



Mesures de la qualité de l'air intérieur sur les quais des gares souterraines Franciliennes de la SNCF

RAPPORT FINAL



L'Observatoire de l'air en Île-de-France



MESURES DE LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR SUR LES QUAIS DES GARES SOUTERRAINES FRANCILIENNES DE LA SNCF

RAPPORT FINAL

Septembre 2022

« Le bon geste environnemental : N'imprimez ce document que si nécessaire et pensez au recto-verso ! »

SOMMAIRE

SOMMAIRE	5
GLOSSAIRE	6
1. INTRODUCTION : CONTEXTE ET OBJECTIFS	7
1.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	7
1.2 DESCRIPTION DES CAMPAGNES DE MESURE	10
2. NIVEAUX DE PARTICULES MOYENS OBSERVES SUR LES QUAIS	12
2.1 NIVEAUX MOYENS OBSERVES SUR LES QUAIS	12
2.1.1. PARTICULES PM ₁₀	12
2.1.2. PARTICULES PM _{2.5}	15
2.2 VARIABILITE TEMPORELLE	18
2.2.1. VARIABILITE JOURNALIERE	18
2.2.2. VARIABILITE HEBDOMADAIRE	20
2.3 LIENS ENTRE PARTICULES FINES PM ₁₀ ET PARTICULES TRES FINES PM _{2.5}	24
2.3.1. RATIOS MOYENS	24
2.3.2. VARIABILITE DES RATIOS HORAIREs	25
2.4 TENEURS DE METAUX MESURES DANS LES PARTICULES.....	26
2.4.1. PART DES METAUX DANS LES PARTICULES PM ₁₀	26
2.4.2. REPARTITION DES METAUX	27
3. FACTEURS D'INFLUENCE.....	30
3.1 INFLUENCE DE LA QUALITE DE L' AIR EXTERIEUR.....	30
3.2 INFLUENCE DU NOMBRE TRAINS EN CIRCULATION	32
3.3 AUTRES FACTEURS D'INFLUENCE	33
4. CONCLUSION	35

Airparif est l'Observatoire indépendant de la qualité de l'air (association loi 1901) en Ile-de-France. Conformément à la Loi sur l'Air et l'utilisation rationnelle de l'Energie, Airparif rassemble les différents acteurs impliqués dans les enjeux atmosphériques et susceptibles d'agir pour son amélioration. Les quatre collègues qui la composent (Etat, collectivités, acteurs économiques, milieu associatif et personnalités qualifiées) assurent son interaction avec les attentes de la société et lui garantissent indépendance et transparence dans ses orientations et ses activités.

Ses activités sont déclinées suivant trois axes :

- **Surveiller** par une combinaison technologique (modélisation, stations, émissions) permettant de renseigner 7 millions de points toutes les heures en Ile-de-France ;
- **Comprendre** la pollution atmosphérique et ses impacts en lien avec le climat, l'énergie et l'exposition des personnes ; prévoir la qualité de l'air au jour le jour, les épisodes de pollution et les évolutions futures ;
- **Accompagner** les décideurs dans l'amélioration de la qualité de l'air sur leur territoire, favoriser la concertation, informer les autorités, les médias et le public.

Airparif est agréée par le Ministère de l'Environnement. **Pour garantir la qualité et la fiabilité de ses résultats, ses activités sont accréditées ISO/CEI 17025 Section Laboratoires par l'AFNOR.**

GLOSSAIRE

µg/m³ : micro gramme par mètre cube

ng/m³ : nano gramme par mètre cube

percentile : un centile est chacune des 99 valeurs qui divisent les données triées en 100 parts égales, de sorte que chaque partie représente 1/100 de l'échantillon de population

AEF : Agence d'Essais Ferroviaires. L'AEF participe à l'homologation de matériel ferroviaire (aspect sécurité et environnement des transports), à l'amélioration de l'environnement aux alentours des emprises ferroviaires (qualité de l'air, bruit) et au développement d'outils à l'usage de ses clients (WIFI, géolocalisation, etc.).

CO₂ : Dioxyde de carbone

PM₁₀ : Particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm

PM_{2,5} : Particules de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm

Les résultats présentés dans ce rapport sont à l'heure locale. La mesure de l'heure H représente la teneur observée entre H-1 et H.

1. INTRODUCTION : CONTEXTE ET OBJECTIFS

1.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

Un programme de partenariat entre SNCF Gares d'Ile-de-France et Airparif a été signé en avril 2016. Son objectif est de mieux connaître et d'améliorer la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines. Ce programme s'inscrit dans le cadre du renforcement de la surveillance de la qualité de l'air intérieur, prévu par le Grenelle de l'environnement¹, afin de mieux documenter les niveaux et comprendre les facteurs d'influence. Aucun décret d'application spécifique aux enceintes souterraines ferroviaires n'est paru à ce jour et il n'existe pas de normes en vigueur dans ces espaces.

L'objectif de ce programme est de documenter finement les niveaux de particules dans les gares franciliennes souterraines exploitées par la SNCF, afin de faciliter la construction de plans d'amélioration et la priorisation des travaux afférents.

Pendant 2 ans, entre janvier 2016 et décembre 2018, 25 gares franciliennes souterraines ou mixtes² ont été, à tour de rôle, équipées d'une station de mesure de la qualité de l'air (la gare de Pont de l'Alma a été instrumentée en juin 2021 grâce à sa réouverture après des travaux sur la période 2017-2019). Dans chaque gare ont été mesurées en continu pendant 2 ou 3 semaines les particules fines PM₁₀ et les particules très fines PM_{2.5}. S'y sont ajoutés également des mesures de métaux, dont certains sont des traceurs du trafic ferroviaire : Fer (Fe), Cuivre (Cu), Zinc (Zn), Antimoine (Sb), Manganèse (Mn), Nickel (Ni), Plomb (Pb), Arsenic (As), Cadmium (Cd) et Chrome (Cr). Enfin, les paramètres de confort (CO₂, Humidité et Température) ont été suivis. Les mesures ont été réalisées sur le quai de la gare.

Suite aux mesures effectuées pendant 2 semaines en gare de Sevrans Beaudottes, qui ont montré que cette gare présentait les concentrations en particules les plus élevées parmi les 24 gares, il a été décidé d'installer dans cette gare une station de mesure en continu des concentrations en particules.

Dans le cadre du partenariat, les mesures dans 16 gares ont été assurées par Airparif, les 7 autres gares ayant été étudiées par AEF³ (la gare d'Avenue Foch a été opérée par les deux opérateurs).

En parallèle, deux stations de référence ont fait l'objet de mesures en continu des particules pendant toute la durée du projet (2016-2018) : la station Magenta (RER E), gérée par AEF et la station Avenue Foch (RER C), gérée par Airparif. Les mesures avaient lieu initialement à la station Saint-Michel-Notre-Dame (de septembre 2016 à décembre 2017) avant un déplacement à la station Avenue Foch, en raison de la crue de la Seine qui a inondé en partie la gare de Saint-Michel-Notre-Dame.

Dans ces stations a été assuré le suivi au pas de temps horaire des concentrations en particules fines (PM₁₀) et très fines (PM_{2.5}). Les stations de Saint-Michel-Notre-Dame puis Avenue Foch ont également fait l'objet de mesure des concentrations en oxydes d'azote (NO_x) à l'échelle horaire (résultats non présentés dans le présent rapport). Des relevés réguliers de métaux y sont également réalisés. Ces

¹ Article 180 de la loi 2010-788 du 12/07/2010 qui impose une surveillance de la qualité de l'air intérieur pour le propriétaire ou l'exploitant des Etablissements Recevant du Public (ERP) déterminé par décret en conseil d'Etat. A ce jour, seuls les ERP recevant des personnes dites sensibles ont bénéficié d'un décret d'application (crèches, écoles).

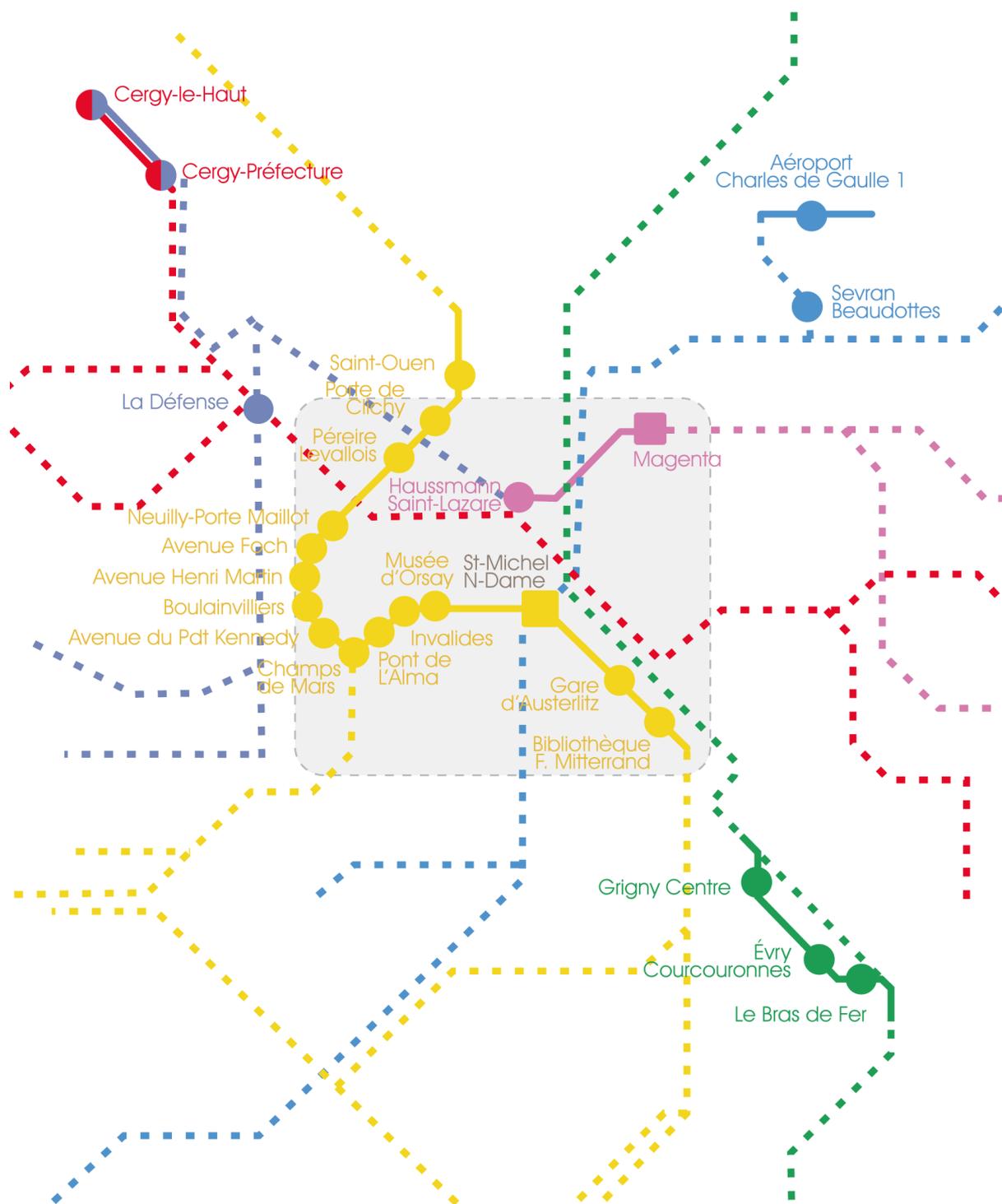
² Gare qui comporte une partie aérienne et une partie souterraine.

³ AEF : Agence Essais Ferroviaires, Laboratoire d'Essais de la SNCF.

deux stations de référence ont été choisies pour leurs caractéristiques différentes : Magenta est une gare récente, avec une ventilation contrôlée, alors que les gares de Saint-Michel-Notre-Dame puis Avenue Foch sont anciennes, sans ventilation mécanique.

Au total, ce sont par conséquent **les résultats de 25 gares qui sont synthétisés dans ce rapport**. La figure suivante illustre la localisation de l'ensemble de ces gares.

Gares Transiliennes étudiées sur la période 2016-2018*



Lignes de RER :

Transilien ligne :

Paris intra muros

*Pont de l'Alma : 2021



Figure 1 - Localisation de l'ensemble des gares étudiées.

Concernant les paramètres de confort, la température, l'humidité et les teneurs en CO₂ ont été suivies sur l'ensemble des gares. Toutefois, dans le cadre de ce rapport de synthèse, seules les mesures de particules et de métaux sont présentées. Les résultats détaillés des paramètres de confort sont consultables dans le rapport de résultats propre à chaque gare.

Nous pouvons tout de même noter de manière synthétique sur les paramètres de confort que :

- la température et l'humidité sont fortement dépendantes de la période des mesures (forte influence de la météorologie) et de la configuration de la gare (une gare mixte, pour laquelle une partie des quais se trouve en extérieur, sera plus impactée par la météorologie). Aussi les températures moyennes sur une campagne de mesure relevées sur les quais ont varié de 10 à 25 degrés.
- Le confinement des gares a été suivi via les teneurs en CO₂, qui permettent de suivre le renouvellement de l'air dans des espaces soumis potentiellement à diverses sources de CO₂ (combustion, respiration humaine, source extérieure). Les relevés horaires en CO₂ sont plus fluctuants que les paramètres de température et d'humidité, ceci en lien avec la fréquentation de la gare. En moyenne sur la période de mesure de chaque gare, les relevés varient entre 350 ppm et 685 ppm. Tous les relevés horaires sont inférieurs à 1000 ppm, seuil à respecter dans des conditions normales d'occupation d'un bâtiment non résidentiel⁴.

1.2 DESCRIPTION DES CAMPAGNES DE MESURE

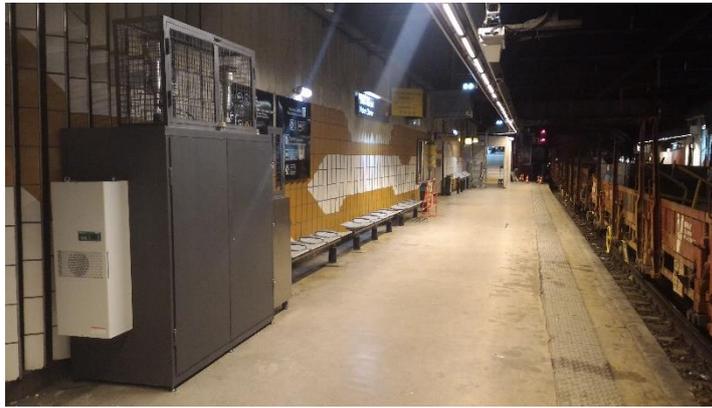
Les gares ont été instrumentés les unes après les autres sur toute la durée du partenariat, soit par Airparif, soit par AEF. L'ANNEXE 1 synthétise les gares étudiées, la période de mesure, l'opérateur ainsi que le lien vers le rapport de résultats spécifique à la gare.

D'une manière générale, une station de mesure temporaire est instrumentée en milieu de quai de gare, afin d'être représentative des niveaux sur l'ensemble des quais. Les mesures sont réalisées pendant toute la durée de la campagne, à savoir pendant 2 ou 3 semaines selon l'opérateur. Cette durée a été choisie afin d'avoir suffisamment de données pour assurer la robustesse des statistiques d'une part et, d'autre part, pour rencontrer potentiellement différentes conditions météorologiques et évaluer l'impact éventuel de l'air extérieur sur les niveaux mesurés sur les quais.

Des mesures en particules PM₁₀, PM_{2,5} et en métaux, ainsi que des relevés en CO₂, humidité et température ont été réalisées à chaque gare. Les mesures de métaux sont réalisées pendant cinq jours (du lundi au vendredi), lors des horaires d'ouverture de la gare au public. Les détails sur les indicateurs de pollution retenus, les appareils de mesure mis en œuvre et la qualité des résultats, sont présentés en ANNEXE 2.

Chaque résultat de campagne de mesure peut être comparé aux relevés des deux stations de référence où les mesures ont lieu en continu depuis 2016. L'une présente des concentrations en particules plutôt faibles. Il s'agit de la gare de Magenta (RER E), instrumentée depuis 2016, gare récente, de grand volume, qui dispose d'un système de ventilation contrôlée. En parallèle, des moyens de mesures au sein d'une gare présentant de plus fortes teneurs en particules ont été installés de septembre 2016 à décembre 2017 à Saint-Michel-Notre-Dame (RER C). Ces derniers ont été déménagés en gare d'Avenue Foch en avril 2018 suite à des infiltrations d'eau. La Figure 2 montre des photos des moyens de mesure installés sur les quais de ces trois gares de référence.

⁴ Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur et effets sur la santé, Avis de l'Anses, rapport d'expertise collective, juillet 2013, Edition scientifique.



(a)



(b)



(c)

Figure 2 – Photos des stations de référence : (a) Saint-Michel-Notre-Dame, RER C (b) Magenta, RER E (c) Avenue Foch, RER C

2. NIVEAUX DE PARTICULES MOYENS OBSERVES SUR LES QUAIS

Ce paragraphe propose une analyse des données : présentation des statistiques sur l'ensemble des mesures, évolution temporelle des relevés à l'échelle horaire, journalière, pour les particules ainsi que la teneur en métaux dans les particules.

2.1 NIVEAUX MOYENS OBSERVES SUR LES QUAIS

Les principaux résultats (moyenne, percentiles 25 et 75 et maximum horaire des données horaires) sont présentés dans le tableau en ANNEXE 3, pour chaque gare étudiée et pour les gares de référence. Pour rappel, 25% des concentrations mesurées sont inférieures au percentile 25. De même, les 25% des concentrations les plus élevées sont supérieures au percentile 75. Ainsi, 50% des données horaires sont comprises entre le percentile 25 et le percentile 75.

