

Mesures de la qualité de l'air intérieur sur les quais du RER C en gare SNCF de Avenue Foch

JANVIER-DÉCEMBRE 2022

SYNTHESE

Un programme de partenariat entre la SNCF Gares & Connexions et Airparif a été signé en avril 2016. Son objectif est de mieux connaître et améliorer la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines. Dans ce cadre, des **mesures en continu en gare RER C d'Avenue Foch** ont été mises en place depuis avril 2018.

Les particules fines (PM_{10}) et très fines ($PM_{2.5}$) sont suivies, ainsi que les métaux et les oxydes d'azote (NO et NO_2), toutefois arrêtées mi-2022.

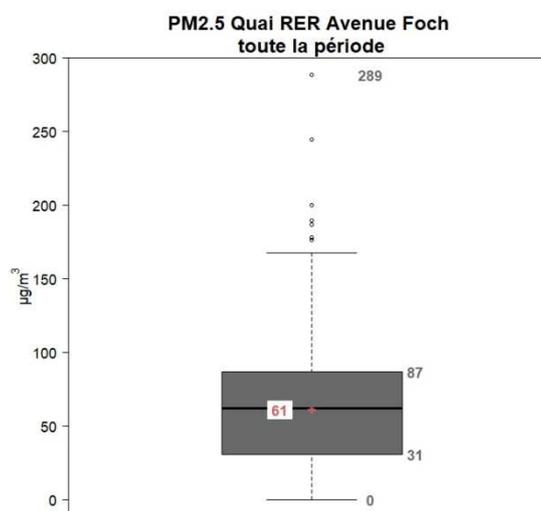
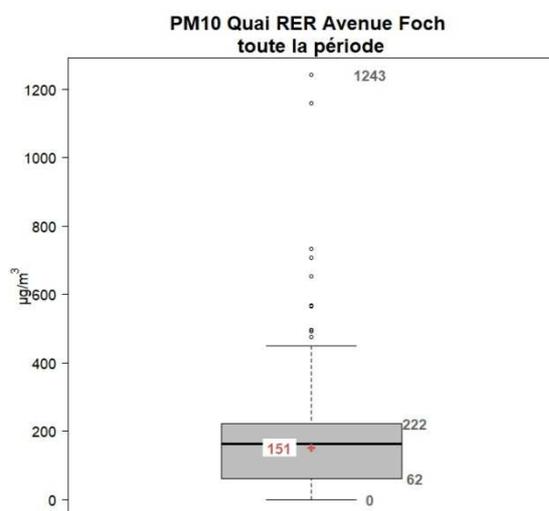
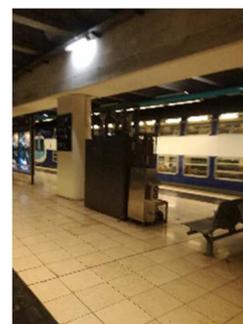
L'année 2022 a été marquée par la reprise post-covid de la circulation des trains. Le nombre de trains ayant circulé en 2022 est stable par rapport à 2021, il reste toujours inférieur au trafic de 2019 (de 20 % environ). Par contre, les voyageurs étaient moins nombreux en 2022 qu'en 2021 en gare d'Avenue Foch (1 430 en moyenne par jour en 2022, contre 2 301 en 2021).

Au cours de l'année 2022 d'importants travaux sur les voies (CASTOR) ont eu lieu l'été sur le RER C. Les mesures ont dû être suspendues du 4 Juillet au 29 août 2022. Aucune donnée n'est par conséquent disponible sur cette période.

Les principaux résultats en particules

Les teneurs en particules fines PM_{10} mesurées sur les quais du RER C en gare RER C Avenue Foch en 2022 sont en moyenne de $151 \mu g/m^3$, le maximum horaire atteint étant de $1243 \mu g/m^3$ (enregistré le mercredi 20 avril entre 2 et 3h, lors de travaux nocturnes, lorsque la gare est fermée au public).

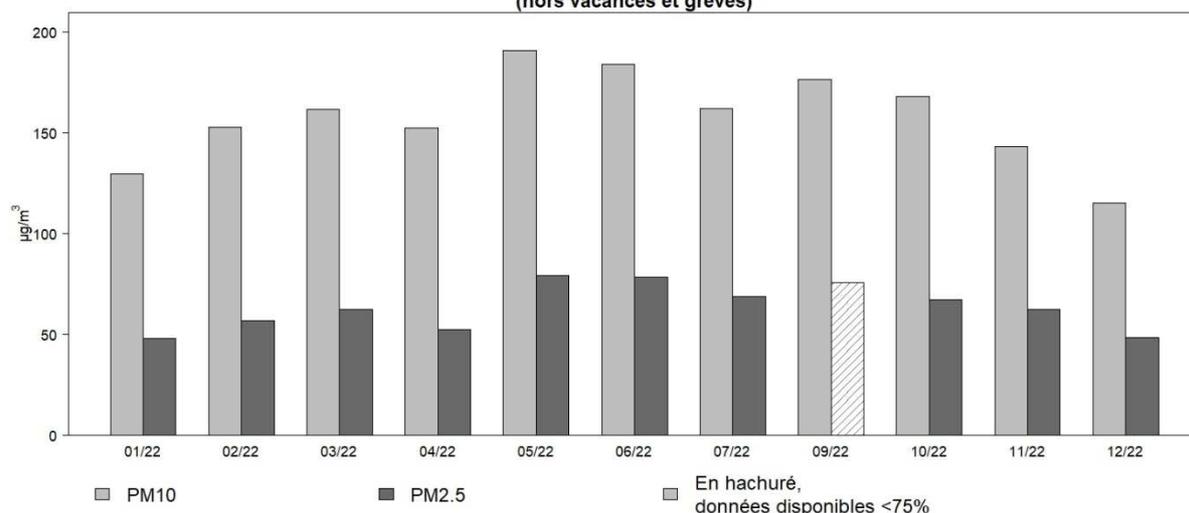
Les niveaux moyens en particules très fines $PM_{2.5}$ atteignent $61 \mu g/m^3$ en 2022, pour un maximum horaire de $289 \mu g/m^3$ (atteint le jeudi 8 décembre entre 5 et 6h, il peut s'agir du passage d'un train travaux avant l'ouverture de la gare au public).



Est-ce que les résultats varient dans le temps (à l'échelle mensuelle, hebdomadaire, horaire) ?

A l'échelle mensuelle, une forte variabilité des concentrations en particules est observée, en lien notamment avec le nombre de trains en circulation et le nombre de voyageurs. Les mois de janvier et décembre présentent les concentrations en particules les plus faibles avec $115 \mu g/m^3$ en moyenne pour les PM_{10} (décembre) et $48 \mu g/m^3$ pour les $PM_{2.5}$ (janvier). Les maxima ont été relevés au cours des mois de mai et juin : $191 \mu g/m^3$ pour les particules PM_{10} en mai et $79 \mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$ en mai et juin.

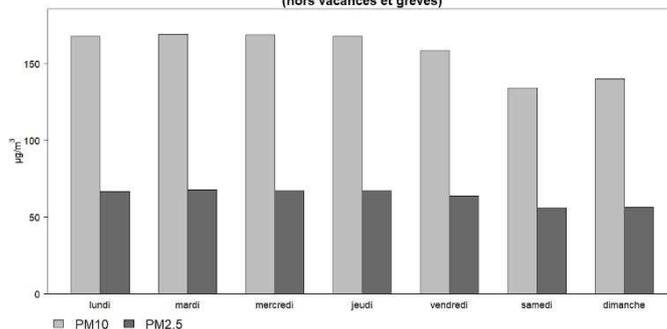
Moyennes mensuelles des particules PM10 et PM2.5, Quai RER Avenue Foch (hors vacances et grèves)



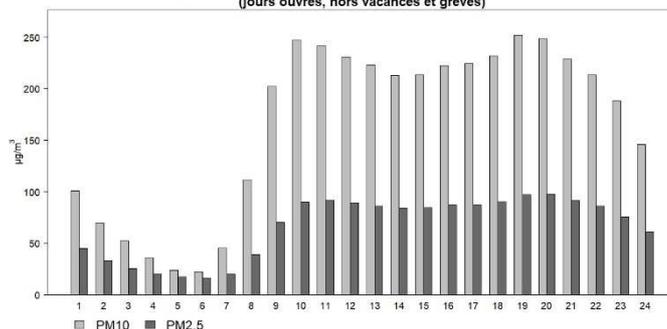
Les variations temporelles hebdomadaires et journalières sont essentiellement liées au nombre de trains en circulation, qui fluctue fortement au cours de la journée et des jours (semaine / week-ends).

A l'échelle hebdomadaire, les profils montrent des teneurs plus faibles les samedis et dimanches, comparativement aux jours ouvrés, ceci pour les PM₁₀ (avec - 18 %) et les PM_{2.5} (avec - 16 %), en lien avec la baisse de fréquentation et de trafic le week-end (nombre de voyageurs et nombre de trains).

Profils hebdomadaires des particules PM10 et PM2.5, Quai RER Avenue Foch (hors vacances et grèves)



Profils journaliers des particules PM10 et PM2.5, Quai RER Avenue Foch (jours ouvrés, hors vacances et grèves)



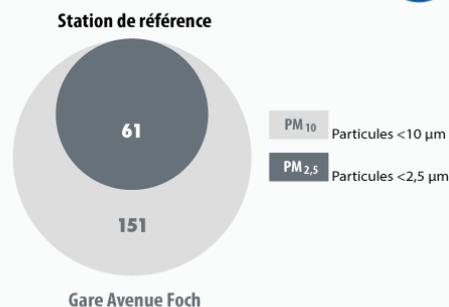
Sur une journée ouvrée, les niveaux nocturnes (1-5h) hors périodes de travaux, sont les plus faibles, avec en moyenne 45 µg/m³ en PM₁₀ et 24 µg/m³ en PM_{2.5}. Les niveaux augmentent en journée. Les concentrations sont maximales le matin (10-12h) et le soir (18-21h). A ces périodes, les concentrations sont en moyenne de 240 µg/m³ pour les PM₁₀ et 93 µg/m³ pour les PM_{2.5}.

Les concentrations sont plus importantes en service commercial (5h-1h) que sur une journée de 24h, de 14 % pour les PM₁₀ et de 12 % pour les PM_{2.5} (pour les jours ouvrés)

Ratio $PM_{2,5}/PM_{10}$: quelle moyenne, quelle fluctuation temporelle ?

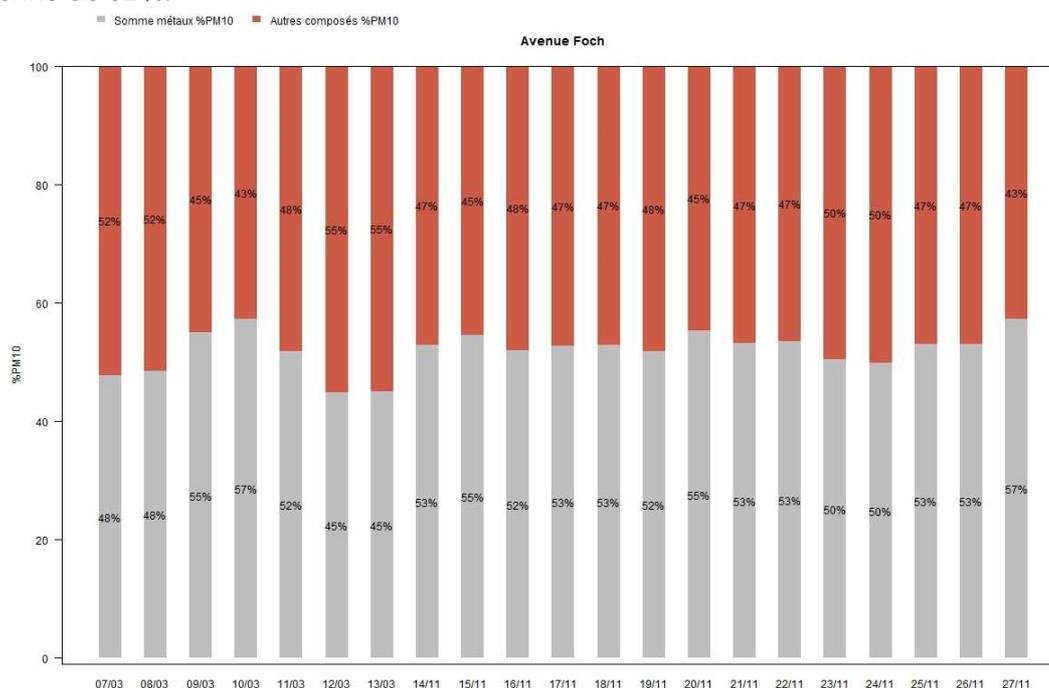
Le ratio horaire $PM_{2,5}/PM_{10}$ sur les quais de la gare RER C d'Avenue Foch est en moyenne de 0,46. Les ratios varient peu à l'échelle mensuelle ou hebdomadaire. Le profil journalier montre des ratios stables en journée (0,4 entre 8h et 24h), et en hausse la nuit (maximum à 0,73). Ceci est cohérent avec l'émission de particules plus grossières liée à la circulation des trains.

Part des $PM_{2,5}$ dans les PM_{10} en $\mu g/m^3$ de janvier à décembre 2022



Quelle est la contribution des métaux au niveau des particules ?

La part des métaux dans les prélèvements journaliers en particules PM_{10} varie de 45 à 57 % sur les 21 journées de mesures réalisées en 2022 (du 8 au 13 mars et du 14 au 27 novembre). Elle est en moyenne de 52 %.



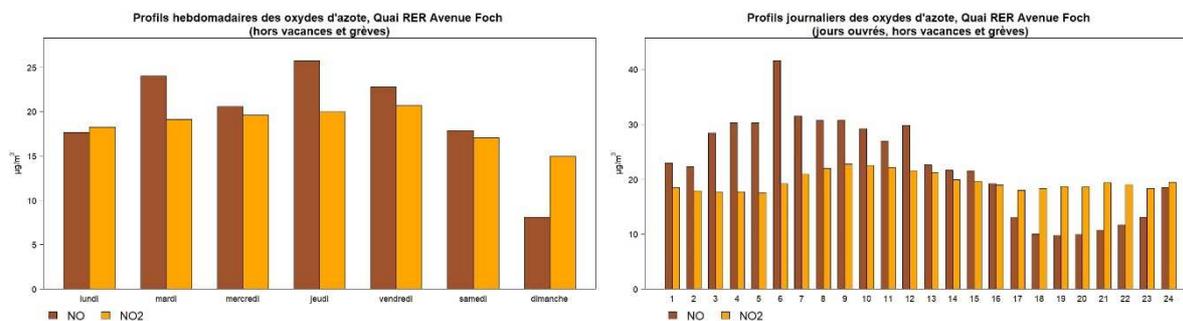
Quelle est la répartition entre les onze métaux suivis (RER C Avenue Foch, année 2022) ?

Le **Fer** est l'élément majoritaire : il représente 94 % de la masse des métaux mesurés à Avenue Foch. Suivent ensuite le **Baryum** (3,6 %), le **Manganèse** (0,8 %), le **Zinc** (0,7 %), le **Cuivre** (0,6 %) et le **Chrome** (0,3 %). Les proportions en Arsenic, Cadmium, Antimoine, Plomb et Nickel sont négligeables par rapport aux métaux précédemment évoqués.

Les principaux résultats des autres composés suivis : oxydes d'azote (NO et NO₂) (jusqu'au 30/06/2022)

La teneur moyenne relevée sur les quais de la gare RER C d'Avenue Foch en 2022 (janvier à juin) est de 18 $\mu g/m^3$ en NO et 18 $\mu g/m^3$ pour le NO₂.

A l'échelle hebdomadaire, les profils montrent des teneurs plus faibles les samedis et dimanches, comparativement aux jours ouvrés, de - 41 % pour le NO et de façon plus limitée pour le NO₂ (diminution de 18 %). Le NO₂ étant un polluant secondaire, les niveaux relevés sont moins impactés par la pollution directement émise par les locomotives diesel (trains travaux), ce qui explique la baisse moins importante relevée.



Sur une journée ouvrée, les niveaux en NO₂ sont à peu près constants, avec une moyenne de 20 µg/m³. Concernant le NO, les niveaux nocturnes (1-5h) sont les plus forts, avec en moyenne 27 µg/m³ contre 21 µg/m³ durant le service commercial (pour les jours ouvrés). La hausse des niveaux de NO la nuit s'explique par les travaux de maintenance du réseau souterrain, qui se font généralement la nuit, voire par le passage de trains à locomotive diesel.

A l'échelle mensuelle, il existe également des fluctuations, dans des proportions plus importantes en NO qu'en NO₂, en lien avec la fréquence des travaux nocturnes.

A noter que les 6 premiers mois de 2022 ont enregistré les teneurs les plus faibles en NOx depuis le début des mesures en, avril 2018, ceci en lien avec la baisse des travaux nocturnes en 2022, moins de pics nocturnes ayant été enregistrés.

Quels sont les principaux facteurs d'influence des concentrations observées sur les quais ?

- **Le nombre de trains en circulation influence directement les teneurs en particules sur le quai**, aussi bien en particules fines PM₁₀ que très fines PM_{2,5}, d'où des maxima observés aux heures de pointe les jours ouvrés, hors périodes de travaux.
- Les niveaux en CO₂, directement liés à la respiration humaine et par conséquent à la fréquentation de la gare, sont corrélés avec les niveaux de particules illustrant les heures de pointe en gare RER C Avenue Foch.
- Pour les particules PM₁₀, l'influence de l'air extérieur est négligeable par rapport aux teneurs observées sur les quais.
- Les caractéristiques du matériel roulant pourraient avoir un impact sur les concentrations en particules en gare, tout comme la vitesse d'arrivée à quai ou le freinage.

SOMMAIRE

SYNTHESE.....	3
SOMMAIRE.....	7
GLOSSAIRE.....	8
INTRODUCTION : CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	9
1. DESCRIPTION DE LA STATION AVENUE FOCH.....	11
1.1 DESCRIPTION DE LA GARE AVENUE FOCH, POLLUANTS MESURES ET LOCALISATION DU POINT DE MESURE.....	11
1.2 PERIODE DE MESURES	12
2. NIVEAUX DE POLLUANTS RENCONTRES DANS LA GARE	13
2.1 NIVEAUX MOYENS OBSERVES SUR LE QUAI : PM ₁₀ , PM _{2.5} ET NO _x	13
2.1.1. PARTICULES PM ₁₀	14
2.1.2. PARTICULES PM _{2.5}	15
2.1.3. OXYDES D'AZOTE (NO _x).....	15
2.2 VARIABILITE TEMPORELLE : PM ₁₀ , PM _{2.5} ET NO _x	17
2.2.1. VARIABILITE DES RELEVES HORAIRES PENDANT LA CAMPAGNE DE MESURE	17
2.2.2. VARIABILITE HEBDOMADAIRE	20
2.2.3. VARIABILITE JOURNALIERE.....	24
2.2.4. VARIABILITE MENSUELLE	26
2.2.5. VARIABILITE ANNUELLE.....	28
2.2.6. NIVEAUX EN SERVICE COMMERCIAL	30
2.3 LIENS ENTRE PARTICULES FINES PM ₁₀ ET PARTICULES TRES FINES PM _{2.5}	33
2.3.1. NIVEAUX MOYENS	33
2.3.2. VARIABILITE HEBDOMADAIRE	34
2.3.3. VARIABILITE JOURNALIERE.....	36
2.3.4. VARIABILITE MENSUELLE	37
2.3.5 NIVEAUX EN SERVICE COMMERCIAL	37
2.3.6 VARIABILITE ANNUELLE.....	38
2.4 TENEURS DE METAUX DANS LES PARTICULES	39
2.4.1. PART DES METAUX DANS LES PARTICULES PM ₁₀	40
2.4.2. REPARTITION DES METAUX.....	41
2.4.3. NIVEAUX OBSERVES ET VARIATIONS TEMPORELLES.....	43
3. FACTEURS D'INFLUENCE.....	45
3.1 INFLUENCE DE LA QUALITE DE L' AIR EXTERIEUR	45
3.2 CONFINEMENT DE LA GARE, PARAMETRES DE CONFORT	49
3.3 PARAMETRES TECHNIQUES, TRAFIC DE LA GARE	51
4. CONCLUSION	53
ANNEXES	55
ANNEXE 1	55
ANNEXE 2.....	56
ANNEXE 3.....	59
ANNEXE 4.....	60

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. Par exemple, la valeur du percentile 25 est la valeur pour laquelle 25% des données sont inférieures à la valeur du percentile.

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

NO Monoxyde d'azote

NO₂ Dioxyde d'azote

NO_x (NO+NO₂) Oxydes d'azote

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 en heure locale. La mesure de l'heure H représente la teneur observée entre H-1 et H.

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 collèges 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 ; prévoir la qualité de l'air au jour le jour, les épisodes de pollution et les évolutions futures ;
- **Comprendre** la pollution atmosphérique et ses impacts en lien avec le climat, l'énergie et l'exposition des personnes ;
- **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.

INTRODUCTION : CONTEXTE ET OBJECTIFS

Un programme de partenariat entre SNCF Gares & Connexions 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.

Après des mesures réalisées dans différentes gares, Airparif assure le suivi en continu de la qualité de l'air sur le quai de la gare RER C d'Avenue Foch. La station mesure au pas de temps horaire les particules fines (PM₁₀) et très fines (PM_{2,5}). Des relevés réguliers de métaux y sont également réalisés, 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), Chrome (Cr) et le Baryum (Ba).

Par ailleurs, la station Avenue Foch mesure également les oxydes d'azote (NO_x). Il s'agit de polluants issus principalement de l'air extérieur, pour lesquels les niveaux sont problématiques en Ile-de-France, et qui peuvent influencer les enceintes ferroviaires souterraines, comme tous les bâtiments ayant des ouvertures sur l'extérieur.

