



# Qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines de la RATP

DIAGNOSTIC DU DISPOSITIF DE SURVEILLANCE ET D'INFORMATION



# Qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines de la RATP Diagnostic du dispositif de surveillance et d'information

Juin 2022

---

## Pour nous contacter

AIRPARIF - Surveillance de la Qualité de l'Air en Île-de-France

7 rue Crillon 75004 PARIS - Téléphone 01.44.59.47.64 - Site [www.airparif.fr](http://www.airparif.fr)

---



# Sommaire

SOMMAIRE.....	3
1. INTRODUCTION.....	5
1.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	5
1.2 MODALITES DE REALISATION.....	6
2. ETAT DES CONNAISSANCES.....	6
2.1. SITUATION INTERNATIONALE.....	6
2.1.1. Contexte.....	6
2.1.2. Concentrations de particules dans les enceintes ferroviaires du monde entier.....	7
2.1.3. Diffusion des informations sur la qualité de l'air.....	9
2.2. POLLUANTS RENCONTRES DANS LES ENCEINTES FERROVIAIRES SOUTERRAINES EN FRANCE.....	9
2.3. FACTEURS D'INFLUENCE DANS LES ENCEINTES FERROVIAIRES SOUTERRAINES.....	9
2.4. IMPACT SUR LA SANTE.....	10
3. REGLEMENTATIONS.....	11
3.1. AVIS DU CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIC DE FRANCE.....	11
3.2. AVIS ET RAPPORT D'EXPERTISE COLLECTIVE DE L'ANSES.....	12
3.3. GUIDE DE RECOMMANDATIONS POUR LA SURVEILLANCE.....	13
3.2.1. Polluants à mesurer.....	14
3.2.2. Sélection des quais à instrumenter.....	14
3.2.3. Critères de choix et sélection.....	14
3.4. NORMES DE QUALITE DE L' AIR DANS LES ENCEINTES FERROVIAIRES SOUTERRAINES DANS LE MONDE.....	15
4. PRESENTATION DU DISPOSITIF DE SURVEILLANCE ET D'INFORMATION DE LA QUALITE DE L' AIR DE LA RATP.....	16
4.1. MESURES PERMANENTES.....	16
4.2. CHOIX DES SITES INSTRUMENTES.....	16
4.3. CAMPAGNES DE MESURE.....	17
4.4. EVALUATION DE L'IMPACT DES DISPOSITIFS DE REMEDIATION.....	18
5. SYSTEME D'INFORMATION DE LA RATP.....	19
5.1. DIFFUSION SUR LE SITE INTERNET ET OPEN DATA DE LA RATP.....	19
5.2. PRISE EN COMPTE DES PARTIES PRENANTES.....	20

6. PRECONISATIONS D'AMELIORATION DU DISPOSITIF DE SURVEILLANCE ET D'INFORMATION .....	21
6.1. POURSUIVRE ET COMPLETER LA SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L' AIR DANS LES EFS.....	21
6.1.1. Cartographie des niveaux dans les gares .....	21
6.1.2. Surveillance régulière .....	21
6.1.3. Analyse des paramètres d'influence .....	22
6.1.4. Veille sur les polluants de l'air .....	22
6.1.5. Recommandations sur le matériel de mesure .....	23
6.2. RENFORCER L'INFORMATION SUR LA SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L' AIR .....	23
6.2.1. Améliorer la lisibilité et la transparence de l'information sur la qualité de l'air.....	24
6.2.2. Fournir des informations sur la variabilité des niveaux dans les EFS de la RATP .....	24
6.2.3. Fournir des informations sur l'évolution des niveaux .....	25
REFERENCES.....	26
ANNEXE 1 .....	27
ANNEXE 2 .....	28

# 1. INTRODUCTION

## 1.1 Contexte et objectifs

Airparif a proposé de donner un avis sur le dispositif de surveillance et d'information sur la qualité de l'air, opéré par la RATP dans ses enceintes ferroviaires souterraines (EFS) et, le cas échéant, de faire des préconisations d'amélioration. Ce diagnostic fait suite à plusieurs sollicitations de ses membres en lien avec la communication de l'association Respire sur les niveaux de particules dans les enceintes ferroviaires souterraines de la RATP et le rapport associé. Airparif a également proposé de réaliser deux campagnes de mesures, sur le quai d'une gare de RER et d'une station de métro. La RATP, Île-de-France Mobilités et l'association Respire sont membres d'Airparif, l'association agréée de surveillance de la qualité de l'air en Île-de-France, qui compte au 31 mai 2022 155 membres.

Île-de-France Mobilités a apporté son soutien financier à cette initiative.

Le réseau de transport ferré de la RATP compte 379 stations et gares dont près de 300 ayant une configuration souterraine. Le réseau de métro et RER de la RATP comprend 14 lignes de métro desservant 303 stations et 2 lignes de RER partagées avec la SNCF, avec 7 gares souterraines pour le RER A et 6 gares souterraines pour le RER B.

L'ANSES, dans ses avis et rapports d'expertise collective de juin 2015 et mai 2022<sup>1</sup> confirme que les concentrations massiques de particules en suspension dans l'air (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) des enceintes ferroviaires souterraines (EFS) sont nettement supérieures à celles mesurées dans l'air extérieur, même en proximité du trafic routier, et à celles mesurées dans l'air intérieur des logements. En ce qui concerne les concentrations en nombre de particules dans les EFS, quelques études montrent qu'en dehors de périodes de travaux de maintenance, elles sont du même ordre de grandeur en moyenne que celles des expositions de fond urbain et sont moins variables. Ces concentrations sont inférieures d'un facteur 1,5 à 4 aux concentrations relevées en proximité du trafic routier et tendent à augmenter avec la profondeur de la station.

Le présent rapport concerne l'évaluation du dispositif de surveillance et d'information sur la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires de la RATP. Ces travaux ont reçu l'appui de l'Imperial College de Londres, qui a donné son avis sur les préconisations. L'Imperial College a également réalisé une synthèse des moyens de surveillance de plusieurs autres réseaux de transport ayant des gares / stations souterraines, intégralement reproduite en annexe du rapport.

Lors de ces travaux, des études sur l'adéquation du matériel utilisé par l'association Respire, un LOAC, pour évaluer les niveaux dans les EFS de la RATP ont également menés par le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), laboratoire CNRS et CEA. Les conclusions de ce rapport sont présentées dans ce rapport et le rapport complet y est annexé.

---

<sup>1</sup> Pollution chimique de l'air des enceintes de transports ferroviaires souterrains et risques sanitaires associés chez les travailleurs - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective – Septembre 2015  
Qualité de l'air des enceintes ferroviaires souterraines - Revue de la littérature sur les effets sanitaires - Proposition de concentrations en particules dans l'air à ne pas dépasser - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective – Mai 2022

Les résultats des deux campagnes de mesure menées par Airparif font l'objet d'un autre rapport, mis à disposition sur le site web d'Airparif, seules les principales conclusions de ces mesures sont présentées dans ce rapport.

## 1.2 Modalités de réalisation

Pour mener à bien son analyse du dispositif de surveillance et d'information, Airparif s'est basée sur :

- des auditions de la RATP et du COFRAC. L'association RESPIRE a également été auditionnée ;
- des documents pour la plupart non publics transmis par la RATP ;
- les documents et informations disponibles en ligne sur le site de la RATP ;
- l'avis d'expert de l'Imperial College présentant une analyse de la situation internationale et des recommandations ;
- les avis du CSHSPF et de l'ANSES
- le guide de recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines, édité par l'INERIS novembre 2020 ;
- les résultats de deux campagnes de mesure menées par Airparif, l'une sur un quai d'une station de métro et l'autre sur un quai d'une gare souterraine de RER du réseau de la RATP
- le rapport d'évaluation du LSCE des mesures du LOAC réalisées en enceinte ferroviaire.

## 2. Etat des connaissances

### 2.1. Situation internationale

L'Imperial College de Londres a recensé les connaissances sur la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines (EFS) dans plusieurs villes dans le monde et a examiné le dispositif de surveillance et d'information de ces EFS.

Les concentrations présentées sont issues de publications récentes. Des recherches systématiques sur Internet dans les métros des capitales et des grandes villes (Paris, Londres, Barcelone, Madrid, Berlin, Stockholm, Milan, Athènes, Moscou, New York, Toronto, Séoul, Tokyo, Shanghai, Pékin, Hong Kong, Singapour) ont également été réalisées.

Le rapport complet, en anglais, est disponible en annexe 1. Les principales conclusions, traduites en français, sont présentées ci-dessous.

#### 2.1.1. Contexte

Des transports publics type métro sont présents dans 204 villes, dans 61 pays. Londres a ouvert son métro en 1863, suivi par les grandes villes d'Europe comme Paris en 1900. Dans les pays en fort développement comme la Chine et l'Inde, de nouvelles lignes systèmes sont construites. Les réseaux de métro vont de 4 km à Yokohama à 803 km à Shanghai, avec entre 6 et 457 stations.

Le métro parisien compte 306 stations sur 255 km de voies. Il est semblable de par sa taille et son âge à celui de Madrid.

## 2.1.2. Concentrations de particules dans les enceintes ferroviaires du monde entier

Les résultats des mesures de  $PM_{2.5}$  et  $PM_{10}$  disponibles dans la littérature ont été utilisées pour situer le réseau parisien dans un contexte international. Les concentrations de particules dans les enceintes ferroviaires souterraines sont souvent plusieurs fois supérieures à celles en air ambiant.

Dans les études publiées dans des revues à comité de lecture, la qualité et la fiabilité des données varie en fonction du matériel utilisé et de la calibration du matériel. Par conséquent, seules les mesures effectuées à l'aide d'une méthode de référence ou équivalente ainsi que celles avec une calibration robuste, ont été prises en compte.

Des mesures de  $PM_{2.5}$  sont disponibles dans 18 villes, principalement européennes et nord-américaines, avec quelques exemples de mesures bien calibrées en Asie. De même, des mesures de  $PM_{10}$  sont disponibles pour 10 villes.

Pour Paris, les données du 1er janvier 2022 et du 10 mai 2022 ont été téléchargées depuis la plateforme d'information RATP (<http://www.iseo.fr/ratp/RATP.php>) pour les cinq lieux de mesure (Auber RER, Châtelet, Châtelet RER, Franklin D. Roosevelt et Nation) pour fournir une moyenne du réseau à comparer aux autres villes ; les résultats sont présentés dans la figure 1.

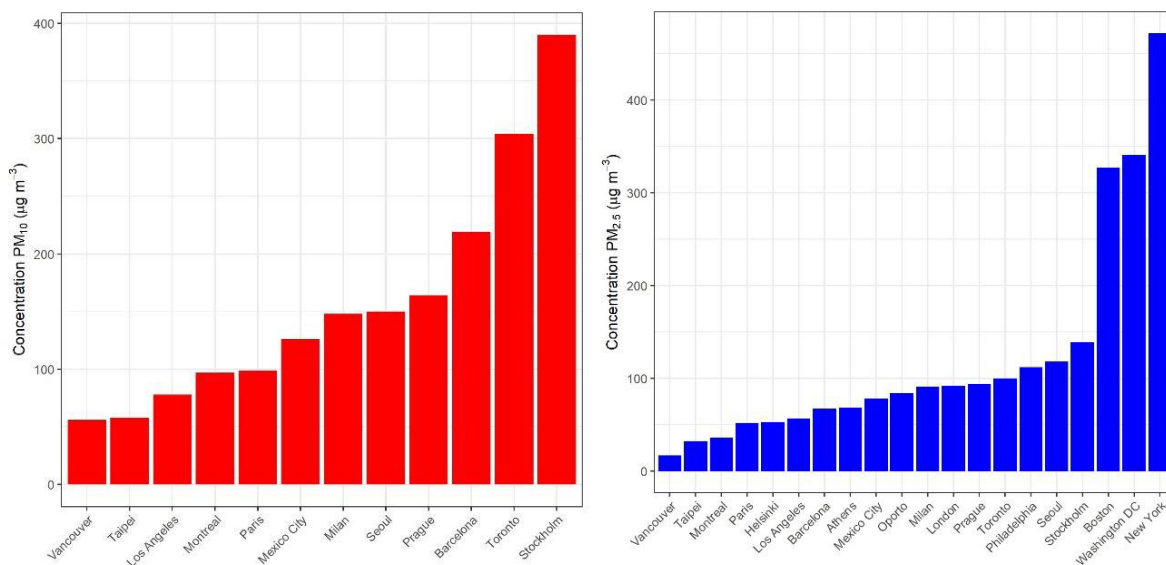


Figure 1 : Concentrations de  $PM_{10}$  et  $PM_{2.5}$  dans les réseaux de métro mondiaux

Outre les différences de matériel utilisé, il convient de tenir compte de la variabilité de l'approche méthodologique, tant sur les emplacements de mesure que des durées de mesure, dans l'interprétation de ses résultats.

Certaines études ont cartographié des réseaux complets de métro avec des mesures court-terme sur chaque quai de gare à l'aide de compteurs de particules optiques calibrés, dans certains cas, en isolant les résultats lorsque le train est en gare ; ces mesures sont réalisées pendant les périodes d'exploitation lorsque les concentrations sont plus élevées.

D'autres études ont mesuré la concentration sur les quais du métro pendant des jours ou des semaines ; ces mesures plus longues sont plus représentatives de la variabilité quotidienne et à plus



long terme mais les niveaux moyens sont plus faibles que dans les études court-terme car ils incluent des mesures avec des concentrations plus faibles, sur des périodes sans circulation de trains. En revanche, la surveillance en continu sur le long terme de la qualité de l'air dans ces environnements est très rare.

Barcelone est l'un des réseaux de métro les plus étudiés d'Europe grâce au projet Improve Life (<http://improve-life.eu/>). Ce projet établit des bonnes pratiques pour évaluer les concentrations dans les systèmes de métro ainsi que des recommandations pour la conception des stations et de la ventilation ainsi que des pistes pour améliorer la qualité de l'air.

Londres a les concentrations de PM<sub>2.5</sub> les plus élevées mesurées dans les métros européens. Cependant, les concentrations restent mal caractérisées géographiquement et temporellement. Les seules mesures généralisées datent de 2019 ; elles ont été réalisées par des universitaires avec des appareils de mesure portatifs pour évaluer les niveaux de particules PM<sub>2.5</sub> sur l'ensemble du réseau. Certains rapports de mesures sont publics mais datent de 2016 ; toutes les autres informations nécessitent une demande d'accès.

New York possède le plus grand réseau de métro en termes de stations (457) et a récemment rapporté les plus fortes concentrations publiées (1 780 µg m<sup>3</sup> en moyenne horaire à Christopher Street Station) mais ne diffuse pas systématiquement les mesures effectuées dans le métro.