Les statistiques des campagnes gares concernent 2 à 3 semaines de mesure, à des périodes différentes de l'année, alors que les mesures aux stations de référence (Magenta, Saint-Michel-Notre-Dame et Avenue Foch) ont été réalisées sur des périodes plus longues (9 mois à Avenue Foch⁵, 16 mois à Saint-Michel-Notre-Dame, 24 mois à Magenta, soit l'ensemble de la période de mesure (01/01/2016 – 31/12/2018)).

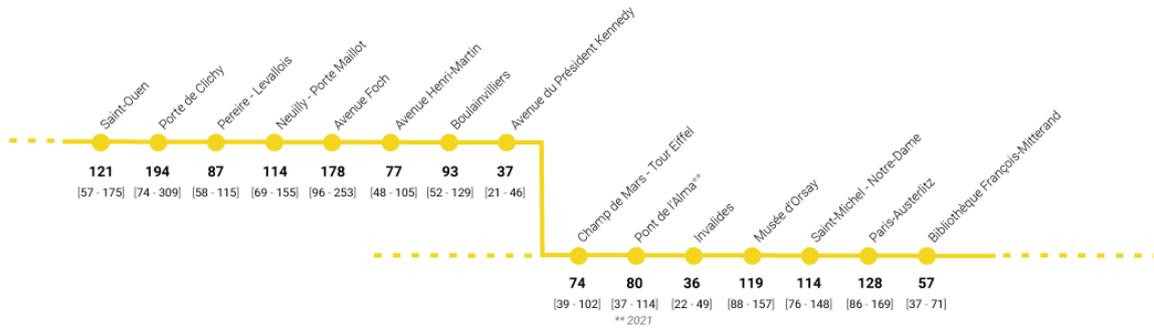
Le printemps de l'année 2018 a été perturbé par des grèves à la SNCF, entraînant une réduction du nombre de trains en circulation, et allant jusqu'à la fermeture de certaines gares. Cela s'est traduit par des concentrations en gares plus faibles. Aussi, afin de comparer les gares dans un mode de fonctionnement « normal », les statistiques présentées correspondent aux mesures hors grèves. A noter également le cas particulier des mesures en gare RER C Pont de l'Alma, réalisées en 2021. Comme pour toutes les campagnes, un rapport spécifique est disponible. Il présente les spécificités de cette campagne (réalisée lors de la crise sanitaire liée à la covid-19) et les comparaisons avec les stations de référence.

2.1.1. PARTICULES PM₁₀

La Figure 3 présente les niveaux moyens, les percentiles 25 et 75 en PM₁₀, pour chaque gare étudiée.

⁵ Dans ce rapport, seules les mesures de 2018 ont été prises en considération à Avenue Foch.

Résultats en particules PM₁₀ des gares RER du Transilien mesurées sur la période 2016-2018**



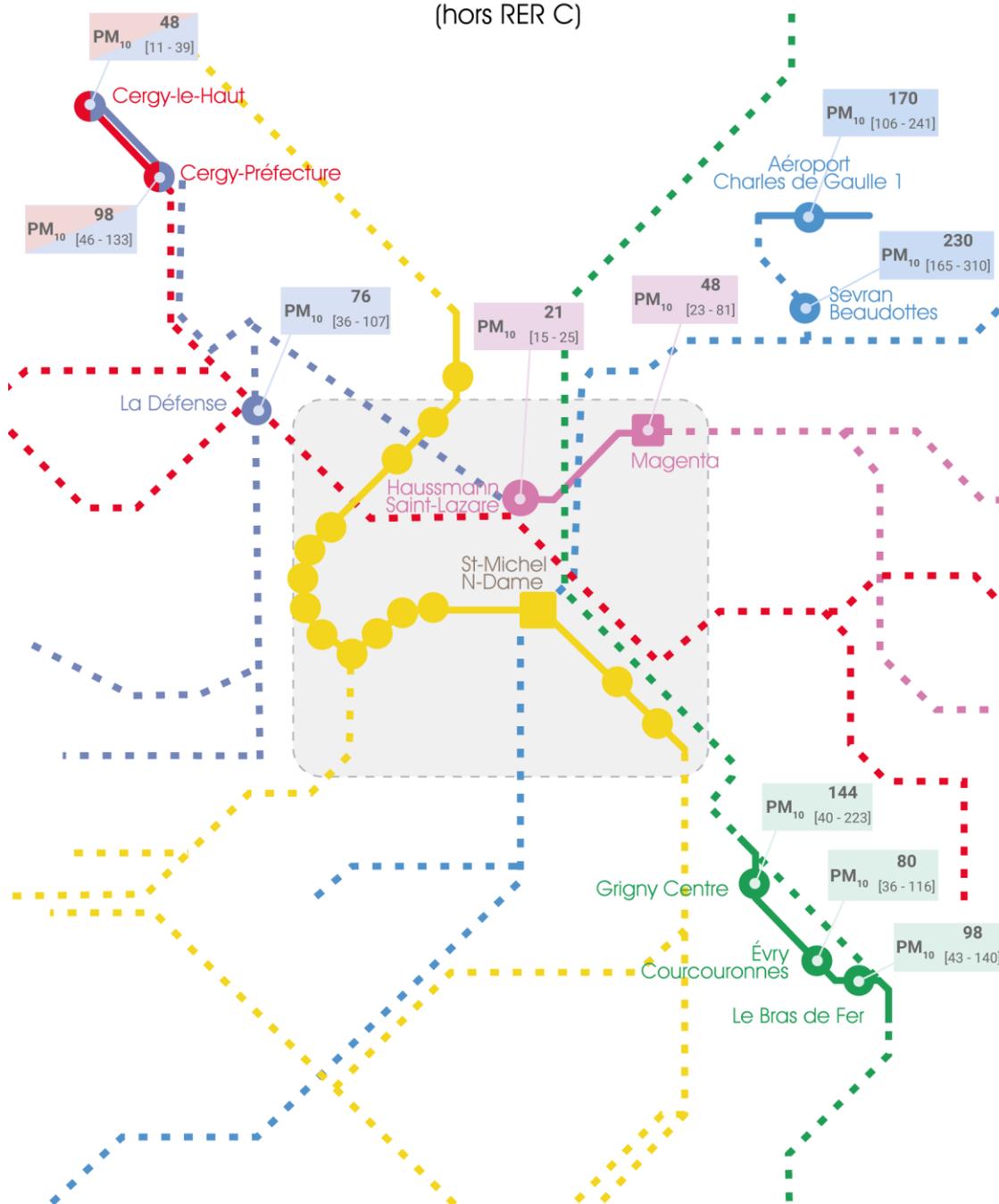
Légende :

121 : moyenne en particules PM₁₀ (µg/m³)
 [57 - 175] [Percentile 25 - Percentile 75]**

*50 % des relevés horaires sont compris dans cette fourchette



Résultats en particules PM₁₀ des gares RER du Transilien mesurées sur la période 2016-2018 (hors RER C)



Lignes de RER :

Transilien ligne :

Paris intra muros

121 : moyenne en particules PM (µg/m³)
[57 - 175] [Percentile 25 - Percentile 75]*

*50 % des relevés horaires sont compris dans cette fourchette



Figure 3 – Teneurs moyennes des concentrations horaires en PM₁₀, percentile 25 et percentile 75, en µg/m³, pour l'ensemble des gares étudiées, période de mesure propre pour chaque gare entre le 01/01/2016 et le 31/12/2018 (2021 pour Pont de l'Alma).

Le **niveau moyen en PM₁₀** le plus faible a été relevé en gare de Haussmann-Saint-Lazare (RER E), avec 21 µg/m³ mesuré pendant 3 semaines en octobre 2016. Il s'agit d'une gare Terminus récente (comme celle de Magenta), de grand volume, ventilée.

A l'opposé, la gare de Sevrans-Beaudottes (RER B) présente la plus forte concentration moyenne en PM₁₀, avec 230 µg/m³ mesurée pendant la campagne de 2017. Cette gare souterraine est caractérisée par un petit volume, sans ventilation autre que naturelle.

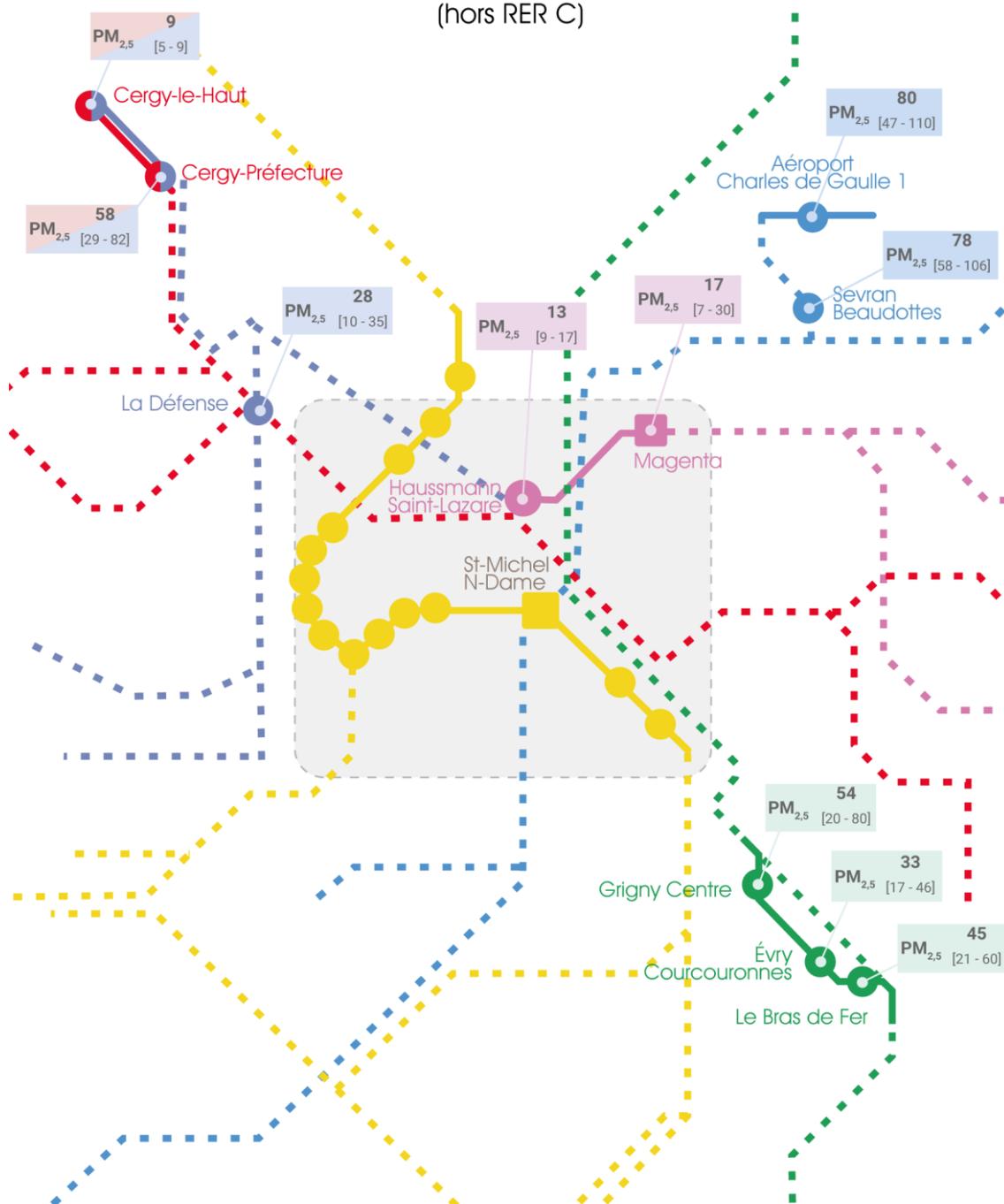
La concentration horaire la plus élevée a été enregistrée en l'absence de circulation commerciale en gare de Saint-Michel-Notre-Dame (1911 µg/m³) lors de travaux nocturnes. En service commercial, le maximum est de 1016 µg/m³, toujours enregistré en gare de Saint-Michel-Notre-Dame. Sur ce paramètre statistique, les écarts sont très importants d'une gare à l'autre.

Les gares de référence présentent des teneurs moyennes en PM₁₀ variables selon la gare : de 38 (en 2016) à 61 µg/m³ (en 2018) en gare de Magenta, 114 µg/m³ en gare de Saint-Michel-Notre-Dame en 2016/2017 et jusqu'à 178 µg/m³ à Avenue Foch en 2018. Ces différences de niveaux moyens entre ces gares peuvent s'expliquer par les différences de configuration des gares et de système de ventilation en place notamment.

2.1.2. PARTICULES PM_{2.5}

La

Résultats en particules PM_{2,5} des gares RER du Transilien mesurées sur la période 2016-2018 (hors RER C)



Lignes de RER :

Transilien ligne :

Paris intra muros

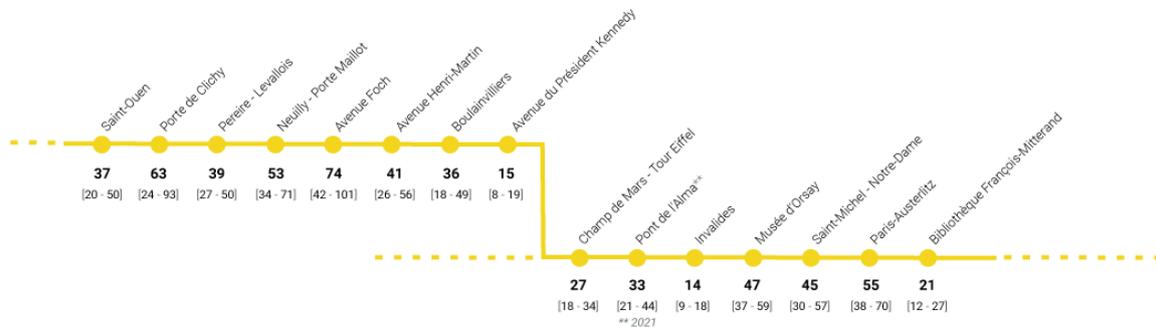
121 : moyenne en particules PM (µg/m³)
[57 - 175] [Percentile 25 - Percentile 75]*

*50 % des relevés horaires sont compris dans cette fourchette



Figure 4 présente les niveaux moyens, les percentiles 25 et 75 en PM_{2,5}, pour chaque gare étudiée.

Résultats en particules PM_{2,5} des gares RER du Transilien
mesurées sur la période 2016-2018**



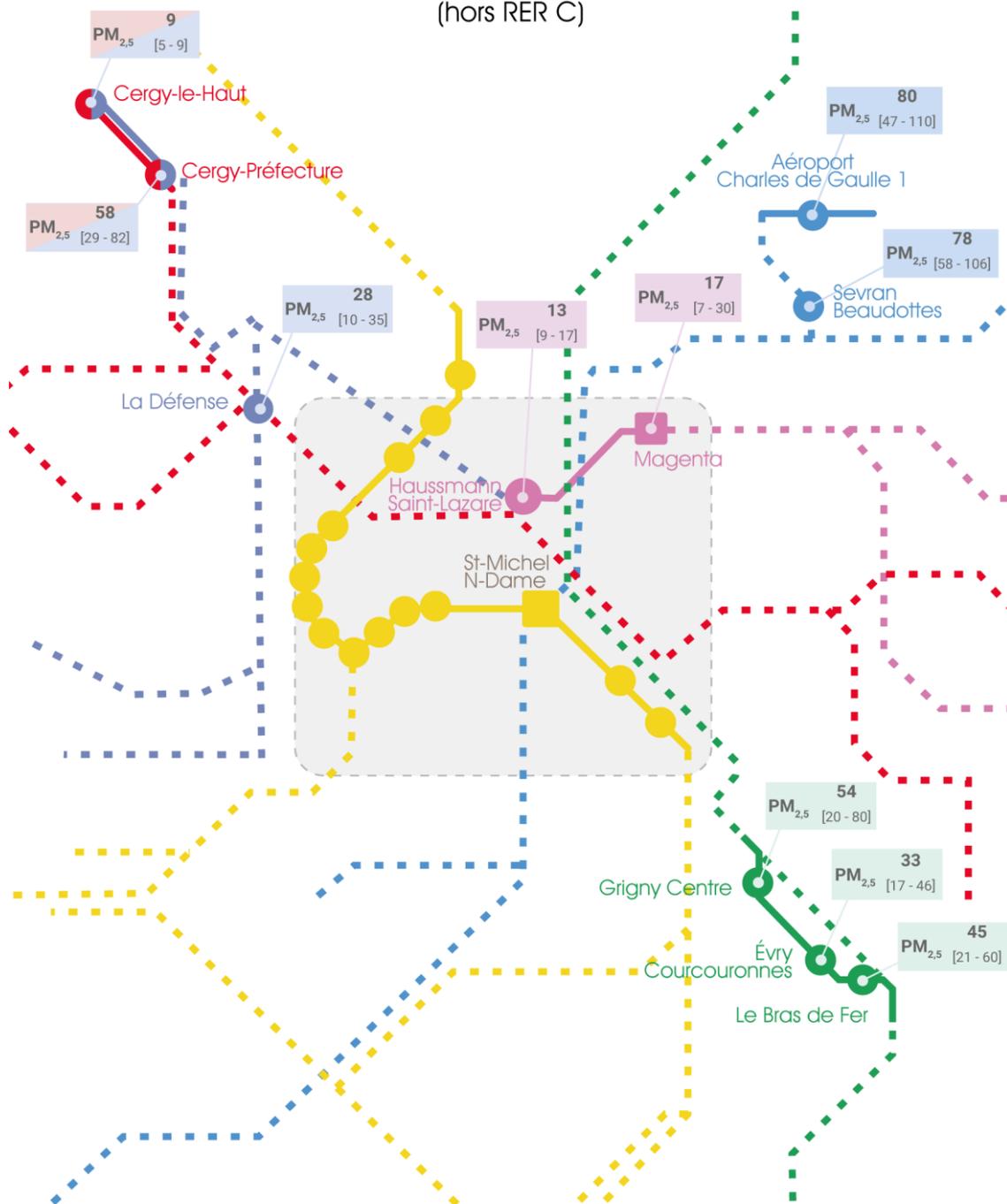
Légende :

121 : moyenne en particules PM_{2,5} (µg/m³)
[57 - 175] [Percentile 25 - Percentile 75]*

*50 % des relevés horaires sont compris dans cette fourchette



Résultats en particules PM_{2,5} des gares RER du Transilien mesurées sur la période 2016-2018 (hors RER C)



Lignes de RER :

Transilien ligne :

Paris intra muros

121 : moyenne en particules PM (µg/m³)
[57 - 175] [Percentile 25 - Percentile 75]*

*50 % des relevés horaires sont compris dans cette fourchette



AGENCE D'ESSAI FERROVIAIRE



Figure 4 – Teneurs moyennes des concentrations horaires en PM_{2,5}, percentile 25 et percentile 75, en µg/m³, pour l'ensemble des gares étudiées, période de mesure propre pour chaque gare entre le 01/01/2016 et le 31/12/2018 (2021 pour Pont de l'Alma).