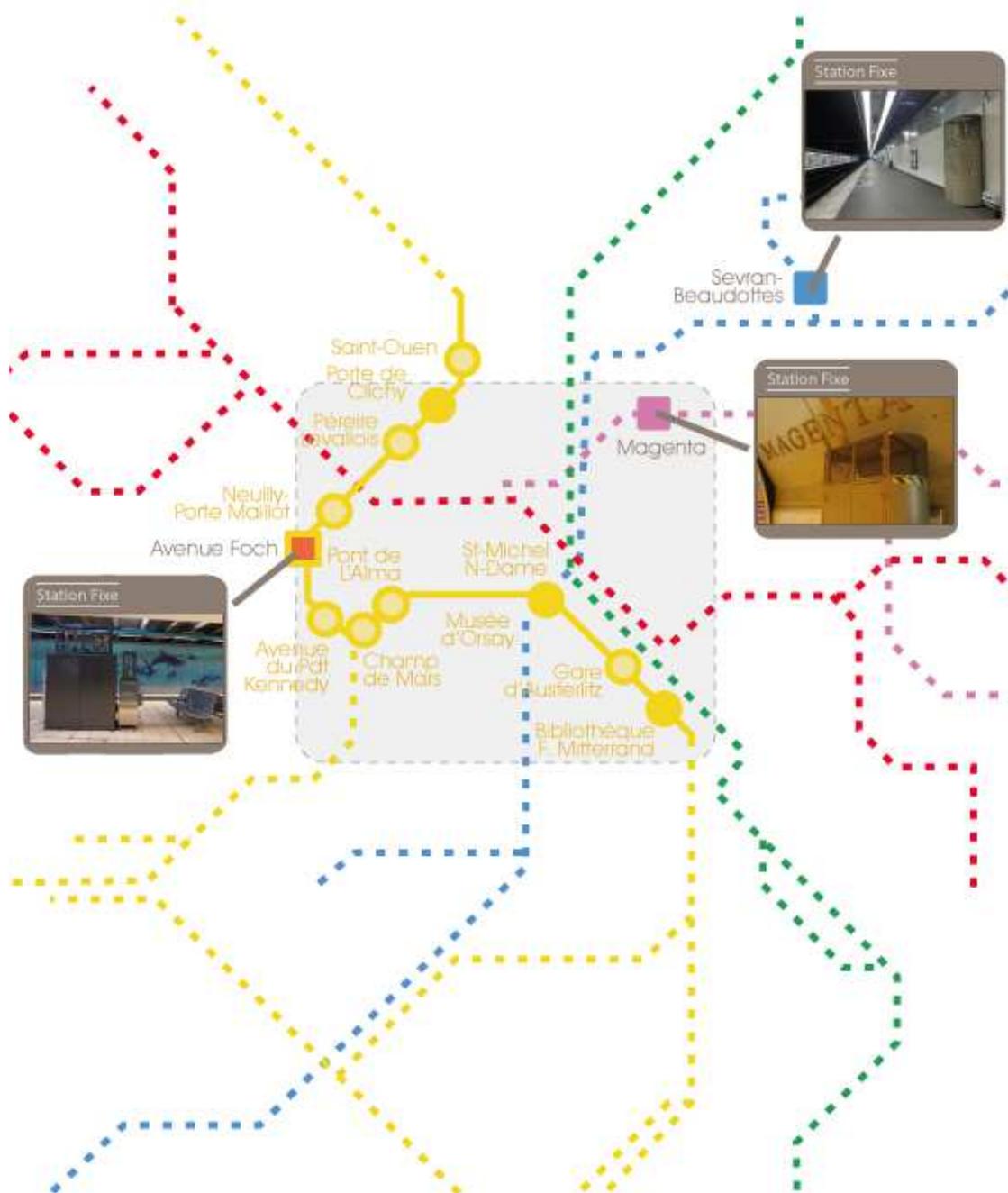
Enfin, les paramètres de confort (CO₂, Humidité et Température) sont suivis via des mesures sur le quai de la gare.

En parallèle de la station Avenue Foch, deux stations de mesure gérées par AEF sont installées dans les gares de Magenta (RER E) et Sevrans-Beaudottes (RER B). Ces trois gares, dites de référence, ont été choisies pour leurs caractéristiques différentes : Magenta est une station récente, avec une ventilation contrôlée, alors que les gares d'Avenue Foch et Sevrans-Beaudottes sont plus anciennes, sans ventilation mécanique.

Ce rapport présente les résultats à la station de référence d'Avenue Foch sur l'ensemble de l'année 2022.

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).

La figure suivante illustre la localisation des trois stations permanentes.



Lignes de RER : (A) (B) (C) (D) (E)

Types de gare : ● souterraine ● mixte : souterraine et aérienne

Paris intra muros ■



Figure 1 - Localisation des trois stations fixes (Magenta, Sevrans-Beaudottes et Avenue Foch)

1. DESCRIPTION DE LA STATION AVENUE FOCH

1.1 DESCRIPTION DE LA GARE AVENUE FOCH, POLLUANTS MESURES ET LOCALISATION DU POINT DE MESURE

La gare Avenue Foch, sur le RER C (Pontoise/Versailles Château/Saint-Quentin-en-Yvelines – Saint-Martin d'Etampes/Dourdan la Forêt/Massy-Palaiseau) est instrumentée depuis avril 2018. Elle permet de réaliser un suivi des niveaux de pollution sur le quai.

Cette gare est de configuration simple, c'est-à-dire sans correspondance. Elle est située au 85, avenue Foch, à Paris (XVI^{ème}).

Les quais de la gare RER sont souterrains, de faible profondeur (niveau -1). Il n'y a pas de système de ventilation mécanique en place mais une ventilation naturelle. Tous les éléments techniques détaillés sur la gare (matériel roulant, etc.) sont présentés en Annexe 1.

Le nombre de voyageurs montant en gare Avenue Foch sur le RER C est de 1 430 en moyenne par jour. C'est l'une des gares RER franciliennes les moins fréquentées (données SNCF 2022).

Le nombre de trains moyen circulant par jour en gare RER C Avenue Foch (2 sens et jours ouvrés/week-end confondus) est de 166.

La station de mesure a été installée au milieu du quai central comme illustré à la Figure 2.

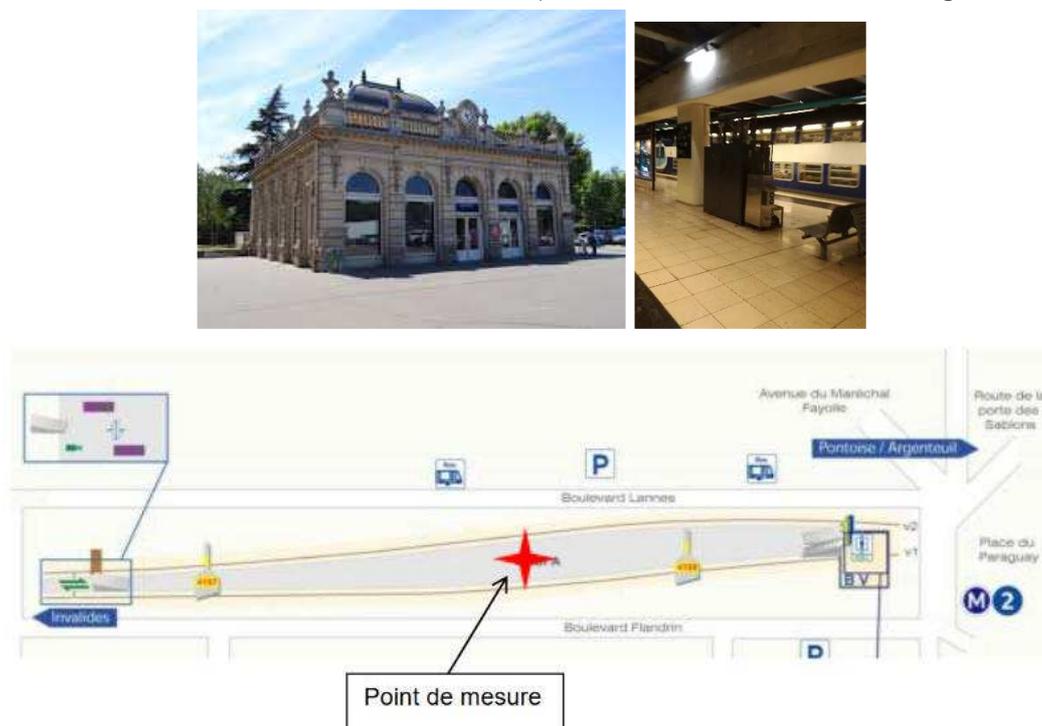


Figure 2 – Localisation du point de mesure (gare Avenue Foch, ligne RER C, quai central), photo de la station de mesure (quai) et photo extérieure de la gare

Des mesures de particules PM₁₀, PM_{2,5}, de métaux et d'oxydes d'azote (NO et NO₂) sont réalisées dans cette gare (arrêt de la mesure des NOx au 04/07/2022). Les paramètres de confort complètent le dispositif de mesure avec des relevés en CO₂, humidité et température.

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.

1.2 PERIODE DE MESURES

La gare RER C Avenue Foch a été choisie comme gare de référence en remplacement de la gare Saint-Michel-Notre-Dame, victime d'inondations en janvier 2018. Les mesures de pollution atmosphérique y sont réalisées en continu depuis **avril 2018**.

Les mesures en gare ont été suspendues entre le 4 juillet et le 29 août 2022 pour cause de travaux CASTOR sur le RER C, ayant entraîné la fermeture de la gare Avenue Foch.

Enfin, suite à un renouvellement de la convention de partenariat entre Airparif et SNCF Gares & Connexions, le suivi de la pollution gazeuse via la mesure des NOx a été arrêtée au 04/07/2022. Aussi le présent rapport traite des données de NOx sur la période de janvier à juin 2022.

2. NIVEAUX DE POLLUANTS RENCONTRES DANS LA GARE

Ce paragraphe présente les résultats de l'analyse des données de surveillance sur le quai de la gare SNCF Avenue Foch : présentation statistique sur la période étudiée et évolution temporelle des relevés à l'échelle horaire, journalière et mensuelle, pour les particules et les oxydes d'azote, ainsi que la teneur en métaux dans les particules PM₁₀.

2.1 NIVEAUX MOYENS OBSERVES SUR LE QUAI : PM₁₀, PM_{2.5} et NO_x

Les principaux résultats (minimum et maximum horaire, moyenne, médiane et percentiles 25 et 75 des données horaires) sont présentés dans le tableau suivant, pour la gare RER C Avenue Foch, sur l'ensemble de l'année 2022.

Statistiques (µg/m ³)	PM ₁₀ (particules fines)	PM _{2.5} (particules très fines)	NO (monoxyde d'azote)*	NO ₂ (dioxyde d'azote)*
Minimum horaire	0	0	0	4
Percentile 25 (P25)	62	31	3	13
Médiane ou Percentile 50	162	62	5	17
Moyenne horaire	151	61	18	18
Percentile 75 (P75)	222	87	13	21
Maximum horaire	1243	289	718	99
% de données horaires valides	81	78	100	100

Tableau 1 – Statistiques des relevés horaires aux stations de référence Avenue Foch, sur la période de mesure.
* mesures NO_x du 01/01/2022 au 30/06/2022

Le niveau moyen en PM₁₀ relevé en gare RER C Avenue Foch sur l'année 2022 est de 151 µg/m³, celui en PM_{2.5} est de 61 µg/m³.

Concernant les polluants gazeux, sur la période de mesure (01/01 – 30/06/22), les niveaux moyens en NO₂ et NO relevés en gare RER C Avenue Foch sont de 18 µg/m³.

Ces résultats sont détaillés dans les paragraphes suivants.

2.1.1. PARTICULES PM₁₀

La variabilité des concentrations en PM₁₀ à la gare RER C d'Avenue Foch est présentée à la Figure 3 par des boîtes à moustaches sur toute la période de mesures.

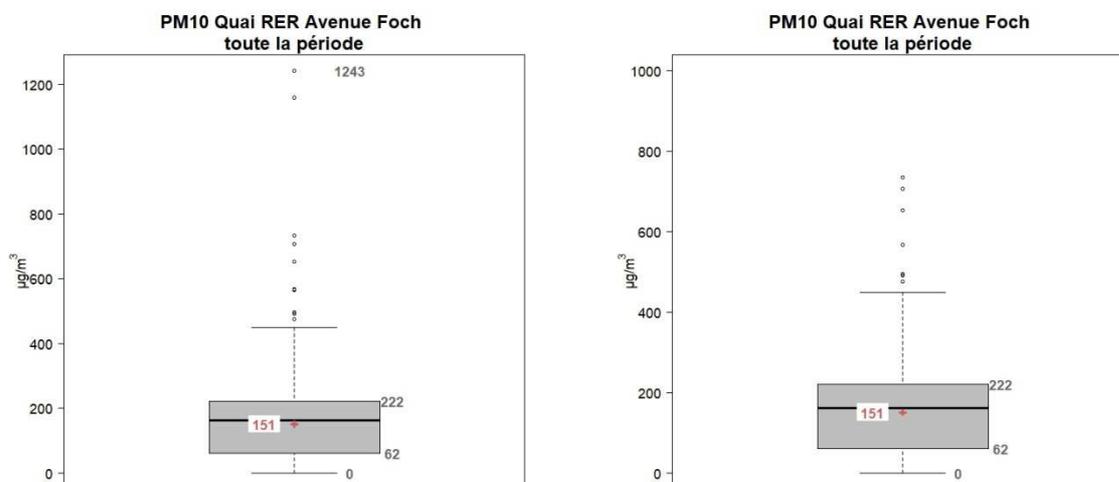


Figure 3 – Boîte à moustaches des relevés horaires en PM₁₀ (en µg/m³) à la gare RER C d'Avenue Foch, en 2022 (Zoom sur les données à droite)

Les boîtes à moustaches permettent de comparer facilement plusieurs grandeurs statistiques. Cette représentation graphique de la distribution d'une variable met en exergue les premier et troisième quartiles (P25 et P75), qui sont les bordures inférieure et supérieure de la boîte rectangulaire. La boîte rectangulaire contient 50 % des données. Ces extrémités se prolongent par des traits terminés par des cercles (minimum et maximum). Dans la boîte rectangulaire, le trait est la médiane (50% des données sont inférieures, les 50 % restantes sont supérieures), et la marque '+' la moyenne. Des détails sont fournis en ANNEXE 3.

La boîte à moustaches présentant les résultats des relevés horaires en particules PM₁₀ en gare RER C d'Avenue Foch montre une répartition « équilibrée² » des mesures, avec quelques maxima horaires isolés (« valeurs atypiques ») élevés.

En considérant toutes les données, 50 % des données horaires relevées sont comprises entre 62 et 222 µg/m³, pour une moyenne de 151 µg/m³ (médiane légèrement supérieure, à 162 µg/m³). Le maximum atteint à Avenue Foch est de 1243 µg/m³, enregistré le mercredi 20 avril entre 2 et 3h, probablement lors de travaux nocturnes.

² Répartition équilibrée : la taille des moustaches (différence entre valeur minimale et percentile 25, et entre percentile 75 et valeur maximale hors valeur(s) aberrante(s)) présente un ordre de grandeur cohérent par rapport à la « boîte » (différence entre percentile 25 et percentile 75), ou encore la moyenne et la médiane sont présentes dans la boîte.

2.1.2. PARTICULES PM_{2.5}

La boîte à moustaches des concentrations horaires en PM_{2.5} relevées à la gare RER C d'Avenue Foch est présentée Figure 4, sur toute la période de mesures.

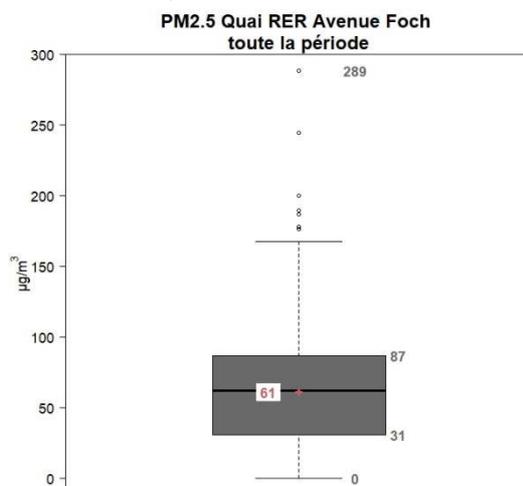


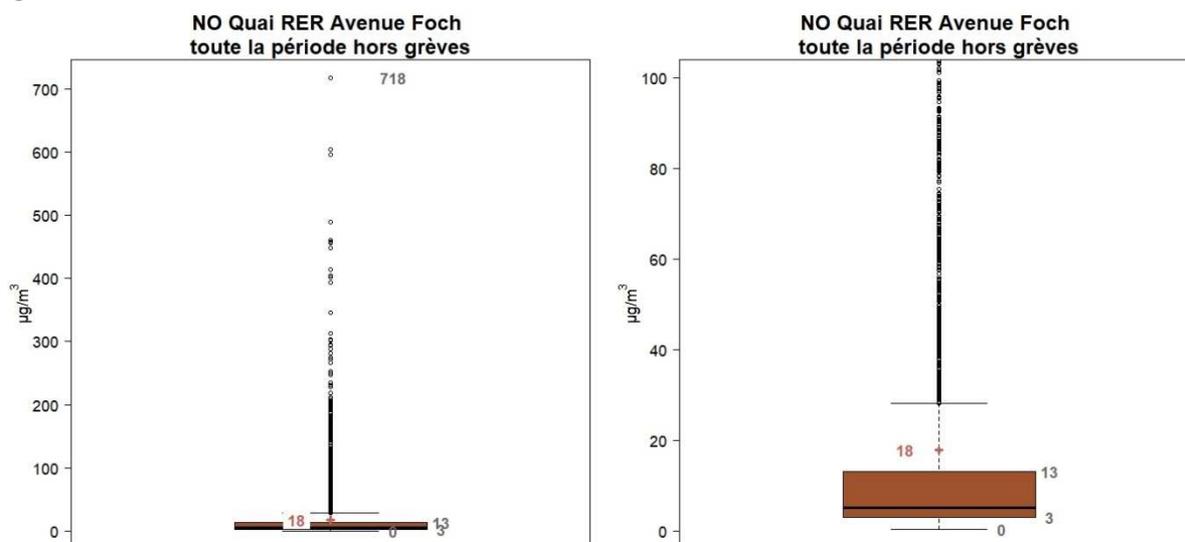
Figure 4 – Boîte à moustaches des relevés horaires en PM_{2.5} (en µg/m³) à la gare RER C d'Avenue Foch, en 2022

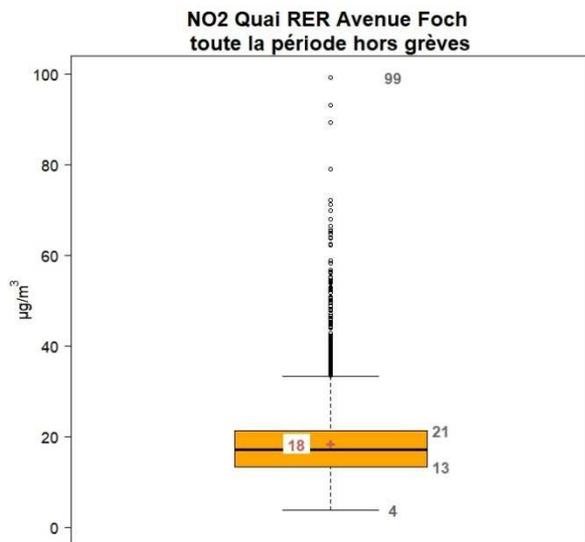
La boîte à moustaches sur l'ensemble de la période de mesure montre une moyenne en PM_{2.5} de 61 µg/m³ en gare RER C Avenue Foch ; 50% des données sont comprises entre 31 et 87 µg/m³ à Avenue Foch.

Le maximum atteint à Avenue Foch (289 µg/m³) a été enregistré le jeudi 8 décembre entre 5 et 6h, probablement lors de travaux nocturnes.

2.1.3. OXYDES D'AZOTE (NO_x)

Les boîtes à moustaches des concentrations horaire en oxydes d'azote (NO et NO₂) sont présentées Figure 5.





a) Monoxyde d'azote

b) Dioxyde d'azote

Figure 5 – Boîtes à moustaches des relevés horaires en (a) NO et (b) NO₂ (en µg/m³) à la Gare RER C d'Avenue Foch, période du 01/01 au 30/06/2022 (Zoom sur les données à droite) ; période hors grève, hors vacances scolaires.

Les boîtes à moustaches montrent de nombreuses valeurs atypiques élevées, en lien avec les sources (la principale étant la circulation de trains diesel nocturnes pour les travaux de maintenance). 50 % des données horaires relevées en NO sont comprises entre 3 et 13 µg/m³, pour une moyenne de 18 µg/m³ et une médiane à 5 µg/m³.

Concernant le dioxyde d'azote, 50 % des données horaires relevées sont comprises entre 13 et 21 µg/m³, pour une moyenne de 18 µg/m³ et une médiane à 14 µg/m³.

La teneur moyenne relevée sur le quai de la gare RER C Avenue Foch est de 151 µg/m³ pour les particules PM₁₀ et de 61 µg/m³ pour les particules PM_{2.5}.

La teneur moyenne relevée sur le quai de la gare RER C Avenue Foch est de 18 µg/m³ pour le NO et 18 µg/m³ pour le NO₂.

2.2 VARIABILITE TEMPORELLE : PM₁₀, PM_{2.5} et NO_x

2.2.1. VARIABILITE DES RELEVES HORAIRE PENDANT LA CAMPAGNE DE MESURE

2.2.1.1. PARTICULES PM₁₀

Les relevés horaires en particules PM₁₀ en gare RER C Avenue Foch sont présentés à la Figure 6.