Séoul dispose d'un système de suivi de qualité de l'air par des capteurs mesurant les poussières ultrafines dans chaque station. Les résultats sont disponibles en temps réel, que ce soit en concentrations sur 1 heure et en moyenne journalière. Ces informations sont rendues publiques dans le cadre de la réglementation de lutte contre la pollution de l'air intérieur du gouvernement métropolitain de Séoul en lien avec sa politique de contrôle de la qualité de l'air intérieur dans les établissements recevant du public : « air pur pour tous ». Cette réglementation établit des normes pour cinq substances et exige une diffusion publique des données sur la qualité de l'air. Cela a abouti à des techniques de nettoyage plus avancées dans les gares et les tunnels et à des systèmes de purification de l'air dans les trains et les gares.

L'Imperial College précise que Paris dispose du système de mesure de référence le plus complet au monde, composé de cinq stations opérationnelles dont certaines depuis 1997 mesurant PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>x</sub> et CO<sub>2</sub> et disponibles en temps réel sur leur site Internet.

En complément, la revue de Zhang et al.<sup>2</sup> (2019) confirme des niveaux moyens de concentration en PM<sub>10</sub> dans les EFS sur le continent européen plus élevés que sur le continent asiatique, ce qui pourrait être lié aux systèmes de métros souterrains plus anciens, à l'usure mécanique, à l'érosion et l'empoussièrement des tunnels et aux faibles espacements entre les stations en Europe. En Asie, les systèmes de métros et de contrôle de la qualité de l'air dans ces enceintes sont relativement récents.

---

<sup>2</sup> Zhang, Weiji, Han Zhao, Ang Zhao, Jiaqiao Lin, et Rui Zhou. 2019. "Current Status, Challenges and Resilient Response to Air Pollution in Urban Subway." *Atmosphere* 10 (8). doi: 10.3390/atmos10080472.

### 2.1.3. Diffusion des informations sur la qualité de l'air

Si la diffusion d'informations sur la qualité de l'air ambiant via Internet et les applications de téléphonie mobile est omniprésente dans les grandes villes du monde, seuls Paris et Séoul disposent via internet d'informations en temps réel sur la qualité de l'air dans leurs métros. D'après l'Imperial College, ces deux villes présentent des concentrations horaires ou journalières, qui ne permettent pas de comprendre clairement la variabilité spatiale des concentrations sur le réseau. De plus, l'information n'est pas facilement accessible.

Aucune ville étudiée n'affiche la qualité de l'air du métro sur les systèmes d'information publics.

## 2.2. Polluants rencontrés dans les enceintes ferroviaires souterraines en France

Comme précisé dans l'avis de l'ANSES de juin 2022<sup>3</sup>, la composition chimique des particules dans les EFS est différente de celle de l'air extérieur urbain. Par rapport aux particules de l'air urbain, les particules de l'air des enceintes ferroviaires souterraines (EFS) sont plus riches en fer et autres éléments métalliques, en carbone (élémentaire et organique). Ces particules sont plus grosses, plus denses et de forme plus variable (en écaille, ellipsoïdales, semi-sphériques ou sphériques). En EFS, les aérosols sont constitués d'éléments métalliques en concentration élevée, dont essentiellement le fer, de carbone organique et de carbone élémentaire.

Dans son avis de 2015<sup>4</sup>, l'ANSES précise que le fer est présent sous forme de fer métal et surtout d'oxydes de fer (hématite, magnétite). Parmi les autres polluants mesurés, les données françaises disponibles montrent la présence possible de silice cristalline et de fibres sans mise en évidence de fibres d'amiante. Les concentrations en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) particulaires, en hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM), en composés carbonylés et en oxydes d'azote sont parfois supérieures dans les EFS à celles de l'air extérieur en situation de fond mais restent inférieures aux concentrations relevées en proximité du trafic routier.

## 2.3. Facteurs d'influence dans les enceintes ferroviaires souterraines

La principale source des particules riches en fer est l'usure des matériaux par la friction roue-frein, suivie du contact roue-rail et du contact entre le matériel roulant et le système d'alimentation électrique. Les sources de la fraction carbonée des particules semblent être le freinage, l'usure des pneus, la remise en suspension des particules émises par les motrices Diesel lors des opérations de maintenance, ainsi que l'apport d'air extérieur. La source de silice est notamment le sable utilisé

---

<sup>3</sup> Qualité de l'air des enceintes ferroviaires souterraines - Revue de la littérature sur les effets sanitaires - Proposition de concentrations en particules dans l'air à ne pas dépasser - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective – Mai 2022

<sup>4</sup> Pollution chimique de l'air des enceintes de transports ferroviaires souterrains et risques sanitaires associés chez les travailleurs - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective – Septembre 2015

pour augmenter la friction et l'adhérence en freinage d'urgence ou en pente, ainsi que la silice présente dans le ballast<sup>4</sup>.

Le guide de l'INERIS<sup>5</sup> explicite les paramètres d'importance pouvant influencer la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines :

- Conditions de circulation, cadence en heures de pointe et creuses, intervalles de passages des rames, amplitude d'ouverture commerciale,
- Matériel roulant (type métro/RER, modèle, véhicule simple ou double étage, équipements, poids du matériel avec voyageurs, Énergie motrice utilisée (rails ou caténares), type de roulement (pneumatique ou fer), système de freinage et de guidage (électrodynamique, freinage mécanique) matériaux de freinage.
- Fréquentation des voyageurs sur les quais ou la station
- Perturbations (arrêt intempestif, travaux ...).
- Caractéristiques du quai : configuration (profondeur, volume, existence d'une courbure des voies avant ou après le quai pour les deux stations qui lui sont adjacentes, présence de portes palières),
- Ventilation générale de la station, du quai et des tunnels adjacents (ventilation naturelle ou mécanique, débit),
- Présence de correspondances sur les mêmes quais ou sur des quais différents, nombre de voies à quai.

## 2.4. Impact sur la santé

Si les effets de la pollution atmosphérique en air extérieur sur la santé sont largement documentés, il y a moins d'éléments sur l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines.

L'ANSES précise dans son avis et rapport d'expertise collective<sup>6</sup> que les études toxicologiques confirment le potentiel oxydant des particules d'EFS qui peut être plus élevé que celui des particules urbaines, mais pas systématiquement. Certaines nouvelles études impliquent d'autres métaux que le fer, comme le cuivre, comme contributeurs à ces effets. La toxicité des particules des EFS reste peu documentée et les études existantes portent uniquement sur des effets à court terme.

Plus de détails sur les éléments toxicologiques sont présents dans une étude récente, le projet exploratoire TOXinTRANSPORT<sup>7</sup>, caractérisations toxicologiques in vitro, chimiques et physiques de particules prélevées dans l'air d'habitacles de transport en roulage, projet de recherche financé par l'ADEME. Son objectif était d'évaluer comment mieux appréhender les effets « cocktail » des particules, auxquelles sont susceptibles d'être exposés voyageurs et travailleurs empruntant des environnements de transport ferrés souterrains. Les prélèvements ont été réalisés sur le quai d'une gare souterraine et en mobilité dans des rames de matériel roulant ferroviaire. Le projet visait à fournir des données inédites sur la réponse à des tests de toxicité des particules (PM) prélevées et leurs compositions physico-chimiques.

---

<sup>5</sup> Recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines – Guide INERIS – Novembre 2020

<sup>6</sup> Qualité de l'air des enceintes ferroviaires souterraines - Revue de la littérature sur les effets sanitaires - Proposition de concentrations en particules dans l'air à ne pas dépasser - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective – Mai 2022

<sup>7</sup> TOXinTRANSPORT, caractérisations toxicologiques in vitro, chimiques et physiques de particules prélevées dans l'air d'habitacles de transport en roulage – ADEME – Mars 2022

Des effets toxicologiques ont pu être reliés à la présence de certains paramètres physico-chimiques et à leur niveau de concentration. Le potentiel inflammatoire des particules rencontrées en enceintes ferroviaires souterraines (EFS) et dans des rames en roulage semble lié à des concentrations élevées en métaux (notamment en fer) ainsi qu'à un potentiel oxydant (PO) élevé pour les mesures sur quai et en rame. Il est à noter que les mesures de PO par  $\mu\text{g}$  de  $\text{PM}_{10}$  sont 4 à 10 fois plus élevées que des moyennes en air ambiant en fond urbain. Dans les deux types d'environnements (quai et rame), les échantillons ont été capables d'induire la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) intracellulaires. En revanche, le potentiel inflammatoire s'est révélé beaucoup plus limité, y compris en rame où les teneurs en endotoxines étaient beaucoup plus élevées que sur le quai.

Concernant les effets sur la santé, les travaux de l'ANSES précisent que les études épidémiologiques suggèrent un effet de la pollution de l'air des EFS sur le stress oxydant systémique et d'effets sur la fonction cardiaque autonome. Ces études restent assez peu informatives pour évaluer les risques liés à l'exposition des usagers ou des travailleurs à la pollution de l'air ambiant des EFS.

## 3. Réglementations

Aucun texte réglementaire ne régit à ce jour en France la surveillance de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines, ni les niveaux à respecter dans ces environnements.

Cependant, dès 2000, le Conseil supérieur d'hygiène public de France (CSHPPF) a rendu plusieurs avis à ce sujet.

En juin 2022, la publication d'un nouveau rapport d'expertise de l'ANSES qui recommande des valeurs à ne pas dépasser dans les EFS pour les usagers en fonction des durées d'exposition.

Des recommandations de surveillance ont été publiées dans un guide édité par l'INERIS en novembre 2020 (guide de recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines).

### 3.1. Avis du Conseil Supérieur d'Hygiène Public de France

Le Conseil Supérieur d'Hygiène Public de France (CSHPPF) a émis plusieurs avis relatifs à la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines.

Dans son avis en date du 5 avril 2001, le Conseil formule des recommandations visant à améliorer la connaissance de l'exposition aux polluants atmosphériques des usagers des enceintes ferroviaires souterraines (dans les stations, les quais et les rames) et notamment préconise la mise en place d'un dispositif de surveillance permettant d'apprécier les concentrations horaires de  $\text{PM}_{10}$  auxquelles sont exposés les usagers, tant au cours de leurs trajets que de leurs passages dans les couloirs et sur les quais, tout particulièrement dans les gares souterraines.

Il recommande également :

- de dresser une typologie des lignes et des stations en fonction des sources potentielles de particules et des facteurs susceptibles d'influencer les concentrations particulières pour élaborer la stratégie de surveillance ;
- suggère d'effectuer une cartographie des polluants au sein du réseau (teneurs des particules PM<sub>10</sub> en fer, nickel, chrome, manganèse, plomb, cadmium, en silice cristalline, en fibres, en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), en hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) et en dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) ;
- de rédiger un rapport annuel d'analyse des résultats, présenté au Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, puis rendu public.

Le CSHPF a également rendu le 3 mai 2021 un avis relatif à l'élaboration de valeurs guides de qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines. Il avait pour but d'assurer la protection de la santé de l'ensemble des usagers et visait les concentrations massiques de PM<sub>10</sub>. Les valeurs de référence horaires avaient été déterminées en considérant que l'exposition cumulée des usagers (pondération des teneurs atmosphériques particulières subies dans les différents environnements fréquentés, par le temps passé dans ces environnements au cours d'une journée) ne devait pas dépasser la valeur limite journalière pour les PM<sub>10</sub> fixée en air ambiant. Ces valeurs avaient été établies selon quatre scénarii correspondant à quatre durées quotidiennes types de séjour dans les enceintes ferroviaires souterraines (durées variant de 1 h 30 à 2 h 15).

Le ministère en charge de la santé a publié en 2003 la circulaire DGS/SD7B n° 2003-314 du 30 juin 2003 relative à la qualité de l'air dans les EFS. Dans cette circulaire, le directeur général de la santé indiquait souhaiter que les exploitants de transports collectifs souterrains appliquent les recommandations du CSHPF en définissant un plan de surveillance de qualité de l'air et en identifiant les sources de polluants afin de définir une stratégie de réduction des émissions.

## 3.2. Avis et rapport d'expertise collective de l'ANSES

Dans le prolongement des travaux du CSHPF et de sa précédente expertise de 2015, l'ANSES a publié en juin 2022<sup>8</sup> une revue de la littérature sur les effets sanitaires et proposé des concentrations de particules à ne pas dépasser dans l'air des EFS.

Le rapport d'expertise collective conclut que le corpus d'études épidémiologiques et toxicologiques ne permet pas d'identifier un point de départ toxicologique ou épidémiologique en lien avec des effets néfastes sur la santé, afin de dériver une Valeur Guide d'Air Intérieur (VGAI). De nouveaux indicateurs de gestion ont donc été développés en se basant sur la méthode de calcul proposée par le CSHPF et en considérant les évolutions de valeurs de références en air extérieur (valeurs limites, recommandations OMS).

Des indicateurs sont donc définis pour les PM<sub>10</sub> et pour les PM<sub>2,5</sub> sur la base de durée de fréquentation à partir des valeurs limites de la directive 2008/50/CE et des recommandations de l'OMS.

---

<sup>8</sup> Qualité de l'air des enceintes ferroviaires souterraines - Revue de la littérature sur les effets sanitaires - Proposition de concentrations en particules dans l'air à ne pas dépasser - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective - Mai 2022

Tableau 2 : Concentrations dans l'air en EFS recommandées *a minima*

Polluant	Durée cumulée de fréquentation de l'EFS sur une journée	Concentration calculée à partir de la valeur limite journalière de la directive européenne 2008/50/CE * (C <sub>sout_Lim</sub> ) (µg.m <sup>-3</sup> )	Concentration calculée à partir de la valeur guide journalière de l'OMS * (C <sub>sout_OMS</sub> ) (µg.m <sup>-3</sup> )
PM <sub>10</sub>	2h/j	260	80
	1h30/j	330	100
	1h/j	480	140
	30min/j	940	250
PM <sub>2,5</sub>	2h/j	s.o.	50
	1h30/j	s.o.	60
	1h/j	s.o.	80
	30min/j	s.o.	140

\*Valeurs calculées en assimilant les particules d'EFS aux particules de l'air ambiant

s.o. : sans objet

Le comité d'experts spécialisés recommande aussi d'améliorer les connaissances sur :

- l'exposition à la pollution de l'air des EFS par des mesures individuelles sur l'ensemble du trajet réalisé en EFS ou issue de modélisations à partir de mesures réalisées dans les différents espaces des EFS fréquentés par les usagers (quais, couloirs, rames, ...),
- les effets de la pollution de l'air des EFS sur la santé et notamment sur la morbidité cardio-respiratoire, compte-tenu des informations apportées par le corpus d'études toxicologiques et épidémiologiques. En ce sens, les résultats attendus de certains programmes de recherche en cours<sup>9</sup> pourraient prochainement apporter des éléments de réponse.