Le **niveau moyen en PM_{2.5}** le plus faible a été relevé en gare de Cergy-Le-Haut (RER A/Ligne L), avec 9 µg/m³ mesuré pendant 2 semaines en janvier 2017, suivi par le niveau moyen en gare d'Hausmann-Saint-Lazare (avec 13 µg/m³), gare qui présente les teneurs les plus faibles en PM₁₀. La configuration de la gare de Cergy-Le-Haut, gare Terminus avec ses quais et voies en partie largement ouverts vers l'extérieur, située en grande couronne de la région parisienne, explique les faibles teneurs en particules très fines en comparaison des autres gares.

A l'opposé, la gare de Sevrans-Beaudoctes (RER B) présente la plus forte moyenne en PM_{2.5}, avec 100 µg/m³ mesurée pendant l'année 2018 (cette dernière présente également les teneurs les plus élevées en PM₁₀), suivie par la gare d'Aéroport Charles de Gaulle (RER B) avec 80 µg/m³. Les concentrations dans cette gare sont relativement atypiques, notamment en termes d'évolution, en lien avec la circulation des trains mais également des travaux ou encore le niveau de pollution de fond sur la plate-forme aéroportuaire.

La **concentration horaire maximale** a été enregistré en gare d'Avenue Foch (453 µg/m³ en service commercial, 476 µg/m³ en dehors de l'ouverture de la gare au public).

Comme pour les PM₁₀, les gares de référence présentent des teneurs moyennes en PM_{2.5} variables selon la gare : de 13 (en 2016) à 11 µg/m³ (en 2018) en gare de Magenta, 45 µg/m³ en gare de Saint-Michel-Notre-Dame en 2016/2017 et jusqu'à 74 µg/m³ à Avenue Foch en 2018. Ces différences de niveaux moyens entre ces gares peuvent également s'expliquer par les différences de configuration des gares et de système de ventilation en place notamment.

La campagne de mesure a permis de déterminer les niveaux moyens **sur toute la période de mesure** en particules fines PM₁₀ et en particules très fines PM_{2.5} sur 25 gares. Les niveaux varient énormément.

Les **niveaux moyens sur toute la période de mesure en particules PM₁₀** ont varié de 21 µg/m³ (enregistré à la gare de Hausmann-Saint-Lazare en octobre 2016) à 230 µg/m³ (enregistré à la gare de Sevrans-Beaudoctes en octobre 2017). A titre de comparaison, la moyenne observée à la station de référence Saint-Michel-Notre-Dame est de 119 µg/m³ sur l'ensemble de la période de mesure.

Concernant les **niveaux moyens en particules PM_{2.5}**, l'écart entre les gares est moindre. Le minimum enregistré est de 9 µg/m³ (enregistré à la gare de Cergy-Le-Haut en janvier 2017), le maximum étant de 80 µg/m³ (enregistré à la gare de l'Aéroport Charles-De-Gaulle 1 en mai/juin 2017), proche de la teneur en gare d'Avenue Foch (79 µg/m³ en 2016) et de Sevrans-Beaudoctes (78 µg/m³). A titre de comparaison, la moyenne observée à la station de référence Saint-Michel-Notre-Dame est de 45 µg/m³ sur l'ensemble de la période de mesure.

2.2 VARIABILITE TEMPORELLE

2.2.1. VARIABILITE JOURNALIERE

2.2.1.1. PARTICULES PM₁₀

La Figure 5 présente le **profil journalier moyen**, à savoir les niveaux moyens observés chaque heure de la journée pour les particules fines PM₁₀, ceci pour les trois stations de mesure en continu retenues pour l'exercice.

Les niveaux présentés sont ceux enregistrés à la station Saint-Michel-Notre-Dame entre septembre 2016 et décembre 2017. Cette gare a été choisie car elle présente des niveaux moyens. A titre de comparaison sont également présentés les niveaux moyens horaires d'une gare présentant des teneurs élevées (gare de Sevrans-Beaudottes, mesures sur les 12 mois de l'année 2018) et à l'inverse ceux d'une gare à teneurs plus faibles (gare de Magenta, mesures sur 3 ans entre janvier 2016 et décembre 2018).

L'ensemble des gares étudiées présentent des variations temporelles comparables.

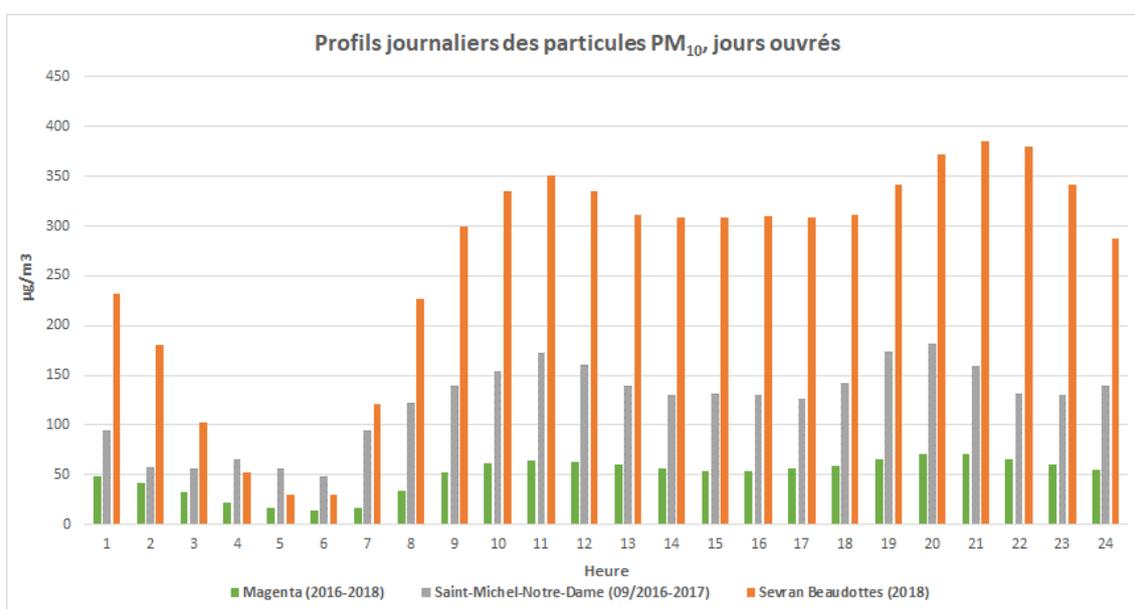


Figure 5 – Évolution des profils journaliers en PM₁₀ aux gares de Magenta (RER E), Saint-Michel-Notre-Dame (RER C) et Sevrans-Beaudottes (RER B), périodes de mesures variables entre janvier 2016 et décembre 2018 selon les gares.

Les particules PM₁₀ ont des profils journaliers proches selon les gares, mêmes si des différences importantes en termes de concentrations existent.

Les **concentrations horaires maximales** sont enregistrées le matin et le soir. Ces plages horaires correspondent à la période où les nombres de trains et de voyageurs sont les plus importants. Les plages horaires précises varient selon les gares. A titre d'exemple, les **heures de pointe** en gare de Saint-Michel-Notre-Dame sont entre 10h et 12h le matin, et entre 19h et 21h le soir. La Figure 5 montre que la période de pointe est décalée en gare de Sevrans-Beaudottes en soirée : les concentrations maximales sont enregistrées entre 10h et 12h le matin et entre 20h et 22h le soir.

A Saint-Michel-Notre-Dame, les niveaux en particules PM₁₀ aux heures de pointes atteignent en moyenne 167 µg/m³, contre 360 µg/m³ à la gare de Sevrans-Beaudottes.

En comparaison, les teneurs moyennes aux heures de pointe en gare de Magenta sont plus faibles, avec une moyenne de 66 µg/m³.

Les niveaux les plus faibles sont enregistrés la nuit (entre 1h et 5h), lors de la fermeture des gares au public. Les concentrations sont alors de quelques dizaines de µg/m³. Certaines gares ont été impactées par des travaux nocturnes, qui peuvent être visibles sur le profil journalier.

Ainsi, à Saint-Michel-Notre-Dame, gare où des travaux nocturnes ont été effectués de façon répétée pendant la période de mesure, les niveaux nocturnes sont de 59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne, et restent relativement stables durant toute la nuit. Les niveaux nocturnes sont plus importants en gare de Sevrans-Beaudottes, avec 91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En gare de Magenta, les niveaux moyens nocturnes sont de 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

On notera une diminution importante des teneurs en fin de nuit (avant l'ouverture au public), notamment en gare de Sevrans-Beaudottes : entre 4h et 6h, les concentrations sur le quai (de l'ordre de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sont inférieures à celles de Saint-Michel-Notre-Dame (de l'ordre de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

En journée, **entre la pointe du matin et celle du soir**, les teneurs en particules sont intermédiaires, supérieures à celles observées la nuit et inférieures à celles des heures de pointe.

2.2.1.2. PARTICULES $\text{PM}_{2,5}$

Le **profil journalier moyen** (niveaux moyens observés chaque heure de la journée) en particules très fines $\text{PM}_{2,5}$, est présenté pour trois stations à la Figure 6.

Comme pour les particules PM_{10} , Les niveaux présentés sont ceux enregistrés à la station de référence Saint-Michel-Notre-Dame entre septembre 2016 et décembre 2017. A titre de comparaison sont également présentés les niveaux moyens horaires d'une gare présentant des teneurs élevées et à l'inverse ceux d'une gare dont les teneurs sont plus faibles : mesures en gare de Magenta (mesures sur 3 ans, de janvier 2016 à décembre 2018) et en gare de Sevrans-Beaudottes (mesures sur l'année 2018).

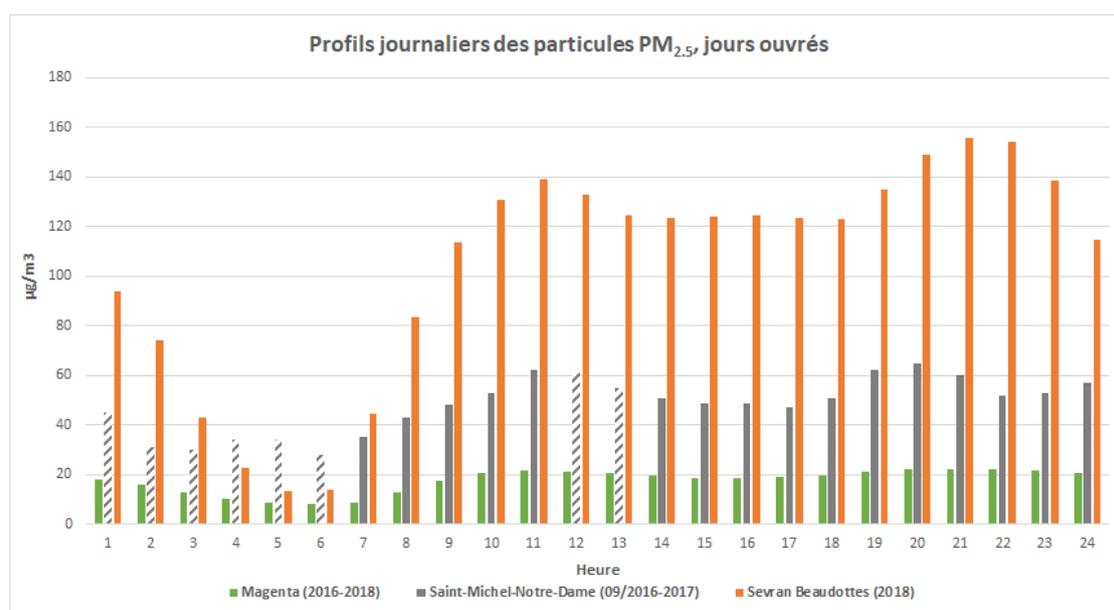


Figure 6 – Évolution des profils journaliers en $\text{PM}_{2,5}$ aux gares de Magenta (RER E), Saint-Michel-Notre-Dame (RER C) et Sevrans-Beaudottes (RER B), périodes de mesures variables entre janvier 2016 et décembre 2018 selon les gares. En hachuré, données disponibles < 75%.

Ce graphique montre, comme pour les PM_{10} , des **fluctuations importantes entre la journée et la nuit**.

Les **concentrations horaires maximales** en particules très fines $\text{PM}_{2,5}$ sont enregistrées, comme pour les particules PM_{10} , le matin et le soir, sur des plages horaires légèrement variables selon les gares. Les concentrations lors des heures de pointe varient énormément selon les gares. Ainsi la gare de référence Saint-Michel-Notre-Dame présente des teneurs moyennes en particules $\text{PM}_{2,5}$ aux heures de pointe de 61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En gare de Sevrans-Beaudottes, le niveau moyen aux heures de pointe est de 144 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, contre 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en gare de Magenta.

Les **niveaux les plus faibles sont enregistrés la nuit** (entre 1h et 5h), lors de la fermeture de la gare au public : 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne pour les $\text{PM}_{2.5}$ en gare de Saint-Michel-Notre-Dame, gare régulièrement soumise à des travaux nocturnes. Dans une gare polluée comme celle de Sevrans-Beaudottes, le niveau moyen nocturne en $\text{PM}_{2.5}$ reste élevé, en moyenne de 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, soit un niveau supérieur à celui de Saint-Michel-Notre-Dame. De faibles teneurs nocturnes sont enregistrées en gare de Magenta, avec 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne.

La Figure 7 présente à titre d'illustration le **profil journalier en PM_{10} et en $\text{PM}_{2.5}$ en gare de Saint-Michel-Notre-Dame. Les profils sont comparables**, même si les variations horaires en particules $\text{PM}_{2.5}$ (écart type de 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur la période d'ouverture de la gare) sont moindres que celles des PM_{10} (écart type de 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur la période d'ouverture de la gare). Cette différence s'explique par le fait que les émissions liées à la circulation des trains concernent d'avantage la fraction la plus grossière des particules. Cela peut également s'expliquer en partie par un temps de déposition différent entre les particules : temps plus court pour les plus grosses particules.

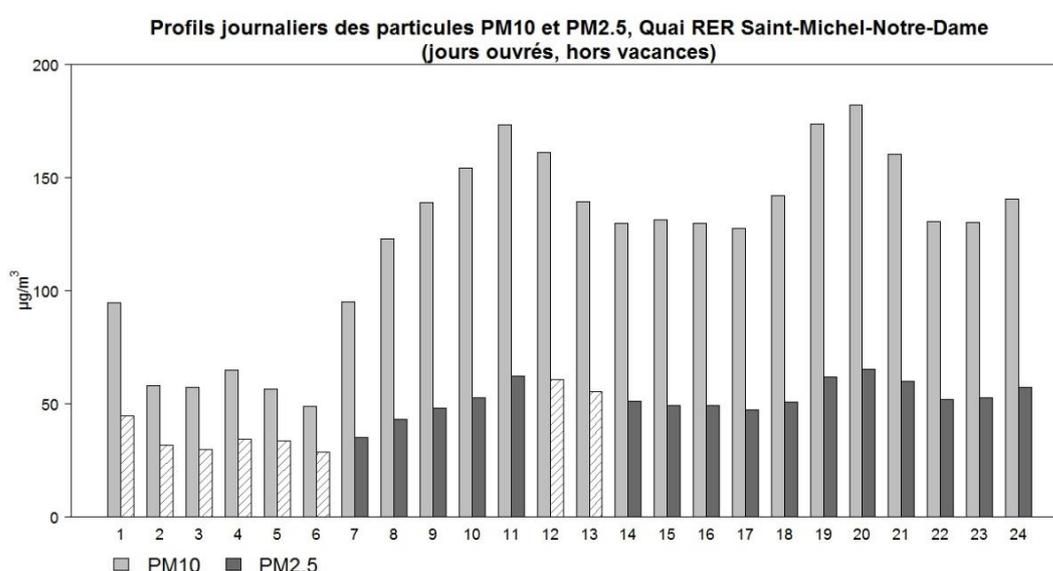


Figure 7 – Évolution des profils journaliers en PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$ à la gare RER C de Saint-Michel-Notre-Dame, période du 05/09/2016 au 31/12/2017 – jours ouvrés. En hachuré, données disponibles < 75%.