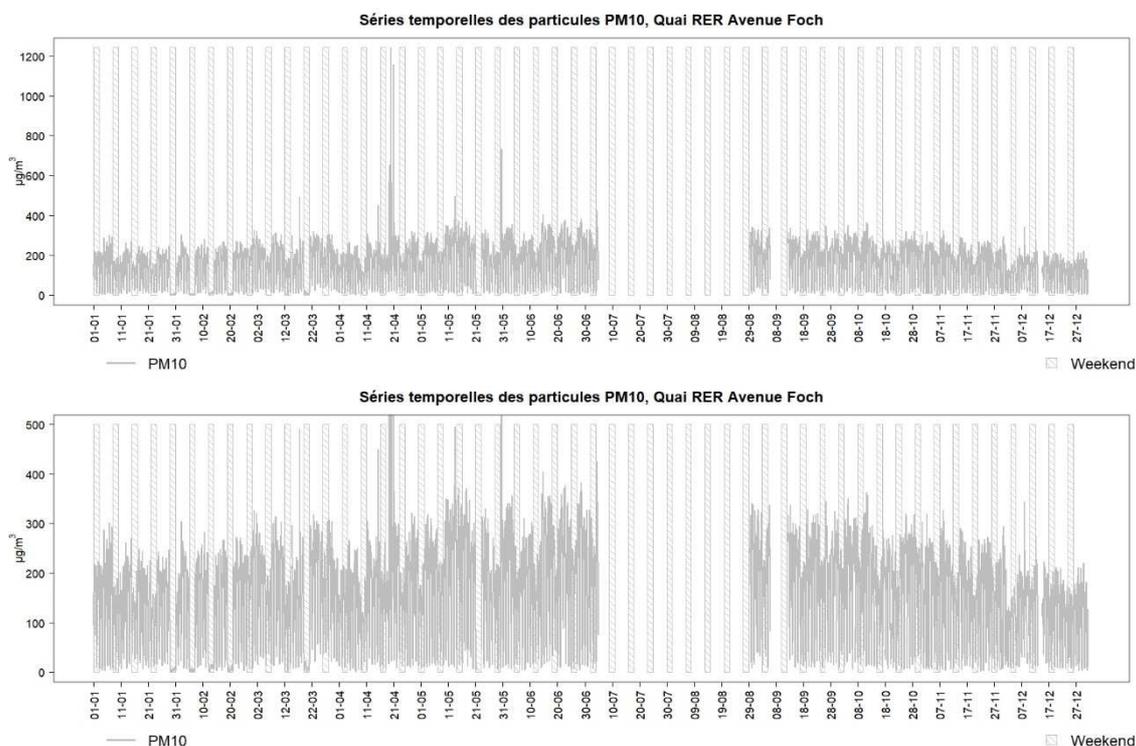


Figure 6 – Evolution des relevés horaires en PM₁₀, en µg/m³ : gare RER C d'Avenue Foch, en 2022 (Zoom en bas)

Le graphique montre des teneurs maximales horaires relativement homogènes sur la période, à l'exception de certains pics très ponctuels. Les maxima horaires sont majoritairement de l'ordre de 300 µg/m³. Sur l'ensemble de la campagne, 12 relevés horaires non consécutifs sont supérieurs à 400 µg/m³ (soit environ 0,2 % des relevés disponibles), et 2 relevés horaires non consécutifs supérieurs à 1000 µg/m³ (enregistrés lors de travaux nocturnes les 20 et 21/04/2022).

2.2.1.2. PARTICULES PM_{2.5}

Les relevés horaires en PM_{2.5} aux stations Avenue Foch sont présentés à la Figure 7.

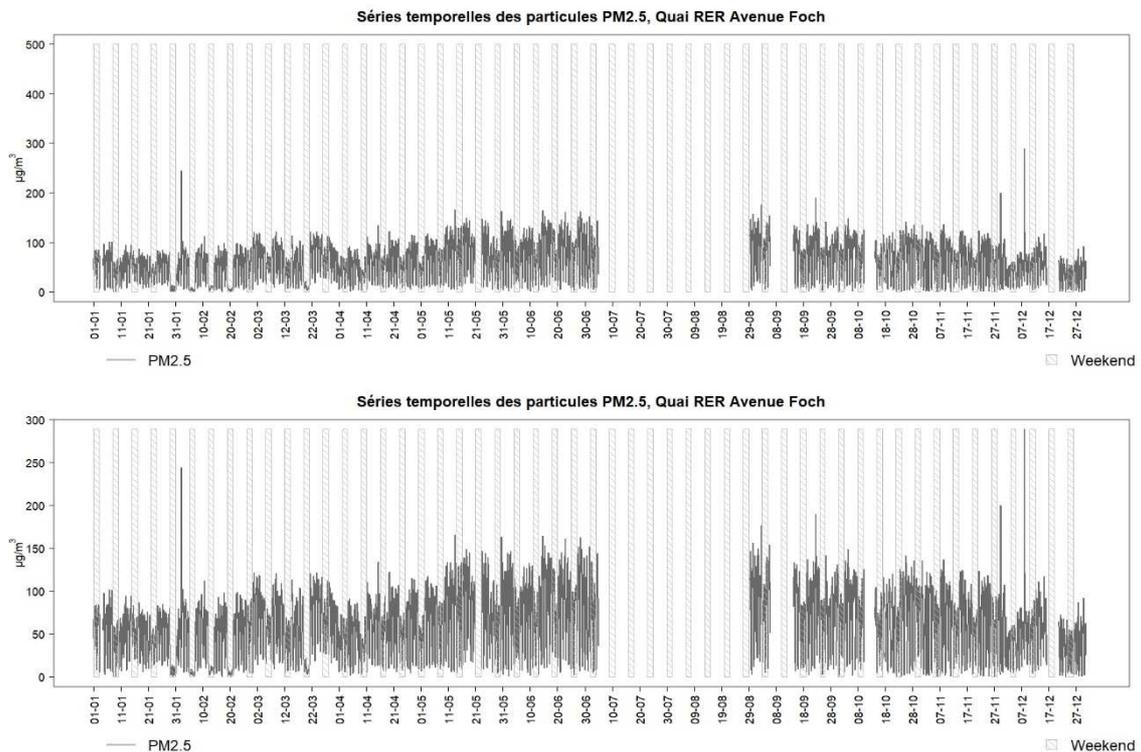


Figure 7 – Evolution des relevés horaires en PM_{2.5}, en µg/m³ : gare RER C d'Avenue, en 2022 (Zoom en bas)

Le graphique montre des teneurs maximales horaires relativement homogènes sur l'année avec toutefois quelques pics atypiques très ponctuels. Le maximum horaire à Avenue Foch a été enregistré le 8 décembre entre 5 et 6h, avec 289 µg/m³, très probablement lié à des travaux nocturnes.

Les maxima horaires sont majoritairement de l'ordre de 100 à 150 µg/m³. Très ponctuellement, des teneurs (3 heures, soit 0,03% environ des relevés disponibles) supérieures à 200 µg/m³ ont été mesurées (enregistrés les 02/02/2022 à 5h, le 29/11/2022 à 11h et le 08/12/2022 à 6h).

2.2.1.3. OXYDES D'AZOTE NO_x

Les relevés horaires en NO_x, présentés en Figure 8, montrent des fluctuations simultanées pour le NO et le NO₂, cela s'expliquant par les mêmes sources d'émissions pour ces deux composés.

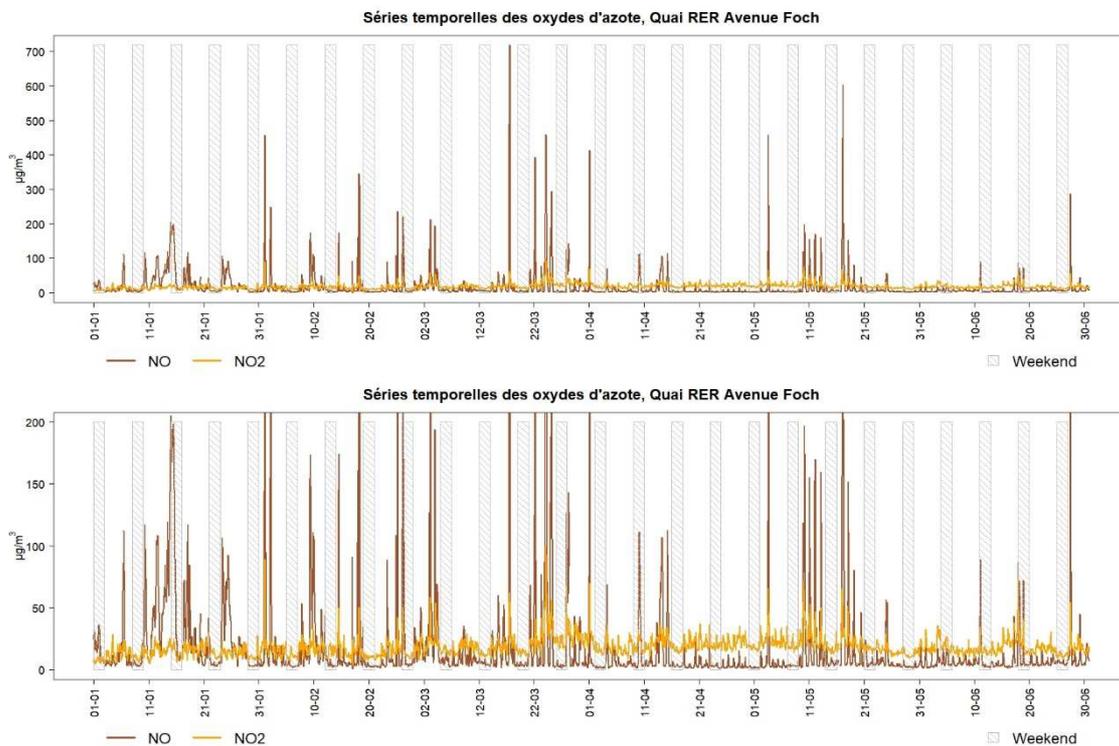


Figure 8 – Evolution des relevés horaires en NO_x, en µg/m³, à la gare RER C d'Avenue Foch, période du 01/01 au 30/06/2022 (Zoom en bas)

Les teneurs en NO sont variables dans le temps. Les relevés horaires n'ont pas dépassé 1000 µg/m³ en 2022. Le maxima horaire s'élève à 718 µg/m³, enregistré en journée le jeudi 17/03/2022 à 16h. Pour le NO₂, les teneurs sont plus homogènes sur l'ensemble de la période. Les niveaux les plus élevés sont mesurés simultanément aux teneurs les plus élevées de NO et n'ont pas dépassé 100 µg/m³ en 2022.

2.2.2. VARIABILITE HEBDOMADAIRE

2.2.2.1. ZOOM SUR LES VARIATIONS HORAIRES SUR UNE SEMAINE

Le détail des variations horaires des concentrations sur une semaine (moyenne de l'ensemble des mesures, hors vacances scolaires de l'Ile-de-France) est présenté en Figure 9.

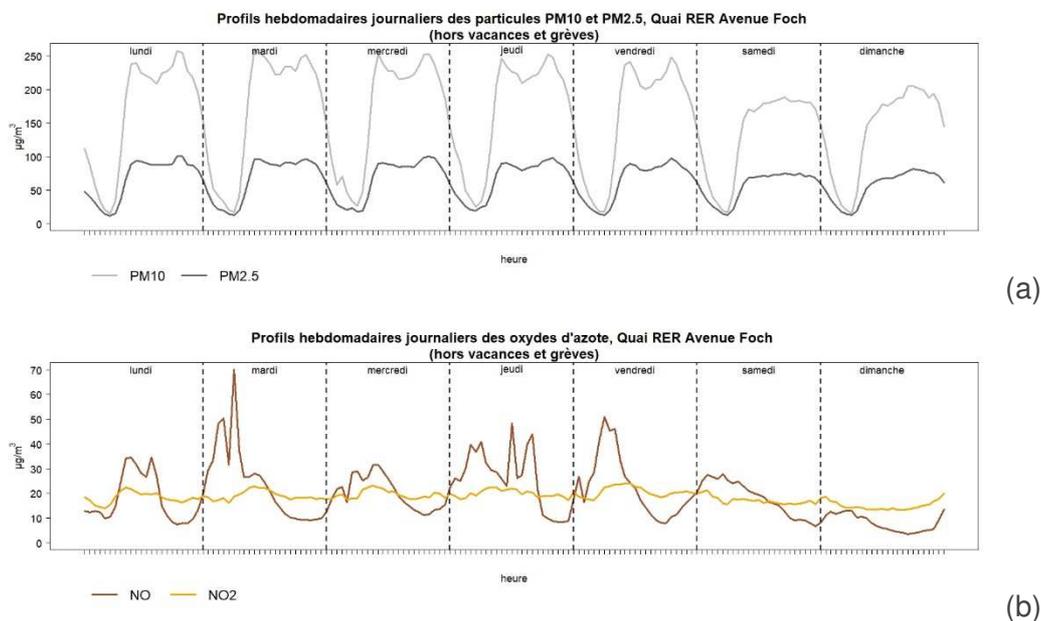


Figure 9 – Évolution des profils horaires en $\text{PM}_{2.5}$ et PM_{10} à la gare RER C d'Avenue Foch sur l'année 2022 (a) et évolution des profils horaires en NO et NO_2 à Avenue Foch et en air extérieur (b) sur la période du 01/01/2022 au 30/06/2022 - hors vacances scolaires et grèves

Le graphique « a » traite des résultats pour les PM_{10} et les $\text{PM}_{2.5}$ en gare RER C d'Avenue Foch. Les variations montrent des fluctuations les jours ouvrés entre les niveaux plus faibles la nuit et la hausse des teneurs en journée, avec les maximaux aux heures de pointe du trafic ferroviaire. Des niveaux plus faibles sont mesurés les samedis et dimanches, avec également des concentrations en journée plus stables que celles observées les jours ouvrés (profil sans heure de pointe).

Le profil des NO_x (graphique « b ») est très différent de celui des particules : les niveaux les plus forts sont enregistrés certaines nuits en semaine.

Les concentrations en dioxyde d'azote sont stables en semaine, comme le week-end.

Concernant le monoxyde d'azote, de fortes augmentations de concentrations, pouvant atteindre $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire en moyenne, sont observées durant la nuit les jours ouvrés. Ces pics de NO sont liés au passage de trains diesel, en lien avec des travaux en gare ou sur la ligne de RER.

2.2.2.2. ZOOM SUR LES VARIATIONS JOURNALIÈRES SUR UNE SEMAINE

Les profils hebdomadaires à la gare RER C Avenue Foch sont présentés à la Figure 10 pour les PM₁₀ et les PM_{2.5} (a) et les NO_x (b).

Une comparaison entre les résultats en période commerciale et en période nocturne est présentée au paragraphe 2.2.6.

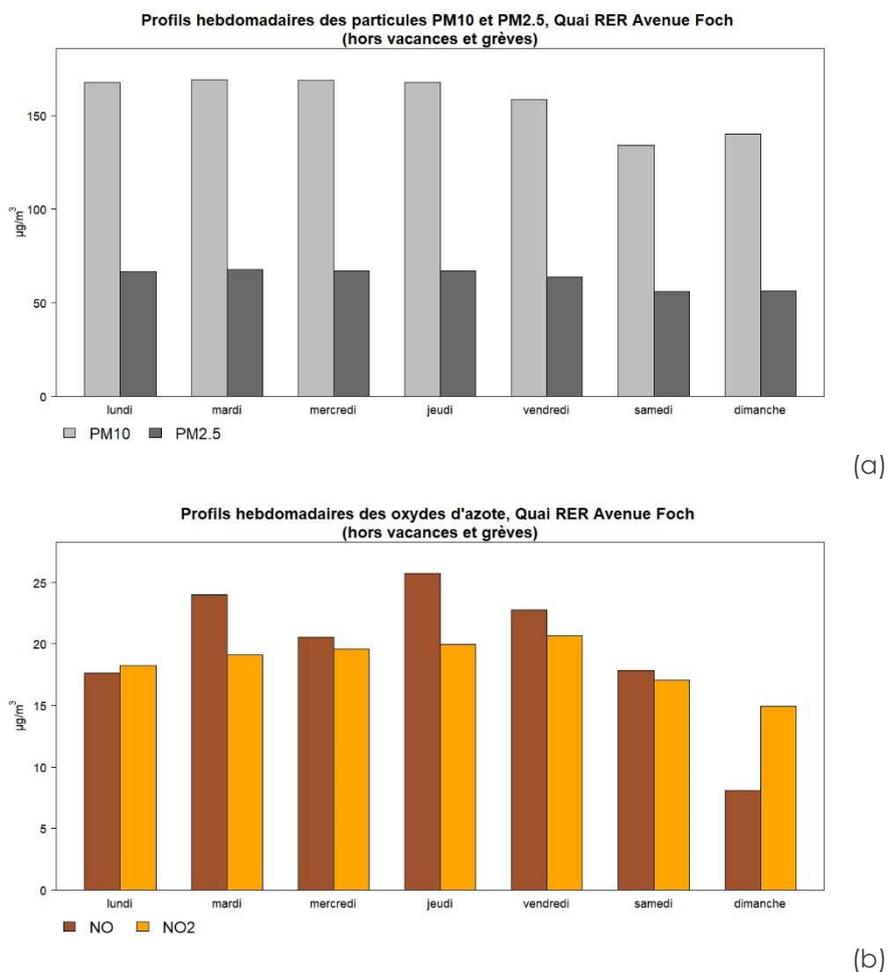


Figure 10 – Évolution des profils hebdomadaires en PM₁₀ et PM_{2.5} sur l'année 2022 (a) à la gare RER C Avenue Foch et évolution des profils hebdomadaires en NO et NO₂ (b) à Avenue Foch sur la période du 01/01 au 30/06/2022 - [hors vacances scolaires](#)

Les niveaux moyens en particules à la station Avenue Foch sont relativement stables les jours ouvrés : autour de 166 µg/m³ en moyenne sur une journée pour les PM₁₀ et 67 µg/m³ en moyenne pour les PM_{2.5}. Les niveaux moyens diminuent les samedis et dimanches par rapport aux jours ouvrés, de 18% pour les PM₁₀ et 16 % pour les PM_{2.5}. Cette différence s'explique par la diminution du nombre de trains le week-end par rapport aux jours ouvrés, facteur d'influence sur les particules (cf. paragraphe 3.3).

La Figure 11 présente les boîtes à moustaches des niveaux horaires de chaque jour, en particules fines PM₁₀ et très fines PM_{2,5} en gare RER C Avenue Foch. Pour chacun des polluants, les dispersions des niveaux horaires pour les jours ouvrés sont relativement stables. L'impact des travaux nocturnes les jours ouvrés se retrouve sur les teneurs maximales (maximum horaire, mais également valeur de la moustache haute (cf. Annexe 3)).

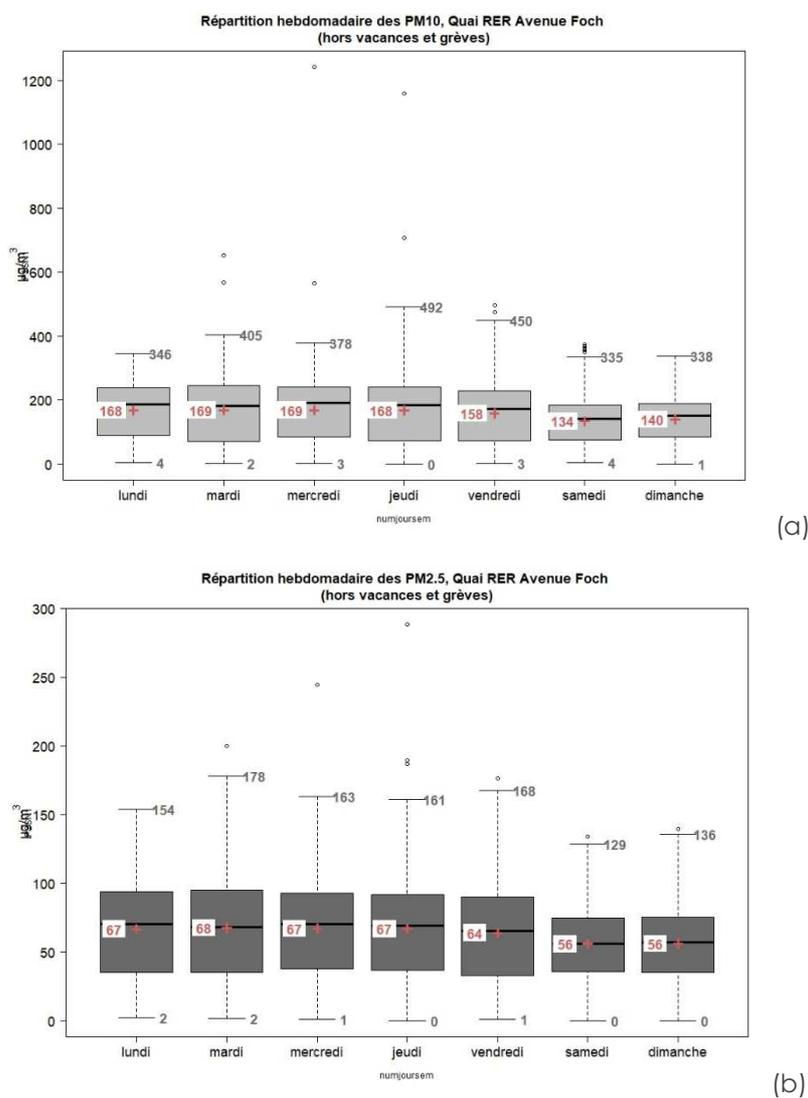


Figure 11 – Boîtes à moustaches des relevés horaires selon les jours en PM₁₀ (a) et PM_{2,5} (b) à la gare RER C d'Avenue Foch, année 2022 - hors vacances scolaires

Concernant les NO_x, la Figure 12 présente les boîtes à moustaches des niveaux horaires de chaque jour, en NO et en NO₂, en gare RER C Avenue Foch (hors vacances scolaires et grèves).