### 3.3. Guide de recommandations pour la surveillance

L'INERIS a édité en novembre 2020 un guide de recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines à la demande de la direction générale de la prévention des risques (DGPR) du ministère de la transition écologique et solidaire. Les exploitants de réseaux ferroviaires souterrains ont contribué au groupe de travail d'élaboration de ce guide tout comme des représentants de la DGPR, de la direction générale de la santé, de la direction générale des infrastructures, des transports et de la mer et de la direction générale de travail.

Ce guide donne des recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines (EFS). Les mesures concernent l'atmosphère des quais situés en souterrain et les habitacles des rames y circulant. Seuls les éléments de ce guide

<sup>9</sup> Hemmendinger et al. 2021, Guseva Canu, Crézé, et al. 2021, Guseva Canu, Hemmendinger, et al. 2021

relatifs aux mesures sur les quais situés en souterrains sont précisés dans les paragraphes suivants, le présent rapport d'expertise ne prenant pas en compte les mesures dans les rames.

### **3.2.1. Polluants à mesurer**

Le guide INERIS précise les polluants à mesurer de manière prioritaire : particules PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> ainsi que les métaux suivants : fer (Fe), baryum (Ba), cuivre (Cu), zinc (Zn), antimoine (Sb), manganèse (Mn), nickel (Ni), plomb (Pb), arsenic (As), cadmium (Cd) et chrome (Cr). La mesure du CO<sub>2</sub> est également préconisée comme indicateur de confinement, ainsi que celle de la température et de l'humidité relative pour identifier des situations atypiques en termes de confort des voyageurs.

Le guide définit également une liste de polluants complémentaires : Silice / Amiante, carbone particulaire (EC et OC), Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les BTEX (Benzène Toluène, Ethylbenzène et Xylène) ainsi que les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>).

Il est à noter que le guide ne décrit la stratégie de mesure que pour les polluants prioritaires.

### **3.2.2. Sélection des quais à instrumenter**

Le guide INERIS précise que le choix des quais sur lesquels réaliser des mesures régulières s'effectue sur la base d'études préalables des niveaux de concentrations particulières rencontrés au niveau des quais pour un fonctionnement habituel du réseau. Ces études préalables sont menées soit sur toutes les stations/gares, soit sur un échantillon représentatif du réseau lorsqu'il contient plus de 50 gares/stations. La représentativité de l'échantillon en termes de concentrations en PM<sub>10</sub> est à démontrer par des études statistiques préalables basées sur des résultats de campagnes de mesures.

Sur cet échantillon représentatif du réseau, des mesures avec des instruments portables (méthodes optiques) sont à mener pour effectuer une première hiérarchisation des niveaux de particules PM<sub>10</sub>. Les teneurs en dioxyde d'azote CO<sub>2</sub> et humidité relative sont également à mesurer. Les mesures sont réalisées en période de pointe du matin et de l'après-midi sur une durée de 15 min sur 3 J (consécutifs ou non) intégrant matin et soir.

### **3.2.3. Critères de choix et sélection**

À partir des bases constituées par une des deux méthodes précédentes, les quais sont classés distinctement en fonction de deux critères :

- valeurs moyennes des concentrations en PM<sub>10</sub> ;
- fréquentation annuelle.

Au minimum trois quais feront l'objet de mesures. Les deux quais présentant les concentrations les plus importantes en PM<sub>10</sub> seront tout d'abord sélectionnés sur des stations différentes, si le réseau le permet ils seront choisis sur des lignes différentes. Puis on sélectionnera le quai le plus fréquenté, il sera différent des deux précédents. Des exemples sont proposés dans le guide pour expliciter ces recommandations.

Le guide explicite que : « Pour les cartographies systématiques qui sont à privilégier pour les petits réseaux, cette classification sera mise à jour annuellement les trois premières années. Si ce classement est inchangé, il pourra être actualisé que tous les trois ans, ou avant s'il existe des modifications qui pourraient avoir un impact significatif sur les niveaux de concentration. » mais ne précise rien sur la périodicité de mesure pour les grands réseaux.

Pour les Quais identifiés, le guide précise que la campagne de mesure est réalisée sur 14 jours consécutifs, au moins une fois par an. Les modalités de choix de la période de mesure l'emplacement des prélèvements sont également explicitées ainsi que méthodes de mesures et pas de temps des mesures préconisés.

Les mesures régulières décrites à réaliser sur les quais identifiés précédemment. Dans le cas de quais déjà suivis dans le cadre d'une surveillance continue ou régulière, il sera apprécié la nécessité de compléter le dispositif en place au regard de l'adéquation de la stratégie de mesure avec les préconisations du guide.

### 3.4. Normes de qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines dans le monde

Les travaux de l'Imperial College dans le cadre de cette étude rappellent qu'il n'existe pas de norme internationale générale sur les particules en suspension dans l'air souterrain. Les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé s'appliquent à la fois à l'air extérieur et à l'air intérieur.

Néanmoins, certains pays ont mis en place des réglementations régissant les concentrations de particules ( $PM_{10}$  ou  $PM_{2.5}$  selon le cas) dans les enceintes ferroviaires souterraines :

- En Suède, l'administration du comté de Stockholm impose, pour les nouveaux quais de métro, que la moyenne horaire des  $PM_{10}$  ne dépasse pas  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$  plus de 175 heures par an.
- La loi sur la qualité de l'air intérieur du ministère coréen de l'environnement (Korea MOE) précise que la moyenne journalière de  $PM_{10}$  ne doit pas dépasser  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur les quais souterrains.
- À Taïwan, la loi sur la gestion de la qualité de l'air intérieur stipule que les moyennes journalières de  $PM_{10}$  et  $PM_{2.5}$  ne doivent pas dépasser respectivement  $75$  et  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Les références sont précisées dans le rapport en anglais présenté en annexe.



## 4. Présentation du dispositif de surveillance et d'information de la qualité de l'air de la RATP

La RATP réalise une surveillance de la qualité de l'air dans ses enceintes ferroviaires souterraines et notamment sur le quai des gares ou stations depuis 1997. La surveillance permanente est assurée par des stations de mesure fixe. Ces mesures sont réalisées par le laboratoire d'essais et de mesures (LEM) accrédité COFRAC pour ces mesures (Certificat d'accréditation N° 1-1523 rév. 18). L'accréditation pour les mesures de qualité de l'air date du début des années 2000. Pour les particules, elle est accréditée selon une méthode interne. La RATP réalise également des campagnes de mesure en utilisant les mêmes méthodologies accréditées ou avec du matériel plus léger, portatif.

### 4.1. Mesures permanentes

Le réseau de mesure en continu de la RATP appelé SQUALES se base sur 3 sites historiques (RER A Auber, Ligne 1 Franklin Roosevelt et Ligne 4 Chatelet). La surveillance permanente est complétée par 2 sites de mesure (RER A Châtelet-les-Halles et RER A Nation) depuis plus de 10 ans.

Particules  $PM_{10}$ , température et humidité relative sont mesurées sur les 5 sites. Des mesures d'oxydes d'azote ( $NO_x$ ) et de dioxyde de carbone ( $CO_2$ , indicateur de confinement) sont de plus assurées sur les 3 sites historiques (RER A Auber, Ligne 1 Franklin Roosevelt et Ligne 4 Chatelet). Enfin des mesures de particules  $PM_{2,5}$  sont effectuées à Nation et Auber. Elles permettent de suivre l'évolution du ratio  $PM_{10}/PM_{2,5}$ . Les mesures de particules sont réalisées avec un appareil de mesure automatique TEOM.

### 4.2. Choix des sites instrumentés

Pour le choix des stations à instrumenter de manière permanente, des campagnes de mesure avec les mêmes appareils que ceux utilisés pour les mesures permanentes (appareil automatique de mesure des particules  $PM_{10}$  - TEOM) ont été menées. Les mesures ont été réalisées sur 20 stations ou gares en souterrain (avec chaque fois un point de mesure aussi à l'extérieur). Les stations retenues dans cet échantillon sont soit fréquentées ou très fréquentées et souterraines très ou moyennement profondément. L'INERIS a mené une étude pour le compte de la RATP en 2004 pour évaluer la représentativité des sites retenus à partir de ces campagnes sur 20 stations. Cette étude, dont Airparif a pu consulter le rapport de conclusion (mais pas les rapports intermédiaires de traitements statistiques), avait montré que le réseau de surveillance SQUALES équipé de deux stations (ligne 1 et ligne 4 depuis 1997/98) devait être complété par une station de surveillance de la qualité de l'air sur le RER (station installée gare Auber sur le RER A). Plus récemment des stations ont été ajoutées à Châtelet-les-Halles et Nation toujours sur le RER A.

Le choix des stations/gares du réseau permanent s'est porté sur les plus fréquentées. Ce choix est antérieur à la sortie du guide de l'INERIS publié en novembre 2020 et ne respecte pas forcément

toutes ses préconisations. Le guide de l'INERIS demande de réaliser des mesures dans la station la plus fréquentée. La gare la plus fréquentée est gare du Nord, qui est à la fois SNCF et RATP. La RATP a souhaité ne pas rompre l'historique des 3 stations initiales du réseau, qu'elle a ensuite complété avec l'ouverture des sites RER A Châtelet-les-Halles et de RER A Nation. Le RER A utilisant du matériel roulant lourd, entraînant un effort de freinage plus élevé et l'émission de plus de particules, il a été considéré nécessaire de mettre plus de points de mesure sur cette ligne, d'autant qu'il n'y a pas deux stations identiques sur la ligne. Il est à noter que des mesures gare du Nord, conformément aux préconisations de l'INERIS, sont prévues par la RATP au second semestre 2022.

### 4.3. Campagnes de mesure

La RATP réalise également des campagnes de mesure continues ou discontinues (3 mois à 3 ans en fonction des objectifs) avec, en fonction des objectifs de la campagne, des matériels de référence ou du matériel plus léger avec des DustTrak, par exemple.

Des mesures de particules, qualitatives, réalisées à partir d'un DustTrak, néphélomètre portatif, ont été réalisées pour estimer la variabilité des niveaux dans les gares et identifier celles qui sont les plus empoussiérées (50 stations). Le mode opératoire a consisté à réaliser 1 prélèvement de 30 minutes par station de métro souterraine ou quai selon la configuration de la station. Ces mesures, ne constituent pas des mesures de référence et sont entachées d'une forte incertitude de mesure. Elles permettent à la RATP de réaliser une comparaison des niveaux des stations pour déterminer celles présentant des niveaux en particules élevés en tenant compte de la température et de l'humidité.

La RATP a également mené en 2002-2003 des mesures de composition chimique de particules des enceintes ferroviaires souterraines sur 20 gares. Ces campagnes ont montré que la majorité de la composition des particules étaient des métaux (70%, avec une part importante de fer, lié aux matériaux de friction) ; la fraction carbonée est l'ordre de 30%, la partie soluble représentant une faible part. La RATP précise que les résultats de mesures de composition chimique montrent une signature des lignes et du matériel roulant et qu'il y a aussi dans les particules un apport des voyageurs, de l'air extérieur et de la remise en suspension. Il est toutefois difficile d'évaluer la part de chaque source, même après des grands lavages des enceintes. Le remplacement des sabots de bois par des matériaux composites a depuis diminué la fraction carbonée des particules ». Depuis, ces analyses restent ponctuelles et sont faites lorsqu'il y a une évolution du matériel roulant notamment.

Il est à noter que les deux campagnes d'Airparif menées à l'automne 2021 sur un quai de RER et un de métro montrent des teneurs en métaux plus faibles, de l'ordre de 50 % dans les PM<sub>10</sub> avec 88 % de fer<sup>10</sup>.

Des mesures exploratoires de particules ultrafines ont été également été menées par la RATP en mars 2020 et avril 2021 avec un appareil de mesure de type SMPS<sup>11</sup> pour tester le matériel. Les résultats montrent, en période hivernale, des montées de PUF le soir (vers 20h) en impactant les classes de 80 à 100 nm qui pourraient être liées au chauffage. La RATP précise que les sabots de

---

<sup>10</sup> Mesures dans les enceintes souterraines de la RATP - Campagnes de mesures sur le quai du RER A à Châtelet-Les Halles et du métro ligne 8 à École militaire – Airparif - Juin 2022

<sup>11</sup> Granulomètre par mobilité électrique permettant un comptage des particules suivant des classes granulométriques

bois, historiques, sont remplacés par des matériaux composites, pouvant être source de PUF dans les systèmes de freinage.

Le LEM réalise également des mesures d'exposition individuelles des travailleurs. Ce point ne faisait pas l'objet du présent diagnostic et n'est pas développé dans ce rapport.

## 4.4. Evaluation de l'impact des dispositifs de remédiation

Des campagnes de mesure (sous accréditation COFRAC) sont menées pour évaluer l'impact de la mise en place d'actions visant à limiter les niveaux de pollution dans les enceintes ferroviaires souterraines :

- Remplacement ou ajout de ventilateurs
- Changement de matériel roulant
- Tests systèmes de traitement, ...

Lors d'un renforcement ou d'une création de poste de ventilation, des mesures sont réalisées avant et après travaux. La RATP précise avoir constaté une baisse des concentrations des particules de 20 % à 60% suivant les gares/stations suite aux travaux de ventilation. Les rapports de ces études avant/après travaux sont des rapports internes.

La RATP précise également ne pas avoir constaté d'influence significative des portes palières mi-hauteur sur la qualité de l'air enregistrée sur le quai. Ainsi la RATP considère que l'installation de portes palières mi-hauteur sur les lignes de métro comptant des stations du réseau SQUALES n'a pas d'impact notable sur la qualité de l'air. L'implantation de portes palières toute hauteur, comme prévu sur le prolongement Sud de la ligne 14 pourrait être plus efficace.

Des moyens de dépollution sont régulièrement testés (partenaires internes ou externe) comme par exemple, un système de freinage avec récupération d'énergie électrique jusqu'à 3 km/h) ou l'expérimentation de filtres par ionisation positive IP'AIR menée dans le cadre d'une expérimentation lancée par la Région Ile-de-France (voir rapport d'évaluation Airlab/Airparif<sup>12</sup>). Des tests de qualifications de semelles de freins moins émissives sont également en cours.

---

<sup>12</sup> Expérimentations « Innovons pour l'Air de nos stations – Synthèse et Avis d'Airlab - Février 2022 (Version modifiée le 31/03/2022)

## 5. Système d'information de la RATP

### 5.1. Diffusion sur le site Internet et open data de la RATP

Les informations mises à disposition du grand public par la RATP sont les résultats des stations du réseau SQUALES suivantes :

Ligne 1 – station Franklin Roosevelt

Ligne 4 – station Chatelet

RER A – gare d'AUBER (indisponible au moment du diagnostic (travaux en gare))

Ces données sont accessibles en temps réel depuis 2018 (seulement Open-Data avant) ainsi qu'en open data. Les résultats de tous les polluants mesurés y sont disponibles : température, humidité relative, concentrations de CO<sub>2</sub>, concentrations de NO<sub>x</sub> et de particules PM<sub>10</sub> / PM<sub>2.5</sub>.