2.2.2. VARIABILITE HEBDOMADAIRE

2.2.2.1. PARTICULES PM_{10}

Les **profils hebdomadaires** pour les PM_{10} aux gares de Magenta, Saint-Michel-Notre-Dame et Sevrans-Beaudottes sont présentés à la Figure 8. Les graphiques comparent les résultats moyennés par jour des trois gares.

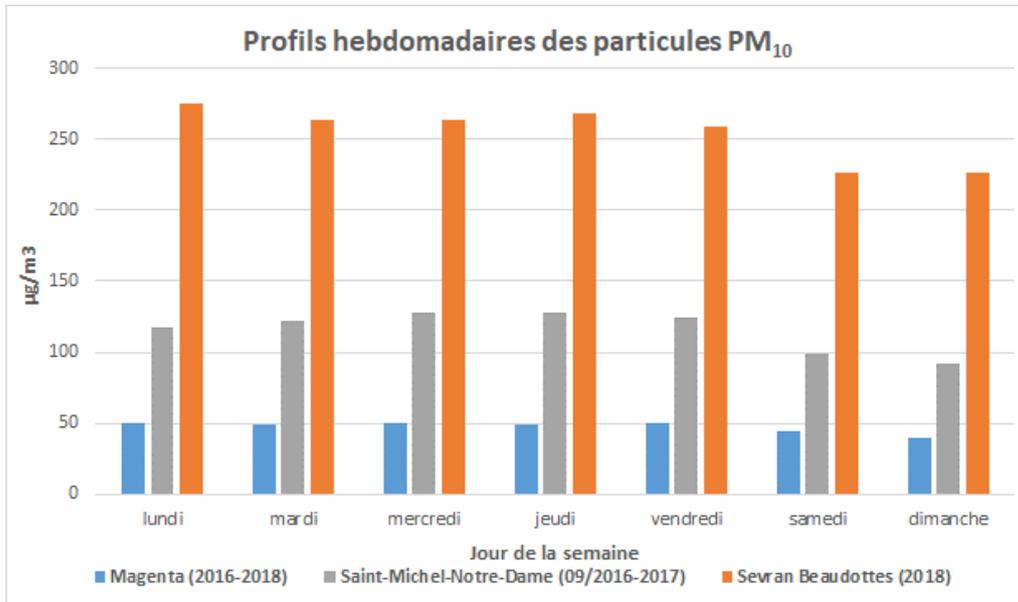


Figure 8 – Évolution des profils hebdomadaires en PM₁₀ aux gares de Magenta (RER E), Saint-Michel-Notre-Dame (RER C) et Sevrans-Beaudottes (RER B), périodes de mesures variables entre janvier 2016 et décembre 2018 selon les gares.

Les niveaux moyens en particules PM₁₀ sont relativement stables les jours ouvrés (du lundi au vendredi). **Ils diminuent généralement les samedis et dimanches par rapport aux jours ouvrés.**

Ainsi, à la gare de référence Saint-Michel-Notre-Dame, le niveau moyen en PM₁₀ les jours ouvrés est d'environ 125 µg/m³. Il est relativement stable sur la semaine (écart type de 4.6 µg/m³). En gare de Sevrans-Beaudottes, le niveau moyen en semaine est de 266 µg/m³ (écart-type de 5.9 µg/m³), alors qu'en gare de Magenta, le niveau moyen d'un jour ouvré est de 50 µg/m³, avec peu de variation selon les jours (écart-type inférieur à 1 µg/m³).

La diminution des niveaux des samedis et dimanches par rapport aux jours ouvrés est de 23% pour les PM₁₀ en gare de Saint-Michel-Notre-Dame et de 15% en gares de Sevrans-Beaudottes et de Magenta.

2.2.2.2. PARTICULES PM_{2.5}

Comme pour les PM₁₀, les profils hebdomadaires pour les PM_{2.5} aux gares de Magenta, Saint-Michel-Notre-Dame et Sevrans-Beaudottes sont présentés à la Figure 9. Les graphiques comparent les résultats moyennés par jour sur les trois gares.

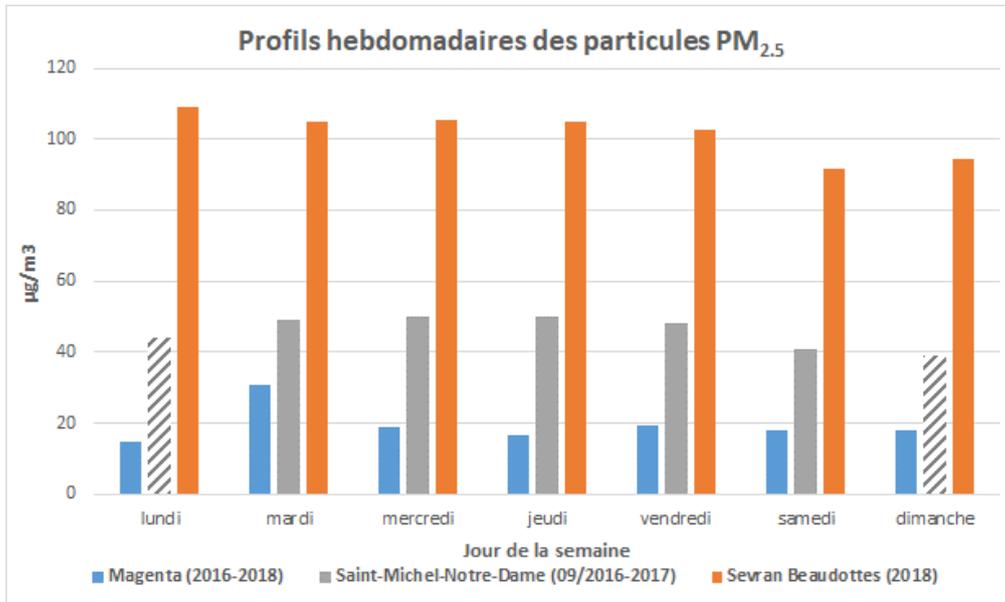


Figure 9 – Évolution des profils hebdomadaires en PM_{2.5} aux gares de Magenta (RER E), Saint-Michel-Notre-Dame et Sevrans-Beaudottes (RER B), périodes de mesures variables entre janvier 2016 et décembre 2018 selon les gares. En hachuré, données disponibles < 75%.

D'une manière générale, et **comme pour les particules PM₁₀, les niveaux en particules PM_{2.5} sont homogènes les jours ouvrés (du lundi au vendredi), et diminuent les week-ends.**

Des différences existent toutefois selon les gares, notamment en termes de niveaux. Alors que les teneurs moyennes journalières en semaine en PM_{2.5} à la station de référence Saint-Michel-Notre-Dame sont de 48 µg/m³ (écart-type de 2.5 µg/m³), ils atteignent en moyenne 105 µg/m³ en gare de Sevrans-Beaudottes (écart-type de 2.3 µg/m³). Les teneurs restent plus faibles en gare de Magenta, avec des niveaux moyens en semaine en PM_{2.5} de 20 µg/m³.

Les niveaux moyens en PM_{2.5} diminuent les samedis et dimanches par rapport aux jours ouvrés, de 17% en gare de Saint-Michel-Notre-Dame, 12% en gare de Sevrans-Beaudottes et de 11% en gare de Magenta.

La Figure 10 présente à titre d'illustration le **profil hebdomadaire en PM₁₀ et en PM_{2.5} en gare de Saint-Michel-Notre-Dame. Les profils sont comparables**, même si les variations journalières en particules PM_{2.5} sont moindres que celles des PM₁₀.

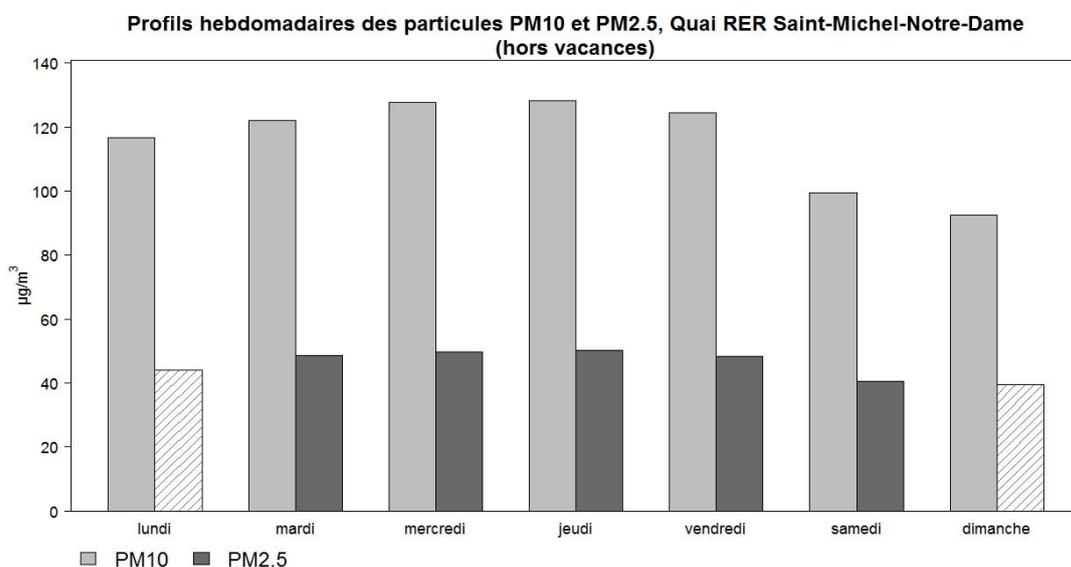


Figure 10 – Évolution des profils hebdomadaires en PM₁₀ et PM_{2.5} à la gare RER C de Saint-Michel-Notre-Dame, période du 05/09/2016 au 31/12/2017. En hachuré, données disponibles < 75%.

Les variations temporelles observées sur les concentrations en particules (PM₁₀ et PM_{2.5}) sont fortement liées à l'activité et la fréquentation de la gare (nombre de voyageurs, nombre de trains).

A l'échelle hebdomadaire, les profils montrent généralement des teneurs les jours ouvrés (du lundi au vendredi) plus élevées que le week-end, ceci pour les PM₁₀ et dans une moindre mesure pour les PM_{2.5}.

Sur une journée ouvrée moyenne, les niveaux nocturnes (entre 1h et 5h) sont les plus faibles. Ils augmentent en journée lors de la reprise d'activité au sein de la gare. Les concentrations sont maximales lorsque la fréquentation de la gare est maximale, à savoir lors des heures de pointe du matin et du soir.

2.3 LIENS ENTRE PARTICULES FINES PM_{10} ET PARTICULES TRES FINES $PM_{2.5}$

L'examen du ratio $PM_{2.5} / PM_{10}$ peut permettre d'identifier des sources de particules différentes.

2.3.1. RATIOS MOYENS

Le ratio moyen entre particules très fines ($PM_{2.5}$) et particules fines (PM_{10}) à chaque gare est présenté en ANNEXE 4.

Les ratios varient selon les gares, de 0.32 à 0.54, pour 21 des 25 gares. Font exception la gare de Cergy-le-Haut, gare pour laquelle le ratio est beaucoup plus faible (0.19), et les gares de Cergy Préfecture et Haussmann-Saint-Lazare, pour lesquelles le ratio est nettement plus élevé (0,66 et 0,63 respectivement).

A Cergy le Haut, ce faible ratio peut être mis en lien avec les teneurs particulièrement faibles en particules très fines $PM_{2.5}$ enregistrées (minimum des gares) comparativement aux teneurs en PM_{10} . Les ratios les plus élevés sont enregistrés en gare de Cergy-Préfecture (0.66) et à Haussmann-Saint-Lazare (0.63). A Cergy-Préfecture, le ratio élevé peut s'expliquer par des concentrations en $PM_{2.5}$ proportionnellement plus élevées que celles de PM_{10} (en lien avec une influence de l'air extérieur dans cette gare). A Haussmann-Saint-Lazare, ce résultat est plus surprenant mais les concentrations en particules PM_{10} et $PM_{2.5}$ y sont faibles (minima des gares).

A l'exception de cette gare, les ratios minima avoisinent 0.33, en gare de Magenta (les concentrations en particules PM_{10} et $PM_{2.5}$ y sont faibles) mais également dans les gares de Sevran-Beaudottes ou Saint-Ouen, où les teneurs en PM_{10} sont élevées proportionnellement à celles de $PM_{2.5}$ (travaux en semaine en extérieur à proximité de la gare de Saint-Ouen).

Suivent ensuite des gares comme Pèreire-Levallois, Avenue Henri Martin ou encore Aéroport Charles De Gaulle 1, avec des ratios de l'ordre de 0.53. Autrement dit, ces gares présentent une concentration de particules inférieure à $2.5 \mu m$ proche de celles des particules plus grossières comprises entre $2.5 \mu m$ et $10 \mu m$.

Pour rappel, les particules émises par le trafic ferroviaire (passage des trains, freinage, remise en suspension) sont de grosse taille. Aussi, il est cohérent que le ratio moyen enregistré dans les gares souterraines soit généralement inférieur à 0.5.

A titre d'illustration, la Figure 11 représente le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ en gare de Saint-Michel-Notre-Dame, gare pour lequel le ratio est qualifié de moyen (0.44), ainsi que ceux des gares de Sevran-Beaudottes et Magenta.

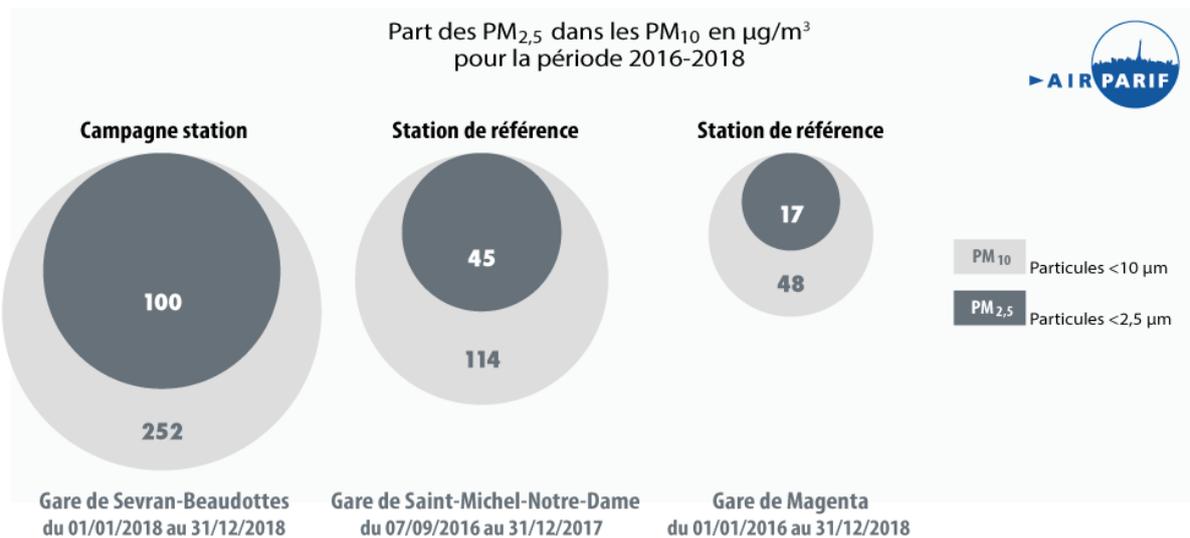


Figure 11 - Part des PM_{2,5} dans les PM₁₀ en µg/m³ à Saint-Michel-Notre-Dame (RER C), Magenta (RER E) et Sevrans-Beaudottes (RER B).

A titre de comparaison, en air ambiant extérieur, en moyenne annuelle sur l'Ile-de-France, les PM_{2,5} représentent environ 60 à 70% des PM₁₀ (ratio de 0.6 à 0.7). Compte-tenu des caractéristiques des particules émises par le trafic ferroviaire, la part des PM_{2,5} au sein des gares est généralement plus faible qu'en air ambiant.

2.3.2. VARIABILITE DES RATIOS HORAIRES

Les ratios sont stables en journée (de 7h à 24h), généralement autour de 0.4 dans l'ensemble des gares. **La nuit (entre 1h et 5h, lors de la fermeture de la gare au public), les ratios sont plus importants.** Ils tendent vers le ratio habituellement observé en air extérieur (entre 0.6 et 0.7). Le ratio maximum est atteint à l'ouverture au public (5h).

Cette évolution du ratio PM_{2,5}/PM₁₀ s'explique par des concentrations en PM_{2,5} proportionnellement plus importantes la nuit par rapport à celles de PM₁₀, en lien d'une part avec la fermeture de la gare et l'absence d'émission (pas de trains, d'où l'absence d'émission de grosses particules liées au freinage, et pas de fréquentation d'où l'absence de remise en suspension) et d'autre part, par une influence de l'air extérieur potentiellement plus importante.

A l'échelle hebdomadaire, il existe peu de variations entre les différents jours de la semaine, y compris les week-ends.

Le ratio moyen PM_{2,5}/PM₁₀ est compris entre 0,32 et 0,54 pour la grande majorité des gares, en lien avec les particules émises par le trafic ferroviaire (passage des trains, freinage, remise en suspension), qui sont de grosse taille. Quelques gares font néanmoins figure d'exception, avec un ratio plus proche de celui de l'air extérieur ou inversement un ratio très bas.

A l'échelle journalière, les ratios sont stables en journée (environ 0,4 entre 7h et 24h) et en hausse la nuit (autour de 0,6), en lien avec les sources de particules PM₁₀ relativement moins importantes (pas de circulations de trains et pas de remise en suspension par le public) que celles des particules très fines PM_{2,5}.