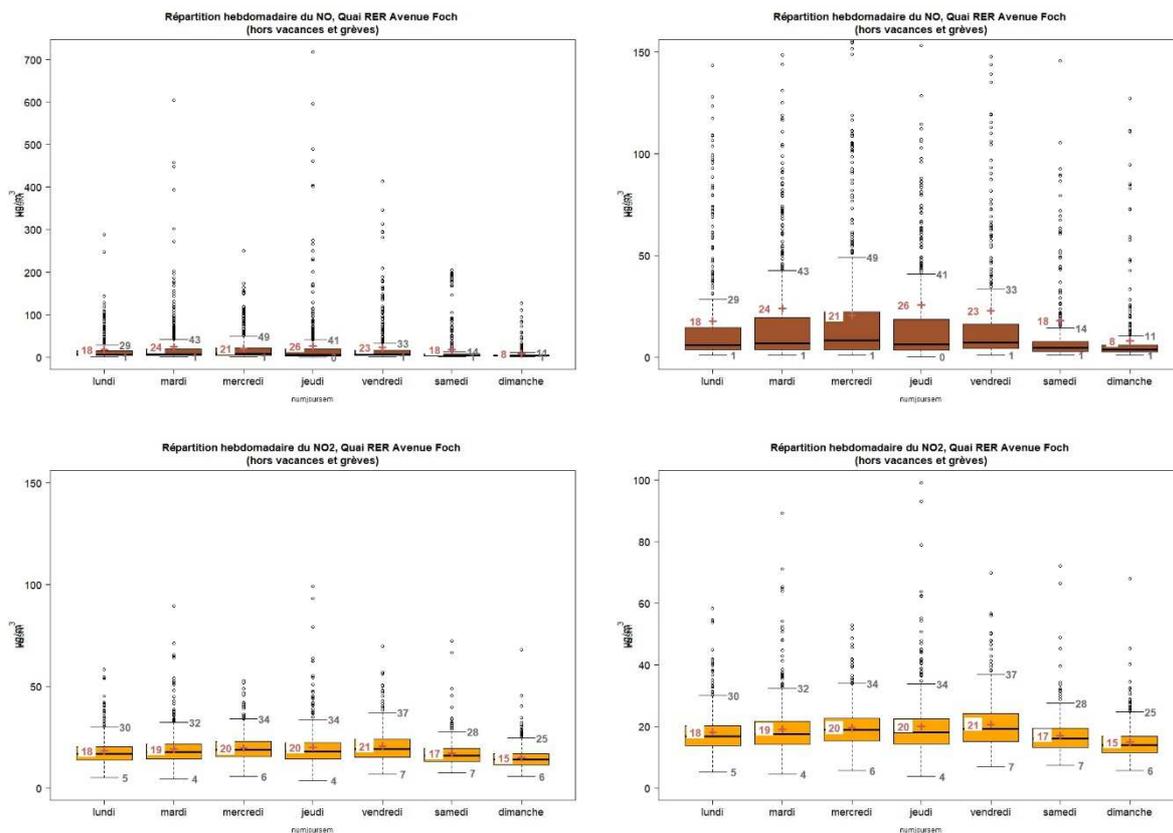


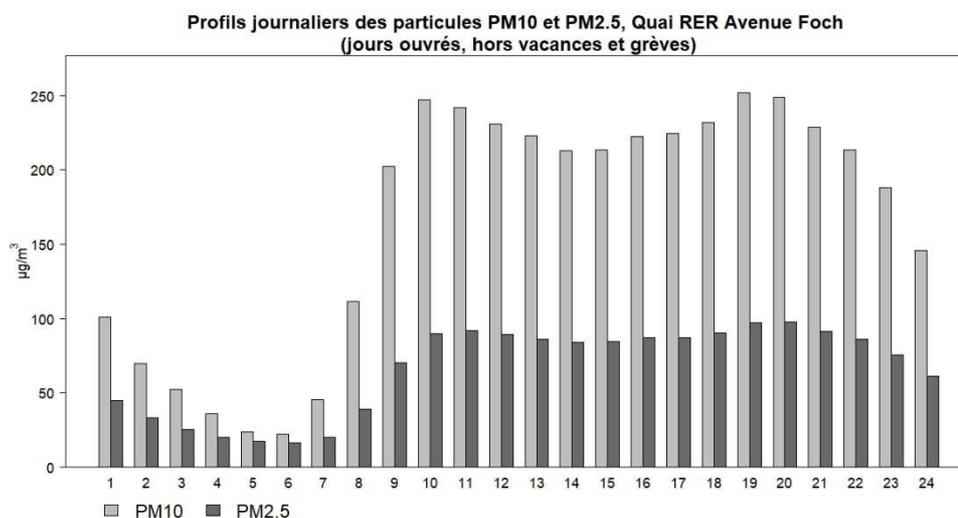
Figure 12 – Boîtes à moustaches des relevés horaires selon les jours en NO (a) et NO₂ (b) à la gare RER C d' Avenue Foch, période du 01/01 au 30/06/2022 - [hors vacances scolaires](#) (Zoom sur la droite)

Les distributions des concentrations en NO₂ sont globalement stables et équilibrées les jours ouvrés, comme le week-end. Concernant le NO, les boîtes à moustaches ne sont pas équilibrées, en lien avec les nombreuses valeurs atypiques relevées. Les concentrations en NO relevées les jours ouvrés sont supérieures à celles observées le week-end, ce qui s'explique par le fait que les travaux ont essentiellement lieu les jours ouvrés. Ainsi, les niveaux en NO diminuent de 41 % le week-end par rapport aux jours ouvrés.

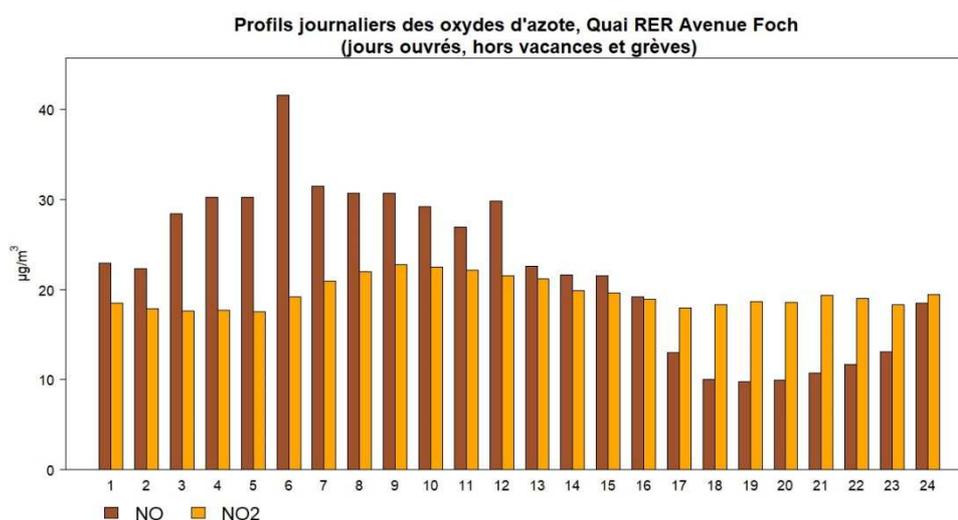
Pour le NO₂, polluant secondaire et par conséquent moins impacté par la pollution directement émise par les locomotives diesel (trains travaux), la baisse des teneurs le week-end est moins importante, avec - 18 %.

2.2.3. VARIABILITE JOURNALIERE

Le profil journalier moyen, présenté à la Figure 13, montre les niveaux moyens observés chaque heure de la journée pour les **jours ouvrés** (hors vacances scolaires).



(a)



(b)

Figure 13 – Évolution des profils journaliers en PM₁₀ (a) et PM_{2.5} (b) en 2022 à la gare RER C d'Avenue Foch et évolution des profils en NO et NO₂ (c) à Avenue Foch, période du 01/01 au 30/06/2022 – [jours ouvrés hors vacances scolaires](#)

Les particules PM₁₀ et PM_{2.5} ont des profils journaliers semblables. Les maxima horaires sont enregistrés lors des heures de pointe : le matin (10-12h) et le soir (18-21h). Les niveaux sur ces périodes de pointe sont en moyenne de 240 µg/m³ pour les PM₁₀ et 92 µg/m³ pour les PM_{2.5} en gare RER C d'Avenue Foch.

Les niveaux les plus faibles en gare RER C Avenue Foch sont enregistrés la nuit (entre 1h et 5h), lors de la fermeture de la gare au public : 45 µg/m³ en moyenne pour les PM₁₀, et 24 µg/m³ pour les PM_{2.5}. L'arrêt du trafic ferroviaire la nuit permet le dépôt des particules ; par conséquent les minima sont enregistrés avant la reprise du trafic (6h). Les concentrations horaires minimales en particules PM₁₀ et PM_{2.5} sont respectivement en moyenne de 22 et 16 µg/m³.

Ces profils journaliers en particules (PM₁₀ et PM_{2.5}) fluctuent en partie en fonction de la circulation ferroviaire, les concentrations maximales étant enregistrées lorsque la circulation ferroviaire est maximale (cf. paragraphe 3.3).

Le profil journalier en PM_{2.5} au sein de la gare RER C Avenue Foch présente des variations horaires moindres (écart type de 36 µg/m³ sur la période d'ouverture de la gare) que celui de PM₁₀ (écart type de 96 µg/m³). Cette différence s'explique par des émissions liées à la circulation des trains dont la fraction des particules est la plus grossière. Cela peut également s'expliquer en partie par un temps de déposition différent entre les particules : temps plus court pour les plus grosses particules.

Les oxydes d'azote (NO et NO₂) mesurés à la gare RER C Avenue Foch ont des profils journaliers différents de ceux des particules.

Pour le NO, les maxima horaires sont enregistrés la nuit, en lien avec la source que représentent les trains travaux à motorisation thermique. Les niveaux sont maximums entre 5 et 6h avec 41 µg/m³ et diminuent de manière constante jusqu'à 18h, où les niveaux atteignent 10 µg/m³.

Concernant le NO₂, les variations horaires sur un jour ouvré sont plus limitées, avec des concentrations variant de 17 à 23 µg/m³.

Les profils journaliers en NO_x sont clairement indépendants de la circulation ferroviaire commerciale, les concentrations maximales étant enregistrées la nuit, en lien avec les travaux nocturnes (cf. paragraphe 3.3).

2.2.4. VARIABILITE MENSUELLE

Le profil mensuel moyen, présenté à la Figure 14, résume les niveaux moyens en particules PM₁₀ et PM_{2,5}, ainsi qu'en oxydes d'azote (NO et NO₂) observés chaque mois de l'année 2022 (hors vacances scolaires), entre le 01/01 et le 30/06/2022 pour les NOx.

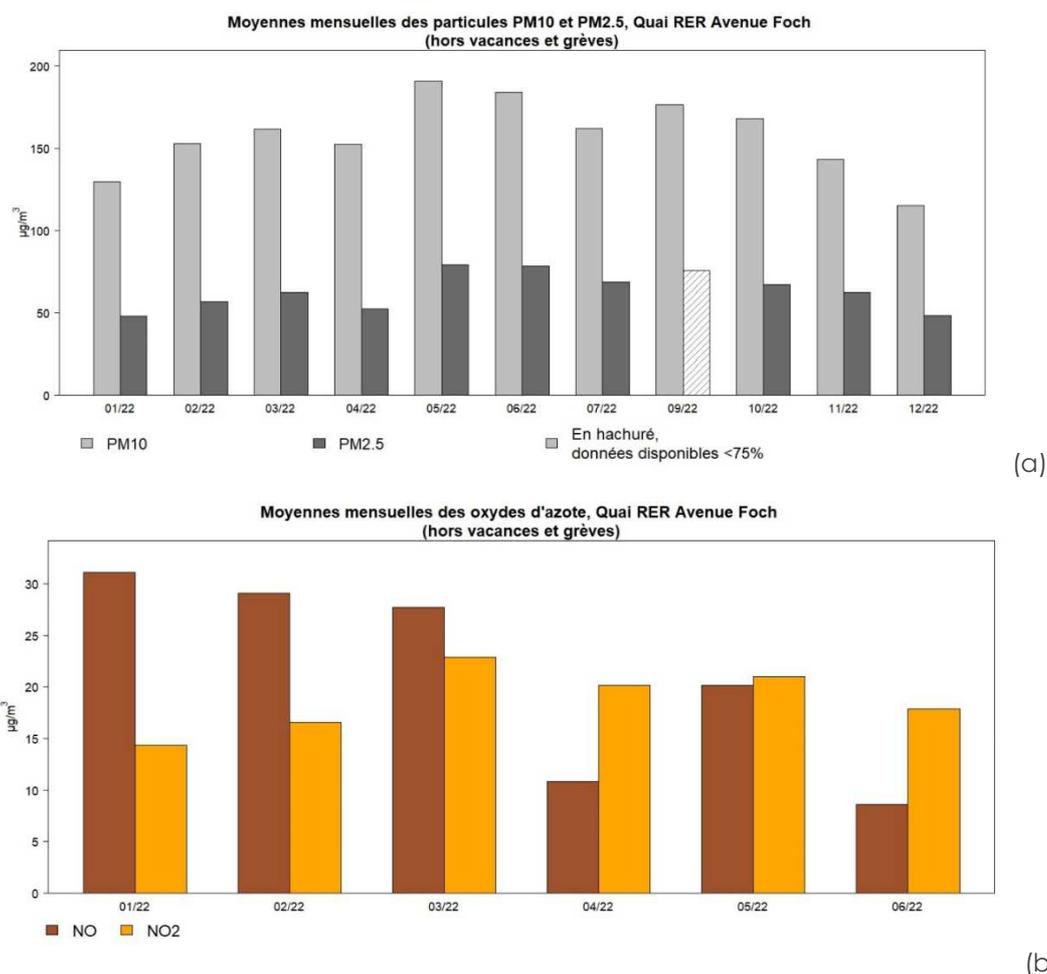


Figure 14 – Évolution des profils mensuels en PM₁₀, PM_{2,5} et NO_x (NO et NO₂) à la gare RER C d'Avenue Foch, période du 01/01 au 30/06/2022 (NO_x) et sur 2022 (PM), [hors vacances scolaires](#)

Les particules PM₁₀ et les particules PM_{2,5} présentent des variations mensuelles comparables. Les concentrations les moins élevées sont observées en hiver (janvier, décembre) : 48 µg/m³ en PM_{2,5} et 115 µg/m³ en PM₁₀. Une hausse des concentrations en particules a été observée en mai et juin, avec un maximum mensuel de 79 µg/m³ en PM_{2,5} et 191 µg/m³ en PM₁₀.

Les variations mensuelles en **NO et NO₂** sont liées, du fait de sources de pollution identiques. Néanmoins, la nature des deux composés (le NO est un polluant primaire, le NO₂ un polluant secondaire) engendre des variations plus importantes sur le NO que sur le NO₂.

Les teneurs mensuelles en NO sont beaucoup plus impactées par les travaux nocturnes ou le passage de trains diesel que le NO₂. Ainsi les variations mensuelles sont plus importantes pour le NO que pour le NO₂. Le mois présentant la plus faible valeur mensuelle en NO est le mois de juin 2022 (9 µg/m³), le maximum (31 µg/m³) a été enregistré en janvier 2022.

Les teneurs mensuelles en NO₂ sont plus stables. Le maximum est enregistré en janvier 2022 (14 µg/m³) et le minimum en mars 2022 (23 µg/m³).

La Figure 15 présente les niveaux moyens en particules observés chaque mois* depuis le début de la surveillance avril 2018, en gare RER C Avenue Foch.

*Les données des vacances scolaires, des grèves et du 1^{er} confinement de l'année 2020 ne sont pas prises en compte.

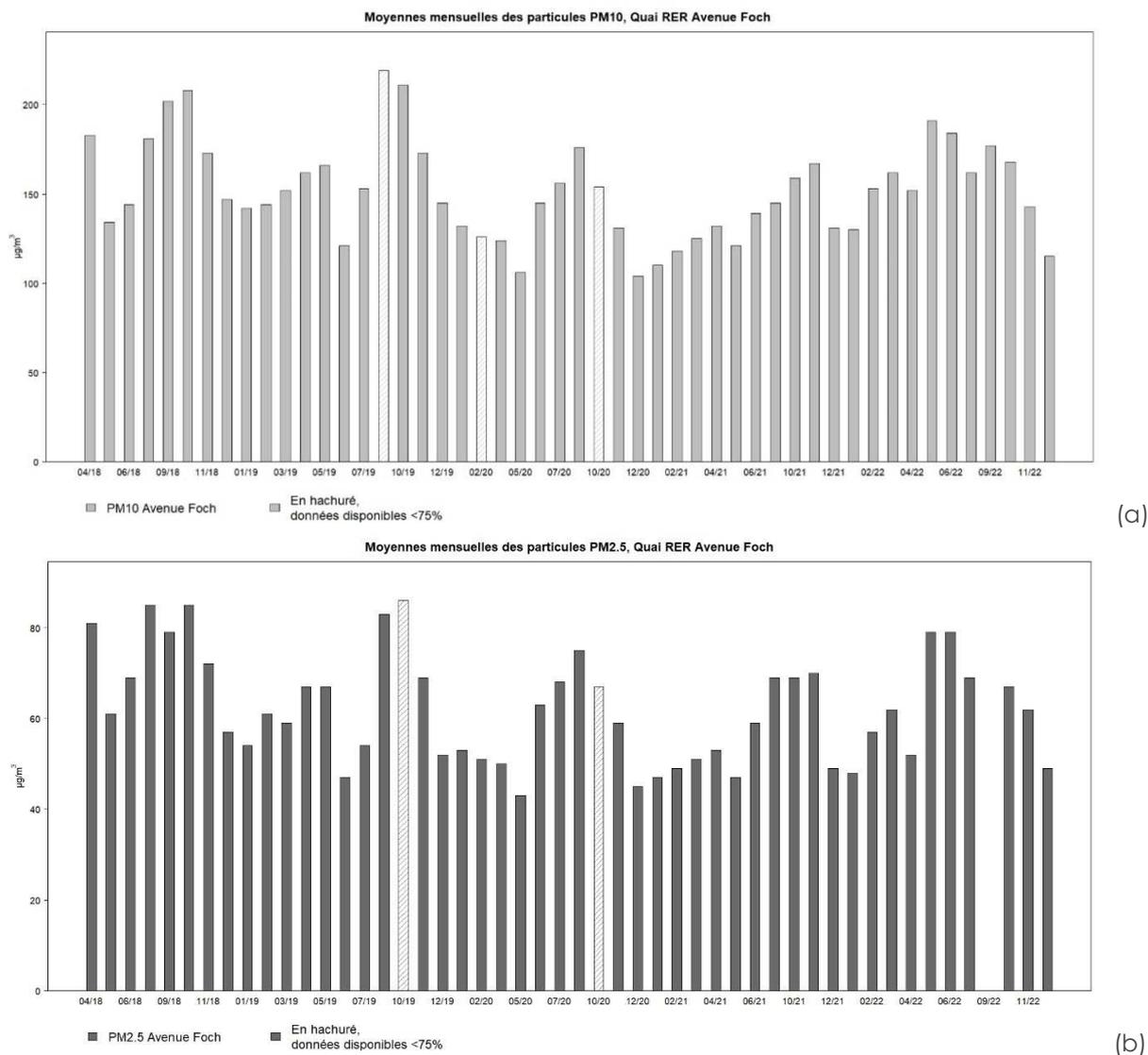


Figure 15 : Evolution des profils mensuels en particules PM₁₀ (a) et PM_{2.5} (b) à la gare RER C Avenue Foch depuis avril 2018 – hors vacances, grèves et 1^{er} confinement. En hachuré, données disponibles < 75%

Les particules PM₁₀ et PM_{2.5} présentent des évolutions mensuelles comparables. Les concentrations varient de manière importante (du simple au double), entre 104 à 219 µg/m³ pour les PM₁₀ et de 43 à 86 µg/m³ pour les particules PM_{2.5}.

Depuis le début de la surveillance de cette gare (avril 2018), une tendance semble se dessiner sur les niveaux moyens mensuels en gare RER C Avenue Foch, avec des teneurs plus élevées en septembre et octobre et plus faibles en hiver (janvier et décembre), notamment pour les particules PM₁₀.

2.2.5. VARIABILITE ANNUELLE

Les tableaux suivants présentent les statistiques des relevés horaires en particules PM₁₀, PM_{2,5} et en oxydes d'azote (NO_x) depuis le début de la surveillance de la gare en avril 2018.

Concernant les particules, les niveaux relevés au cours de l'année 2022 sont en augmentation par rapport aux années précédentes (2021, voire 2020 pour les PM₁₀), ce qui s'explique par la reprise du trafic ferroviaire après la baisse enregistrée en 2020 et 2021 en lien avec la crise sanitaire. Les niveaux annuels de 2022 restent toutefois inférieurs à ceux de 2018 et 2019.

Statistiques (µg/m ³)	2018	2019	2020	2021	2022
Minimum horaire	0	0	0	0	0
Percentile 25 (P25)	83	86	65	61	62
Médiane ou Percentile 50	165	168	151	144	162
Moyenne horaire	168	163	148	133	151
Percentile 75 (P75)	241	229	216	192	222
Maximum horaire	1318	3278	518	1661	1243
% de données horaires valides	90	94	87	80	81

Tableau 2 : Statistiques des relevés horaires en PM₁₀ à la station de référence RER C Avenue Foch depuis 2018.

Statistiques (µg/m ³)	2018	2019	2020	2021	2022
Minimum horaire	5	5	0	0	0
Percentile 25 (P25)	45	40	30	30	31
Médiane ou Percentile 50	68	65	61	56	62
Moyenne horaire	66	67	62	55	61
Percentile 75 (P75)	87	87	88	76	87
Maximum horaire	324	973	316	2012	289
% de données horaires valides	79	80	88	79	78

Tableau 3 : Statistiques des relevés horaires en PM_{2,5} à la station de référence RER C Avenue Foch depuis 2018

Concernant le monoxyde d'azote, les niveaux relevés sur les 6 premiers mois de l'année 2022 sont en baisse, c'est la plus faible moyenne enregistrée depuis le début des mesures en avril 2018. Une baisse avait déjà été observée en 2019 et 2020, en lien avec la crise sanitaire liée au covid. Cette évolution s'explique probablement par les travaux réalisés chaque année. Les relevés 2022 montrent clairement moins de pics nocturnes élevés que les précédentes années, synonyme de moins de travaux en gare d'Avenue Foch.

Les résultats en baisse en NO en 2022 se traduisent par des niveaux plus faibles en NO₂ pour cette même année.

Statistiques (µg/m ³)	2018	2019	2020	2021	2022*
Minimum horaire	2	0	1	1	0
Percentile 25 (P25)	8	3	4	4	3
Médiane ou Percentile 50	14	6	6	10	5
Moyenne horaire	38	29	26	34	18
Percentile 75 (P75)	32	18	19	28	13
Maximum horaire	1467	2257	1745	1393	718
% de données horaires valides	91	96	85	81	100

Tableau 4 : Statistiques des relevés horaires en NO à la station de référence RER C Avenue Foch depuis 2018. * Fin des mesures le 30/06/22

Statistiques (µg/m ³)	2018	2019	2020	2021	2022*
Minimum horaire	13	8	4	3	4
Percentile 25 (P25)	26	23	14	14	13
Médiane ou Percentile 50	32	29	18	19	17
Moyenne horaire	35	34	20	21	18
Percentile 75 (P75)	40	38	23	25	21
Maximum horaire	329	468	206	283	99
% de données horaires valides	91	96	85	81	100

Tableau 5 : Statistiques des relevés horaires en NO₂ à la station de référence RER C Avenue Foch depuis 2018. * Fin des mesures le 30/06/22

2.2.6. NIVEAUX EN SERVICE COMMERCIAL

La Figure 16 présente les moyennes hebdomadaires des différents composés suivis, lors du service commercial d'une part (de 5h à 1h) et pendant la nuit d'autre part (période de fermeture de la gare au public).