Les résultats des stations de mesure de Chatelet-les Halles et Nation sont également disponibles depuis le 01/01/2022.

Un exemple est présenté ci-dessous (copie d'écran du site Internet de la RATP).



Exemple pour Ligne 4 à Chatelet NO<sub>2</sub> et PM<sub>10</sub> – copie d'écran faite le 06/04/2022

Un bilan annuel des résultats de ces mesures est également disponible pour la dernière année de mesures complète.

Ces informations sont accessibles via trois pages du site de la RATP :

- Etre attentif à la qualité de l'air dans nos espaces

<https://www.ratp.fr/groupe-ratp/pour-la-planete-et-la-ville/etre-attentif-a-la-qualite-de-lair-dans-nos-espaces>

Cette page permet d'accéder au bilan 2020 ainsi qu'aux mesures en temps réel des 3 stations du réseau SQUALES.

- Surveillance de la qualité de l'air en gares & stations souterraines

<http://www.iseo.fr/ratp/RATP.php>

- La page open data de la RATP : [open.data.ratp.fr](http://open.data.ratp.fr)

D'après la RATP, les données en open data sont peu utilisées (essentiellement stagiaires ou étudiants).

## 5.2. Prise en compte des parties prenantes

Lors des échanges la RATP a mentionné ses travaux sur la prise en compte des parties prenantes qui ont été menés dans le cadre de la politique Responsabilité Sociétale de l'Entreprise (démarche RSE)<sup>13</sup> avec une analyse des matérialités réalisée en 2017 et mise à jour en 2021 (salariés, IDFM, FNAUT, fournisseurs, ...). La qualité de l'air est un enjeu fort des voyageurs et des salariés.

La RATP participe au comité de normalisation avec le souhait de rester à niveau et d'utiliser les bonnes pratiques. La RATP milite pour l'homologation du test du matériel roulant sur banc concernant les émissions de particules.

La RATP participe également au réseau COMET (comité des métros - réseau international des transports en communs) et a régulièrement également des échanges avec les homologues français, la SNCF ou d'autres transporteurs en région. La RATP a souligné lors de son audition qu'elle a été l'un des premiers réseaux au monde à disposer d'un réseau de mesures en continu de qualité de l'air pour avoir des informations et la seule à faire une étude épidémiologique avec une cohorte de grande ampleur. Avant 1996/97, la RATP mesurait des fumées noires et la qualité de l'air ne semblait pas un sujet d'air intérieur. L'évolution des moyens de mesures avec le suivi des particules PM<sub>10</sub> a permis de quantifier les niveaux en PM<sub>10</sub> dans les EFS.

Au sein du COMET, la RATP a pu constater une augmentation de l'intérêt pour la qualité de l'air dans les EFS au fur et à mesure des années. Séoul, en pointe sur la prise en compte de la qualité de l'air axe plus ses travaux sur le traitement et le test de solutions pour ce faire.

Les efforts de la RATP se sont également plus concentrés récemment sur les actions d'améliorations, avec une priorité sur la réduction des émissions à la source, que sur l'évolution de la surveillance de la qualité de l'air.

---

<sup>13</sup> La responsabilité sociétale des entreprises (RSE) également appelée responsabilité sociale des entreprises est définie par la commission européenne comme l'intégration volontaire par les entreprises de préoccupations sociales et environnementales à leurs activités commerciales et leurs relations avec les parties prenantes. En d'autres termes, la RSE c'est « la contribution des entreprises aux enjeux du développement durable ». Une entreprise qui pratique la RSE va donc chercher à avoir un impact positif sur la société tout en étant économiquement viable (source : Ministère de l'économie et des finances et de la relance)

## 6. Préconisations d'amélioration du dispositif de surveillance et d'information

Les préconisations suivantes d'Airparif ont été discutées en amont avec l'Imperial College de Londres qui les partage.

### 6.1. Poursuivre et compléter la surveillance de la qualité de l'air dans les EFS

#### 6.1.1. Cartographie des niveaux dans les gares

La RATP a mené des campagnes de mesures avec un dispositif portable sur les gares / stations souterraines du réseau.

Il est suggéré de hiérarchiser les stations par groupes de stations par exemple par classes de concentrations ou par typologie de stations / gares. Il est nécessaire que les concentrations de chaque groupe de station puisse être situées par rapport aux stations du réseau de mesure permanent. Cela permettrait de renforcer l'information du grand public, en mettant en évidence la variabilité des niveaux selon les typologies de station. Il convient de prévoir de refaire périodiquement cette hiérarchisation afin de valoriser les évolutions intervenues (par exemple, moins de stations dans les groupes présentant les niveaux les plus forts ou bien globalement une baisse des niveaux sur l'ensemble des groupes, ...).

Il est préconisé ensuite des campagnes de mesure annuelles conformes au protocole gare sur au moins une station par groupe identifié qui ne serait pas représenté par les stations permanentes. Ces mesures serviraient de niveau de référence pour chaque groupe de stations.

Il est à noter une singularité sur le réseau avec la station gare du Nord qui est exploitée à la fois par la SNCF et par la RATP. Il est préconisé d'articuler les réflexions des deux opérateurs pour qu'une surveillance soit assurée dans cette gare très fréquentée.

Il est rappelé que le diagnostic d'Airparif s'est attaché aux mesures sur les quais. Cependant, il est également préconisé de suivre les recommandations du guide de l'INERIS pour les mesures dans les rames. Les dernières recommandations de l'ANSES vont aussi dans ce sens.

#### 6.1.2. Surveillance régulière

Le réseau de surveillance actuel de la qualité de l'air intérieur de la RATP est constitué de 5 stations ce qui est une force. Cette surveillance permanente va au-delà des préconisations de surveillance du protocole de l'INERIS de surveillance des gares souterraines (14 J de mesures par an).

Il est préconisé de maintenir cette surveillance permanente. Le cas échéant, suite à la hiérarchisation des niveaux de particules dans toutes les gares, cette surveillance pourrait être

amenée à évoluer dans les années à venir pour représenter au mieux les niveaux sur le réseau. Il est préconisé d'évaluer les niveaux mesurés au regard des valeurs recommandées par l'ANSES dans son avis et rapport d'évaluation collective publié en juin 2022, selon une méthodologie qui reste à préciser via une concertation entre l'ANSES et les parties intéressées.

En complément des paramètres actuellement mesurés, il est préconisé de renforcer le suivi des métaux avec une campagne annuelle de mesure des métaux spécifiés comme prioritaires dans le guide de l'INERIS ainsi que de la silice. Il est préconisé de considérer dans les interprétations, et notamment sur la contribution des métaux à la masse des particules mesurées dans les EFS, que les métaux sont présents sous forme d'oxydes métalliques<sup>14</sup>.

### **6.1.3. Analyse des paramètres d'influence**

Si les principaux facteurs d'influence sont connus, leur importance est moins documentée. Ainsi la poursuite des analyses des données disponibles ou des mesures faites lors de campagnes avant / après changements (ventilation, matériel roulant, ...) est nécessaire pour éclairer les choix de solutions d'amélioration et prioriser les travaux.

Par ailleurs, les mesures sont préconisées en milieu de quai dans le protocole gare, des informations sur la variabilité des niveaux sur les quais notamment de RER serait à investiguer dans un second temps.

### **6.1.4. Veille sur les polluants de l'air**

Il est préconisé de veiller à vérifier les niveaux dans les EFS des polluants actuellement non réglementés dans l'air ambiant mais dont l'impact sanitaire est avéré.

Par exemple, des mesures de comptage de particules ultrafines ont été réalisées dans les EFS, notamment lors des deux campagnes de mesures d'Airparif menées à l'automne 2021 sur un quai de métro (station école militaire sur la ligne 8 de métro) et un de RER (Châtelet-les-Halles sur le quai du RER A en direction de l'Est)<sup>15</sup>. Les résultats de ces deux campagnes ne semblent pas montrer de spécificités des niveaux de PUF ni de leur répartition granulométrique dans les EFS par rapport aux caractéristiques de ces particules dans l'air ambiant. Néanmoins ce sont des résultats sur deux quais de métro et RER, ne pouvant être considérés comme représentatifs des niveaux dans tout le réseau.

Afin de conforter les premiers enseignements, il serait utile de faire quelques campagnes complémentaires dans des environnements contrastés pour compléter ces premiers résultats qui montrent que les PUF ont essentiellement des sources extérieures.

De même, les niveaux d'autres polluants pourraient être à investiguer à l'avenir en fonction de l'avancée des connaissances sur la pollution atmosphérique et ses impacts sanitaires.

---

<sup>14</sup> Aérosol sources in Subway environnements, Minguillon et al, 2018

<sup>15</sup> Mesures dans les enceintes souterraines de la RATP - Campagnes de mesures sur le quai du RER A à Châtelet-Les Halles et du métro ligne 8 à École militaire – Airparif - Juin 2022

### 6.1.5. Recommandations sur le matériel de mesure

Les méthodes de mesure des PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> doivent être choisies avec soin. En raison de la différence importante des caractéristiques physiques et chimiques entre les particules dans l'air ambiant et celles dans les enceintes ferroviaires souterraines, les techniques qui utilisent des approches de mesure de masse non directes, telles que les compteurs de particules optiques, doivent être calibrées en fonction de l'environnement spécifique.

Le LOAC, appareil utilisé par l'association RESPIRE, a été évalué par le Laboratoire des Sciences, du Climat et de l'Environnement, laboratoire conjoint du CNRS, du CEA et de l'Université de Versailles-Saint Quentin. Cette étude montre que :

- La variabilité temporelle des résultats en masse des mesures du LOAC sont cohérentes avec celle du TEOM, utilisé en référence, comme c'est le cas pour de nombreux compteurs optiques
- Les concentrations de PM<sub>10</sub> affichées par le LOAC présentent une nette sous-estimation comme c'est le cas pour les autres compteurs optiques calibrés en air extérieur. Une correction est possible si des mesures de la composition chimique sont réalisées sur le quai considéré, en parallèle ou sur une période représentative
- Concernant les résultats en nombre de particules, le LOAC, contrairement à d'autres compteurs optiques, mesure une variabilité temporelle sur la gamme 200 – 400 nm (particules les plus petites mesurées par la LOAC non cohérente avec celle du SMPS, l'appareil de référence utilisé, à la différence d'autres appareils de comptage optique.

Le rapport est présenté en annexe 2.

## 6.2. Renforcer l'information sur la surveillance de la qualité de l'air

La RATP travaille de longue date sur la surveillance de la qualité de l'air dans ses enceintes ferroviaires souterraines. Le public a cependant une vision peu claire des niveaux rencontrés et de leur variabilité. Ainsi, au-delà de la poursuite de la mise à disposition des résultats des mesures permanentes, il est préconisé :

- d'améliorer la lisibilité et la transparence de l'information sur la surveillance de la qualité de l'air et ses résultats
- de fournir des informations sur la variabilité spatiale des niveaux de particules dans les EFS de la RATP
- de mettre à disposition des synthèses sur l'évolution des niveaux sur le moyen terme et des raisons de ces évolutions.



### **6.2.1. Améliorer la lisibilité et la transparence de l'information sur la qualité de l'air**

Il est préconisé de centraliser les informations existantes dans une même rubrique sur internet pour améliorer la lisibilité des informations sur la qualité de l'air et de mettre davantage en avant la surveillance de la qualité de l'air sur le site Internet.

La mise à disposition des résultats des résultats des 5 stations permanentes (et pas seulement 3) est un plus depuis janvier 2022 et la page de présentation des résultats a été revue et est plus lisible que précédemment. Il est préconisé de préciser le cas échéant les raisons d'une absence de mise à disposition des résultats sur une période longue (cas de la station AUBER fermée en 2021 compte-tenu des travaux de réfection de la station, ayant supprimé l'accès à l'électricité de la station de mesure).

En complément il est nécessaire de mettre à disposition un rapport de résultats des mesures de composition chimique des particules au-delà de l'information « particules composées majoritairement de métaux », puisque la composition des particules dans les EFS est très différente de celle de l'air extérieur.

Plus globalement il convient de mettre à disposition les résultats des mesures réalisées dans le cadre de la mise en œuvre des recommandations du guide de l'INERIS.

Il est également suggéré de décliner l'information sur différents supports de communication et notamment le fait qu'une surveillance de la qualité de l'air dans les EFS est opérée en précisant où l'information est disponible, notamment sur les multiples supports d'informations présents dans les EFS.

Enfin, suite à la parution récente des recommandations de l'ANSES, une analyse des niveaux relevés dans les EFS au regard des recommandations est à mener.

### **6.2.2. Fournir des informations sur la variabilité des niveaux dans les EFS de la RATP**

Il est suggéré de hiérarchiser chaque station dans un groupe de stations par classe de concentrations. Il est nécessaire que les concentrations de chaque groupe de station puisse être situées par rapport aux niveaux des stations du réseau permanent ou des résultats des campagnes de mesure annuelles. Cela permettrait de montrer que toutes les stations / gares n'ont pas les mêmes niveaux de pollution et renforcer la compréhension par le public du choix des stations de mesure permanentes. Il est important de prendre en compte également les stations en air extérieur pour une information complète des voyageurs.

Il convient de prévoir de refaire régulièrement cette hiérarchisation afin de valoriser les évolutions intervenues (par exemple, moins de stations dans les groupes présentant les niveaux les plus forts ou bien globalement une baisse des niveaux sur l'ensemble des groupes, ...).

Il est également préconisé de mettre des éléments de comparaison des niveaux avec d'autres environnements (tunnels routiers, ...) et modes de transports.

### **6.2.3. Fournir des informations sur l'évolution des niveaux**

La mise en œuvre de solutions visant à améliorer la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines est régulière : ajout ou remplacement des systèmes de ventilation, changement de matériel roulant, ... De plus, des tests de solutions de limitation à la source des émissions ou de traitement pour limiter les concentrations dans les EFS sont régulièrement menés.

Aussi, il serait pertinent de mettre à disposition des informations sur l'évolution des niveaux pour montrer que la situation s'améliore et illustrer l'efficacité des solutions mises en œuvre avec des informations sur les gains mesurés suite à la mise en place de systèmes de traitement : ventilation, changement de matériel roulant, ... avec par exemple des fourchettes, les gains étant variables suivant les configurations des gares et stations.