A l'échelle hebdomadaire, peu de variations sont observées.

2.4 TENEURS DE METAUX MESURES DANS LES PARTICULES

De manière générale, les particules sont composées de cinq types d'éléments : le carbone élémentaire, les ions, la matière organique (dont le carbone organique), les métaux et les composés minéraux. Les métaux sont clairement caractéristiques des enceintes ferroviaires souterraines, notamment des systèmes de freinage⁶, alors que les autres éléments proviennent majoritairement de l'air extérieur. Aussi les mesures de composition des particules ont concerné prioritairement l'analyse des métaux.

Les concentrations des métaux d'intérêt ont été étudiées dans les particules PM₁₀ pour toutes les gares, chaque jour ouvré pendant une semaine au cours des campagnes de mesure. Les prélèvements journaliers ont été réalisés sur la période d'ouverture de la gare au public, à savoir de 5h à 1h. Des mesures à la station Saint-Michel-Notre-Dame ou Avenue Foch ont été réalisées en parallèle, selon le même protocole, de façon contemporaine aux prélèvements faits dans chacune des gares.

Les dix métaux suivants ont été étudiés : Fer, Cuivre, Plomb, Zinc, Antimoine, Manganèse, Nickel, Arsenic, Cadmium et Chrome. L'Aluminium a été ajouté en cours de période, à partir du mois d'octobre 2017. Ces métaux ont été choisis conformément à la littérature⁶.

2.4.1. PART DES METAUX DANS LES PARTICULES PM₁₀

La

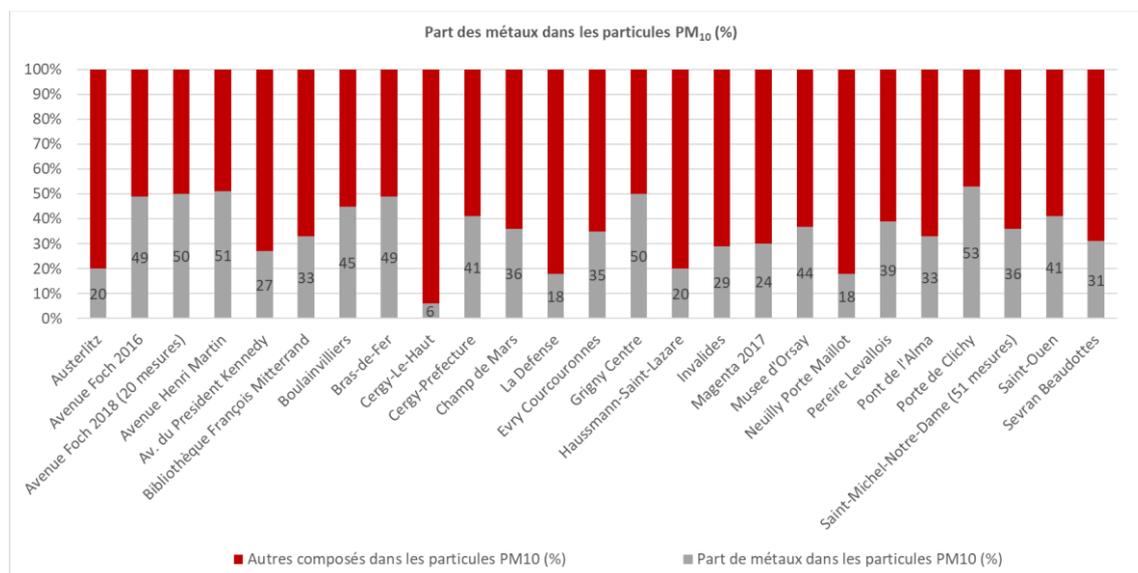


Figure 12 représente la part des métaux mesurés dans les particules PM₁₀ à chaque gare. Les valeurs numériques sont présentées à l'ANNEXE 5.

⁶ Pollution chimique de l'air dans les enceintes de transports ferroviaires souterrains et risques sanitaires associés chez les travailleurs, Avis de l'Anses, Rapport d'expertise collective – Septembre 2015, Edition scientifique.

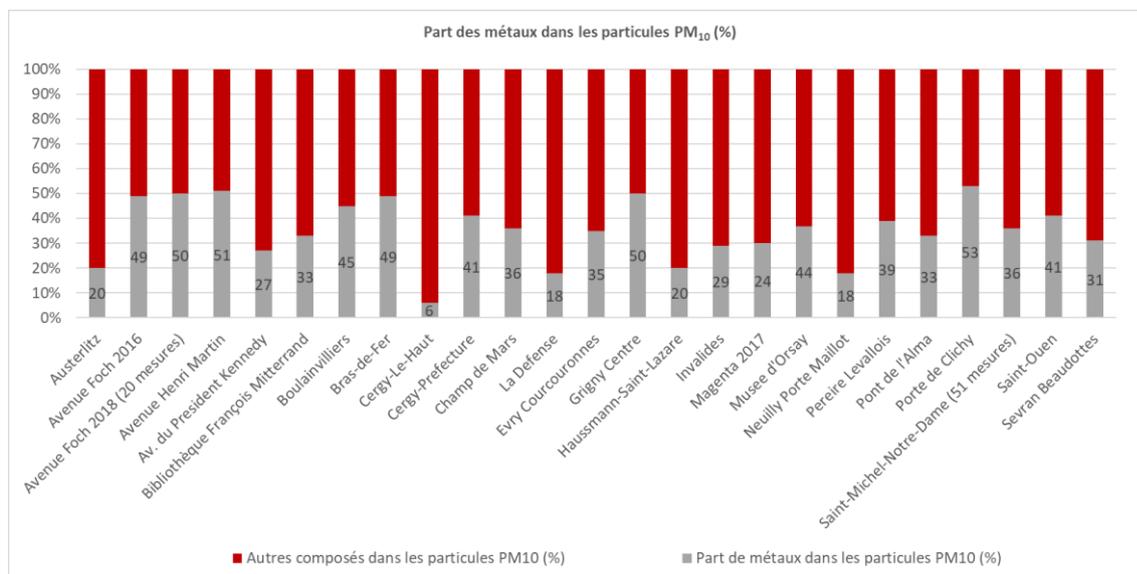


Figure 12 - Part des métaux mesurés dans les particules PM₁₀ (en % de particules PM₁₀) sur les périodes de prélèvements précisées à chaque gare étudiée, pour la période du programme de surveillance du 01/01/2016 au 31/12/2018 (2021 pour Pont de l'Alma).

La part des métaux mesurés dans les particules PM₁₀ varie de manière importante selon les gares. Les métaux mesurés représentent entre 18% à 53% de la masse des PM₁₀, selon les gares, avec une exception en gare de Cergy le Haut.

La gare de Cergy-le-Haut présente en effet un résultat atypique, avec une part de métaux dans les particules PM₁₀ de 6% (elle présente également un ratio PM_{2,5} / PM₁₀ beaucoup plus faible que les autres gares). Ce résultat peut s'expliquer en partie par la configuration de la gare, très ouverte sur l'extérieur, permettant une meilleure dispersion des particules métalliques, mais également un mélange avec l'air extérieur moins chargé en métaux.

Parmi les gares qui présentent une faible part de métaux dans les particules figurent Neuilly-Porte-Maillot, La Défense ou encore Magenta. Comme pour la gare de Cergy-le-Haut, la configuration des gares de Neuilly-Porte-Maillot et La Défense présentent des ouvertures vers l'extérieur, d'où un ratio de particules métalliques plus faible. A Magenta, la présence du système de ventilation peut être assimilée à un apport d'air extérieur.

A l'opposé, les gares de Porte de Clichy, Avenue Henri Martin, Avenue Foch et Grigny Centre ont une part des métaux dans les particules PM₁₀ supérieure ou égale à 50%. Il s'agit de gares plutôt confinées (excepté pour Grigny Centre), présentant des niveaux importants en particules PM₁₀.

2.4.2. REPARTITION DES METAUX

La Figure 13 représente la répartition moyenne des composés mesurés entre septembre 2016 et décembre 2017 (49 journées disponibles) en gare de Saint-Michel-Notre-Dame.

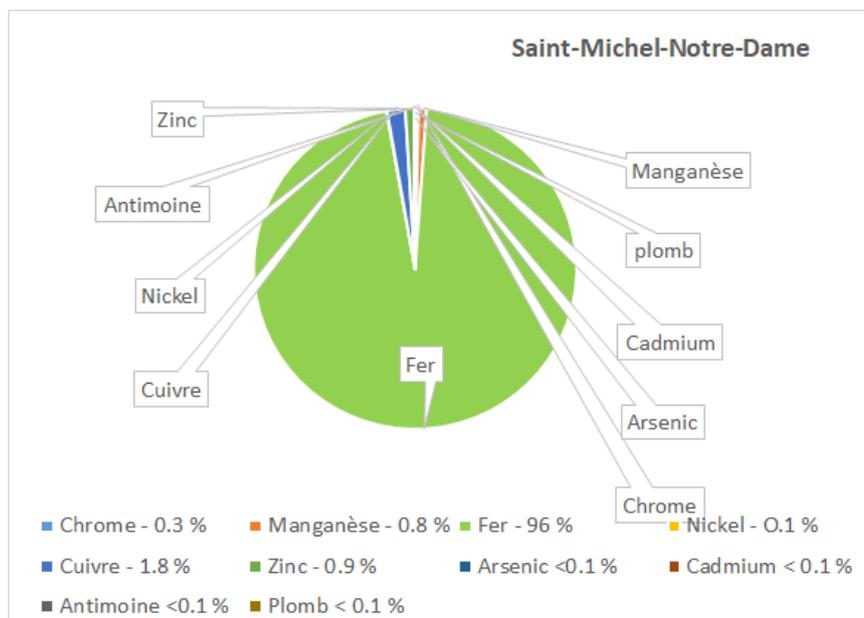


Figure 13 – Part de chaque métal dans les relevés en particules, en moyenne des mesures entre septembre 2016 et décembre 2017, en gare RER C de Saint-Michel-Notre-Dame.

La contribution moyenne de chaque métal dans les différentes gares est proche de celle présentée pour la gare de Saint-Michel-Notre-Dame.

Parmi les métaux étudiés, le Fer est l'élément majoritaire dans toutes les gares : il représente entre 93 et 97% des métaux mesurés dans toutes les gares.

La part du Fer dans les métaux est légèrement plus faible à la gare d'Hausmann-Saint-Lazare (89%), La Défense (90%) et Cergy-le-Haut (92%). Ces trois gares sont des gares terminus, où le freinage est par conséquent réduit, ce qui pourrait expliquer en partie la plus faible proportion de Fer (principal composé des rails). A l'inverse, la part du Fer dans les métaux est légèrement plus élevée à la gare d'Avenue Foch, Avenue Henri Martin, Boullainvilliers et Grigny Centre (97%). Aucune caractéristique unique, commune à ces gares (ligne, rayon de courbure, etc.), n'explique ces résultats.

L'ensemble des résultats (teneurs mesurées pour chaque métal à chaque gare, et part associée dans les particules PM₁₀) sont présentés en ANNEXE 6. Même si la part du Fer dans les métaux est du même ordre de grandeur dans la majorité des gares, **les concentrations en Fer sont très variables selon les gares**, mais proportionnelles aux teneurs en particules PM₁₀. Ainsi, c'est la gare de Cergy-le-Haut qui présente la plus faible teneur moyenne en Fer (1 µg/m³ sur 5 jours ouvrés de mesure), suivie par la gare d'Hausmann-Saint-Lazare (4 µg/m³). A l'opposé, les gares de Grigny Centre, Porte de Clichy, Sevran Beaudottes ou encore Avenue Foch présentent des teneurs moyennes en Fer élevées, proches ou supérieures à 100 µg/m³.

Les métaux les plus abondants après le Fer sont le **Cuivre, le Zinc, le Manganèse et l'Aluminium**⁷ mais dans des proportions bien plus faibles que le Fer, la part de chacun de ces métaux dans les particules PM₁₀ étant généralement de quelques pourcents (< 8%). **Les concentrations peuvent être plus élevées dans certaines gares**, avec des moyennes supérieures à 1 000 ng/m³ (= 1 µg/m³) en Manganèse, Aluminium ou Zinc par exemple, voire supérieures à 4 000 ng/m³ en Cuivre.

Suit ensuite le **Chrome**, avec des parts inférieures à 1%. Encore une fois, les concentrations peuvent être plus élevées dans certaines gares. Par exemple, la teneur moyenne en gare de Porte de Clichy dépasse 400 ng/m³ en Chrome.

Les proportions en **Arsenic, Cadmium, Antimoine, Nickel, et Plomb** sont négligeables par rapport aux métaux précédemment évoqués. **Les concentrations peuvent être élevées dans certaines**

⁷ Dans les gares où l'Aluminium a été mesuré

gares, comme par exemple l'Antimoine sur les gares étudiées de la ligne B, à savoir en gare de Sevrans-Beaudottes (533 ng/m³) et d'Aéroport Charles de Gaulle (150 ng/m³) ou encore en gare de Cergy-le-Haut (136 ng/m³). Les teneurs en Nickel sont d'environ 30 ng/m³, le maximum étant de 70 ng/m³ en gare de Sevrans-Beaudottes. Enfin, les teneurs en Plomb peuvent atteindre plusieurs dizaines de ng/m³, le maximum ayant été enregistré en gare des Invalides (55 ng/m³).

Les sources de métaux identifiées dans les enceintes souterraines ferroviaires sont :

- Les émissions lors du freinage. La plupart de ces composés peuvent être présents dans les semelles de frein : Manganèse, Fer, Chrome, Plomb, Cuivre, Nickel, Antimoine.
- Les émissions lors du roulage. Les principaux composés des rails ou encore des roues sont le Fer, le Chrome, le Nickel ou encore le Manganèse.

La principale source de Fer dans les enceintes souterraines ferroviaires est l'usure des rails par friction (lors du freinage, mais également lors de la circulation des trains). Le Fer peut également être présent dans les semelles de frein.

Le Cuivre peut être présent dans les câbles d'alimentation. Dans les enceintes souterraines ferroviaires, il est émis lors du contact entre les pantographes et les caténaires (système d'alimentation). Il peut également être présent dans les semelles de frein et par conséquent il peut être émis lors du freinage.

Aussi la variabilité observée selon les gares s'explique d'une part par la configuration de la gare (volume de la gare, influence de l'air extérieur), mais également par les caractéristiques de la ligne de RER (différences en matière de câbles d'alimentation, de composition de semelles de freinage, composition des rails) et du matériel roulant.

Les résultats concernant les métaux mesurés sont cohérents avec les sources identifiées et avec les résultats de la littérature⁶. L'analyse bibliographique dans les réseaux ferroviaires français (hors réseau francilien) met en avant le Fer comme élément dominant, suivi du Cuivre, du Zinc, de l'Antimoine et du Manganèse.

Les résultats à l'échelle des grandes villes mondiales mettent également en avant le Baryum (non mesuré), le Nickel et le Chrome. Ainsi, les observations sur le réseau francilien sont cohérentes avec les résultats dans des environnements similaires.

La part des métaux mesurés dans les particules PM₁₀ varie de manière importante selon les gares.

Les métaux représentent entre 18% à 53% de la masse de PM₁₀, selon les gares.

Ces différences sont dues d'une part, aux configurations des gares (volume plus ou moins important, influence de l'air extérieur) et d'autre part, aux différences liées à la ligne (différences en matière de câbles d'alimentation, de composition de semelles de freinage, composition des rails).

Le **Fer** est l'élément majoritaire : il représente généralement entre environ 93% et 97% des métaux mesurés sur l'ensemble des gares, à quelques exceptions près. Les gares présentant moins de Fer dans les métaux sont des gares terminus.

Viennent ensuite le **Cuivre**, le **Zinc**, le **Manganèse et l'Aluminium**, dans des proportions moindres (de l'ordre de quelques %).

En termes de concentrations, les teneurs moyennes observées dans certaines gares peuvent être plus élevées que dans d'autres gares : à titre d'exemple, les teneurs moyennes en Fer dépassent 100 µg/m³ dans certaines gares.

3. FACTEURS D'INFLUENCE

3.1 INFLUENCE DE LA QUALITE DE L'AIR EXTERIEUR

Les polluants de l'air extérieur peuvent se retrouver dans les enceintes ferroviaires souterraines, de façon plus ou moins marquée selon la profondeur de la gare, les accès vers l'extérieur et le système de ventilation en place notamment. L'influence sera d'autant plus importante que la gare est peu profonde et qu'il existe plusieurs accès vers l'extérieur (voies d'accès par exemple) et un système de ventilation en marche.

La qualité de l'air extérieur est influencée au quotidien par les émissions anthropiques ou naturelles, les conditions météorologiques et les imports de polluants (plus ou moins importants selon la provenance des masses d'air, et qui est particulièrement vrai pour les particules). Aussi, il est important de connaître les paramètres météorologiques observés lors des mesures afin de savoir s'ils ont été ou non favorables à l'accumulation de la pollution atmosphérique. Des conditions dispersives des polluants atmosphériques correspondent à des états dépressionnaires, avec un temps pluvieux et/ou venteux. A l'inverse, des temps anticycloniques, avec peu de vent et/ou des inversions de température, sont des conditions météorologiques défavorables pour la qualité de l'air extérieur.

A titre d'exemple, une comparaison des moyennes journalières en particules PM₁₀ sur le quai de la **gare de Bibliothèque François Mitterrand** avec les niveaux enregistrés en air extérieur est présentée à la Figure 14.