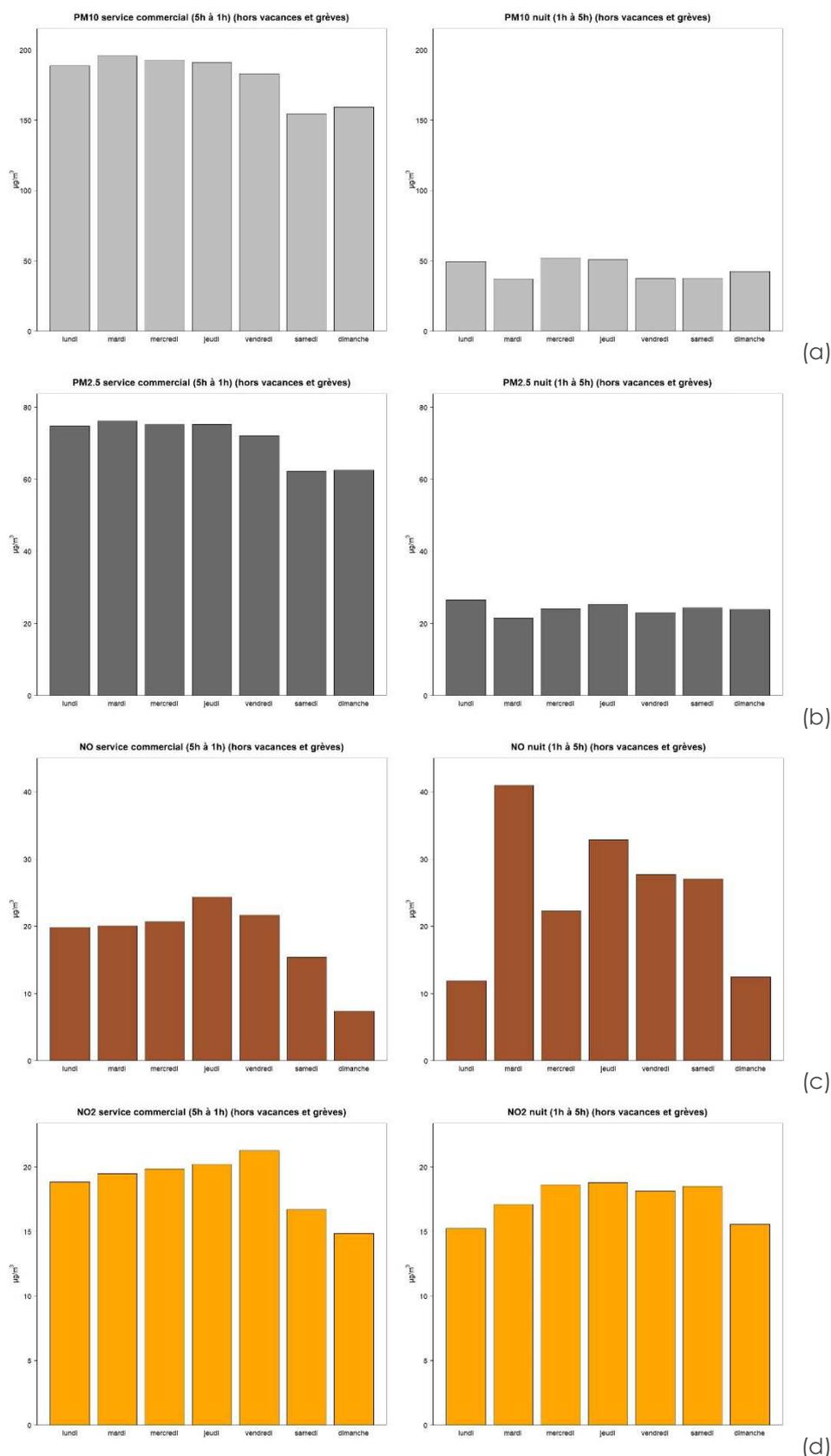


Figure 16 – Évolution des profils hebdomadaires en PM₁₀ (a), PM_{2.5} (b), NO (c) et NO₂ (d) à la gare RER C Avenue Foch en 2022 (période du 01/01 au 30/06/22 pour les NO_x) – hors vacances scolaires. Service commercial (5 à 1h) à gauche, Nuit (1 à 5h) à droite

Les niveaux en particules (PM₁₀ et PM_{2.5}) sont stables les jours ouvrés lors du **service commercial**. Ces teneurs sont supérieures aux moyennes journalières (sur 24h) : pour les PM₁₀, la moyenne les jours ouvrés lors du service commercial est de 190 µg/m³, contre 166 µg/m³ en moyenne sur 24h, soit un écart de 14 %.

Concernant les PM_{2.5}, la moyenne les jours ouvrés lors du service commercial est de 75 µg/m³, contre 67 µg/m³ en moyenne sur 24h, soit un écart de 12 %.

Ces écarts entre les moyennes en service commercial et les moyennes sur toute la journée s'expliquent par des teneurs en particules plus faibles la nuit, de façon plus marquée pour les PM₁₀ que pour les PM_{2.5} (figures de droite (a) et (b)).

Les **teneurs nocturnes en particules (PM₁₀ et PM_{2.5})** sont plus faibles, la principale source de particules sur les quais étant la circulation des trains, limitée aux éventuels trains de travaux la nuit. Elles varient peu selon les jours de la semaine. Concernant les PM₁₀, les concentrations nocturnes sont maximales les mercredis (52 µg/m³) et minimales les vendredis (37 µg/m³). La concentration minimale en particules PM_{2.5} est de 21 µg/m³ les mardis et les maxima sont observés les lundis (27 µg/m³).

Concernant les NO_x, lors du **service commercial**, la teneur moyenne en **NO** les jours ouvrés est de 21 µg/m³, et 22 µg/m³ sur 24h. Cette faible variation s'explique par l'absence de source de NO en journée. Pour le **NO₂**, la concentration moyenne pendant le service commercial (20 µg/m³) est très proche de la moyenne sur 24h (19 µg/m³).

Les **teneurs nocturnes** en NO s'élèvent en moyenne à 25 µg/m³, avec une variabilité selon les jours. Les minima sont enregistrés les lundi et dimanche avec 12 µg/m³ et les maxima le mardi (avec 41 µg/m³). Les niveaux moyens nocturnes les jours ouvrés s'élèvent à 27 µg/m³. Ceci s'explique par les travaux nocturnes, principaux responsables des fortes teneurs, qui ont lieu les nuits des jours ouvrés.

Les **teneurs nocturnes** en NO₂ sont en moyenne de 18 µg/m³, les concentrations varient de 15 µg/m³ (lundi) à 19 µg/m³ (mercredi et jeudi).

Les variations temporelles observées sur les concentrations en particules (PM₁₀ et PM_{2.5}) en gare RER C Avenue Foch sont liées à l'activité et la fréquentation de la gare en période d'ouverture de la gare au public (nombre de voyageurs, nombre de trains), mais également aux travaux ferroviaires qui ont lieu la nuit.

Sur une journée ouvrée moyenne, les niveaux nocturnes (entre 1h et 5h) sont les plus faibles, avec une moyenne de 45 µg/m³ pour les PM₁₀ et de 24 µg/m³ pour les PM_{2.5}. Les niveaux augmentent en journée. Les concentrations sont maximales lorsque la fréquentation de la gare est maximale, à savoir lors des heures de pointe, entre 10 et 12h le matin et entre 18h et 21h le soir. Les concentrations sur le quai atteignent alors 240 µg/m³ en moyenne pour les PM₁₀ et 92 µg/m³ pour les PM_{2.5}.

A l'échelle hebdomadaire, les profils montrent des teneurs plus faibles les samedis et dimanches, comparativement aux jours ouvrés, toujours en lien avec le nombre de trains en circulation, plus élevé les jours ouvrés par rapport aux week-ends. La baisse des niveaux moyens en week-end est de 18 % pour les PM₁₀ et 16 % pour les PM_{2.5}.

A l'échelle mensuelle, il existe également des fluctuations, dans des proportions similaires pour les PM₁₀ et les PM_{2.5}. Les minima et maxima des particules sont observés aux mêmes périodes : minima en hiver (décembre et janvier), maxima au printemps (mai, juin).

Enfin, **les concentrations sont plus importantes en service commercial** que sur une journée de 24h, de l'ordre de 14 % pour les PM₁₀ et 12 % pour les PM_{2.5} (chiffres jours ouvrés) compte-tenu des émissions de particules liées au trafic ferroviaire (remise en suspension, abrasion).

Concernant les oxydes d'azote (NO et NO₂) et contrairement aux particules, les variations temporelles observées en gare RER C Avenue Foch ne sont pas liées à la circulation des trains en période de service commercial.

Sur une journée ouvrée moyenne, les niveaux nocturnes sont les plus forts, avec en moyenne 27 µg/m³ en NO et 18 µg/m³ en NO₂ entre 1h et 5h, les jours ouvrés. Cela correspond à la période des travaux de maintenance réalisés sur le réseau souterrain, voire uniquement à des passages de trains à locomotive diesel. Les niveaux sont plus faibles le reste de la journée, principalement pour le NO : en moyenne la teneur en NO durant le service commercial est de 21 µg/m³ et de 20 µg/m³ pour le NO₂ (pour les jours ouvrés).

A l'échelle hebdomadaire, les profils montrent des teneurs en NO et NO₂ plus faibles les samedis et dimanches, comparativement aux jours ouvrés, les travaux ayant lieu du lundi soir au jeudi matin. La baisse est de 41 % pour le NO et de 18 % pour le NO₂.

2.3 LIENS ENTRE PARTICULES FINES PM₁₀ ET PARTICULES TRES FINES PM_{2.5}

Le ratio PM_{2.5}/PM₁₀ peut servir à identifier des sources de particules différentes.

2.3.1. NIVEAUX MOYENS

Le ratio entre particules très fines (PM_{2.5}) et particules fines (PM₁₀) en gare Avenue Foch est présenté à la Figure 17.

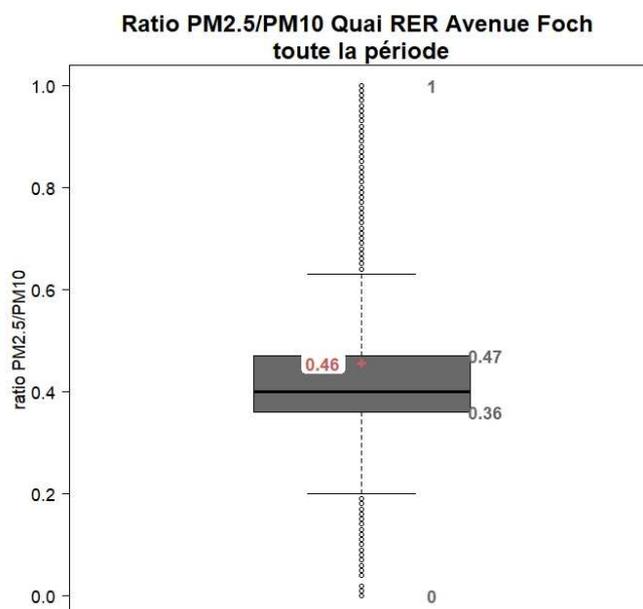


Figure 17 – Boîte à moustache des ratios horaires en PM_{2.5}/PM₁₀, à la Gare RER C Avenue Foch, en 2022

En moyenne, en gare RER C d'Avenue Foch, sur toute la période de mesure, le ratio PM_{2.5}/PM₁₀ est de 0,46.

Les particules émises par le trafic ferroviaire sont de grosse taille, en lien avec les processus mécaniques de formation (freinage et frottements entre roues et rail), ainsi qu'avec leur remise en suspension, bien illustré par le ratio plus faible que le ratio observé en air extérieur, généralement de l'ordre de 0,7.

2.3.2. VARIABILITE HEBDOMADAIRE

2.3.2.1. ZOOM SUR LES VARIATIONS HORAIRES SUR UNE SEMAINE

Les fluctuations horaires du ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ (ratios horaires moyennés sur une semaine) en gare Avenue Foch sont présentées à la Figure 18.

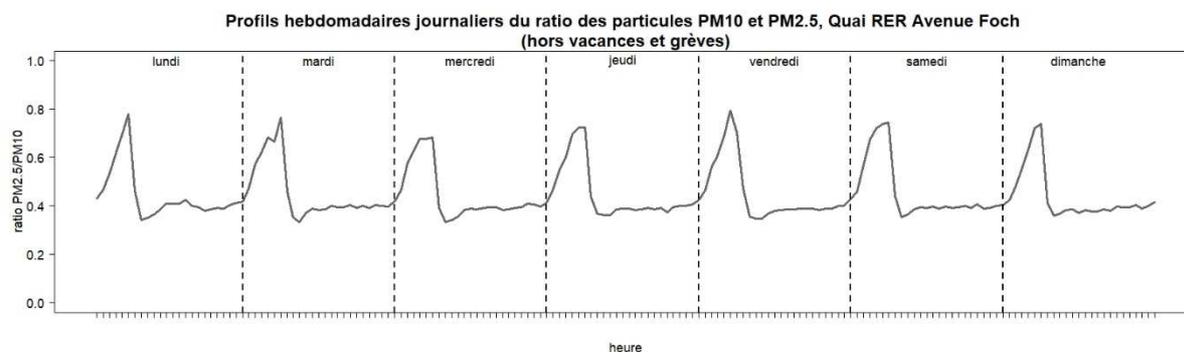


Figure 18 – Evolution du profil horaire du ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ à la gare RER C d'Avenue Foch, en 2022 [hors vacances scolaires](#)

Les ratios relevés à la gare RER C Avenue Foch sont relativement stables en journée, autour de 0,4, et augmentent la nuit pour atteindre 0,8 environ, en lien avec la baisse des passages de trains entraînant une moindre formation et remise en suspension de grosses particules liées au freinage et au dépôt des particules les plus grosses. Le ratio nocturne tend vers le ratio habituellement observé en air extérieur (0,7).

2.3.2.1. ZOOM SUR LES VARIATIONS JOURNALIÈRES SUR UNE SEMAINE

Les fluctuations journalières du ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ en gare Avenue Foch sont présentées à la Figure 19.

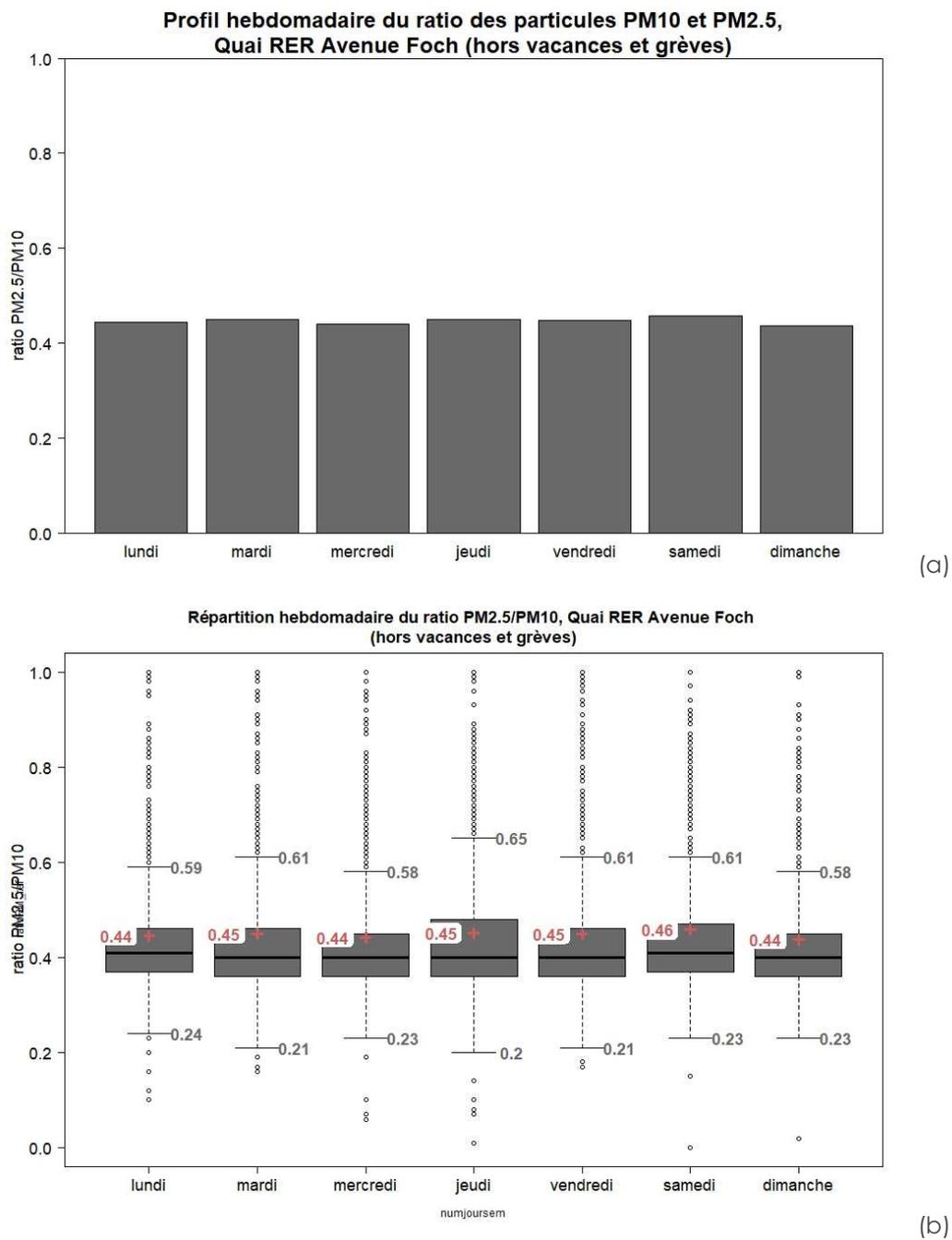


Figure 19 – Évolution des profils journaliers des ratios $PM_{2.5}/PM_{10}$ à la gare RER C d'Avenue Foch (a), en 2022 - [hors vacances scolaires](#). Zoom sur les boîtes à moustaches (b)

Les ratios sont très stables sur l'ensemble de la semaine, week-ends compris : les ratios varient entre 0,44 et 0,46 en gare RER C Avenue Foch.

2.3.3. VARIABILITE JOURNALIERE

Le profil moyen journalier (jours ouvrés) pour la gare Avenue Foch est présenté à la Figure 20.

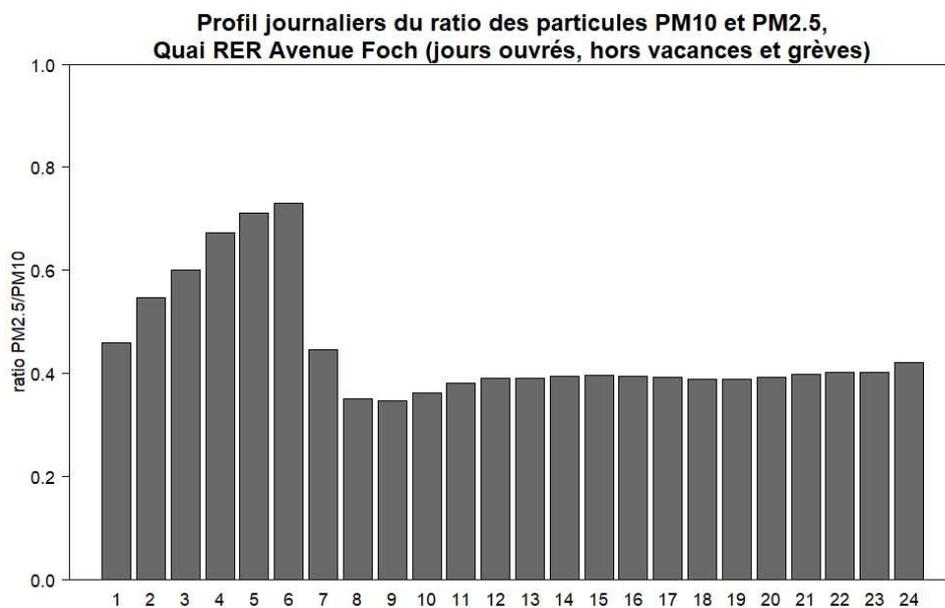


Figure 20 – Évolution du profil journalier du ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ à la gare RER C d'Avenue Foch, en 2022 – [jours ouvrés](#) [hors vacances scolaires](#)

Une stabilité des ratios en journée (de 8h à 24h) est observée en gare RER C Avenue Foch (moyenne à 0,40). La nuit (entre 1h et 5h, lors de la fermeture de la gare au public), les ratios sont plus importants et augmentent tout au long de la nuit. Le ratio maximum est atteint à l'ouverture de la gare au public (0,73 à 6h).

Les particules PM_{10} étant plus grosses, elles sédimentent plus rapidement que les particules $PM_{2.5}$. Ainsi lors de la fermeture de la gare, les concentrations en particules PM_{10} vont diminuer plus rapidement que les $PM_{2.5}$ et seront moins susceptibles d'être remises en suspension, le ratio va donc augmenter.

2.3.4. VARIABILITE MENSUELLE

Le profil mensuel moyen, présenté à la Figure 21, résume les ratios moyens observés chaque mois en 2022, hors vacances scolaires, en gare RER C Avenue Foch.

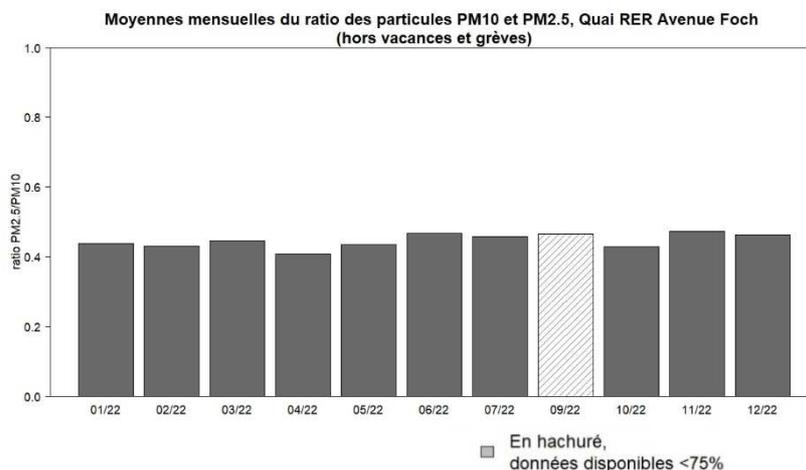


Figure 21 – Évolution du profil mensuel du ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ (a) à la gare RER C d'Avenue Foch, en 2022 – [jours ouvrés hors vacances scolaires](#)

Les ratios $PM_{2.5}/PM_{10}$ en gare RER C Avenue Foch présentent de faibles variations mensuelles. Le mois d'avril 2022 présente le ratio le plus faible (0,41 en moyenne), le maximum (0,47) ayant été observé en novembre.

2.3.5 NIVEAUX EN SERVICE COMMERCIAL

La Figure 22 présente les moyennes hebdomadaires des ratios $PM_{2.5}/PM_{10}$, lors du service commercial d'une part et pendant la nuit d'autre part (période de fermeture de la gare au public) à la gare RER C Avenue Foch.