# REFERENCES

Pollution chimique de l'air des enceintes de transports ferroviaires souterrains et risques sanitaires associés chez les travailleurs - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective – Septembre 2015

Qualité de l'air des enceintes ferroviaires souterraines - Revue de la littérature sur les effets sanitaires - Proposition de concentrations en particules dans l'air à ne pas dépasser - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective – Mai 2022

Mesures dans les enceintes souterraines de la RATP - Campagnes de mesures sur le quai du RER A à Châtelet-Les Halles et du métro ligne 8 à École militaire – Airparif - Juin 2022

Zhang, Weiji, Han Zhao, Ang Zhao, Jiaqiao Lin, et Rui Zhou. 2019. "Current Status, Challenges and Resilient Response to Air Pollution in Urban Subway." *Atmosphere* 10 (8). doi: 10.3390/atmos10080472

Recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines – Guide INERIS – Novembre 2020

TOXinTRANSPORT, caractérisations toxicologiques in vitro, chimiques et physiques de particules prélevées dans l'air d'habitacles de transport en roulage – Queron J., De Mendonça Andrade M., Le Bihan O., Lacroix G., Plumail M., Uzu G., Suarez G., Ngo S., Delater A., Fable S., Meunier L., Tebby C., Amara A, Bonnair N., Petit J.-E., Benbekka R, Gros V., Durif M. - Projet de recherche réalisé par INERIS, SNCF MOBILITÉS / AEF, CNRS / IGE, CNRS / LSCE, UVSQ / DAVID, Unisanté PMU et financé par l'ADEME - ADEME – Mars 2022

Hemmendinger et al. 2021, Guseva Canu, Crézé, et al. 2021, Guseva Canu, Hemmendinger, et al. 2021

Expérimentations « Innovons pour l'Air de nos stations – Synthèse et Avis d'AirLab - Février 2022 (Version modifiée le 31/03/2022)

Aérosol sources in Subway environnements, Minguillon et al, 2018

# ANNEXE 1

**Expert Opinion on Measurement and Public  
Information Systems for Paris Metro**

**Dr D Green,**

**Senior Research Fellow in Aerosol Science at Imperial College London**

14<sup>th</sup> April 2022

This report is the independent expert opinion of the author.



# Contents

## 1. Scope

The aim of this report is to summarise concentrations measured and ongoing measurement approaches in subway systems across the world and identify any established approaches to public information and to provide recommendations on measurement and public dissemination.

## 2. Approach

The concentrations measured in subway systems have been summarised from peer review and recent publications which report the activity of academic groups, often working in partnership with local universities and research organisations. Further information has been obtained from systematic internet searches on the subway systems in capital and major cities using the city name (Paris, London, Barcelona, Madrid, Berlin, Stockholm, Milan, Athens, Moscow, New York, Toronto, Seoul, Tokyo, Shanghai, Beijing, Hong Kong, Singapore) and key words (Air, Quality, Pollution and Information); the first 20 search results have been reviewed.

## 3. Background

Subway systems for rapid public transport can be found in 204 cities, in 61 countries. London opened the London Underground system in 1863 followed shortly after by major cities in Europe such as Paris in 1900. New systems continue to be built, especially in rapidly developing countries such as China and India. Metro systems range in size from Yokohama at 4 km to Shanghai at 803 km; with between 6 and 457 stations. The Paris Metro has 306 stations across 255 km of track and is similar in size and is most similar to size and age to the Madrid system.

## 4. Air quality standards

There is still no international general underground airborne particle standard, although the WHO Air quality guideline values [1] which are applicable to both outdoor and indoor air stipulate  $5 \mu\text{g m}^{-3}$  as an annual mean and  $15 \mu\text{g m}^{-3}$  as a 24-hour mean. Nevertheless, some countries have put regulations in place governing  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  concentrations on underground platforms. In Sweden, the Stockholm County Council Administration stipulated that the  $\text{PM}_{10}$  hourly mean should not exceed  $240 \mu\text{g m}^{-3}$  for new metro platforms for more than 175 hours per year [2]. The Korean Ministry of Environment (Korea MOE) established the Indoor Air Quality (IAQ) Act of Korea MOE which stipulates that the  $\text{PM}_{10}$  daily average should not exceed  $150 \mu\text{g/m}^3$  on underground platforms [3]. In Taiwan, the Indoor Air Quality Management Act stipulates that  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  daily means should not exceed 75 and  $35 \mu\text{g m}^{-3}$  respectively [4].

## 5. Concentrations of Air Pollutants in Subway Systems around the World

The concentration of PM in subway systems is often several times higher than that above ground. A review of current literature was undertaken to extract available  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$

---

This report, supplied by Imperial Consultants (ICON), is the independent expert opinion of the author.



concentrations and place the Paris network in an international context. In the available peer-reviewed studies, the quality of data varied as many used optical particle counters to compare different urban transport modes. Therefore, only measurements which were undertaken using a reference or equivalent method, or those which were robustly calibrated against one, have been considered. PM<sub>2.5</sub> measurements were available from 18 cities, these were predominantly from European and North American cities, with few examples of well calibrated measurements from Asia: (Athens[5], Barcelona[6], Boston[7], Helsinki[8], London[9], Los Angeles[10], Mexico City[11], Milan[12], Montreal[13], New York[7], Oporto[5], Philadelphia[7], Prague[14], Stockholm[15], Taipei[16], Toronto[13], Vancouver[13] and Washington DC[7]) Similarly, PM<sub>10</sub> was available from 10 cities (Barcelona[6], Los Angeles[10], Mexico City[11], Milan[12], Montreal[13], Prague[14], Stockholm[15], Taipei[16], Toronto[13] and Vancouver[13]). To provide the most up to date PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> concentrations from the Paris network, data from 1<sup>st</sup> Jan 2022 and 10<sup>th</sup> May 2022 were downloaded from the RATP information platform (<http://www.iseo.fr/ratp/RATP.php>) for all five measurement locations (Auber RER, Châtelet, Châtelet RER, Franklin D. Roosevelt and Nation) to provide a network average to compare to other cities; these results are shown in Figure 1

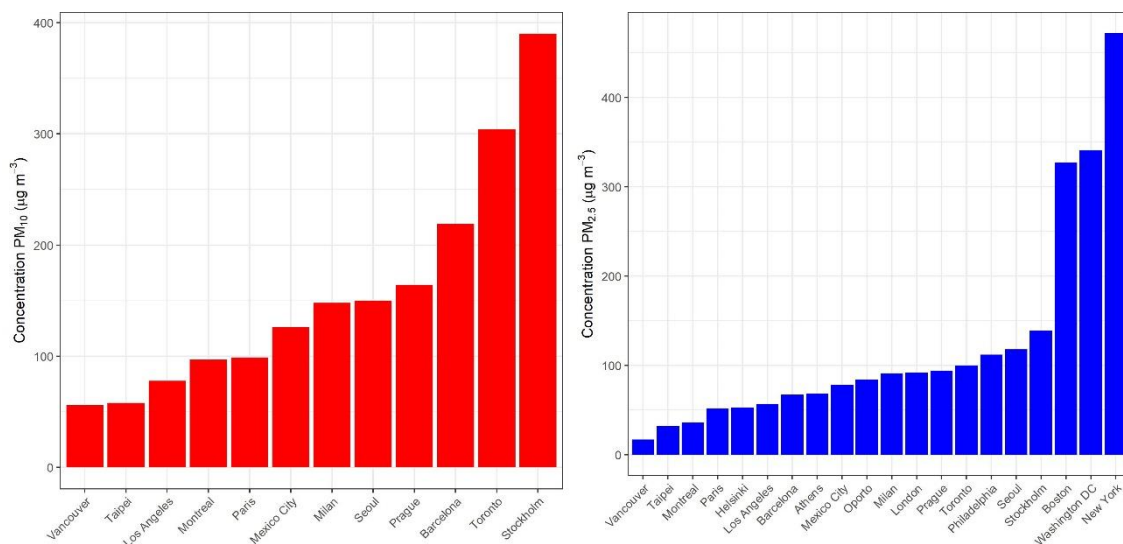


Figure 1: PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations in global subway networks

Consideration should be given to the variability in methodological approach as the location and duration of measurements varied between studies. Some studies have attempted to map entire subway networks using calibrated optical particle counters, taking short term measurements on each station platform [17] or isolating concentrations when the train is in the station [9]; these could be considered a more representative assessment of entire networks and in the case of London include both underground and overground area of the network. These measurements are taken during operational periods when concentrations are higher. Others studies have measured concentration on subway platforms for days or weeks [6, 15]; these longer term studies are more representative of the daily and longer term variability but will be biased low compared to the other studies as they include hours when the trains are not running and concentrations are lower.

Despite this growing literature detailing the concentrations found in subway systems, long term monitoring of air quality in these environments is very rare as measurements tend to be limited to short term campaigns and personal exposure assessments against workplace exposure standards.

Barcelona is one of the most studied subway networks in Europe,[18, 19] having been the subject of the Improve Life Project (<http://improve-life.eu/>). This established best practice for assessing the concentrations in subway systems as well as recommendations for station design, ventilation and ways to improve air quality.

London has the highest PM<sub>2.5</sub> concentrations measured in European subway systems, however, concentrations remain poorly characterised geographically and temporally. The Institutional of Occupational Medicine Study [20] established these high concentrations and these were subsequently measured against workplace exposure standards but no widespread measurements were undertaken until 2019 when universities utilised portable PM<sub>2.5</sub> measurement devices to make the network.[9, 21] To date some reports of measurements are available publicly but date from 2016; all other information is only available through freedom of information requests.

New York has the largest subway network in terms of stations (457) and has recently reported the highest published concentrations (1,780 ug m<sup>-3</sup> PM<sub>2.5</sub> as an hourly mean in Christopher Street Station)[17] but does not routinely disseminate measurements made in the subway.

Seoul has a measurement system consisting of air quality sensors measuring ultra-fine dust displayed at <https://www.inair.or.kr/info/subway.html> , reporting 1 hour and 24 hour concentrations at every station. This is part of broader regulations from the Seoul Metropolitan Government's to tackle indoor air pollution via their 'Indoor Air Quality Control at Public Use Facilities : Clean Air for All' policy which sets standards for five substances and requires public disclosure of air quality data. This has resulted in more advanced cleaning approaches in stations and tunnels and air purification systems in trains and stations.

Paris has the most comprehensive reference measurement system in the world, consisting of five stations operational since 1997 measuring PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> and available in real time at <http://www.iseo.fr/ratp/RATP.php>.

## 6. Public Dissemination

Dissemination of ambient air quality information via internet and mobile phone apps is ubiquitous in major cities around the world. However, only Paris and Seoul were found to have real time information on air quality in their subway systems. Both these cities reported short term concentrations over hours or days which did not allow a clear understanding of how concentrations varied across the networks. However, this information was not easy to find and improved signposted should therefore be a priority for both the travelling public and those concerned about air quality.

Public information systems which report air quality forecasts and real time information during pollution episodes are becoming common in many cities. For instance, Seoul has 682 screens installed at subways stations or bus stops while London air quality forecasts on bus

---

[This report, supplied by Imperial Consultants \(ICON\), is the independent expert opinion of the author.](#)

stop information signs and digital advertising screens. No cities were found that reported subway air quality on public information systems.

## 7. Recommendations for Measurement

PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> are the pollutants of main concern in subway systems due to the sources of wear and resuspension. Other pollutants such as NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> are also useful to help understand how external pollution mixes into the subway system and effectiveness of the ventilation systems; they should therefore also be monitored where possible.

PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> measurement methods should be considered carefully. Due to the substantial difference in physical and chemical characteristics between ambient and subway PM, any techniques that use non-direct mass measurement approaches, such as optical particle counters, need to be calibrated to the specific environment. Reference measurement techniques provide the best way to assess PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> concentrations in environments with diverse physical and chemical characteristics influenced by different sources.

The spatial variability, caused by differences in rolling stock and ventilation, has been demonstrated to be much larger than any temporal variability in cities such as London and New York, which have similar subway systems to Paris. It is important to understand these so that the influence of sources can be quantified, and the appropriate policy interventions identified. This requires in-depth study of representative locations in different areas of the system, which may be characterised by different rolling stock or ventilation rates, to understand the influence of different sources and should include the measurement of tracers for sources such as brake, rail and tyre wear, and mineral dust. This should be followed by long term (or repeated) measurements to assess the impact of any abatement approaches, operational changes, or updates to rolling stock.

The locations of monitoring should reflect the highest concentrations and the busiest stations, it should also consider the variability in rolling stock and ventilation across the network.

## 8. Recommendations for Public Dissemination

Unlike ambient air quality, the concentration of pollution measured at any location in subway systems remains fairly constant on a day-to-day basis. As discussed, the spatial variability is much larger than any temporal variability, therefore public dissemination approaches, which represent this spatial variability, such as maps low pollution routes, that allow passengers to adjust their short and long term travelling patterns to minimise exposure, should be considered ahead of real time dissemination systems from a small number of locations that are not representative of the wider network.

## 9. References

1. Organization, W.H., *Air Quality Guidelines - Update 2021*. 2021, WHO Regional Office for Europe Copenhagen, Denmark.
2. Tu, M., *Measuring and Modelling PM Levels on Underground Platforms*, in *KTH Royal Institute of Technology*. 2021: Stockholm, Sweden.
3. Park, D.U. and K.C. Ha, *Characteristics of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, CO<sub>2</sub> and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea*. *Environ Int*, 2008. **34**(5): p. 629-34.
4. Chen, Y.Y., et al., *Indoor Air Quality in the Metro System in North Taiwan*. *Int J Environ Res Public Health*, 2016. **13**(12).
5. Martins, V., et al., *Factors controlling air quality in different European subway systems*. *Environmental Research*, 2016. **146**: p. 35-46.
6. Querol, X., et al., *Variability of levels and composition of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in the Barcelona metro system*. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012. **12**(11): p. 5055-5076.
7. Luglio, D.G., et al., *PM<sub>2.5</sub> Concentration and Composition in Subway Systems in the Northeastern United States*. *Environmental Health Perspectives*, 2021. **129**(2): p. 027001.
8. Aarnio, P., et al., *The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM<sub>2.5</sub>) in the Helsinki subway system*. *Atmospheric Environment*, 2005. **39**(28): p. 5059-5066.
9. Smith, J.D., et al., *PM<sub>2.5</sub> on the London Underground*. *Environment International*, 2020. **134**: p. 105188.
10. Kam, W., et al., *Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro*. *Atmospheric Environment*, 2011. **45**(8): p. 1506-1516.
11. Mugica-Álvarez, V., et al., *Concentrations and properties of airborne particles in the Mexico City subway system*. *Atmospheric Environment*, 2012. **49**: p. 284-293.
12. Senem, O., et al., *Particle number and mass exposure concentrations by commuter transport modes in Milan, Italy*. *AIMS Environmental Science*, 2016. **3**(2): p. 168-184.
13. Van Ryswyk, K., et al., *Impacts of Subway System Modifications on Air Quality in Subway Platforms and Trains*. *Environmental Science & Technology*, 2021. **55**(16): p. 11133-11143.
14. Cusack, M., et al., *Variability of aerosols and chemical composition of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub> on a platform of the Prague underground metro*. *Atmospheric Environment*, 2015. **118**: p. 176-183.
15. Johansson, C. and P.-Å. Johansson, *Particulate matter in the underground of Stockholm*. *Atmospheric Environment*, 2003. **37**(1): p. 3-9.
16. Cheng, Y.-H., Y.-L. Lin, and C.-C. Liu, *Levels of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in Taipei Rapid Transit System*. *Atmospheric Environment*, 2008. **42**(31): p. 7242-7249.
17. Luglio David, G., et al., *PM<sub>2.5</sub> Concentration and Composition in Subway Systems in the Northeastern United States*. *Environmental Health Perspectives*, 2021. **129**(2): p. 027001.
18. Minguillón, M.C., et al., *Aerosol sources in subway environments*. *Environmental Research*, 2018. **167**: p. 314-328.