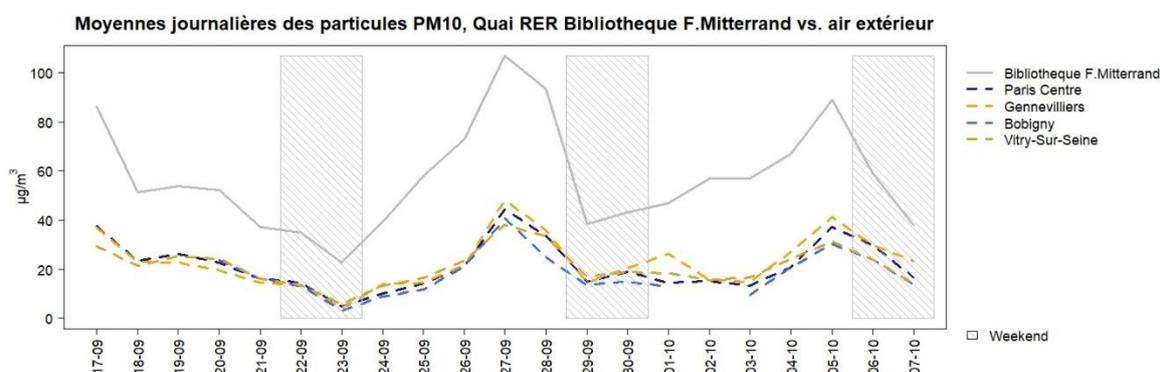


Figure 14 – Evolution des teneurs journalières en PM₁₀ en gare de Bibliothèque François Mitterrand et en air extérieur (situation de fond à Paris Centre, Gennevilliers et Vitry-sur-Seine, en proximité du trafic routier à Boulevard Périphérique Porte d'Auteuil), période du 17/09 au 07/10/2018.

Les teneurs moyennes en PM₁₀ enregistrées sur le quai à Bibliothèque François Mitterrand sont corrélées aux niveaux enregistrés en air extérieur par les stations du réseau Airparif, ce qui met en évidence une influence de l'air extérieur, et qui est dû à la configuration même de la gare, semi-ouverte.

Un autre exemple, celui de la **gare Saint-Michel-Notre-Dame**, est présenté à la Figure 15. Les concentrations journalières en particules PM₁₀ observées sur le quai RER de Saint-Michel-Notre-Dame et les teneurs en air extérieur⁸ sont présentées entre le 30/11/2016 et le 11/02/2017 (période

⁸ Gennevilliers : 60 rue Richelieu, Gennevilliers, situation de fond ; Boulevard Périphérique Porte d'Auteuil : Paris 16ème, proximité du trafic routier.

au cours de laquelle des dépassements de seuils d'information ou d'alerte de la population⁹ ont été enregistrés en extérieur). Les augmentations de niveaux observés en air extérieur les jours d'épisodes de pollution (en bleu sur le graphique) se retrouvent sur le quai, mais de façon plus ou moins marquée selon les jours.

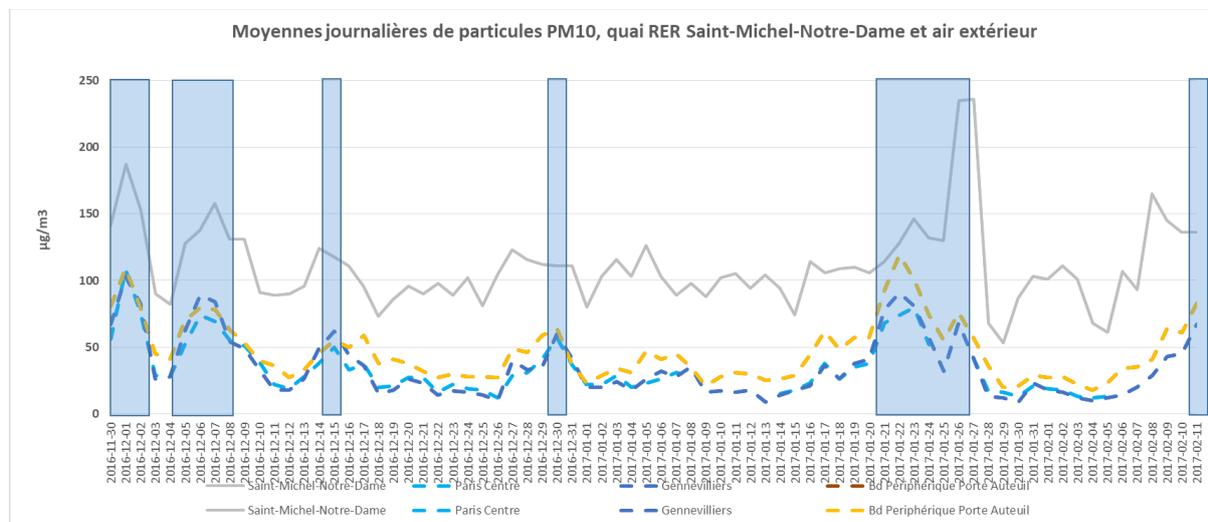


Figure 15 – Moyennes journalières des concentrations en particules PM₁₀, en air extérieur (stations de fond de Paris Centre et Gennevilliers, à proximité du trafic routier au Boulevard Périphérique Porte d’Auteuil) et en gare de Saint-Michel-Notre-Dame, entre le 30/11/2016 et le 11/02/2017. En bleu les épisodes de pollution.

La Figure 16 présente une comparaison des moyennes journalières en **particules PM_{2.5}** sur le quai de la **gare de Bras-de-Fer** avec les niveaux enregistrés en air extérieur est présentée. Comme pour les particules PM₁₀, présenté précédemment, **les teneurs en particules PM_{2.5} enregistrées sur ce quai sont corrélées aux niveaux enregistrés en air extérieur par les stations du réseau Airparif, ce qui met en évidence une influence de l'air extérieur.** Cette influence varie toutefois selon les gares. Pour certaines gares, il n'existe pas de corrélation entre les teneurs sur le quai et les concentrations en air extérieur.

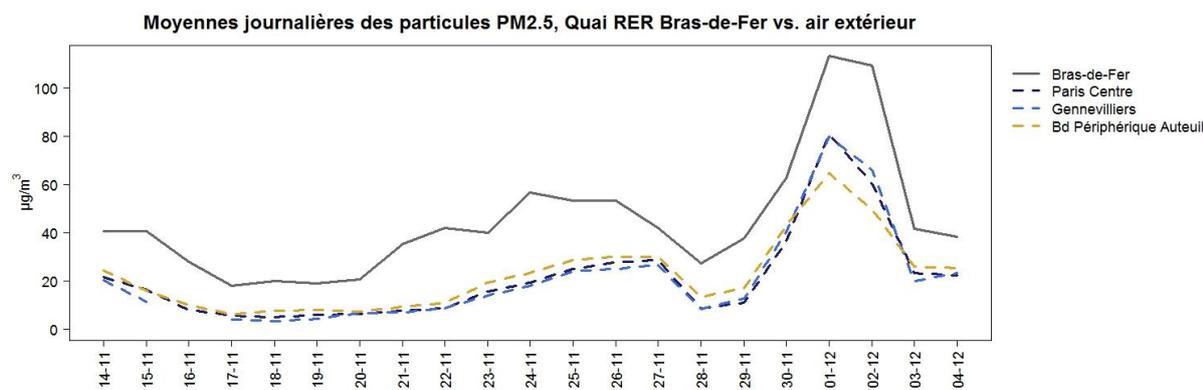


Figure 16 – Evolution des teneurs journalières en PM_{2.5} en gare de Bras-de-Fer et en air extérieur (situation de fond à Paris Centre, Gennevilliers et en proximité du trafic routier à Boulevard Périphérique Porte d’Auteuil), période du 17/09 au 07/10/2018.

Les augmentations de niveaux observées en air extérieur les jours d'épisode de pollution se retrouvent sur le quai, aussi bien pour les particules PM₁₀ que pour les particules PM_{2.5}, mais de façon plus ou moins marquée selon les jours et les gares. A noter que l'influence de l'air extérieur d'une manière générale (épisode de pollution ou non), étudiée pour chaque gare, n'apparaît pas de façon aussi évidente que sur cet exemple. Par les facteurs explicatifs, l'ouverture des quais sur l'extérieur ou encore la profondeur de la gare peuvent être avancés.

⁹ Conformément à l'arrêté inter-préfectoral du 19/12/2016. Détails sur les épisodes de pollution de décembre 2016 via le document https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/bilan-2016.pdf pages 79 à 86

3.2 INFLUENCE DU NOMBRE TRAINS EN CIRCULATION

Il est traité dans ce paragraphe à titre d'exemple l'influence du nombre de trains en circulation en gare de Saint-Michel-Notre-Dame. L'étude de l'influence du nombre de trains sur les niveaux mesurés sur les quais a été réalisée pour chaque gare, les résultats sont présentés dans chaque rapport dédié aux gares.

Le **nombre de trains circulant** en gare de Saint-Michel-Notre-Dame a été transmis par la SNCF Gares d'Ile-de-France, ceci selon les différentes périodes : JOB (jours ouvrés du mardi au jeudi), samedi et dimanche, et jours fériés, pendant la campagne de mesure.

En moyenne, les jours ouvrés, 477 trains circulent en gare de Saint-Michel-Notre-Dame. Le samedi, ce sont 430 trains qui circulent et 369 trains le dimanche. Il s'agit du nombre de trains théoriques en circulation. Les chiffres sont présentés à la Figure 17.

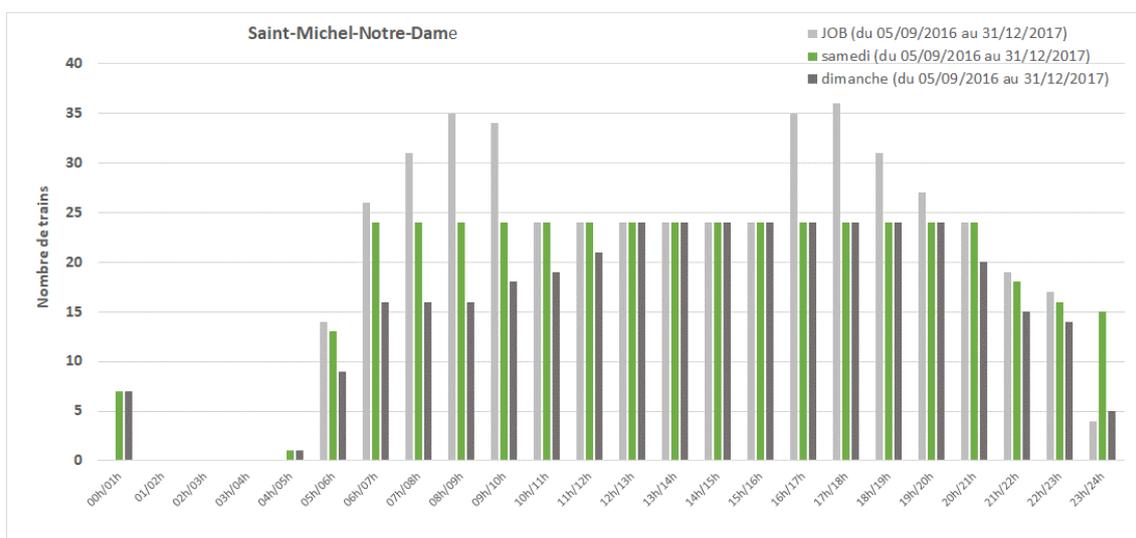


Figure 17 – Nombre de trains enregistrés chaque heure à la gare RER C de Saint-Michel-Notre-Dame, période du 05/09/2016 au 31/12/2017.

Un croisement du nombre de trains en circulation avec les concentrations moyennes en particules PM_{10} et $PM_{2.5}$ à l'échelle journalière est présenté à la Figure 18 pour les jours ouvrés en gare de Saint-Michel-Notre-Dame.

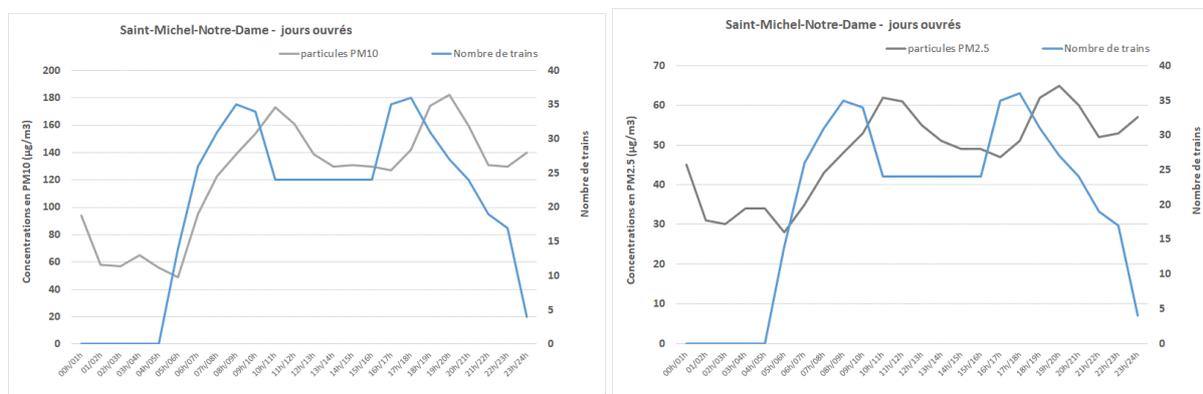


Figure 18 – Profils journaliers moyens des teneurs en particules PM_{10} , $PM_{2.5}$ et du nombre de trains en circulation à la gare RER C de Saint-Michel-Notre-Dame, période du 05/09/2016 au 31/12/2017 (jours ouvrés).

Le profil journalier des teneurs en particules (PM_{10} et $PM_{2.5}$) est corrélé au nombre de trains en circulation. Un décalage horaire d'une heure apparaît, qui peut s'expliquer par le délai de mesure : la valeur affichée à 10h correspond aux mesures réalisées entre 9h et 10h.

Un croisement du nombre de trains en circulation avec les concentrations en particules en fonction du type de jour de la semaine est présenté à la Figure 19. A l'échelle hebdomadaire, les teneurs observées en particules (PM₁₀ et PM_{2.5}) sont liées au nombre de trains en circulation.

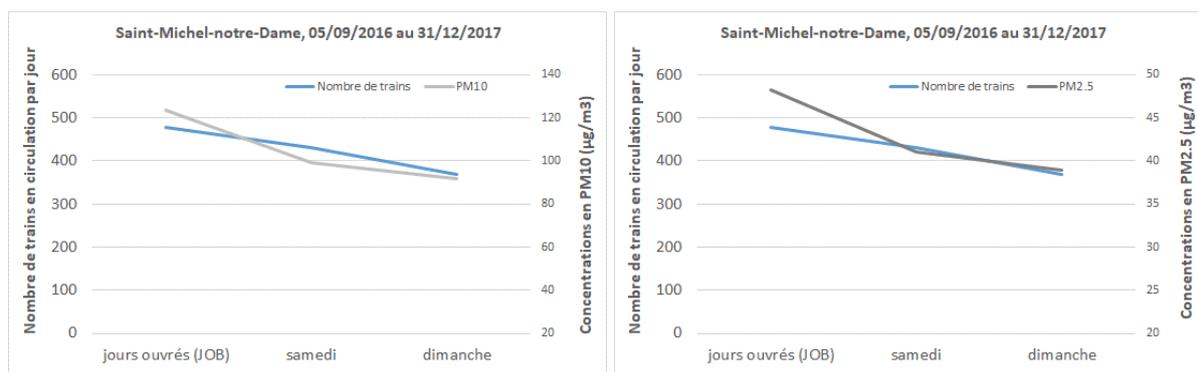


Figure 19 – Teneurs en particules PM₁₀ et PM_{2.5} observées et nombre de trains en circulation, pour les jours ouvrés, le samedi et le dimanche, à la gare RER C de Saint-Michel-Notre-Dame, période du 05/09/2016 au 31/12/2017.

Ces résultats montrent que la circulation des trains est un facteur d'influence sur les teneurs en particules (remise en suspension des particules, abrasion). Cette influence est observable sur les particules PM₁₀ et dans une moindre mesure sur les particules PM_{2.5}.

Il existe toutefois des différences selon les gares. L'influence du nombre de trains sur les teneurs en particules en gare est plus ou moins marquée selon les gares, notamment en fonction de la configuration de la gare (ouverture partielle des quais, ventilation existante ou pas, etc.).

3.3 AUTRES FACTEURS D'INFLUENCE

Les facteurs d'influence potentiels, dont les données sont disponibles, ont été exploités afin d'expliquer la variabilité des teneurs en particules selon les gares.

Les différents paramètres étudiés sont (mis à part le nombre de trains et l'air extérieur, étudiés précédemment) :

- la ligne de RER (B, C, D...),
- le nombre de voyageurs par jour,
- la présence ou non de travaux externes à la gare,
- la typologie de la gare (mixte ou souterraine),
- la typologie des tunnels et leur ouverture (ouverts des deux côtés, ouverts sur un côté seulement, ouvertures partielles...),
- la présence de correspondance (avec ou sans),
- la présence d'une ventilation mécanique,
- l'occurrence de travaux nocturnes sur les infrastructures,
- la température dans la gare,
- les niveaux de CO₂ dans la gare (indiquant le volume de voyageurs),
- l'année d'ouverture de la gare.

L'analyse statistique montre que certains facteurs, comme la ligne de RER, la température ou encore la présence de correspondance, n'ont pas d'influence claire sur les niveaux de particules.

La présence d'un **système de ventilation** a un impact important sur les concentrations de particules sur les quais. Seules les gares d'Haussmann-Saint-Lazare et Magenta, sur la ligne E, en sont pourvues. Ces deux gares, équipées d'une ventilation mécanique, présentent des concentrations faibles en particules PM₁₀ et PM_{2.5}. La ventilation est un paramètre influençant les teneurs en particules mesurées sur le quai.