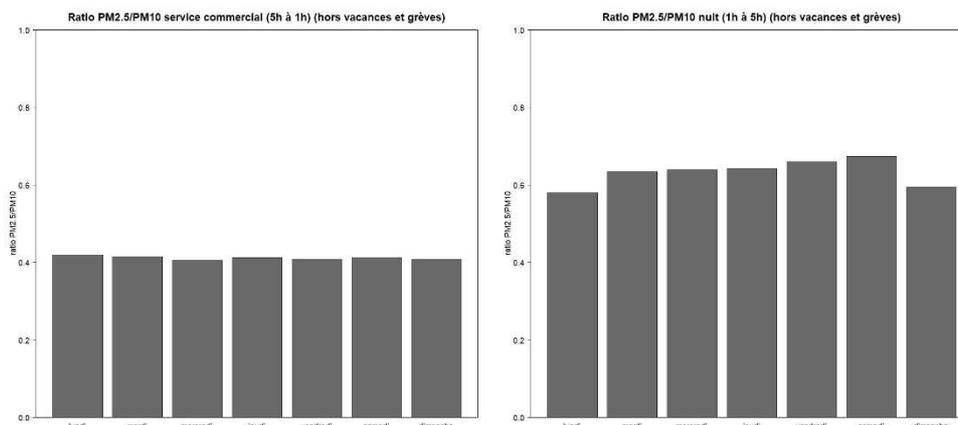


Figure 22 – Évolution des profils hebdomadaires du ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ à la gare RER C d'Avenue Foch, en 2022 – [hors vacances scolaires](#). Service commercial à gauche, Nuit à droite

Le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ est stable les jours ouvrés lors du **service commercial, avec des ratios** proches de 0,4, aussi bien en semaine que le week-end. Les **ratios nocturnes** sont un peu plus élevés, autour de 0,6 et ils sont constants la semaine comme le week-end. Cela s'explique par la baisse des concentrations en particules (en particulier PM_{10}) la nuit, lors de l'arrêt de circulation des trains, principale source de particules de grosse taille.

2.3.6 VARIABILITE ANNUELLE

Le tableau suivant présente les statistiques des ratios $PM_{2.5}/PM_{10}$ depuis le début de la surveillance de la gare en avril 2018.

Statistiques ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2018	2019	2020	2021	2022
Minimum horaire	0,04	0	0,03	0,02	0
Percentile 25 (P25)	0,38	0,35	0,38	0,38	0,36
Médiane ou Percentile 50	0,42	0,39	0,43	0,42	0,4
Moyenne horaire	0,47	0,43	0,48	0,49	0,47
Percentile 75 (P75)	0,49	0,44	0,5	0,5	1
Maximum horaire	1	1	1	1	0,17
% de données horaires valides	89	88	85	79	77

Tableau 6 : Statistiques des ratios $PM_{2.5}/PM_{10}$ en gare RER C Avenue Foch depuis 2018

Les ratios $PM_{2.5}/PM_{10}$ varient peu depuis 2018, entre 0,43 au minimum en 2019 et 0,49 en 2021. Les variations annuelles du ratio peuvent s'expliquer par les variations annuelles de fréquentation de la gare, de trafic ferroviaire et de travaux.

Le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ est en moyenne de 0,46 en gare RER C Avenue Foch en 2022, et il varie peu depuis le début de la surveillance de la gare.

A l'échelle journalière, les ratios sont stables en journée (0,40 entre 8h et 24h) et en hausse la nuit (entre 0,4 et 0,75 en moyenne), en lien avec les sources de particules PM_{10} relativement moins importantes (pas de circulations commerciales) que celles des particules très fines $PM_{2.5}$.

A l'échelle hebdomadaire, peu de variations sont observées. Le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ est équivalent le week-end par rapport à la semaine.

A l'échelle mensuelle, il y a également peu de variations, les ratios moyens variant de 0,41 à 0,47.

2.4 TENEURS DE METAUX DANS LES PARTICULES

De manière générale, les particules sont composées des cinq types d'éléments suivants : le carbone élémentaire, les ions, la matière organique (dont le carbone organique), les métaux et les poussières minérales. Les métaux sont clairement caractéristiques des enceintes ferroviaires souterraines, notamment des systèmes de freinage³, bien qu'ils soient également présents, en nettement moindre quantité, dans l'air extérieur, comme les autres éléments. 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 en gare RER C Avenue Foch. Des mesures ont été réalisées du 7 au 13 mars 2022, et du 14 au 27 novembre 2022. Les prélèvements journaliers ont été réalisés sur la période d'ouverture de la gare au public, à savoir de 5h à 1h, chaque jour. Des résultats de mesure des métaux sont donc disponibles pour **21 jours**.

Onze métaux ont été étudiés : Baryum, Fer, Cuivre, Plomb, Zinc, Antimoine, Manganèse, Nickel, Arsenic, Cadmium et Chrome. Ces métaux ont été choisis conformément à la littérature³. Le Baryum a été ajouté à la liste des métaux étudiés en 2021, en cohérence avec les recommandations nationales de réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines⁴.

Dans la continuité de 2021, des filtres en téflon sont dorénavant utilisés plutôt que des filtres en quartz pour le prélèvement des métaux, ce qui permet la mesure gravimétrique des particules PM₁₀.

³ 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.

⁴ Recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines, https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Ineris-Guide_Protocol_EFS_WEB_BD.pdf

2.4.1. PART DES METAUX DANS LES PARTICULES PM₁₀

Les graphiques suivants (Figure 23) montrent la part de l'ensemble des métaux mesurés parmi les particules PM₁₀, pour chaque journée de mesure en gare RER C Avenue Foch.

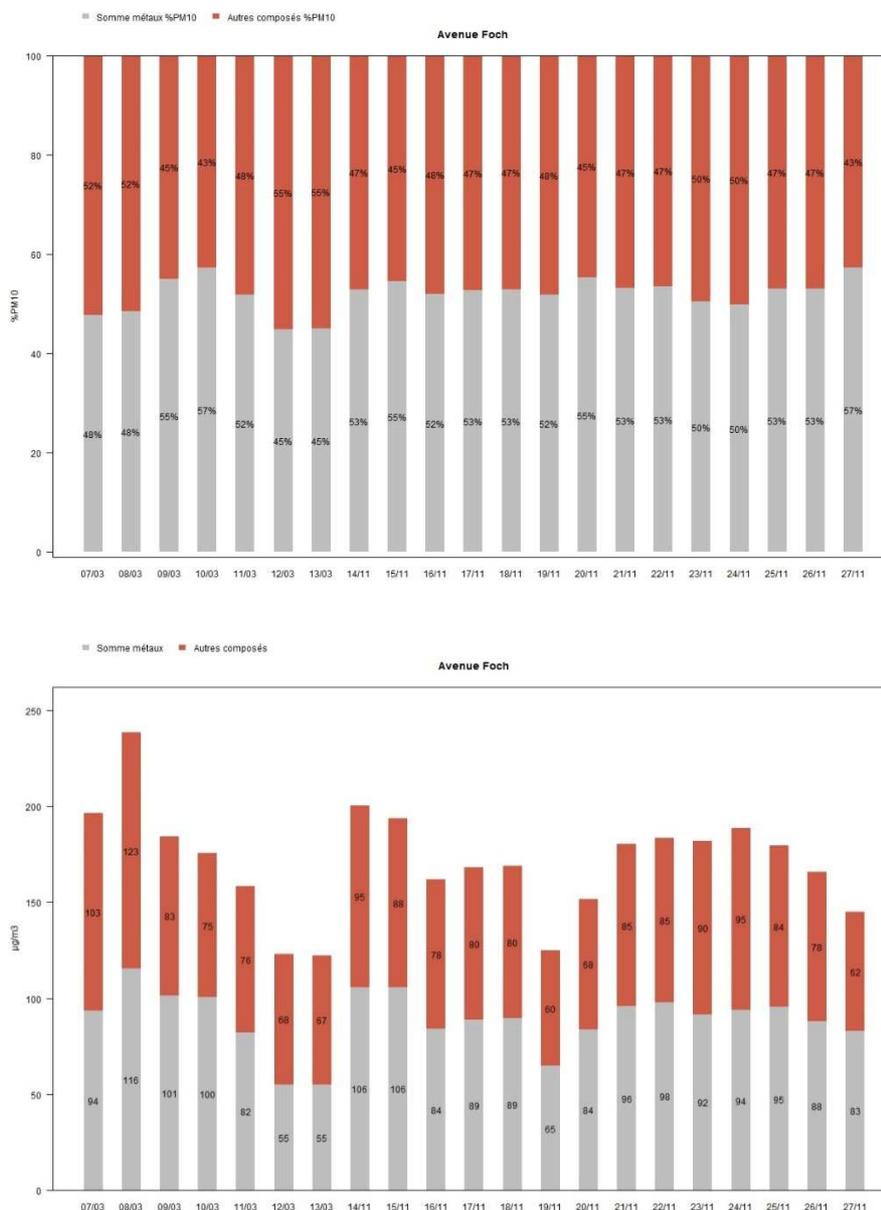


Figure 23 – Part des métaux dans les particules PM₁₀ (en % de particules PM₁₀) et évolution des relevés journaliers (concentrations en µg/m³) sur les périodes de prélèvement de l'année 2022, à la gare RER C Avenue Foch

Sur l'ensemble des données disponibles (21 journées de mesure), les concentrations en métaux varient de 55 µg/m³ (le samedi 12/03/2022 et le dimanche 13/03/2022) à 116 µg/m³ (le mardi 08/03/2022). En comparaison avec la concentration en particules PM₁₀ enregistrée les mêmes journées lors des même tranches horaires, **la part des métaux** a varié de 45 % (les 12 et 13 mars 2022) à 57 % (le jeudi 10/03/2022 et le dimanche 27/11/2022). Elle est **en moyenne de 52 %**.

La part des métaux dans les particules PM₁₀ varie peu d'une année à l'autre. La part des métaux dans les particules PM₁₀ a été globalement stable en 2018, 2019, 2021 et 2022 avec des parts de métaux respectivement de 50, 47, 45 % et 52% en 2022. Les parts de métaux les plus faibles ont été relevées en 2020 (37% en moyenne sur les prélèvements de l'année 2020), ce qui s'explique par la baisse globale du trafic ferroviaire liée à la crise sanitaire.

2.4.2. REPARTITION DES METAUX

La figure suivante (Figure 24) représente la répartition moyenne des composés mesurés au cours des différentes périodes de prélèvements de l'année 2022 (21 jours disponibles).

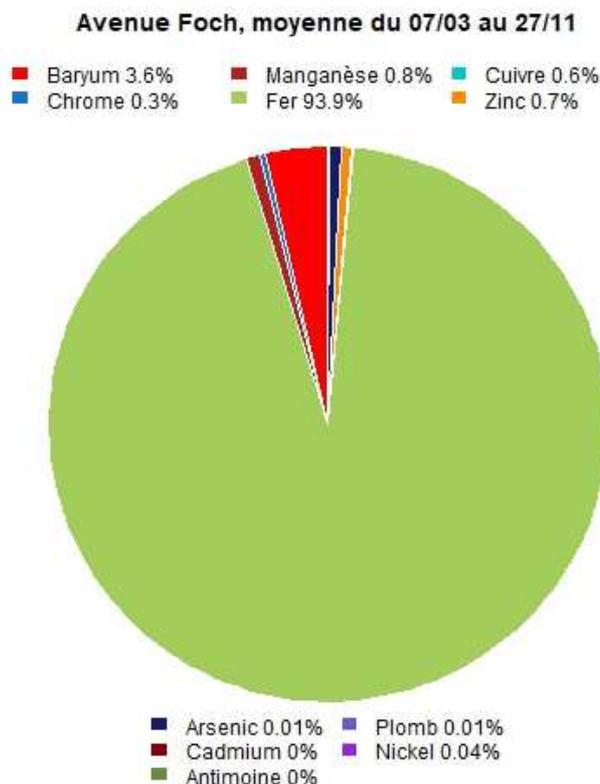


Figure 24 – Part de chaque métal dans les relevés en particules, en moyenne des mesures réalisées en 2022, en gare RER C de Avenue Foch

Parmi les onze métaux étudiés, le **Fer** est l'élément majoritaire : il représente 94 % des métaux mesurés à Avenue Foch. Ce résultat est stable sur toutes les journées de mesure, le pourcentage variant de 93 à 95 %.

Les métaux les plus abondants sont ensuite le **Baryum**, le **Zinc**, et le **Manganèse** mais dans des proportions bien plus faibles que le Fer, avec en moyenne 3,6 % pour le Baryum, 0,8 % pour le Manganèse et 0,7 le Zinc. Vient ensuite le **Cuivre**, qui représente en moyenne 0,6 % des métaux mesurés dans les particules PM₁₀.

Les proportions de ces métaux dans les particules PM₁₀ peuvent varier selon les jours, mais ils restent relativement stables.

Le **Chrome** représente en moyenne 0,3 % des métaux mesurés dans les particules PM₁₀.

Les proportions en **Arsenic**, **Nickel**, **Cadmium**, **Antimoine** et **Plomb** sont négligeables par rapport aux métaux précédemment évoqués.

Les proportions des différents métaux ont peu varié au cours des dernières années. Le tableau suivant présente les proportions de métaux relevés depuis le début de la surveillance de la gare, en avril 2018.

Métaux	2018 (20 jours de mesures)	2019 (12 jours de mesures)	2020 (10 jours de mesures)	2021 (21 jours de mesures)	2022 (21 jours de mesures)
Aluminium	1,1 %	0,7 %	1,0 %	Non mesuré	Non mesuré
Antimoine	< 0,1 %	< 0,1 %	< 0,1 %	< 0,1 %	< 0,1 %
Arsenic	< 0,1 %	< 0,1 %	< 0,1 %	< 0,1 %	< 0,1 %
Baryum	Non mesuré	Non mesuré	Non mesuré	3,5 %	3,6 %
Cadmium	< 0,1 %	< 0,1 %	< 0,1 %	< 0,1 %	< 0,1 %
Chrome	0,4 %	0,3 %	0,4 %	0,3 %	0,3 %
Cuivre	0,7 %	0,5 %	0,7 %	0,7 %	0,6 %
Fer	96 %	97 %	96 %	94 %	94 %
Manganèse	0,8 %	0,8 %	0,9 %	0,8 %	0,8 %
Nickel	0,1 %	0,1 %	0,1 %	< 0,1 %	< 0,1 %
Plomb	< 0,1 %	< 0,1 %	< 0,1 %	< 0,1 %	< 0,1 %
Zinc	0,9 %	0,6 %	1,0 %	0,8 %	0,8 %

Tableau 7 : Evolution de la part des métaux dans les particules PM₁₀ depuis 2018

Les sources connues dans les enceintes ferroviaires souterraines sont :

- Les émissions lors du freinage. La plupart de ces composés (Manganèse, Fer, Aluminium, Chrome, Plomb, Cuivre, Nickel, Antimoine, Baryum) peuvent être présents dans les semelles de frein.
- 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 ferroviaires souterraines 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 est présent dans les câbles d'alimentation dans les enceintes souterraines ferroviaires, il est émis lors du contact entre le matériel roulant et les caténaires (système d'alimentation). Il est également présent dans les semelles de frein et par conséquent il peut être émis lors du freinage.

Les concentrations des composés métalliques observées sont cohérentes avec les sources identifiées et les résultats de la littérature. L'analyse bibliographique dans les réseaux ferroviaires français (hors réseau francilien) met en avant le Fer comme élément dominant en termes de concentrations, 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, le Nickel et le Chrome. Ainsi les observations sur le réseau francilien sont cohérentes avec les résultats dans des environnements similaires.

2.4.3. NIVEAUX OBSERVES ET VARIATIONS TEMPORELLES

Le graphique suivant (Figure 25) présente les concentrations journalières observées pour le Fer (21 jours de mesures) à la gare Avenue Foch. Les relevés journaliers pour chacun des autres métaux sont présentés en Annexe 4.

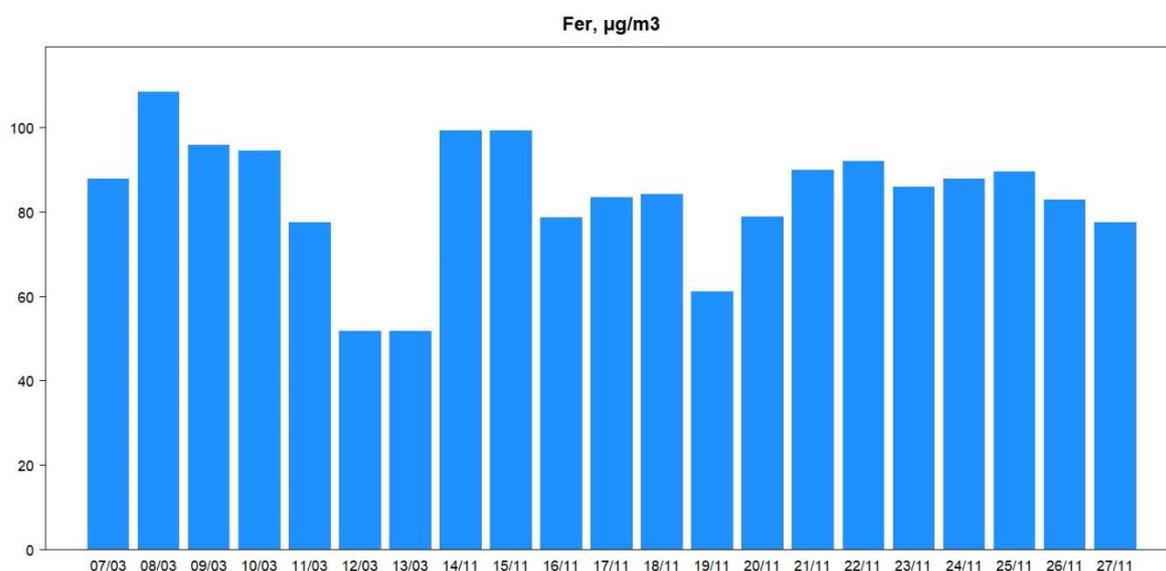


Figure 25 – Relevés journaliers en Fer (en µg/m³) à la gare RER C de Avenue Foch, 2022

Les teneurs en **Fer** ont varié en gare RER C Avenue Foch au cours des différentes journées de mesures, de 52 µg/m³ les samedi 12 et dimanche 13 mars 2022, à 108 µg/m³ le mardi 8 mars 2022. Ces niveaux sont en lien direct avec les concentrations en particules PM₁₀ observées sur ces mêmes journées, comme évoqué au paragraphe précédent. La variabilité temporelle observée sur le Fer pendant les journées de mesure se retrouve sur les autres métaux mesurés.

Cinq métaux présentent des teneurs de l'ordre de quelques centaines à milliers de ng/m³. Il s'agit du **Cuivre, Zinc, Manganèse, Chrome et du Baryum**.

Les concentrations journalières en **Baryum** ont varié de 1 888 à 4 487 ng/m³, les résultats sont en moyenne de 3 229 ng/m³.

Les teneurs journalières en **Zinc, Cuivre et Manganèse** sont du même ordre de grandeur. Les teneurs en **Zinc** varient de 353 à 895 ng/m³, pour une moyenne de 664 ng/m³. Celles du **Cuivre** varient de 317 à 721 ng/m³, pour une moyenne de 538 ng/m³. Les teneurs **Manganèse** varient de 456 à 869 ng/m³ pour une moyenne de 682 ng/m³.

Les concentrations journalières en **Chrome** sont plus faibles, entre 196 à 391 ng/m³, pour une moyenne de 293 ng/m³.

Pour les cinq autres métaux, les niveaux journaliers varient :

- Entre 26 et 49 ng/m³ pour le Nickel⁵, pour une moyenne de 38 ng/m³.
- Entre 2 et 8 ng/m³ pour le Plomb⁵, pour une moyenne de 5 ng/m³,
- Entre 1 et 5 ng/m³ pour l'Antimoine⁵, pour une moyenne de 2 ng/m³,
- Entre 3 et 7 ng/m³ pour l'Arsenic⁵, pour une moyenne de 5 ng/m³,
- Pour le Cadmium⁵, les relevés journaliers sont tous inférieurs au seuil de détection (0.27 ng/m³).

⁵ Limite de détection pour le Nickel, Antimoine : 38 ng/filtre ; Pour le Plomb, Cadmium, Arsenic : 8 ng/filtre.
Limite de quantification pour le Nickel, Antimoine : 125 ng/filtre ; Pour le Plomb, Cadmium, Arsenic, Antimoine : 25 ng/filtre.

Les concentrations maximales ont été relevées au cours de la journée du mardi 08/03/2022, à l'exception du Cuivre et du Zinc pour lesquels il s'agit du lundi 14/11/2022. Il s'agit des deux journées pour lesquelles les teneurs en particules PM₁₀ étaient maximales.

Le tableau suivant présente les concentrations moyennes en métaux relevées depuis le début de la surveillance de la gare RER C Avenue Foch, en avril 2018.

Métaux (ng/m ³)	2018 (20 journées de mesures)	2019 (12 journées de mesures)	2020 (10 journées de mesures)	2021 (21 journées de mesures)	2022 (21 journées de mesures)
Aluminium	989	960	820	Non mesuré	Non mesuré
Antimoine	4	4	5	7	2
Arsenic	9	15	12	6	5
Baryum	Non mesuré	Non mesuré	Non mesuré	3 010	3 229
Cadmium	0.27	0.27	0.27	2.15	0.27
Chrome	366	453	324	282	293
Cuivre	677	680	564	608	538
Fer	93 416	129 353	75 500	80 766	83 702
Manganèse	787	1 020	744	647	682
Nickel	56	71	44	37	38
Plomb	24	18	154	43	5
Zinc	843	857	780	718	664

Tableau 8 : Concentrations moyennes en métaux (ng/m³) relevées depuis avril 2018 en gare RER C Avenue Foch

Les concentrations en métaux évoluent peu au fil des années. Les concentrations en métaux ont globalement diminué sur l'année 2021, en lien avec la diminution globale du trafic ferroviaire et aux restrictions de la crise sanitaire (confinements et couvre-feux). Les teneurs en 2022 sont très proches de celles de 2021. A noter en 2022 des teneurs faibles en Plomb, aucune valeur atypiquement forte ayant été relevée.

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 souterraines, de façon plus ou moins marquée selon la profondeur de la gare, les accès et ouvertures vers l'extérieur et le système de ventilation en place. L'influence sera d'autant plus importante que la gare est peu profonde et qu'il existe plusieurs accès vers l'extérieur.

Les concentrations relevées en gare RER C Avenue Foch sont comparées aux concentrations relevées par différentes stations du réseau de surveillance d'Airparif :

- Station Gennevilliers, située 60 Rue Richelieu 92230 Gennevilliers. Station de typologie urbaine de fond ;
- Station Boulevard Périphérique Porte d'Auteuil, située au niveau du boulevard Périphérique Porte d'Auteuil 75016 Paris. Station de typologie trafic ;
- Station Paris Centre, située dans le Jardin des Halles – Al J. Supervielle 75001 Paris. Station de typologie urbaine de fond.