19. Moreno, T., et al., *Subway platform air quality: Assessing the influences of tunnel ventilation, train piston effect and station design*. Atmospheric Environment, 2014. **92**: p. 461-468.
20. Seaton, A., et al., *The London Underground: Dust and Hazards to Health*. Occupational and Environmental Medicine, 2005. **62**(6): p. 355-362.
21. Saunders, B.M., et al., *Spatial variability of fine particulate matter pollution (PM2.5) on the London Underground network*. Urban Climate, 2019. **30**: p. 100535.



**Imperial Consultants (ICON)**

**58 Prince's Gate, Exhibition Road, South Kensington, London SW7 2PG**

**Tel: +44 (0)20 7594 6565 Fax: +44 (0)20 7594 6570**

**Email: [consultants@imperial.ac.uk](mailto:consultants@imperial.ac.uk)**

**Web: [www.imperial-consultants.co.uk](http://www.imperial-consultants.co.uk)**

**LinkedIn: [/IC-CONSULTANTS-LTD](https://www.linkedin.com/company/ic-consultants-ltd)**

**Twitter: [@ConsultImperial](https://twitter.com/ConsultImperial)**

# ANNEXE 2

# Evaluation des performances du compteur optique LOAC (*Light Optical Aerosol Counter*) dans une enceinte ferroviaire souterraine

Rédacteur : Jean-Eudes Petit, ingénieur-chercheur CEA au Laboratoire des Sciences  
du Climat et de l'Environnement

Relecteur : Valérie Gros, directrice de recherche CNRS au Laboratoire des Sciences  
du Climat et de l'Environnement







# Sommaire

<b><u>I/ Introduction</u></b>	4
<b><u>II/ Matériel et méthode</u></b>	5
II.1. Campagnes de mesures sur quai	5
II.2. Instrumentations	5
II.3. Le LOAC	6
<b><u>III/ Résultats et discussion</u></b>	7
III.1/ Concentrations massiques	7
III.2/ Granulométrie, concentration en nombre	11
<b><u>IV/ Conclusion</u></b>	14
<b><u>Références</u></b>	16

## I/ Introduction

La pollution atmosphérique regroupe un ensemble complexe de phénomènes physico-chimiques et météorologiques. Cette complexité est en partie liée à la large variété de sources d'émissions, qu'elles soient naturelles ou anthropiques, et également aux diverses de transformation dans l'atmosphère. La pollution de l'air extérieure est associée à des impacts sanitaires (e.g. Anderson et al., 2012), où, en France, on estime qu'elle est responsable, chaque année, d'environ 50 000 décès prématurés. Concernant les particules, l'Organisation Mondiale pour la Santé estime qu'il n'y a pas de seuil en dessous duquel la pollution est inoffensive pour l'homme. Cette toxicité provient notamment de la composition chimique et de leurs sources (Daellenbach et al., 2020), mais aussi leurs tailles, pénétrant plus ou moins profondément dans l'arbre bronchique humain.

En parallèle, la qualité de l'air intérieur est devenue un sujet de préoccupation majeure, étant donné notre exposition soutenue à des sources spécifiques. C'est le cas par exemple des enceintes ferroviaires souterraines (EFS), où de précédentes évaluations, en France et ailleurs dans le monde, font état de fortes concentrations en PM<sub>10</sub> (particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10µm) dépassant les seuils mis en place pour l'air extérieur.

C'est dans ce contexte qu'une récente étude réalisée par l'association Respire (<https://www.respire-asso.org/pollution-ratp/>) dans certaines gares du réseau ferroviaire de la RATP. La qualité de l'air intérieur y avait été caractérisée grâce un compteur optique LOAC, notamment en termes de concentration massique et de nombre de particules.

La présente étude vise à caractériser les performances métrologiques du LOAC dans le cadre strict de l'évaluation de la qualité de l'air intérieur des EFS. Il est important de noter ici que ce rapport n'a pas vocation à invalider ou valider le document et les mesures produits par Respire, ni à invalider ou valider les mesures effectuées par la RATP dans le cadre du réseau SQUALES. Ce document n'apporte pas non plus d'éléments permettant de juger de la fiabilité du LOAC dans d'autres environnements, intérieurs ou extérieurs.

Ces travaux ont été menés avec l'appui d'Airparif et le soutien financier d'Ile-de-France mobilités.

## II/ Matériel et méthode

### II.1. Campagnes de mesures sur quai

Une campagne de mesures, pilotée par Airparif, s'est déroulée en gare de Chatelet – les Halles du 29 septembre 2021 au 26 octobre 2021. Entièrement souterraine et profonde, cette gare est la plus importante du réseau RATP, au travers l'interconnexion avec 3 lignes de RER et 5 lignes de métro. La campagne de mesures s'est déroulée sur le quai du RER A (direction Boissy Saint-Léger - Marne La Vallée Chessy) dans la configuration ci-dessous (Figure 1).

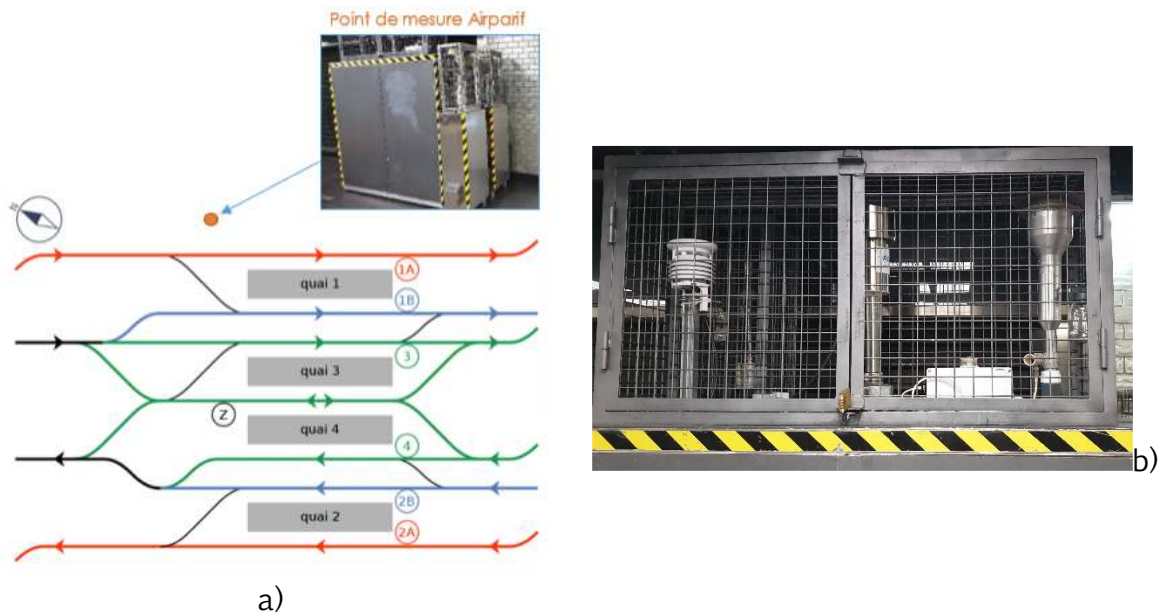


Figure 1 : a) Localisation du point de mesure sur le quai du RER A de la gare Châtelet - les Halles ; b) Têtes de prélèvements dans l'armoire, le LOAC est le boîtier blanc.

### II.2. Instrumentations

L'armoire installée sur le quai était équipée de différentes instrumentations afin de pouvoir répondre aux objectifs de caractérisation des performances du LOAC.

La concentration massique des  $PM_{10}$  était suivi par TEOM (*Tapered Element Oscillating Microbalance*). Le TEOM offre une mesure directe de la masse des particules à travers l'oscillation d'un élément en verre. La mesure étant effectuée à  $50^{\circ}C$ , le TEOM ne prend pas en compte la contribution de composés semi-volatils. Cependant, comme présenté plus loin dans le rapport, cette fraction des particules a été largement minoritaire durant la campagne, notamment comparée à la composition chimique de l'air ambiant. Nous pouvons donc considérer les mesures TEOM comme données de référence pour la concentration massique de  $PM_{10}$ .

La granulométrie des particules submicroniques a été déterminée par SMPS (*Scanning Mobility Particle Sizer*), sur une gamme de taille entre 5nm et 400nm. Cet instrument permet de compter les particules suivant leurs diamètres de mobilité électrique.

La granulométrie des particules submicroniques (1-18 $\mu$ m) était suivie par FIDAS. Cet instrument est un compteur optique, déclaré équivalent à la méthode de référence pour la mesure des PM<sub>2.5</sub> et PM<sub>10</sub> en fond urbain.

Des prélèvements sur filtres (PM<sub>10</sub>) ont été réalisés de manière journalière afin de déterminer la composition chimique des particules au travers toute une batterie d'analyses chimiques (Anions & Cations solubles dans l'eau, Carbone Organique & Élémentaire, Éléments métalliques).

### II.3. Le LOAC

Le LOAC (Renard et al., 2016a) est un compteur optique de particules, fournissant la granulométrie des particules dans une gamme de taille de quelques centaines de nanomètres (200nm) à plusieurs dizaines de micromètres (30 $\mu$ m). Le LOAC se situe donc en dehors de la gamme de taille des particules ultrafines (PUF, <100nm). Grâce à une mesure de diffusion à deux angles de diffusion (12° et 60°), il possède l'avantage de ne pas être sensible à l'indice de réfraction des particules, et donc à leur nature chimique (Figure 2). C'est ainsi qu'il peut fournir, par classe de taille, une typologie des particules suivant un indice de spéciation. Les concentrations spéciées en matière carbonée, sels, minéraux et gouttelettes peuvent être ensuite utilisées afin d'estimer la concentration massique des particules.

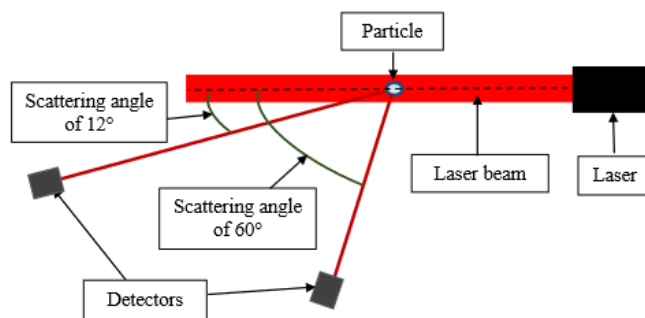


Figure 2 : Principe de fonctionnement du LOAC (issu de Renard et al., 2016a)

Le LOAC est principalement utilisé pour l'étude des aérosols d'altitude à bord de divers ballons dérivants par exemple (e.g. Renard et al., 2016b; Brattich et al., 2019), mais aussi pour le suivi des particules troposphériques (e.g. McMullen et al., 2021).

Le LOAC utilisé lors de la présente étude a été entièrement révisé par MétéoModem (<http://www.meteomodem.com/fr/loac.html>; en charge de la distribution du LOAC)

quelques semaines avant le début de la campagne de mesures. L'incertitude du LOAC est estimée à environ 20% sur la mesure des  $PM_{10}$  (Renard et al., 2016a).

Le LOAC fournit nativement des données avec une résolution temporelle d'une minute. Les données brutes ont été traitées avec le logiciel constructeur afin d'obtenir des fichiers texte interprétables. Ces fichiers contiennent les résultats de granulométrie, de concentrations massiques et de typologie, présentés dans la section suivante. Dans le but d'harmoniser les pas de temps des différentes instruments automatiques, l'ensemble des données a été moyenné sur une résolution temporelle horaire.

### III/ Résultats et discussion

#### III.1/ Concentrations massiques

La Figure 3 illustre la variabilité temporelle des  $PM_{2.5}$  et  $PM_{10}$  mesurées par le FIDAS, le LOAC et le TEOM sur le quai du RER A. Les concentrations de  $PM_{10}$  étaient comprises entre 5 et 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (observées sur le TEOM), suivant un cycle journalier très marqué, directement relié aux heures de pointe et à l'exploitation du réseau en journée.

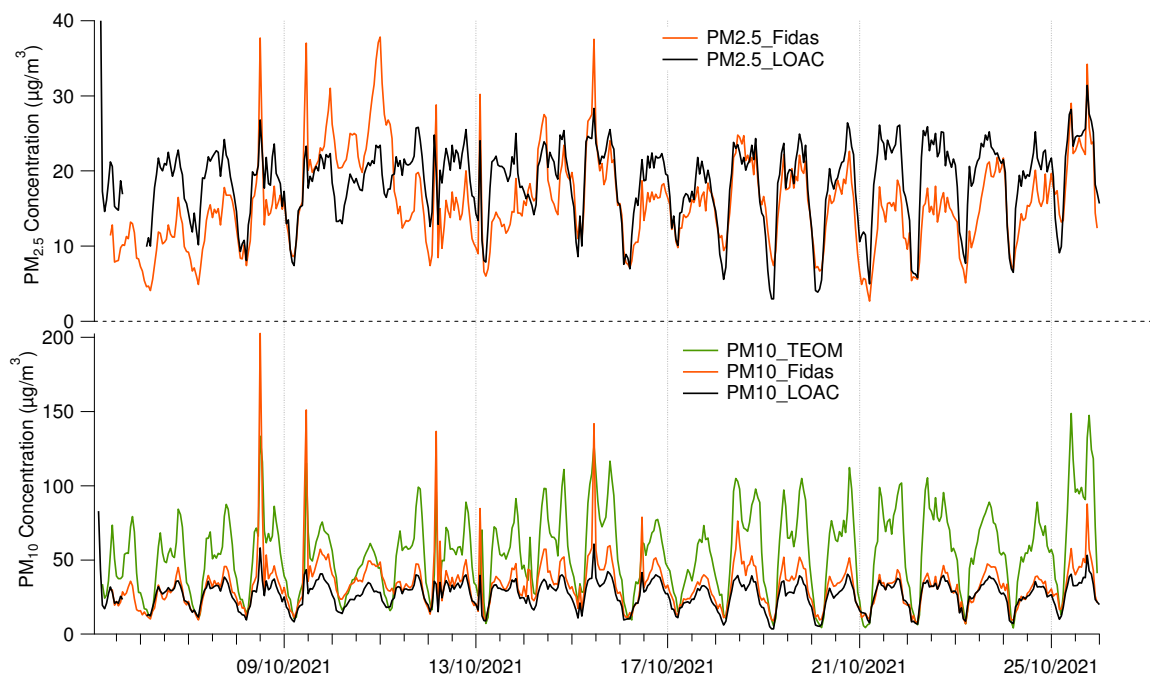


Figure 3 ; Variabilité des concentrations des  $PM_{10}$  et  $PM_{2.5}$  mesurées par le LOAC, le TEOM et le FIDAS.