La **configuration de la gare**, notamment si elle possède une **partie aérienne**, a également un impact important sur les teneurs en particules sur les quais. Ainsi, des gares comme Avenue du Président Kennedy et Invalides présentent des concentrations les plus faibles en particules PM₁₀ et PM_{2.5} sur la ligne du RER C.

La fréquentation d'une gare (le nombre de voyageurs) n'explique pas à elle seule les concentrations en particules observées sur les quais. A titre d'exemple, le nombre de voyageurs en gare d'Avenue Foch est d'environ 1800 voyageurs/jour¹⁰, pour des teneurs moyennes en particules PM₁₀ de l'ordre de 180 µg/m³. A l'inverse, en gare d'Austerlitz, le nombre de voyageurs est bien plus important (28 000 voyageurs/jour) et les concentrations en particules plus faibles (128 µg/m³ sur la période d'étude). Aussi les concentrations en particules PM₁₀ ne sont pas proportionnelles aux nombres de voyageurs.

L'influence de paramètres comme les concentrations en air extérieur, le nombre de train, la ventilation ou encore les paramètres techniques a été étudiée dans les gares investiguées.

- **Le nombre de trains en circulation influence directement les teneurs en particules** sur le quai, d'où des maxima observés aux heures de pointe les jours ouvrés. L'influence du nombre de trains est visible au niveau journalier et au niveau hebdomadaire : les concentrations sont plus faibles le week-end lorsque moins de trains circulent.
- **L'air extérieur influence de façon variable les teneurs en particules sur les quais des gares.** Les concentrations en particules observées sur le quai RER de Saint-Michel-Notre-Dame sont impactées par les niveaux en air extérieur en cas de fortes teneurs en extérieur : lors d'épisodes de pollution, de forts niveaux se retrouvent également sur le quai. A l'échelle mensuelle ou journalière, l'impact de l'air extérieur sur les quais n'est pas visible ; **la source prédominante de pollution aux particules sur les quais reste la circulation ferroviaire.**
- L'analyse statistique des autres potentiels facteurs d'influence n'a pas permis de trouver un lien entre l'un de ces facteurs et les concentrations en particules sur les quais :

Par exemple, la **fréquentation d'une gare (le nombre de voyageurs)** n'explique pas à elle seule les concentrations en particules observées sur les quais.

Toutefois, une **configuration de gare avec une partie aérienne** a un impact important sur les teneurs en particules sur les quais. Les concentrations y sont plus faibles en particules PM₁₀ et PM_{2.5} du fait d'un moindre confinement favorisant la dispersion des particules.

Enfin les deux gares qui bénéficient **d'un système de ventilation** présentent les teneurs en particules les plus faibles.

¹⁰ Nombre de montants par jour, 2016, source SNCF.

4. CONCLUSION

Ce rapport présente les résultats de l'étude réalisée en partenariat entre Airparif et SNCF Gares Ile-de-France (et son laboratoire d'analyse AEF) sur 25 gares franciliennes sur la période 2016-2018 (report en 2021 pour Pont de l'Alma suite à la fermeture de la gare pour travaux). La campagne de mesure a permis de déterminer les niveaux moyens en particules fines PM_{10} et en particules très fines $PM_{2.5}$ dans chaque gare, ainsi que la teneur de certains métaux.

Les éléments à retenir concernant les **particules PM_{10}** et **$PM_{2.5}$** sont :

- Les **niveaux moyens sur toute la période de mesure en particules PM_{10} sont très variables selon les gares**, de $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (enregistré à la gare de Haussmann-Saint-Lazare en octobre 2016) à $230 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (enregistré à la gare de Sevran-Beaudottes en octobre 2017). A titre de comparaison, la moyenne observée à la station de référence Saint-Michel-Notre-Dame est de $119 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur l'ensemble de la période de mesure.
- Concernant les **niveaux moyens en particules $PM_{2.5}$, l'écart entre les gares est moindre**. Le minimum enregistré est de $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (enregistré à la gare de Cergy-Le-Haut en janvier 2017) alors que le maximum atteint $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (enregistré à la gare de l'Aéroport Charles-De-Gaulle 1 en mai/juin 2017). A titre de comparaison, la moyenne observée à la station de référence Saint-Michel-Notre-Dame est de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur l'ensemble de la période de mesure.

Concernant les variations temporelles des particules :

- **A l'échelle hebdomadaire**, les profils montrent généralement des **teneurs les jours ouvrés (du lundi au vendredi) plus élevées que le week-end**, ceci pour les PM_{10} et dans une moindre mesure pour les $PM_{2.5}$. Les variations entre les jours ouvrés et les week-ends sont plus marquées sur les gares présentant de fortes concentrations.
- **Sur une journée ouvrée moyenne**, les niveaux nocturnes (entre 1h et 5h) sont les plus faibles. Ils augmentent en journée lors de la reprise d'activité au sein de la gare. **Les concentrations sont maximales lorsque la fréquentation de la gare est maximale, à savoir lors des heures de pointe du matin et du soir.**

Un zoom sur le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ permet de mieux comprendre la répartition des particules selon leur taille rencontrée en gare :

- **Le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ moyen est compris entre 0,3 et 0,55, en lien avec les particules émises par le trafic ferroviaire (passage des trains, freinage, remise en suspension), qui sont de grosse taille.**
- **A l'échelle journalière, les ratios sont stables en journée (environ 0,4 entre 7h et 24h)** et en hausse la nuit (autour de 0,6), en lien avec les sources de particules PM_{10} relativement moins importantes (pas de circulations de trains et pas de remise en suspension par le public) que celles des particules très fines $PM_{2.5}$.
- A l'échelle hebdomadaire, peu de variations sont observées.

Certains métaux, traceurs du trafic ferroviaire, ont été étudiés :

- **La part des métaux dans les particules PM_{10} varie de manière importante selon les gares.** Les métaux représentent entre 18% à 53% de la masse de PM_{10} , selon les gares.

Ces différences sont dues d'une part, aux configurations des gares (volume plus ou moins important, influence de l'air extérieur) et d'autre part, aux différences liées à la ligne (différences en matière de câbles d'alimentation, de composition de semelles de freinage, composition des rails).

- **Le Fer est l'élément majoritaire** : il représente généralement entre **93% et 97% des métaux mesurés** sur l'ensemble des gares.
- Viennent ensuite le **Cuivre**, le **Zinc**, le **Manganèse et l'Aluminium**, dans des proportions moindres (de l'ordre de quelques %).

L'influence potentielle de différents paramètres (comme les concentrations en air extérieur, la ventilation ou encore les paramètres techniques) sur les concentrations de particules sur les quais ont été étudiés :

- **Le nombre de trains en circulation influence directement les teneurs en particules** sur le quai, d'où des maxima observés aux heures de pointe. L'influence du nombre de trains est visible au niveau journalier et au niveau hebdomadaire (jours ouvrés/week-end) : les concentrations sont plus faibles le week-end lorsque moins de trains circulent.
- **L'air extérieur influence de façon variable les teneurs en particules sur les quais des gares.** Les concentrations en particules observées sur le quai RER de Saint-Michel-Notre-Dame sont impactées par les niveaux en air extérieur en cas de fortes teneurs en extérieur : lors d'épisodes de pollution, de forts niveaux se retrouvent également sur le quai. A l'échelle mensuelle ou journalière, l'impact de l'air extérieur sur les quais n'est pas visible ; **la source prédominante de pollution aux particules sur les quais reste la circulation ferroviaire.**
- L'analyse statistique des autres potentiels facteurs d'influence n'a pas permis de trouver un lien entre l'un de ces facteurs et les concentrations en particules sur les quais. Toutefois, la présence d'un **système de ventilation** permet de diminuer les concentrations en particules sur les quais.

Le suivi en continu des teneurs en particules dans les gares franciliennes perdure via les mesures dans **trois gares de référence**, choisies en fonction de leurs niveaux, à savoir :

- Magenta (RER E), représentant une gare faiblement polluée ;
- Saint-Michel-Notre-Dame, remplacée depuis 2018 par Avenue Foch (RER C) : Les concentrations en particules dans ces gares peuvent être considérées de moyens par rapport à l'ensemble des gares investiguées ;
- Sevrans-Beaudottes (RER B), qui présente les teneurs en particules parmi les plus élevées de celles observées pendant cette étude.

En complément des mesures présentées dans ce rapport, des mesures spécifiques dans les microenvironnements de la gare ont été réalisées avec un appareil portable, afin de caractériser la variabilité des niveaux de particules au cours de la journée de travail et dans les microenvironnements fréquentés par les agents SNCF. Les résultats ont été restitués individuellement aux agents ayant réalisé les mesures, ainsi qu'à leurs représentants, de façon collective ou anonyme. Ces mesures portatives ont mis en évidence que **le quai des gares est l'environnement des gares le plus exposant aux particules**, ceci quelle que soit la gare étudiée. Les autres environnements, comme le hall d'accueil, les couloirs ou encore les bureaux, sont moins exposés aux particules.

La SNCF travaille sur la réduction des particules dans ses enceintes ferroviaires souterraines. En 2019 ont débuté des expérimentations en gare d'Avenue Foch menées par les lauréats de l'appel à projets « Innovons pour l'air de nos gares » lancé par la Région Ile-de-France en 2018.

ANNEXE 1 :

DETAILS SUR LES CAMPAGNES DE MESURE : GARE, LIGNE, PERIODE DE MESURE, LIEN VERS RESULTATS

Gare	Ligne RER	Date début mesures	Date fin mesures	Opérateur	Lien rapport
Aéroport Ch. De Gaulle 1	B	22/05/2017	11/06/2017	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_CampagneGareCDG1_0318.pdf
Austerlitz	C	05/09/2016	25/09/2016	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_CampagneGareAusterlitz_0517.pdf
Avenue Foch	C	04/10/2016	18/10/2016	AEF	http://www.iseo.fr/sncf/rapports/DOC046151-00.signed.pdf
		12/04/2018	en cours	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/pollution/air-interieur-gare
Avenue Henri Martin	C	20/05/2017	04/06/2017	AEF	http://www.iseo.fr/sncf/rapports/DOC047122-00.signed.pdf
Av. du President Kennedy	C	02/10/2017	22/10/2017	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_CampagneGareAvenuePresidentKennedy_0618.pdf
Bibliothèque François Mitterrand	C	17/09/2018	07/10/2018	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_CampagneGareBFM_0619.pdf
Boulaivilliers	C	10/09/2016	25/09/2016	AEF	http://www.iseo.fr/sncf/rapports/DOC044213-00.signed.pdf
Bras-de-Fer	D	14/11/2016	12/12/2016	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_CampagneGareBrasdeFer_1117.pdf
Cergy-Le-Haut	A/L	10/06/2017	25/06/2017	AEF	http://www.iseo.fr/sncf/rapports/DOC046567-00.pdf
Cergy-Prefecture	A/L	09/01/2017	29/01/2017	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_CampagneGareCergyPrefecture_1117.pdf
Champ de Mars	C	18/06/2018	08/07/2018	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_CampagneGareChampDeMars_0619.pdf
La Defense	U/L	18/11/2017	03/12/2017	AEF	http://www.iseo.fr/sncf/rapports/DOC047580-00.signed.pdf
Evry Courcouronnes	D	04/12/2017	24/12/2017	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_CampagneGareEvryCourcouronnes_0918.pdf.pdf
Grigny Centre	D	19/06/2017	09/07/2017	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_CampagneGareGrignyCentre_0318.pdf
Hausmann-Saint-Lazare	E	03/10/2016	23/10/2016	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_CampagneGareHausmann_0617.pdf
Invalides	C	29/10/2016	13/11/2016	AEF	http://www.iseo.fr/sncf/rapports/DOC047121-00.signed.pdf
Magenta	E	01/2016	en cours	AEF	http://www.iseo.fr/sncf/generic.html
					http://www.iseo.fr/sncf/rapports/DOC047931-00.signed.pdf
Musee d'Orsay	C	26/03/2018	15/04/2018	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_CampagneGareMuseeOrsay_1218.pdf
Neuilly Porte Maillot	C	18/04/2017	09/05/2017	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_CampagneGareNeuillyPorteMaillot_0318.pdf
Pereire Levallois	C	14/05/2018	10/06/2018	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_CampagneGarePereireLevallois_0619.pdf
Pont de l'Alma	C	07/06/2021	28/06/2021	Airparif	https://www.airparif.fr/etudes/2021/qualite-de-lair-interieur-quais-rer-c-pont-de-lalma-2021.pdf
Porte de Clichy	C	04/09/2017	24/09/2017	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_CampagneGarePorteClichy_0618.pdf
Saint-Michel-Notre-Dame	C	07/09/2016	31/12/2017	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_CampagneGareSMND_0519.pdf
Saint-Ouen	C	20/02/2017	12/03/2017	Airparif	https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapport_CampagneSaint-Ouen_1017.pdf
Sevran Beaudottes	B	14/10/2017	29/10/2017	AEF	http://www.iseo.fr/sncf/rapports/DOC047520-00.pdf
		01/01/2018	en cours	AEF	http://www.iseo.fr/sncf/index.html#five

ANNEXE 2 :

DETAILS TECHNIQUES DES MESURES

Indicateurs de la pollution retenus

Les connaissances d'Airparif et de la SNCF en matière de pollution (pollution extérieure pour le premier, notamment au travers de la cinquantaine de stations de mesure permanentes composant le réseau d'Airparif ; pollution intérieure dans les enceintes souterraines ferroviaires pour le second, au travers des études temporaires réalisées par la SNCF), ainsi que des analyses bibliographiques sur le sujet, permettent de définir les polluants atmosphériques à mesurer afin de répondre aux objectifs de l'étude.

L'air à l'intérieur des espaces souterrains ferroviaires est caractérisé par la présence de **particules**. Elles proviennent majoritairement de la circulation des trains (systèmes de freinage, ballast ...), mais également de l'air extérieur.

Dans le cadre du partenariat, les particules fines PM₁₀ et très fines PM_{2.5} sont mesurées.

Certains **métaux**, traceurs du trafic ferroviaire, sont également mesurés pour caractériser la pollution intérieure. Le trafic ferroviaire, via principalement le roulage des trains et le système de freinage, est un émetteur important.

Enfin, les paramètres de confort (CO₂, Humidité relative et Température) ont été suivis.

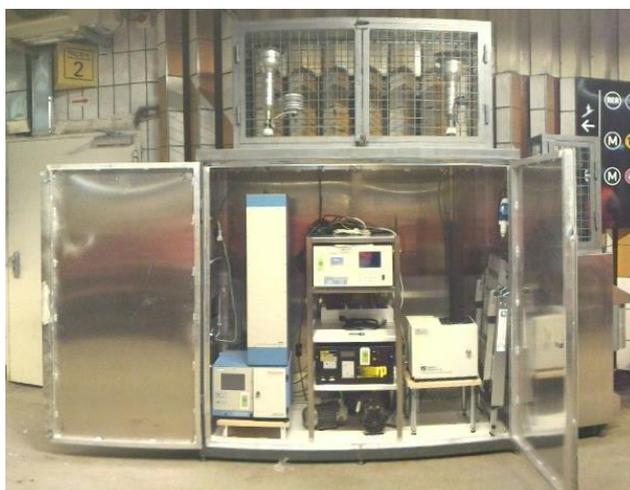
Moyens techniques mis en œuvre

ANALYSEURS AUTOMATIQUES

Des sites automatiques, renseignant les concentrations de pollution au pas de temps horaire, ont été mis en place, ceci en cohérence avec la nécessité de disposer de données temporelles fines de pollution pour l'interprétation des résultats.

La station de mesure se présente sous forme d'une station classique de mesure de la qualité de l'air, équipée d'analyseurs automatiques installés au sein d'une armoire spécifique dans le cadre de cette étude. Une station d'acquisition permet un échange régulier d'informations depuis le siège de l'opérateur.

Le fonctionnement d'une station mobile est identique à celui de l'ensemble des stations permanentes du réseau fixe d'Airparif et implique des contraintes techniques lourdes : accès et connexion aux lignes électriques et si possible téléphoniques, ainsi que la maintenance régulière des analyseurs.



Les concentrations en particules fines (PM₁₀)¹¹ et très fines (PM_{2,5}) ont été mesurées par analyseurs automatiques, ainsi que les NO_x sur le site de l'Avenue Foch et avant à Saint-Michel-Notre-Dame.

PRELEVEMENTS MANUELS

Toutes les mesures ne peuvent pas être réalisées par analyseur automatique : c'est le cas des métaux. La mesure se réalise en deux temps : prélèvement sur filtre, puis analyse en différé dans un laboratoire spécifique.

Pour la réalisation de ces mesures, un préleveur LECKEL a été mis en place. Les prélèvements de métaux sont réalisés sur des filtres quartz. L'analyse est réalisée selon une méthode normalisée par le laboratoire Micropolluant¹².

Afin d'être conforme aux pratiques existantes dans les enceintes souterraines, les prélèvements de métaux sont réalisés pendant 5 jours ouvrés, entre le passage du 1er train (environ 5h) et celui du dernier train (environ 1h).

La liste des métaux étudiés s'appuie en particulier sur les recommandations de l'ANSES⁶ dans les enceintes souterraines ferroviaires, à savoir :

Fer (Fe), Cuivre (Cu), Zinc (Zn), Antimoine (Sb), Manganèse (Mn), Nickel (Ni), Plomb (Pb), Arsenic (As), Cadmium (Cd), Chrome (Cr) et Aluminium (Al).