Ces trois stations mesurent les oxydes d'azote ainsi que les particules PM₁₀ et PM_{2.5}.

La localisation des stations est présentée Figure 26.

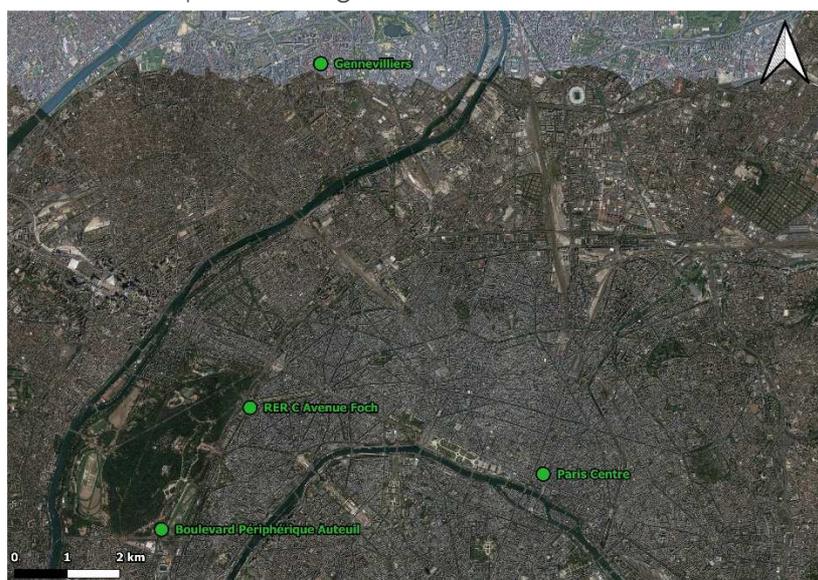
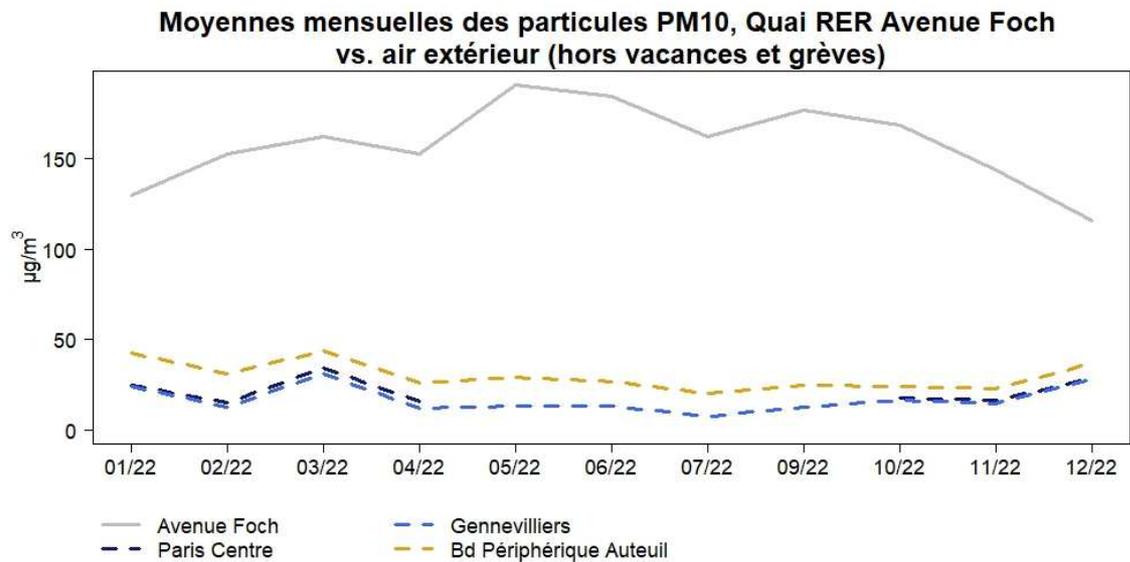


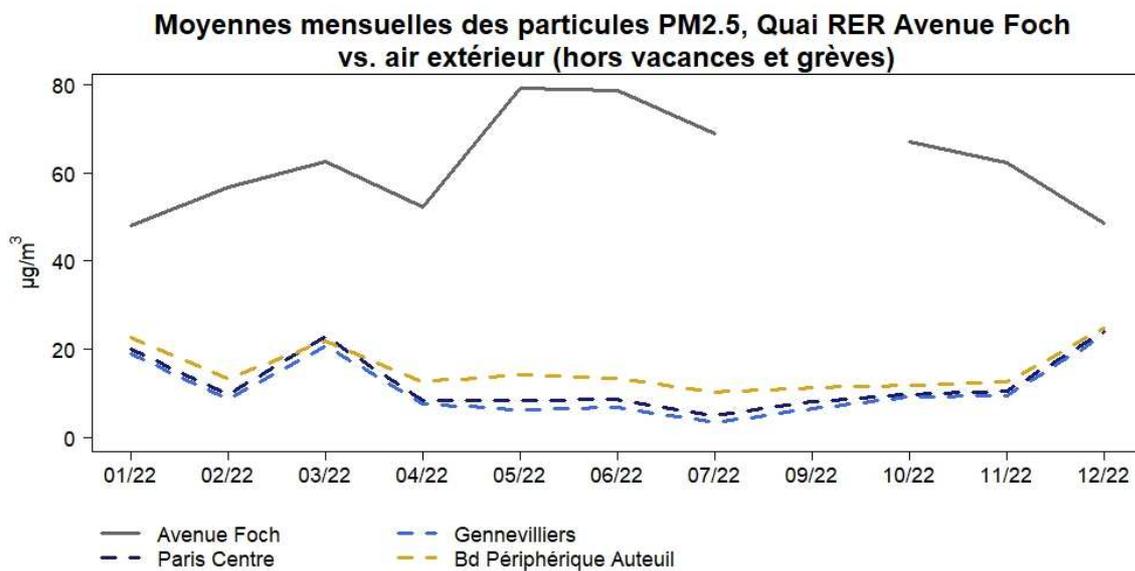
Figure 26 : Cartographie des stations de surveillance de l'air extérieur utilisées pour la comparaison des concentrations à la gare RER C Avenue Foch

La Figure 27 présente les concentrations moyennes mensuelles pour les particules PM₁₀ et PM_{2.5} sur les quais du RER C Avenue Foch, ainsi qu'en air extérieur, sur différentes stations du réseau Airparif.

Les concentrations moyennes en particules PM₁₀ et PM_{2.5} sur les quais de la gare RER C Avenue Foch sont quatre à neuf fois supérieures aux concentrations mesurées par les stations Paris Centre, Gennevilliers et Auteuil du réseau Airparif sur la même période. **Les teneurs en particules étant bien plus importantes sur les quais qu'en extérieur, l'influence de l'air extérieur sur les concentrations en particules est probablement négligeable.**



(a)



(b)

Figure 27 – Moyennes mensuelles des concentrations en PM₁₀ (a) et PM_{2.5} (b), en air extérieure et en gare RER C Avenue Foch, en 2022 - [hors vacances scolaires](#)

Les graphiques suivants présentent les profils journaliers en particules PM₁₀ (a) et PM_{2.5} (b) en gare RER C Avenue Foch ainsi qu'aux stations Paris Centre, Gennevilliers et Auteuil du réseau Airparif.

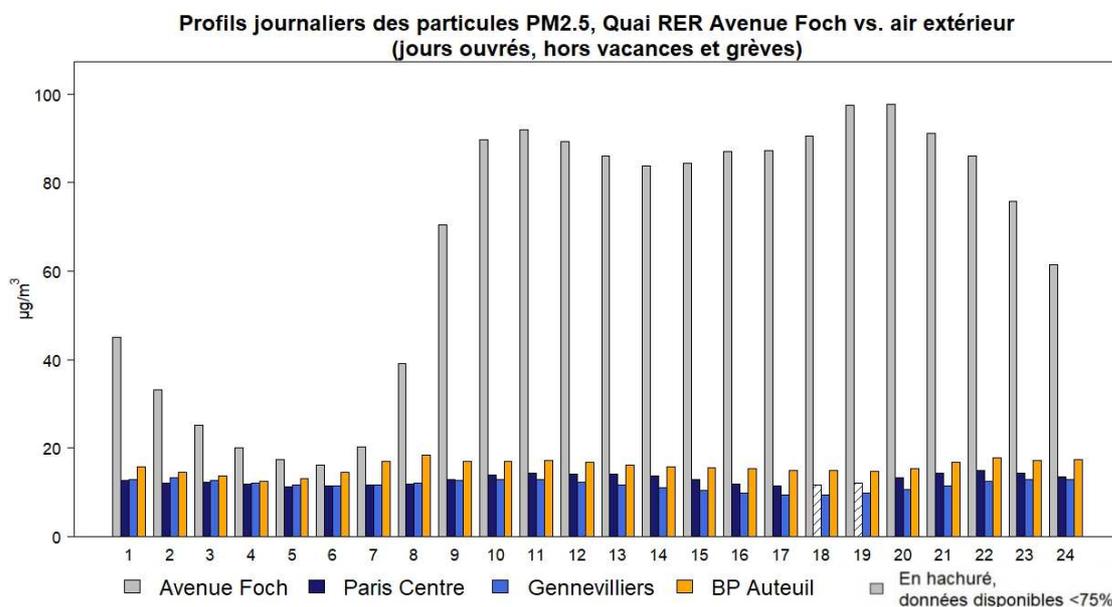
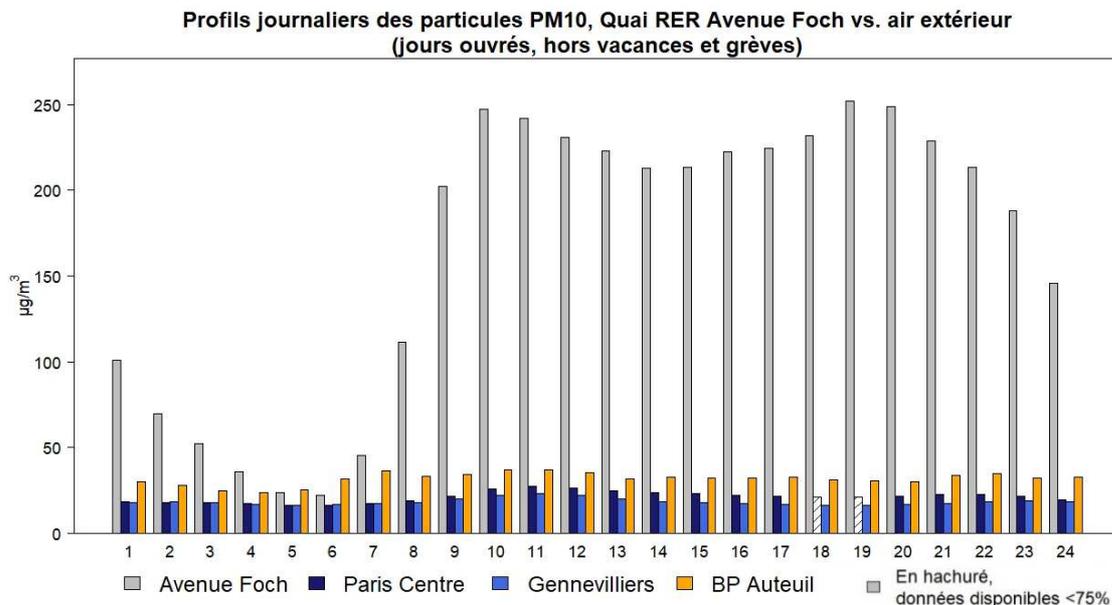


Figure 28 : Profils journaliers en particules PM₁₀ (a) et PM_{2.5} (b), en air extérieur et en gare RER C Avenue Foch, en 2022 – jours ouvrés hors vacances scolaires

Les concentrations en particules PM₁₀ et PM_{2.5} relevées en gare RER C Avenue Foch sont, à toute heure, largement supérieures à celles relevées sur les stations de fond du réseau Airparif, à savoir Paris Centre et Gennevilliers, ainsi qu'à la station à proximité du trafic routier Boulevard Périphérique Porte d'Auteuil. Les niveaux relevés en gare sont jusqu'à dix fois supérieurs à ceux relevés en extérieur.

Le graphique suivant (Figure 29) représente les moyennes mensuelles en NO₂ sur les quais de la gare RER C Avenue Foch et en air extérieur. Il est difficile de voir un lien direct entre les fluctuations mensuelles des concentrations en NO₂ sur le quai et celles des concentrations mesurées en air extérieur, aussi bien en situation de fond (stations Paris Centre et Gennevilliers) qu'à proximité du trafic routier (station Boulevard Périphérique Porte d'Auteuil). A l'échelle mensuelle, **l'influence de la qualité de l'air extérieur sur les concentrations mesurées au niveau du quai du RER C Avenue Foch ne peut pas être mise en avant.**

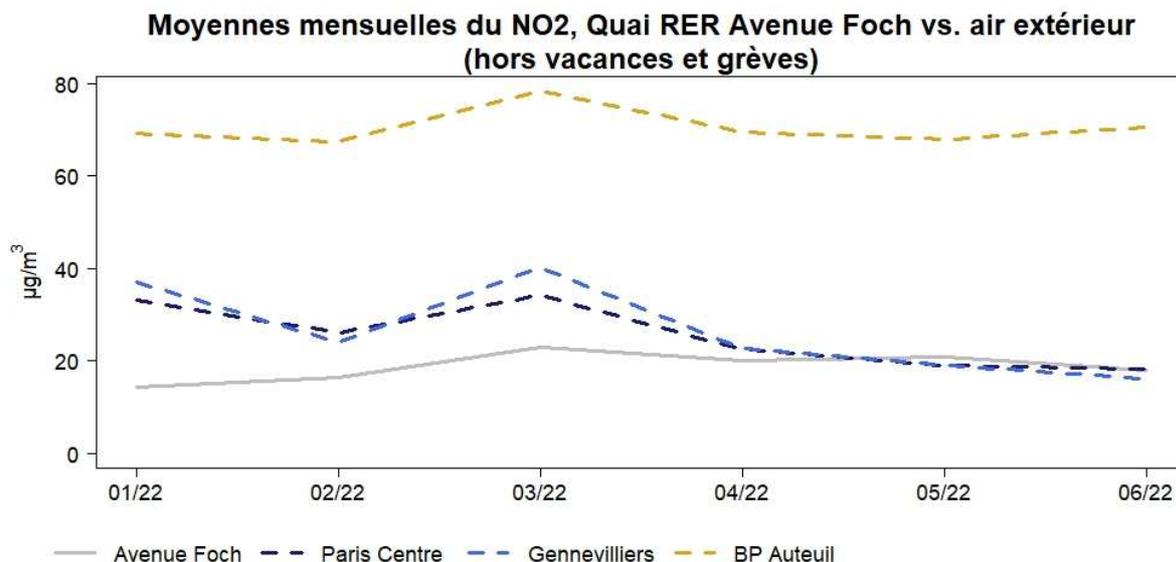


Figure 29 – Moyennes mensuelles des concentrations en NO₂, en air extérieur et en gare RER C Avenue Foch, entre janvier et juin 2022 (janvier à juin) - [hors vacances scolaires](#)

Le graphique suivant (Figure 30) représente les profils journaliers (concentrations moyennes horaires) en NO₂ sur le quai de la gare Avenue Foch et en air extérieur. Les concentrations en NO₂ en gare RER C Avenue Foch varient très peu sur une journée, contrairement à celles des stations extérieures où les pics du matin et du soir sont plus marqués.

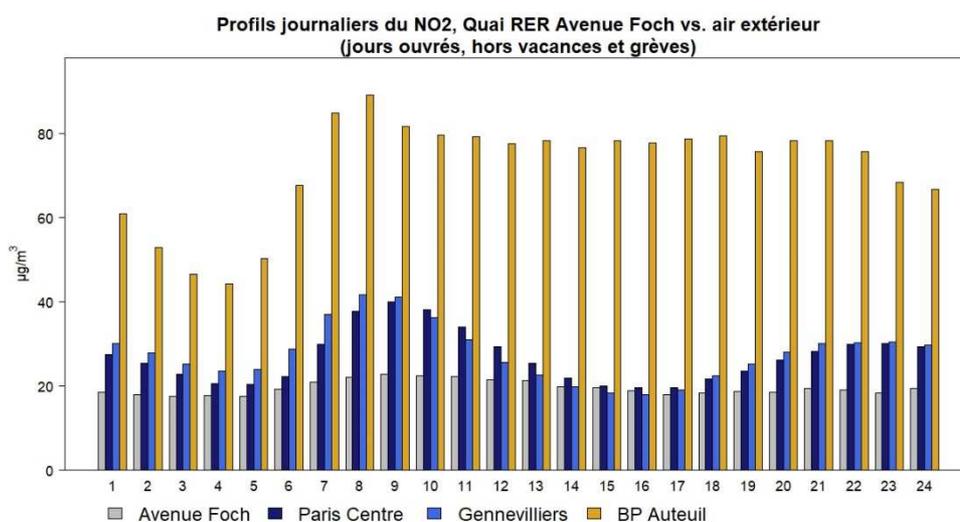


Figure 30 : Profils journaliers des concentrations en NO₂, en air extérieur et en gare RER C Avenue Foch, entre janvier et juin 2022 – [jours ouvrés hors vacances scolaires](#)

Les concentrations en **particules et en dioxyde d'azote** observées sur le quai RER d'Avenue Foch sont **faiblement impactées par les niveaux en air extérieur**, lors du fonctionnement normal de la gare.

Concernant les particules, à l'échelle mensuelle ou journalière, l'impact de l'air extérieur sur les quais n'est pas visible ; la source prédominante de pollution reste la circulation ferroviaire.

Concernant le dioxyde d'azote, à l'échelle mensuelle comme à l'échelle journalière, l'impact de l'air extérieur sur les quais n'est pas visible lors du fonctionnement normal de la gare d'après les relevés de 2022.

3.2 CONFINEMENT DE LA GARE, PARAMETRES DE CONFORT

La mesure des teneurs en CO₂ permet de suivre le renouvellement d'air et le confinement de la gare dans des espaces potentiellement soumis à diverses sources de CO₂ (combustion, respiration humaine). Les paramètres température ambiante et humidité ont également été suivis.

Les relevés journaliers en température, humidité et teneurs en CO₂ à la gare Avenue Foch sont présentés à la Figure 31.

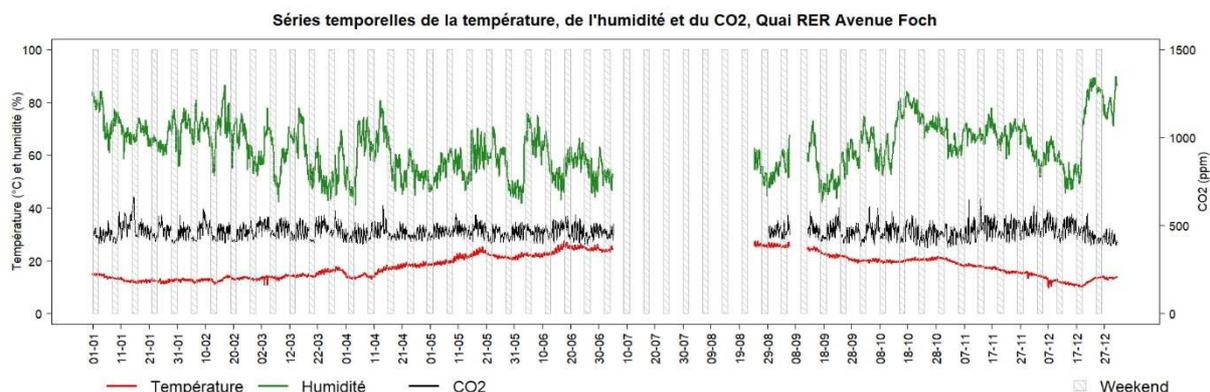


Figure 31 – Relevés horaires de dioxyde de carbone (CO₂), température (T) et d'humidité relative (H) à la gare RER C de Avenue Foch, en 2022

Sur l'ensemble de la période étudiée (année 2022), la **température** moyenne en gare RER C Avenue Foch est de 18°C. Les relevés horaires ont varié entre 9 et 28°C (minima enregistrés la nuit en hiver, maxima observés en après-midi l'été).

L'**humidité relative** moyenne en gare RER C Avenue Foch est de 63 % en 2021, les relevés horaires ont varié entre 41 % et 90 %.

Sur l'ensemble de la période considérée, une variation saisonnière des températures est observée, en lien avec l'influence des conditions météorologiques extérieures. Les fluctuations de l'humidité sont plus marquées, également en lien avec les conditions météorologiques extérieures.

La principale source de **CO₂** sur les quais étant la respiration humaine, les concentrations relevées varient avec la fréquentation de la gare. La moyenne relevée sur la période étudiée est de 463 ppm, et les relevés horaires ont varié entre 375 ppm et 661 ppm. Les niveaux en CO₂ ont été très stables en 2022.

La comparaison des concentrations horaires en particules (PM₁₀ d'une part, PM_{2.5} d'autre part) et les teneurs en CO₂ les jours ouvrés (cf. Figure 32) montre que les teneurs maximales sont observées en même temps pour le CO₂ et pour les particules, à savoir aux heures de pointe du matin (10h) et du soir (18 - 21h). Cela confirme que les concentrations en particules sont plus importantes lorsque la fréquentation de la gare est la plus élevée. Toutefois l'amplitude des variations des niveaux de dioxyde de carbone est, au cours d'une journée, moins importante que pour les particules.