Tableau 1 : Coefficient de corrélation ( $r^2$ ) entre les différentes mesures

	PM <sub>10</sub> TEOM	PM <sub>10</sub> FIDAS	PM <sub>10</sub> LOAC	PM <sub>2.5</sub> LOAC
PM <sub>10</sub> TEOM				
PM <sub>10</sub> FIDAS	0.41			
PM <sub>10</sub> LOAC	0.73	0.61		
PM <sub>2.5</sub> FIDAS		0.59		0.44
PM <sub>2.5</sub> LOAC			0.86	

Tableau 2 : Pente de la régression linéaire entre les différentes mesures

	PM <sub>10</sub> TEOM	PM <sub>10</sub> FIDAS	PM <sub>10</sub> LOAC	PM <sub>2.5</sub> LOAC
PM <sub>10</sub> TEOM				
PM <sub>10</sub> FIDAS	1.54			
PM <sub>10</sub> LOAC	2.14	1.29		
PM <sub>2.5</sub> FIDAS		2.13		0.85
PM <sub>2.5</sub> LOAC			1.43	

Le LOAC présente une bonne corrélation avec le TEOM en PM<sub>10</sub> (Tableau 1), indiquant un suivi satisfaisant de la variabilité temporelle des concentrations. Le FIDAS a une corrélation plus faible (0.41) avec le TEOM, dû à un fort effet de levier de quelques points ( $r^2=0.62$  en enlevant ces pics identifiés Figure 3). LOAC et FIDAS présentent des co-variations cohérentes en PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub>.

Cependant, une nette sous-estimation des PM<sub>10</sub> est observée pour le FIDAS et le LOAC par rapport au TEOM, d'un facteur 1.5 et 2.1, respectivement.

Ceci peut être relié à une hypothèse inhérente aux compteurs de particules pour convertir un nombre en masse, à savoir l'utilisation de la densité des particules. Alors que cette dernière se situe généralement aux alentours de 1.4 g/cm<sup>3</sup> en atmosphère extérieure pour les PM<sub>1</sub> (Petit, 2014). Elle peut être légèrement plus élevée en PM<sub>2.5</sub> et PM<sub>10</sub> (1-2 g/cm<sup>3</sup>, Wu and Boor, 2021), notamment dû à la présence de matériel minéral (Putaud et al., 2004). La densité peut donc varier considérablement si la spéciation chimique est spécifique à l'environnement étudié. C'est notamment le cas d'une enceinte ferroviaire souterraine, où l'intensité et le profil chimique de la source de particules (abrasion des pneus et des freins, resuspension), combinée à un brassage de l'air moins important, conduit à une matrice spécifique, significativement différente de l'air ambiant extérieur. C'est ce qu'illustre les mesures de spéciation chimique effectuées à partir de prélèvements filtres lors de cette étude. La large contribution du fer (49% en moyenne), supposé sous sa forme d'oxydation +III (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), diffère de la composition chimique de l'air extérieur francilien, généralement dominée par la matière carbonée et les sels inorganiques (Bressi et al., 2013), comme illustré sur la Figure 4 ci-dessous.

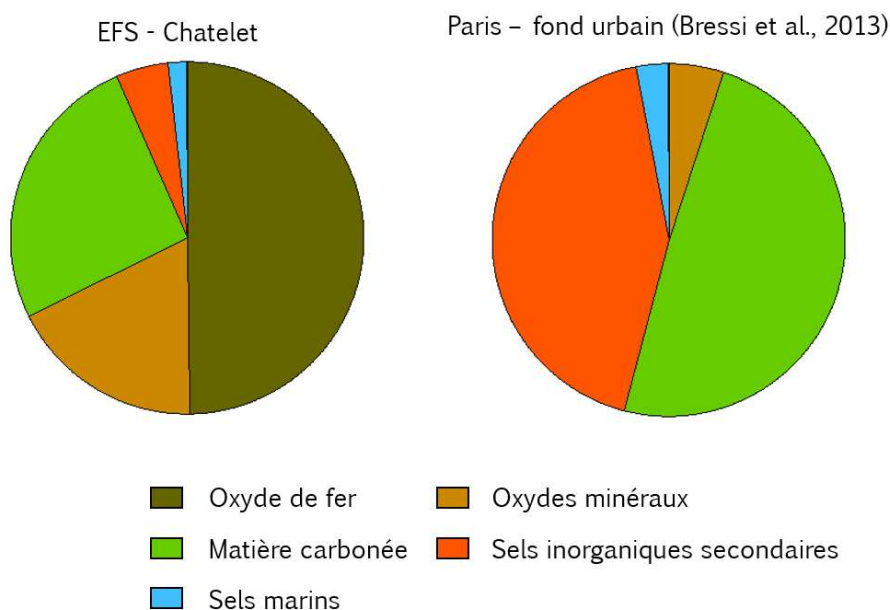


Figure 4: composition chimique moyenne des PM<sub>10</sub> lors de cette étude, comparée au fond urbain parisien. La catégorisation des composés chimiques en EFS est issue de la méthodologie décrite dans Minguillón et al. (2018).

A partir de cette composition chimique, il est possible d'estimer une densité moyenne des particules, en supposant des densités individuelles, suivant :

$$d_{chem} = \frac{\sum_i d_i \cdot C_i}{\sum_i C_i}$$

, où  $d_{chem}$  et  $d_i$  sont respectivement la densité estimée et la densité du composé  $i$ , et  $C_i$  la concentration du composé  $i$ . Le Tableau ci-dessous résumé les valeurs de  $d_i$  utilisée.

Tableau 3 : Densité individuelle utilisée pour estimer la densité moyenne des particules en EFS

Composé	Densité
Fe (sous forme Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.24
Al (sous forme Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.95
Si (sous forme SiO <sub>2</sub> )	2.65
CaCO <sub>3</sub>	2.71
Matière organique	1.2
Carbone Elementaire	0.8
Sels inorganiques	1.75
Sels (NaCl)	2.16



La densité moyenne s'élève à 3.5. Cette valeur est significativement plus élevée que la densité des particules en air extérieur.

La typologie des particules estimée par le LOAC montre une prédominance de particules « minérales » (Figure 5), notamment entre 5 et 10  $\mu\text{m}$ , ce qui est cohérent avec la composition chimique exposée en Figure 4. Le LOAC utilise par défaut une densité de 2.2 pour cette catégorie, adaptée par exemple aux épisodes de sables sahariens. Mais conformément à la composition chimique spécifique des EFS (prédominance des oxydes de fer), cette valeur ne semble pas adaptée, et peut expliquer une grande partie des différences constatées avec le TEOM. On peut noter sur la Figure 5 qu'à partir de 15 $\mu\text{m}$ , plus de la moitié des particules sont « non-définie ».

Il est important de souligner que ce raisonnement s'applique également à l'algorithme du FIDAS, et à l'ensemble des compteurs optiques, où la détermination précise de la concentration de PM est directement liée à la connaissance de la densité des particules. De ce fait, les capteurs optiques peuvent fournir des informations de concentrations massiques cohérentes dans des environnements spécifiques uniquement si la composition chimique des particules est finement caractérisée et prise en compte ; dans sa composition et également dans sa variabilité temporelle.

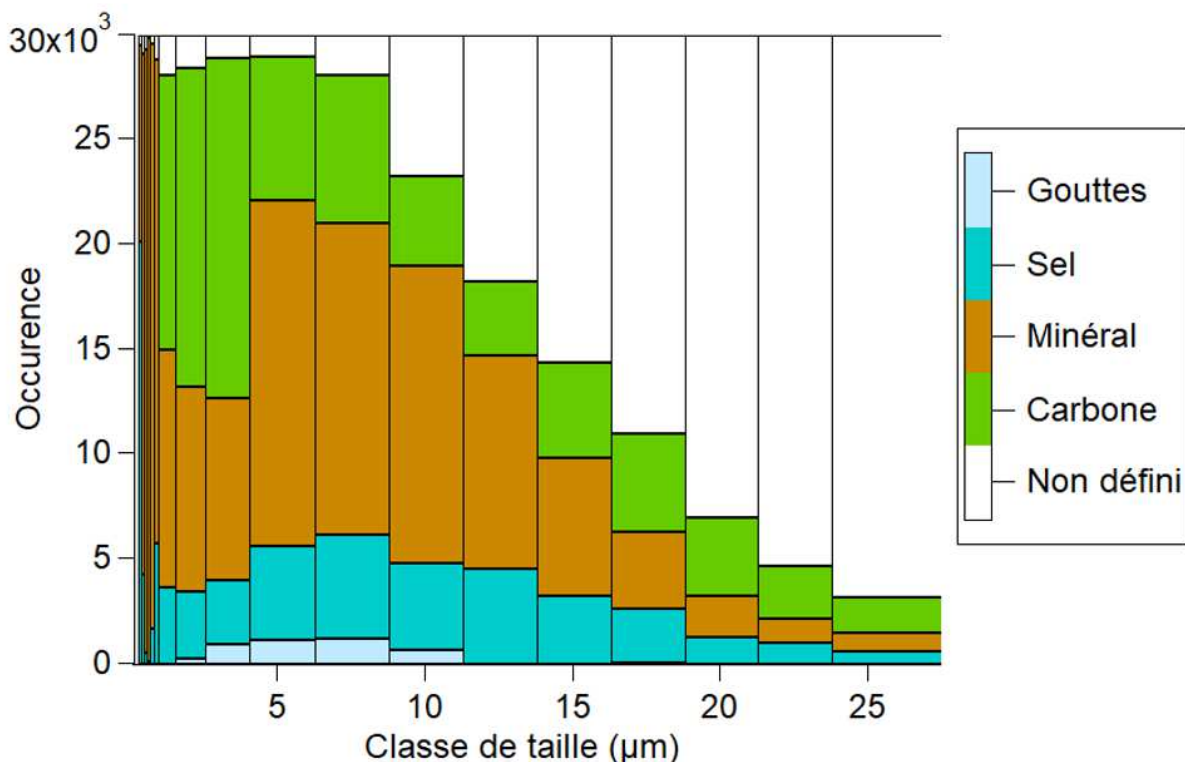


Figure 5 : Typologie des particules estimée par le LOAC, suivant les différentes classes de taille

### III.2/ Granulométrie, concentration en nombre

La granulométrie moyenne est présentée dans la Figure 6, sur l'intervalle de classes de taille complet des trois instruments (SMPS, FIDAS et LOAC). A noter que le premier canal du LOAC est 200-300nm.

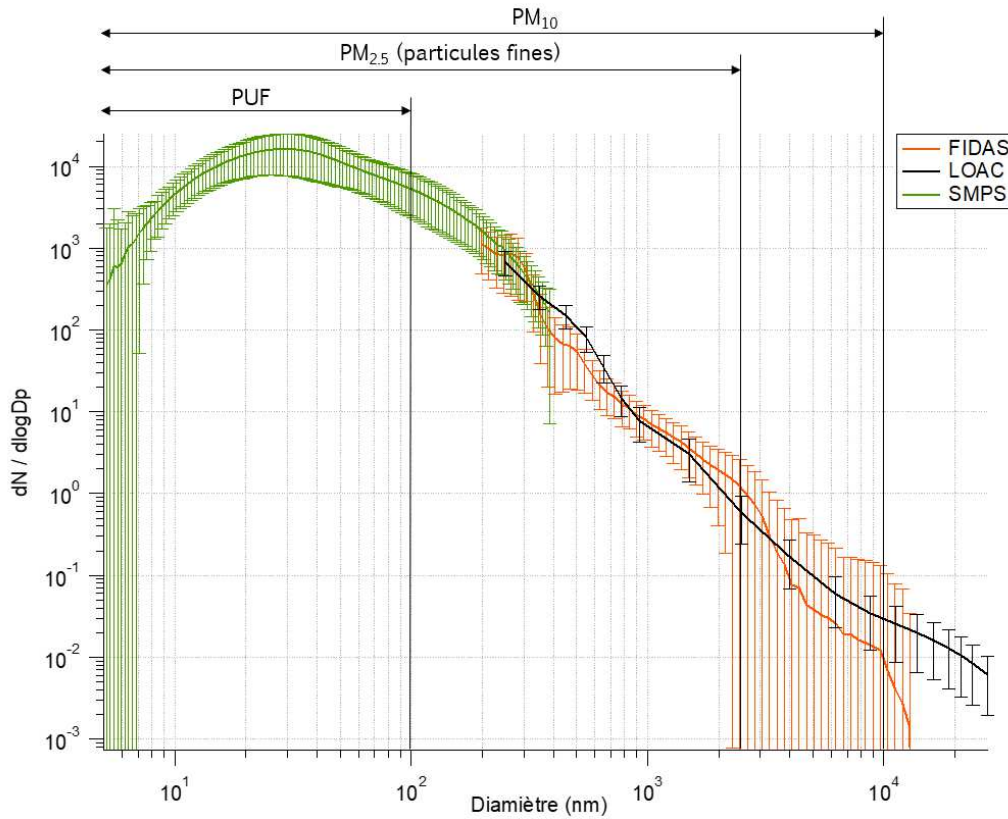


Figure 6 : Granulométrie moyenne ( $\pm$  écart-type) pour le FIDAS, le LOAC et le SMPS. Conformément aux recommandations constructeur, les canaux  $<200\text{nm}$  n'ont pas été pris en compte pour le FIDAS.

Afin de comparer les instruments sur une gamme de taille commune, les données de nombre ont été intégrées entre 200nm et 400nm. Ces résultats de comptage entre SMPS et compteurs optiques sont présentés ci-dessous à titre indicatif, étant donné que le *diamètre de mobilité électrique* mesuré par le SMPS n'est pas nécessairement équivalent au *diamètre optique* mesuré par le FIDAS et le LOAC.