Les prélèvements ont été réalisés sur les particules PM₁₀, sur des filtres en quartz selon la norme NF EN 14902 (mesure de la fraction PM₁₀ de la matière particulaire en suspension). Le débit est d'environ 2.3 m³/h.

L'analyse est réalisée par ICPMS (Analyse par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif) selon norme NF EN 14902.



VALIDATION DES MESURES

Des opérations de vérifications, de maintenance et d'étalonnage sont réalisées régulièrement, permettant de s'assurer que les données recueillies sont d'une précision, d'une exactitude, d'une intégralité, d'une comparabilité et d'une représentativité satisfaisante.

Un processus de validation par du personnel qualifié comporte deux étapes obligatoires :

- une validation technique, réalisée quotidiennement,
- une validation environnementale, réalisée de manière hebdomadaire.

Une invalidation peut être due à un problème technique de l'analyseur, à un évènement extérieur (coupure électrique par exemple) rendant la donnée non représentative, etc.

L'exploitation des données est réalisée sur des relevés validés. Une donnée est considérée comme valide si au moins 75% de ses éléments constitutifs le sont. Par exemple, une moyenne horaire est calculable si au moins 75% (≥) de données 15 minutes sont valides, consécutives ou non sur l'heure.

¹¹ Mesures des PM₁₀ et PM_{2,5} selon la norme NF EN 12341 par FDMS (mesure par micro-balance, prise en compte de la fraction volatil des particules). A la station Magenta (mesures par AEF), mesure des PM₁₀ et des PM_{2,5} par micro-balance à l'aide des analyseurs automatiques de type RP1400 (R&P) appelés aussi TEOM, en prenant en compte la norme NF EN 12341.

¹² Micropolluant : <http://www.micropolluants-tech.fr/>

ANNEXE 3 :

STATISTIQUES DES RELEVES HORAIRES EN PARTICULES PM₁₀ ET EN PM_{2.5} A CHAQUE GARE ETUDIEE, POUR LA PERIODE DU PROGRAMME DE SURVEILLANCE DU 01/01/2016 AU 31/12/2018 (2021 POUR PONT DE L'ALMA)

Gare	Ligne RER	Date début mesures	Date fin mesures	PM ₁₀ (en µg/m ³)					PM _{2.5} (en µg/m ³)				
				moyenne	P25	P75	max horaire en service commercial	max horaire si hors service commercial	moyenne	P25	P75	max horaire en service commercial	max horaire si hors service commercial
Aéroport Ch. De Gaulle 1	B	22/05/2017	11/06/2017	170	106	241	422	--	80	47	110	203	--
Austerlitz	C	05/09/2016	25/09/2016	128	86	169	248	288	55	38	70	163	205
Avenue Foch	C	04/10/2016	18/10/2016	207	162	258	431	841	79	61	96	195	269
		12/04/2018	31/12/2018	178	96	253	1016	1318	74	42	101	453	476
Avenue Henri Martin	C	20/05/2017	04/06/2017	77	48	105	135	--	41	26	56	74	--
Av. du President Kennedy	C	02/10/2017	22/10/2017	37	21	46	154	--	15	8	19	73	--
Bibliothèque François Mitterrand	C	17/09/2018	07/10/2018	57	37	71	185	187	21	12	27	68	--
Boulaivilliers	C	10/09/2016	25/09/2016	93	52	129	289	--	36	18	49	116	--
Bras-de-Fer	D	14/11/2016	12/12/2016	98	43	140	296	--	45	21	60	167	--
Cergy-Le-Haut	A/L	10/06/2017	25/06/2017	48	11	39	591	--	9	5	9	49	--
Cergy-Prefecture	A/L	09/01/2017	29/01/2017	98	46	133	312	--	58	29	82	172	--
Champ de Mars	C	18/06/2018	08/07/2018	74	39	102	198	--	27	18	34	62	--
La Defense	U/L	18/11/2017	03/12/2017	76	36	107	455	--	28	10	35	149	--
Evry Courcouronnes	D	04/12/2017	24/12/2017	80	36	116	337	--	33	17	46	104	--
Grigny Centre	D	19/06/2017	09/07/2017	144	40	223	486	--	54	20	80	182	--
Hausmann-Saint-Lazare	E	03/10/2016	23/10/2016	21	15	25	53	--	13	9	17	41	--
Invalides	C	29/10/2016	13/11/2016	36	22	49	81	--	14	9	18	32	--
Magenta	E	01/01/2016	31/12/2016	38	23	51	162	--	13	7	16	69	--
		01/01/2017	31/12/2017	44	28	55	407	451	16	9	19	203	243
		01/01/2018	31/12/2018	61	40	81	324	--	21	14	30	137	--
Musee d'Orsay	C	26/03/2018	15/04/2018	119	88	157	257	--	47	37	59	117	185
Neuilly Porte Maillot	C	18/04/2017	09/05/2017	114	69	155	294	--	53	34	71	138	--
Pereire Levallois	C	14/05/2018	10/06/2018	87	58	115	187	--	39	27	50	84	--
Pont de l'Alma	C	07/06/2021	28/06/2021	80	37	114	204	278	33	21	44	77	--
Porte de Clichy	C	04/09/2017	24/09/2017	194	74	309	725	--	63	24	93	258	--
Saint-Michel-Notre-Dame	C	07/09/2016	31/12/2017	114	76	148	565	1911	45	30	57	176	384
Saint-Ouen	C	20/02/2017	12/03/2017	121	57	175	349	--	37	20	50	95	--
		14/10/2017	29/10/2017	230	165	310	475	--	78	58	104	159	--
		01/01/2018	31/12/2018	252	158	349	754	--	100	62	139	154	--
Sevran Beaudottes	B												

ANNEXE 4 :

RATIOS PM_{2.5} / PM₁₀ MOYENS A CHAQUE GARE ETUDIEE POUR LA PERIODE DU PROGRAMME DE SURVEILLANCE DU 01/01/2016 AU 31/12/2018 (2021 POUR PONT DE L'ALMA)

Gare	Ligne RER	Date début mesures	Date fin mesures	Ratios PM _{2.5} /PM ₁₀
Aéroport Ch. De Gaulle 1	B	22/05/2017	11/06/2017	0.53
Austerlitz	C	05/09/2016	25/09/2016	0.46
Avenue Foch	C	04/10/2016	18/10/2016	0.38
		12/04/2018	31/12/2018	0.54
Avenue Henri Martin	C	20/05/2017	04/06/2017	0.53
Av. du President Kennedy	C	02/10/2017	22/10/2017	0.48
Bibliothèque François Mitterrand	C	17/09/2018	07/10/2018	0.37
Boulaivilliers	C	10/09/2016	25/09/2016	0.39
Bras-de-Fer	D	14/11/2016	12/12/2016	0.51
Cergy Le Haut	A/L	10/06/2017	25/06/2017	0.19
Cergy-Prefecture	A/L	09/01/2017	29/01/2017	0.66
Champ de Mars	C	18/06/2018	08/07/2018	0.42
La Defense	U/L	18/11/2017	03/12/2017	0.37
Evry Courcouronnes	D	04/12/2017	24/12/2017	0.46
Grigny Centre	D	19/06/2017	09/07/2017	0.46
Hausmann-Saint-Lazare	E	03/10/2016	23/10/2016	0.63
Invalides	C	29/10/2016	13/11/2016	0.39
		01/01/2016	31/12/2016	0.34
		01/01/2017	31/12/2017	0.36
Magenta	E	01/01/2018	31/12/2018	0.33
		26/03/2018	15/04/2018	0.45
Musee d'Orsay	C	26/03/2018	15/04/2018	0.45
Neuilly Porte Maillot	C	18/04/2017	09/05/2017	0.51
Pereire Levallois	C	14/05/2018	10/06/2018	0.53
Pont de l'Alma	C	07/06/2021	28/06/2021	0.5
Porte de Clichy	C	04/09/2017	24/09/2017	0.39
Saint-Michel-Notre-Dame	C	07/09/2016	31/12/2017	0.44
Saint-Ouen	C	20/02/2017	12/03/2017	0.32
Sevran Beaudottes	B	14/10/2017	29/10/2017	0.34
		01/01/2018	31/12/2018	0.41

ANNEXE 5 :

PART DES METAUX DANS LES PARTICULES PM₁₀ (EN % DE PARTICULES) A CHAQUE GARE, SUR LES PERIODES DE PRELEVEMENTS PRECISEES, POUR LA PERIODE DU 01/01/2016 AU 31/12/2018 (2021 POUR PONT DE L'ALMA)

Gare	Ligne RER	Date début mesures métaux	Date fin mesures métaux	Part de métaux dans les particules PM ₁₀ (%)
Aéroport Ch. De Gaulle 1	B	05/06/2017	09/06/2017	32
Austerlitz	C	12/09/2016	16/09/2016	20
Avenue Foch 2016	C	03/10/2016	07/10/2016	49
Avenue Foch 2018 (20 mesures)		04/02/2018**	21/09/2018**	50
Avenue Henri Martin	C	29/05/2017	02/06/2017	51
Av. du President Kennedy	C	16/10/2017	20/10/2017	27
Bibliothèque François Mitterrand	C	17/09/2018	21/09/2018	33
Boulaivilliers	C	19/09/2016	23/09/2016	45
Bras-de-Fer	D	21/11/2016	25/11/2016	49
Cergy-Le-Haut	A/L	12/06/2017	16/06/2017	6
Cergy-Prefecture	A/L	09/01/2017	13/01/2017	41
Champ de Mars	C	02/07/2018	06/07/2018	36
La Defense	U/L	13/10/2017	17/10/2017	18
Evry Courcouronnes	D	11/12/2017	15/12/2017	35
Grigny Centre	D	19/06/2017	23/06/2017	50
Hausmann-Saint-Lazare	E	03/10/2016	07/10/2016	20
Invalides	C	07/11/2016	11/11/2016	29
Magenta 2017	E	17/04/2017	30/04/2017	24
Musee d'Orsay	C	16/04/2018	20/04/2018	44
Neuilly Porte Maillot	C	17/04/2017	21/04/2017	18
Pereire Levallois	C	21/05/2018	25/05/2018	39
Pont de l'Alma	C	14/06/2021	18/06/2021	33
Porte de Clichy	C	11/09/2017	15/09/2017	53
Saint-Michel-Notre-Dame (51 mesures)	C	12/09/2016*	15/12/2017*	36
Saint-Ouen	C	27/02/2017	03/03/2017	41
Sevran Beaudottes	B	16/10/2017	20/10/2017	31

ANNEXE 6 :

TENEURS MESUREES ET PART DANS LES PARTICULES PM₁₀(EN % DE PARTICULES) POUR CHAQUE METAL, A CHAQUE GARE, SUR LES PERIODES DE PRELEVEMENTS PRECISEES, POUR LA PERIODE GLOBALE DU 01/01/2016 AU 31/12/2018 (2021 POUR PONT DE L'ALMA)

Gare	mesures métaux	mesures métaux	Concentration Moyenne en métal mesuré (en ng/m3)											Part moyenne de chaque métal mesuré (%)										
			Aluminium	Antimoine	Arsenic	Cadmium	Chrome	Cuivre	Fer	Manganèse	Nickel	Plomb	Zinc	Aluminium	Antimoine	Arsenic	Cadmium	Chrome	Cuivre	Fer	Manganèse	Nickel	Plomb	Zinc
Aéroport Ch. De Gaulle 1	05/06/2017	09/06/2017	ND	150.1	5.2	<1	230	1689	53 955	518	40.9	0.01	356		0.3%	<0.01%	<0.01%	0.4%	3.0%	94.7%	0.9%	0.1%	<0.01%	0.6%
Austerlitz	12/09/2016	16/09/2016	ND	2.3	2.7	<1	106	396	32 232	282	17.9	0.01	381		<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.3%	1.3%	96.1%	0.9%	0.1%	<0.01%	1.3%
	03/10/2016	07/10/2016	ND	5.0	14.7	<1	406	854	117 361	981	67.1	38.73	924		<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.3%	0.7%	97.0%	0.8%	0.1%	0.03%	0.8%
Avenue Foch	04/02/2018**	21/09/2018**	989	4.1	9.2	<1	366	677	93 416	787	55.5	0.02	843	1.1%	<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.4%	0.7%	96.0%	0.8%	0.1%	<0.01%	0.9%
Avenue Henri Martin	29/05/2017	02/06/2017	ND	3.5	8.6	<1	351	782	99 659	805	49.0	33.40	894		<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.3%	0.8%	97.0%	0.8%	0.1%	0.03%	0.9%
Av. du Président Kennedy	16/10/2017	20/10/2017	352	3.9	1.2	<1	47	132	12 807	103	10.2	0.01	199	2.5%	<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.3%	1.0%	93.7%	0.7%	0.1%	<0.01%	1.6%
Bibliothèque François Mitterrand	17/09/2018	21/09/2018	467	4.2	2.2	<1	83	256	18 651	163	12.2	0.02	248	2.3%	<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.4%	1.3%	93.7%	0.8%	0.1%	<0.01%	1.2%
Boulaivilliers	19/09/2016	23/09/2016	ND	4.7	7.8	<1	228	505	65 368	531	39.3	23.10	469		<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.3%	0.8%	97.0%	0.8%	0.1%	0.03%	0.7%
Bras-de-Fer	21/11/2016	25/11/2016	ND	3.0	5.9	<1	255	261	64 279	592	34.3	0.02	967		<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.4%	0.4%	96.8%	0.9%	0.1%	<0.01%	1.5%
Cergy-Le-Haut	12/06/2017	16/06/2017	ND	11.2	0.0	<1	18	21	1 357	19	0.0	1.64	40		0.76%	<0.01%	<0.01%	1.2%	1.5%	92.4%	1.3%	0.0%	0.11%	2.8%
Cergy-Prefecture	09/01/2017	13/01/2017	ND	136.5	4.0	<1	148	210	46 730	415	34.8	0.02	992		0.3%	<0.01%	<0.01%	0.3%	0.4%	95.9%	0.9%	0.1%	<0.01%	2.1%
Champ de Mars	02/07/2018	06/07/2018	392	2.1	2.3	<1	105	369	26 225	236	17.3	0.01	234	1.4%	<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.4%	1.4%	95.0%	0.9%	0.1%	<0.01%	0.9%
La Defense	13/11/2017	17/11/2017	ND	6.9	3.7	0.7	67	212	22 960	234	22.4	30.09	2077		0.03%	<0.01%	<0.01%	0.3%	0.8%	89.6%	0.9%	0.1%	0.12%	8.1%
Evry Courcouronnes	11/12/2017	15/12/2017	322	1.4	1.5	<1	86	131	23 445	181	12.0	0.01	421	1.3%	<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.4%	0.5%	95.3%	0.7%	0.0%	<0.01%	1.7%
Grigny Centre	19/06/2017	23/06/2017	ND	6.5	6.8	<1	393	450	100 607	795	0.0	0.03	1195		<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.4%	0.4%	97.2%	0.8%	0.0%	<0.01%	1.2%
Hausmann-Saint-Lazare	03/10/2016	07/10/2016	ND	1.4	0.3	<1	18	182	3 564	36	3.4	0.01	179		<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.4%	0.4%	96.8%	0.9%	0.1%	<0.01%	1.5%
Invalides	07/11/2016	11/11/2016	ND	3.0	4.9	<1	77	434	14 620	136	11.4	54.56	184		<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.5%	2.8%	94.2%	0.9%	0.1%	0.35%	1.2%
Magenta 2017	17/04/2017	30/04/2017	ND	3.2	0.1	<1	52	630	9 375	92	9.3	0.02	446		<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.5%	5.9%	88.2%	0.9%	0.1%	0.2%	4.2%
Musee d'Orsay	16/04/2018	20/04/2018	ND	4.8	6.0	<1	257	913	65 747	595	40.4	0.03	726		<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.4%	1.3%	96.2%	0.9%	0.1%	<0.01%	1.1%
Neuilly Porte Maillot	17/04/2017	21/04/2017	ND	1.4	2.1	<1	88	236	22 693	229	19.2	0.01	394		<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.4%	1.0%	95.8%	1.0%	0.1%	<0.01%	1.7%
Peretie Levallois	21/05/2018	25/05/2018	396	1.7	4.1	<1	151	251	39 541	328	22.0	0.02	356	1.0%	<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.4%	0.6%	96.3%	0.8%	0.1%	<0.01%	0.9%
Pont de l'Alma	14/06/2021	18/06/2021	ND	2.5	2.0	<1	122	506	34 346	285	16.2	0.04	261		<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.3%	1.4%	93.1%	0.8%	0.0%	0.02%	0.7%
Porte de Clichy	11/09/2017	15/09/2017	1057	3.4	8.0	<1	415	641	103 773	821	44.7	0.03	855	1.0%	<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.4%	0.6%	96.4%	0.8%	0.0%	<0.01%	0.8%
Saint-Michel-Notre-Dame	12/09/2016*	15/12/2017*	ND	12.3	3.7	<1	154	799	45 451	384	26.4	0.02	414		<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.3%	1.8%	96.0%	0.8%	0.1%	<0.01%	0.9%
Saint-Ouen	27/02/2017	03/03/2017	ND	3.0	5.9	<1	255	261	64 279	592	34.3	0.02	967		<0.01%	<0.01%	<0.01%	0.4%	0.4%	96.8%	0.9%	0.1%	<0.01%	1.5%
Sevran Beaudottes	16/10/2017	20/10/2017	ND	533.1	11.8	4.6	473	4051	110 510	1022	69.7	27.00	614		0.45%	<0.01%	<0.01%	0.4%	3.5%	94.2%	0.9%	0.1%	0.02%	0.5%

* : 20 mesures

** : 51 mesures