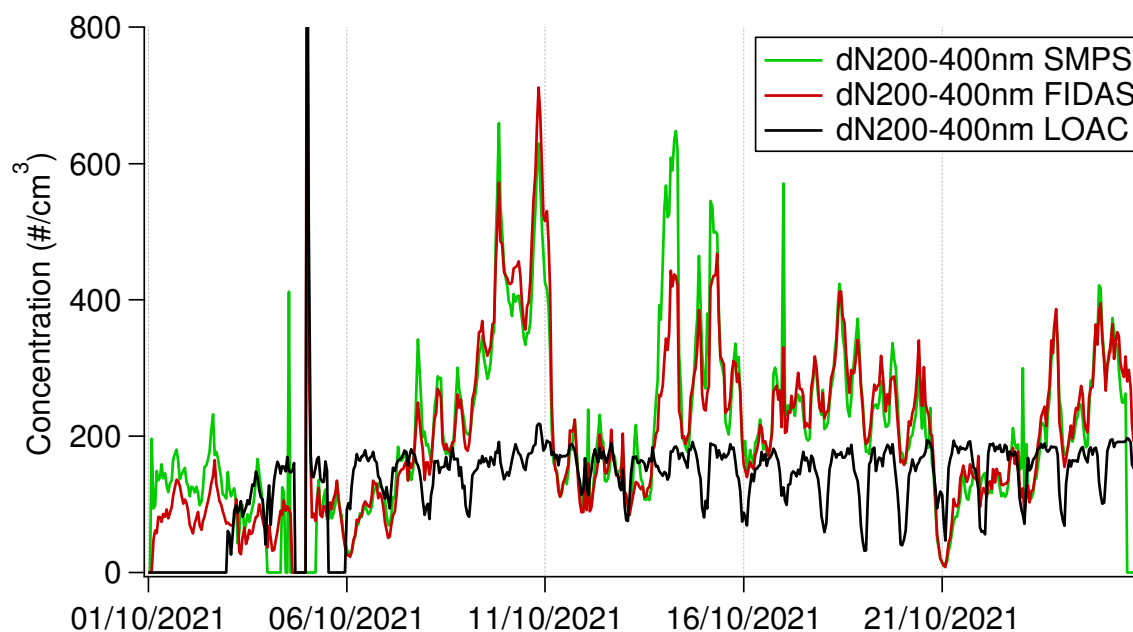


Figure 7 : Variabilité temporelle des particules entre 200nm et 400nm mesurée par le SMPS, le FIDAS et le LOAC.

De manière surprenante, la variabilité temporelle du comptage LOAC n'est pas cohérente ( $r^2 < 0.1$ ) avec les données SMPS et FIDAS pour cette gamme de taille, alors que le FIDAS présente une bonne corrélation avec le SMPS, avec une pente de 0.82 et un  $r^2$  de 0.67 (Figure 7). Une telle décorrélation du LOAC avec le SMPS semble avoir été obtenue sur la gamme 200nm-300nm par Renard et al. (2016a). Ce décrochage de variabilité temporelle par rapport au FIDAS est observé jusqu'à environ 600nm, comme illustré Figure 8.

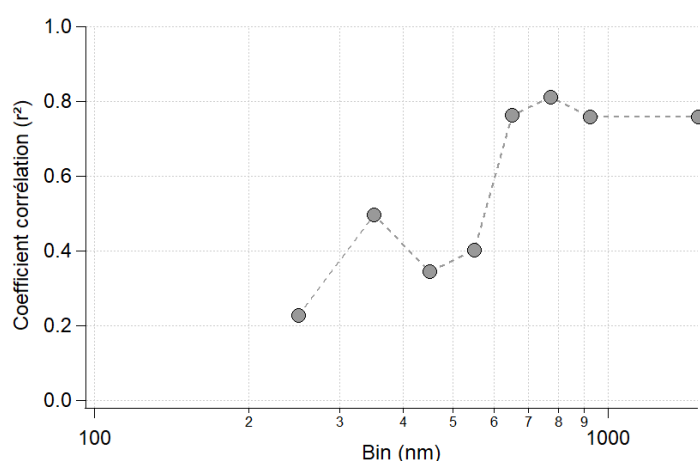


Figure 8 : Coefficient de corrélation entre le comptage (dN) FIDAS et le LOAC sur chaque classe du LOAC

Sur une gamme de taille plus large, entre  $1\mu\text{m}$  et  $10\mu\text{m}$ , la variabilité du LOAC est en effet beaucoup plus cohérente avec celle du FIDAS ( $r^2 > 0.7$ ), même si des différences sont à noter en termes de valeurs absolues (pente=1.72), sans qu'il soit possible ici de dégager une mesure « référence ». Ce résultat est à mettre en perspective avec les faibles valeurs de dN observées.

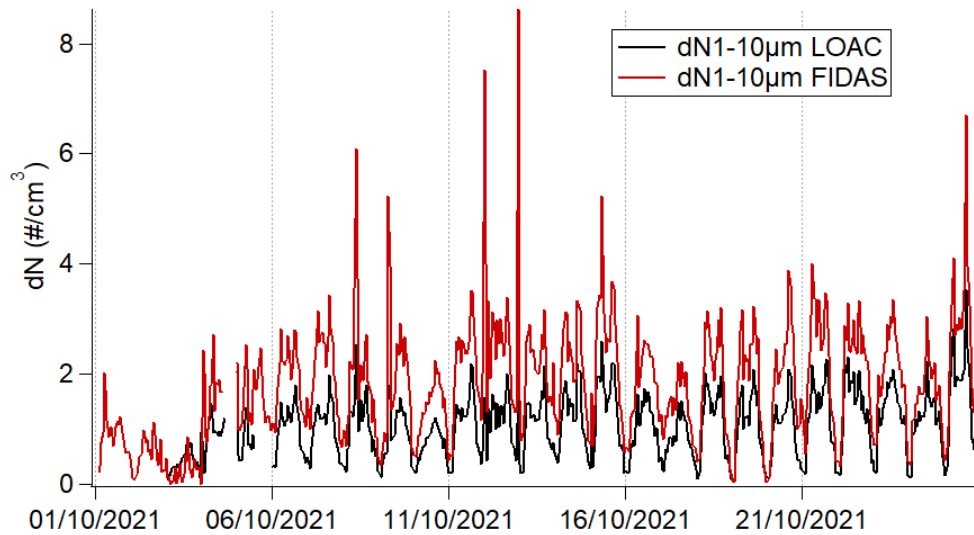


Figure 8 : Variabilité temporelle des particules entre  $1\mu\text{m}$  et  $10\mu\text{m}$  mesurée par le FIDAS et le LOAC.

#### **IV/ Conclusion**

Suite à la récente étude de l'association Respire dans certaines gares du réseau RATP, les performances du LOAC ont été évaluées au travers d'une campagne de mesures dans la station Châtelet-les Halles du RER A. Un dispositif instrumental de pointe a été mis en œuvre sur le quai du RER A durant 3 semaines en octobre 2021. Des mesures de référence de PM<sub>10</sub> (TEOM) ont été effectuées, complétées par une granulométrie des particules ultrafines (SMPS), fines et grossières (FIDAS), ainsi qu'une caractérisation de leur composition chimique.

Concernant le suivi des concentrations massiques de PM<sub>10</sub> en EFS, le LOAC donne des résultats cohérents dans les variations temporelles. Cependant, les performances du LOAC ne sont pas satisfaisantes en termes de valeur absolue, avec une sous-estimation d'un facteur environ 2 par rapport au TEOM. Cela est dû en grande partie à la spécificité de l'environnement chimique des EFS, et aux hypothèses nécessaires au calcul de la concentration massique à partir d'un nombre de particules. Il est important de souligner que le FIDAS est également sujet à cette problématique. Le suivi précis des PM<sub>10</sub> par capteur optique en EFS ne peut donc s'effectuer qu'avec une caractérisation préalable (ou simultanée) de la composition chimique spécifique des particules. Par ailleurs, même si des similitudes chimiques peuvent être rencontrées dans d'autres gares franciliennes, ce rapport n'apporte pas d'éléments de discussion autour de la représentativité de la gare de Châtelet – les Halles, étant donné la variété de configurations possibles (profondeur, ventilation, rames etc).

De plus, la typologie de particules estimée par le LOAC (qui semble particulièrement incertaine pour les grandes tailles) n'a pas pu être évaluée à partir des mesures effectuées ; pour ce faire, des analyses chimiques par classes de taille (au travers par exemple de prélèvements avec impacteur à étages) sont nécessaires. Ce n'est qu'à ces conditions que les données du LOAC pourront être métrologiquement représentatives de l'environnement des EFS, et scientifiquement interprétables.

Concernant le suivi du nombre de particules en EFS, les performances du LOAC sont largement dépendantes de la classe de taille étudiée. En effet, la mesure des particules avec un diamètre inférieur à 400nm n'était, dans le cadre de notre campagne, pas cohérentes avec les observations SMPS et FIDAS. Par ailleurs, les compteurs optiques ne sont, par nature, pas adaptées à la caractérisation des particules ultrafines, où, conformément à la norme en vigueur (CEN 16976), des compteurs à noyaux de condensation sont recommandés. Pour des tailles plus importantes, comprises entre 1 et 10µm, le LOAC présente néanmoins une bonne cohérence temporelle avec le FIDAS.

Tout en tenant compte des limitations de cette étude (mesures dans une seule enceinte ferroviaire), elle a permis de donner des éléments sur 2 points importants. D'une part que le LOAC, dans ce type d'environnement, ne permet pas de caractériser

correctement les concentrations de particules dont le diamètre est inférieur à 500nm. C'est le cas notamment des particules ultrafines. D'autre part que des corrections devraient impérativement être appliquées aux données de concentration massique fournies par le LOAC pour tenir compte de la spécificité de la composition chimique des particules rencontrées, sans quoi l'incertitude annoncée de 20% peut devenir largement sous-estimée.

## Références

- Anderson, J. O., Thundiyil, J. G., and Stolbach, A.: Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health, 8, 166–175, <https://doi.org/10.1007/s13181-011-0203-1>, 2012.
- Brattich, E., Serrano Castillo, E., Giulietti, F., Renard, J.-B., Tripathi, S. N., Ghosh, K., Berthet, G., Vignelles, D., and Tositti, L.: Measurements of aerosols and charged particles on the BEXUS18 stratospheric balloon, *Ann. Geophys.*, 37, 389–403, <https://doi.org/10.5194/angeo-37-389-2019>, 2019.
- Bressi, M., Sciare, J., Gherzi, V., Bonnaire, N., Nicolas, J. B., Petit, J.-E., Moukhtar, S., Rosso, A., Mihalopoulos, N., and Féron, A.: A one-year comprehensive chemical characterisation of fine aerosol (PM<sub>2.5</sub>) at urban, suburban and rural background sites in the region of Paris (France), 13, 7825–7844, <https://doi.org/10.5194/acp-13-7825-2013>, 2013.
- Daellenbach, K. R., Uzu, G., Jiang, J., Cassagnes, L.-E., Leni, Z., Vlachou, A., Stefenelli, G., Canonaco, F., Weber, S., Segers, A., Kuenen, J. J. P., Schaap, M., Favez, O., Albinet, A., Aksoyoglu, S., Dommen, J., Baltensperger, U., Geiser, M., El Haddad, I., Jaffrezo, J.-L., and Prévôt, A. S. H.: Sources of particulate-matter air pollution and its oxidative potential in Europe, *Nature*, 587, 414–419, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2902-8>, 2020.
- McMullen, N., Annesi-Maesano, I., and Renard, J.-B.: Impact of Rain Precipitation on Urban Atmospheric Particle Matter Measured at Three Locations in France between 2013 and 2019, *Atmosphere*, 12, 769, <https://doi.org/10.3390/atmos12060769>, 2021.
- Minguillón, M. C., Reche, C., Martins, V., Amato, F., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S., Querol, X., and Moreno, T.: Aerosol sources in subway environments, *Environmental Research*, 167, 314–328, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.07.034>, 2018.
- Petit, J.-E.: Compréhension des sources et des processus de formation de la pollution particulaire en région Ile-de-France, Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines, 2014.
- Putaud, J.-P., Raes, F., Van Dingenen, R., Brüggemann, E., Facchini, M.-C., Decesari, S., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hüglin, C., Laj, P., Lorbeer, G., Maenhaut, W., Mihalopoulos, N., Müller, K., Querol, X., Rodriguez, S., Schneider, J., Spindler, G., Brink, H. ten, Tørseth, K., and Wiedensohler, A.: A European aerosol phenomenology—2: chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe, 38, 2579–2595, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.041>, 2004.
- Renard, J.-B., Dulac, F., Berthet, G., Lurton, T., Vignelles, D., Jégou, F., Tonnelier, T., Jeannot, M., Couté, B., Akiki, R., Verdier, N., Mallet, M., Gensdarmes, F., Charpentier, P., Mesmin, S., Duverger, V., Dupont, J.-C., Elias, T., Crenn, V., Sciare, J., Zieger, P., Salter, M., Roberts, T., Giacomoni, J., Gobbi, M., Hamonou, E., Olafsson, H., Dagsson-Waldhauserova, P., Camy-Peyret, C., Mazel, C., Décamps, T., Piringer, M., Surcin, J., and Daugeron, D.: LOAC: a small aerosol optical counter/sizer for ground-based and balloon measurements of the size distribution and nature of atmospheric particles –

Part 1: Principle of measurements and instrument evaluation, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 1721–1742, <https://doi.org/10.5194/amt-9-1721-2016>, 2016a.

Renard, J.-B., Dulac, F., Berthet, G., Lurton, T., Vignelles, D., Jégou, F., Tonnelier, T., Jeannot, M., Couté, B., Akiki, R., Verdier, N., Mallet, M., Gensdarmes, F., Charpentier, P., Mesmin, S., Duverger, V., Dupont, J.-C., Elias, T., Crenn, V., Sciare, J., Zieger, P., Salter, M., Roberts, T., Giacomoni, J., Gobbi, M., Hamonou, E., Olafsson, H., Dagsson-Waldhauserova, P., Camy-Peyret, C., Mazel, C., Décamps, T., Piringer, M., Surcin, J., and Daugeron, D.: LOAC: a small aerosol optical counter/sizer for ground-based and balloonmeasurements of the size distribution and nature of atmospheric particles – Part 2: First results from balloon and unmanned aerial vehicleflights, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 3673–3686, <https://doi.org/10.5194/amt-9-3673-2016>, 2016b.

Wu, T. and Boor, B. E.: Urban aerosol size distributions: a global perspective, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 8883–8914, <https://doi.org/10.5194/acp-21-8883-2021>, 2021.