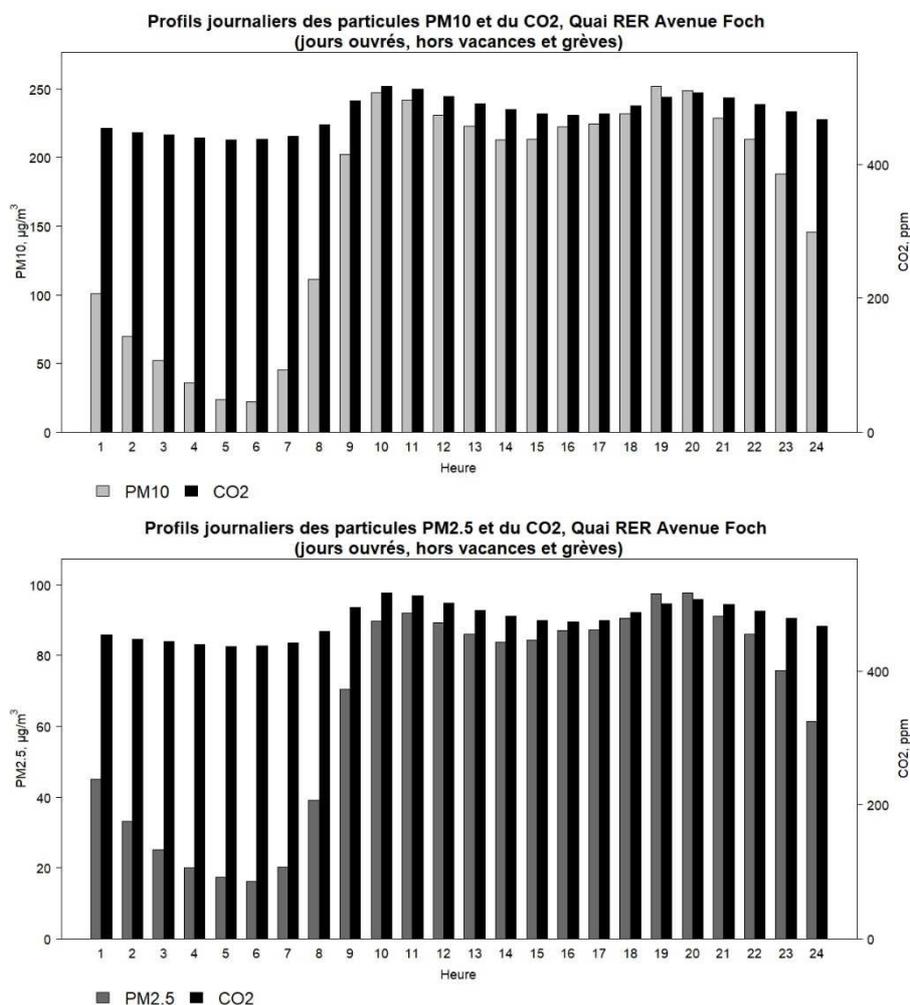


Figure 32 – Profils journaliers en PM₁₀ et CO₂ et en PM_{2.5} et CO₂, à la gare RER C de Avenue Foch, en 2022 – [jours ouvrés, hors vacances scolaires](#)

3.3 PARAMETRES TECHNIQUES, TRAFIC DE LA GARE

Certains paramètres techniques de la gare doivent être pris en compte en tant que potentiels facteurs explicatifs des niveaux de particules :

- Fréquence des trains circulant sur les voies,
- Influence de la ventilation : la gare RER C Avenue Foch ne bénéficie pas de ventilation mécanique, aucune influence de changement de ventilation, au cours des mesures, n'a pu être étudiée.

Le **nombre de trains circulant** par heure en gare RER C Avenue Foch a été transmis par la SNCF Gares & Connexions sur l'ensemble de l'année 2022.

En moyenne, 175 trains circulent en gare RER C Avenue Foch durant les jours ouvrés, contre 143 trains les samedis et les dimanches. Les chiffres sont présentés en Figure 33.

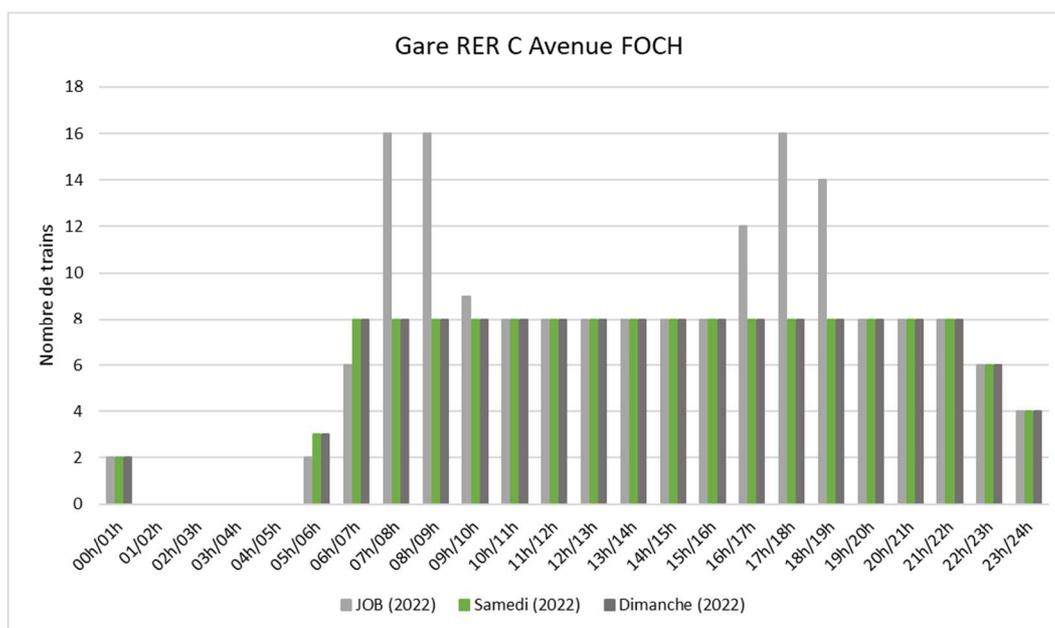


Figure 33 – Nombre de trains enregistrés chaque heure à la gare RER C Avenue Foch en 2022

Un croisement du nombre de trains en circulation avec les concentrations moyennes en **particules** à l'échelle journalière est présenté à la Figure 34 pour les jours ouvrés en gare RER C Avenue Foch.

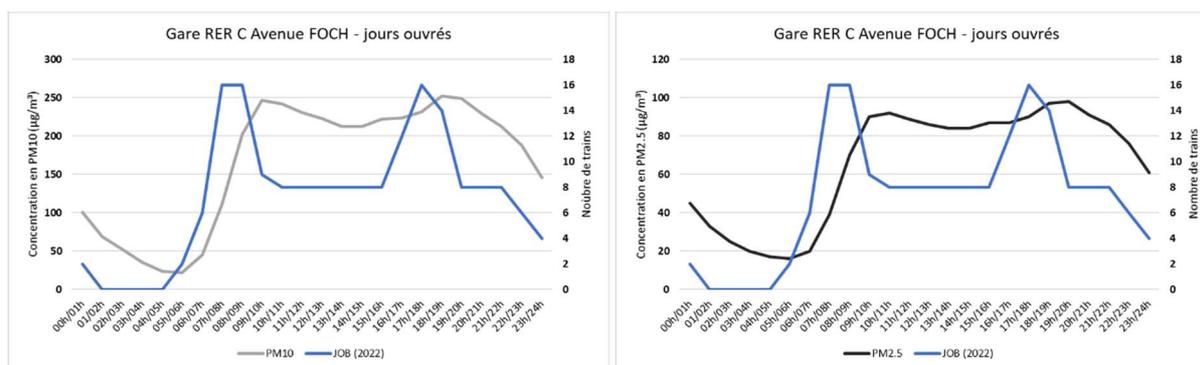


Figure 34 – Teneurs en particules PM₁₀, PM_{2.5} et nombre de trains en circulation (jours ouvrés) à la gare RER C de Avenue Foch en 2022

Le profil des teneurs en particules (PM₁₀ et PM_{2.5}) est corrélé au nombre de trains en circulation. Un décalage horaire (1h) 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 35. Les teneurs observées en particules (PM₁₀ et PM_{2.5}) sont liées au nombre de trains en circulation.

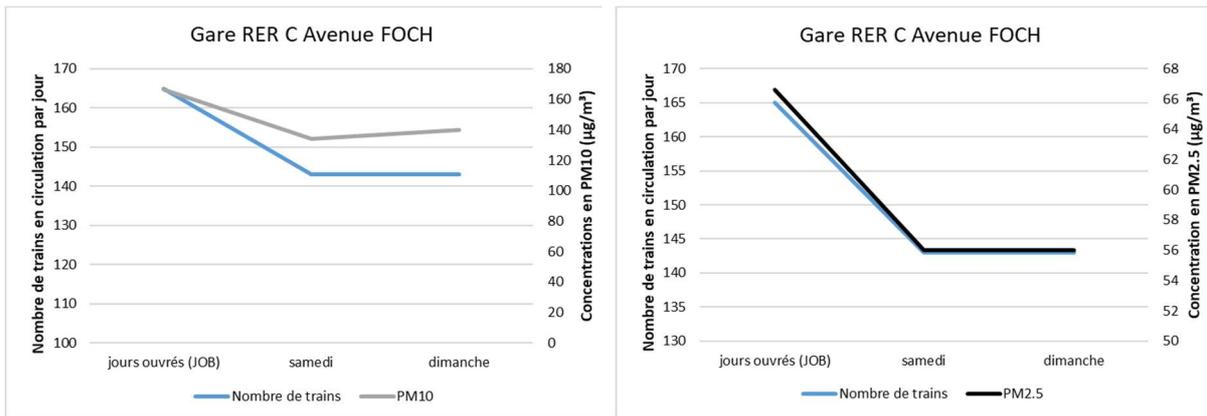


Figure 35 : Teneurs en particules PM₁₀ et PM_{2.5} observées et nombre de trains en circulation, pour les jours ouvrés, le samedi et le dimanche, à la gare RER C Avenue Foch

Un croisement du nombre de trains avec les teneurs en **NO** et **NO₂** ne montre pas de corrélation (cf. Figure 36) pendant la période d'ouverture de la gare au public. La nuit, les concentrations plus élevées en NO, alors que la circulation commerciale a cessé, sont dues aux trains de travaux (qui ne sont pas comptabilisés).

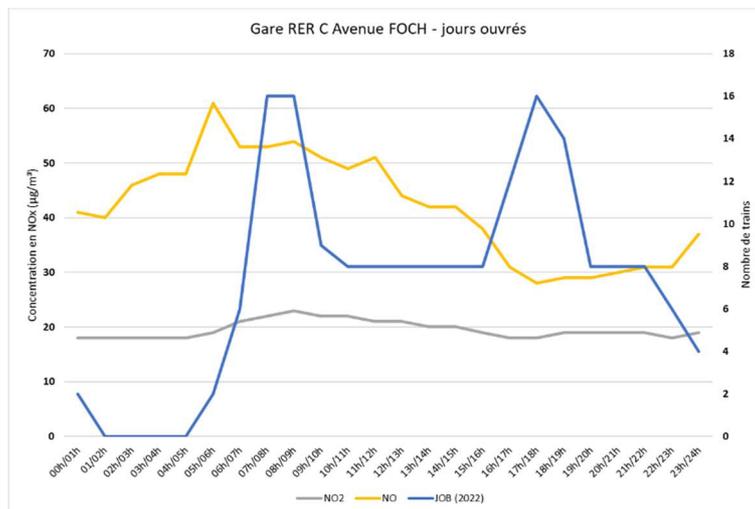


Figure 36 – Teneurs en NO_x et nombre de trains en circulation à la gare RER C d'Avenue Foch, en 2022

L'influence de divers paramètres de la gare RER C Avenue Foch a été étudiée.

- **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.
- Les niveaux en CO₂, directement liés à la respiration humaine et par conséquent à la fréquentation de la gare, sont corrélés avec les niveaux de particules en gare RER C Avenue Foch.

4. CONCLUSION

Ce rapport présente les niveaux de pollution observés en gare RER C d'Avenue Foch sur l'ensemble de l'année 2022. Cette gare bénéficie d'un suivi en continu mis en place dans le cadre du partenariat entre Airparif et SNCF Gares & Connexions depuis avril 2018. A noter que les mesures ont été suspendues pendant l'été à cause des travaux CASTOR réalisés sur le RER C et ayant engendré une fermeture de la gare Avenue Foch au public. Par ailleurs, les mesures de NOx ont été arrêtées à l'été, les données traitées concernent la période du 01.01 au 30.06.23.

Les éléments à retenir concernant les **particules PM₁₀** et **PM_{2.5}** sont :

- Les **teneurs en particules fines PM₁₀** mesurées sur les quais du RER C en gare RER C Avenue Foch au cours de l'année 2022 **étaient en moyenne de 151 µg/m³**, le maximum horaire atteint étant de 1 243 µg/m³ (enregistré le mercredi 20 avril entre 2 et 3h, probablement lors de travaux).
- **Les niveaux moyens en particules très fines PM_{2.5} étaient de 61 µg/m³**, pour un maximum horaire de 289 µg/m³ (enregistré le jeudi 8 décembre entre 5 et 6h, probablement lors de travaux).

La répartition mensuelle montre des fluctuations dans des proportions similaires en PM₁₀ et PM_{2.5}. Les mois de janvier et décembre présentent les niveaux moyens en PM₁₀ et PM_{2.5} les plus faibles, tandis que les mois de mai et juin présentent les niveaux moyens en particules les plus élevés.

L'évolution des profils hebdomadaires montre des concentrations plus faibles les samedis et dimanches, comparativement aux jours ouvrés : une baisse de l'ordre de 18 % pour les PM₁₀ et 16 % pour les PM_{2.5} est enregistrée. Les profils journaliers montrent des concentrations minimales la nuit, lors de la période de fermeture de la gare. Les teneurs sont maximales lors des pointes du matin (10-12h) et du soir (18-21h). Enfin, les concentrations sont plus importantes en service commercial que sur une journée de 24h, de l'ordre de 14 % pour les PM₁₀ et 12 % pour les PM_{2.5}.

Concernant les **oxydes d'azote (NO et NO₂)**, la teneur moyenne relevée sur les quais de la gare RER C à Avenue Foch est de **18 µg/m³ en NO** et **18 µg/m³ pour le NO₂**.

Comme pour les particules, à l'échelle hebdomadaire, les profils montrent des teneurs plus faibles les samedis et dimanches, comparativement aux jours ouvrés. La baisse est de l'ordre de 41 % pour le NO et de 21 % pour le NO₂.

Sur une journée ouvrée moyenne, les niveaux nocturnes sont les plus forts (entre 1h et 5h), correspondant à la période des travaux de maintenance réalisés sur le réseau souterrain, voire uniquement à des passages de trains travaux à locomotive diesel (en moyenne 27 µg/m³ en NO et 18 µg/m³ en NO₂). Les niveaux sont plus faibles le reste de la journée, durant le service commercial en NO (la teneur moyenne de NO est de 21 µg/m³). Les teneurs sont relativement stables en NO₂ (20 µg/m³ en moyenne pendant le service commercial).

La part des **métaux** dans les **particules PM₁₀**, suivie périodiquement (21 journées de mesures), est en moyenne de 52 %. Le **Fer** est l'élément majoritaire : il représente 94 % de la masse des métaux mesurés. Suivent ensuite **le Baryum** (3,6 %), le **Manganèse** (0,8 %), le **Zinc** (0,7 %), le **Cuivre** (0,6 %) et le **Chrome** (0,3 %). Les proportions en Arsenic, Cadmium, Antimoine, Plomb et Nickel sont négligeables.

La part des différents composés varie modérément pendant l'ensemble des mesures.

Les concentrations moyennes annuelles en particules PM₁₀ et PM_{2.5} varient peu depuis le début de la surveillance de la gare en avril 2018. Les années 2020 et 2021 ont présenté les niveaux les plus

faibles, en lien avec la baisse globale du trafic ferroviaire liée à la crise sanitaire. Les teneurs en 2022 sont reparties à la hausse par rapport à 2021, mais restent inférieures à celles de 2018 et 2019

La circulation ferroviaire et la fréquentation de la gare sont les principaux paramètres d'influence des concentrations en particules sur le quai de la gare.

Concernant les oxydes d'azote, les variations temporelles observées en gare RER C Avenue Foch ne sont pas liées à la circulation des trains de voyageurs mais aux travaux nocturnes utilisant des engins thermiques pour les valeurs les plus élevées.

Compte tenu des fortes teneurs en particules en gare RER C Avenue Foch, une influence de l'air extérieur sur les niveaux intérieurs est peu visible.

ANNEXES

Annexe 1

Éléments techniques de la gare Avenue Foch (RER C)

Configuration de la gare :

Pas de correspondance.

Un quai central encadré de 2 voies.

Pas de portes palières

Ventilation : Naturelle

Fréquentation de la gare :

Nombre de voyageurs /jour (montants par station/j) : 1 430 par jour (source SNCF)

Nombre de trains/jour ; 175 les jours ouvrés, 143 le samedi et le dimanche

Caractéristiques du matériel roulant :

Matériel : type RER

Modèle : automotrices Z5600, Z8800, Z20500, Z20900

Véhicules compartimentés (4 à 6 voitures par rame)

Véhicules à étage (2 niveaux), entre 872 et 1536 places totales par train.

Energie motrice : électrique par caténaire

Type de roulement : Fer

Conditions de circulation :

Travaux CASTOR pendant l'été : fermeture de la gare au public

Annexe 2

Détails 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.

A la gare de référence Avenue Foch, des mesures en dioxyde d'azote, spécifique de la pollution urbaine, ont été réalisées depuis 2018. Elles ont été arrêtées à l'été 2022.

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, afin 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. Une station d'acquisition permet un échange régulier d'informations depuis le siège d'Airparif.

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 (PM₁₀)⁶ et particules fines (PM_{2,5}) ont été mesurées par analyseurs automatiques, ainsi que les NO_x⁷ sur le site d'Avenue Foch.

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 maintenant réalisés sur des filtres téflon, permettant ainsi la mesure gravimétrique des particules PM₁₀. L'analyse est réalisée selon une méthode normalisée par le laboratoire Micropolluant⁸.

Afin d'être conforme aux pratiques existantes dans les enceintes souterraines, les prélèvements de métaux sont réalisés pendant 5 jours ouvrés (pour les campagnes dans les gares, il a été choisi, conjointement avec SNCF Gares d'Ile-de-France, de réaliser les prélèvements au cours de la 1^{ère} semaine de mesure, du lundi au vendredi), entre le passage du 1^{er} train (environ 5h) et celui du dernier train (environ 1h).

La liste des métaux étudiés s'appuie en particulier sur les recommandations de l'ANSES³ 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 Baryum (Ba).

Les mesures ont été réalisées sur les particules PM₁₀, prélevées 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) (analyse) 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 rendant la donnée non représentative, etc.

⁶ Mesures des PM₁₀ et PM_{2,5} selon la norme NF EN 12341 par FDMS (Filter Dynamics Measurement System : mesure par micro-balance, prise en compte de la fraction volatile des particules). A la station Magenta (mesures par AEF), mesure des PM₁₀ et des PM_{2,5} par micro-balance à l'aide d'analyseurs automatiques de type RP1400 (R&P) appelés aussi FDMS, en prenant en compte la norme NF EN 12341.

⁷ Mesures des NO_x selon la norme NF EN 14211 par réduction catalytique et chimiluminescence.

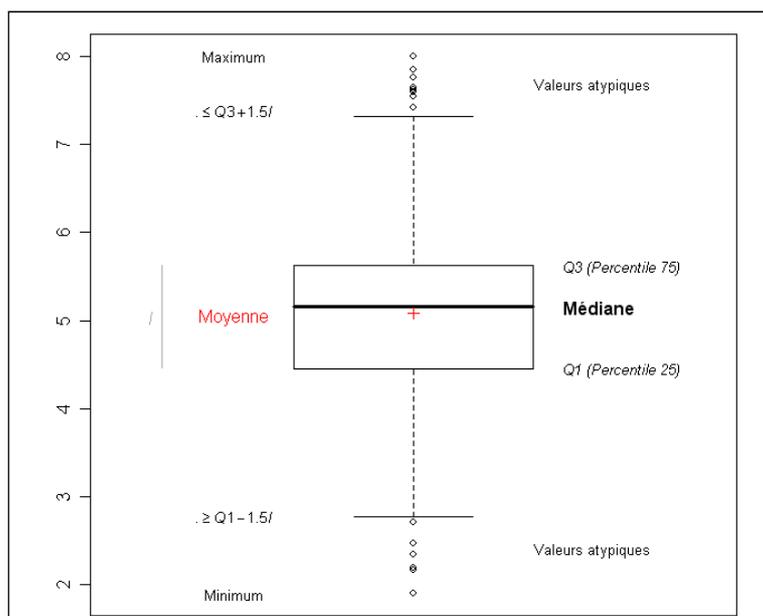
⁸ Micropolluant : <http://www.micropolluants-tech.fr/>

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 valide si au moins 75 % (\geq) de données 15 minutes sont valides, consécutives ou non sur l'heure.

Annexe 3

Boîte à moustache – Définition

Une boîte à moustache (ou box plot) est un graphique représentant la répartition d'une série statistique. Pour ce faire, l'échantillon est séparé en 4 parties de même effectif, appelées quartiles. Un quartile est donc constitué de 25 % des données de l'ensemble de l'échantillon. Le deuxième quartile (percentile 50) est appelé plus couramment la médiane (50% des valeurs y sont inférieures, 50% y sont supérieures).



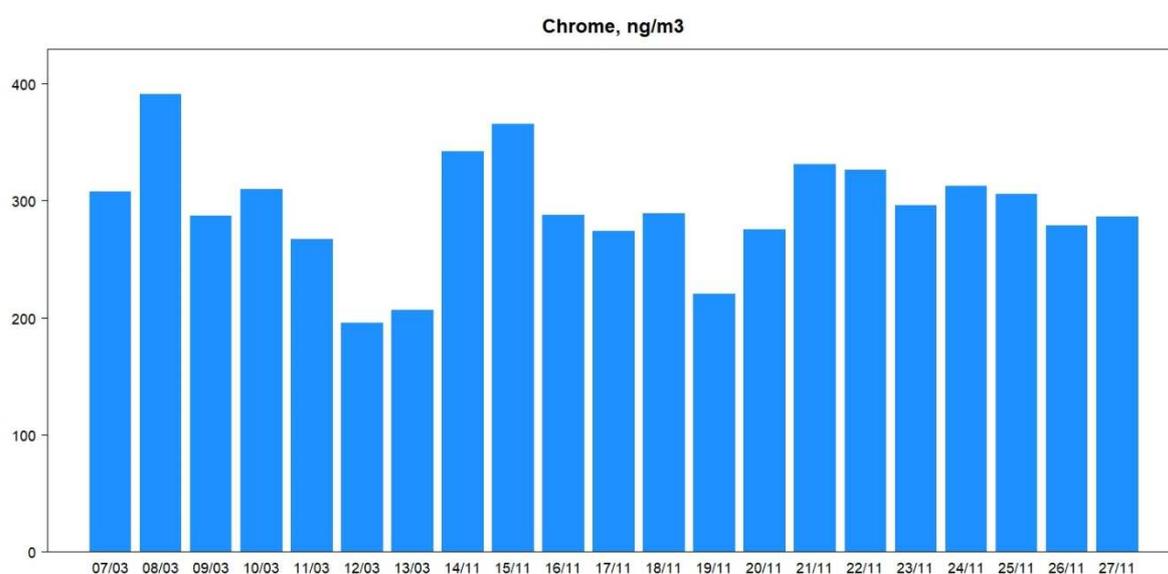
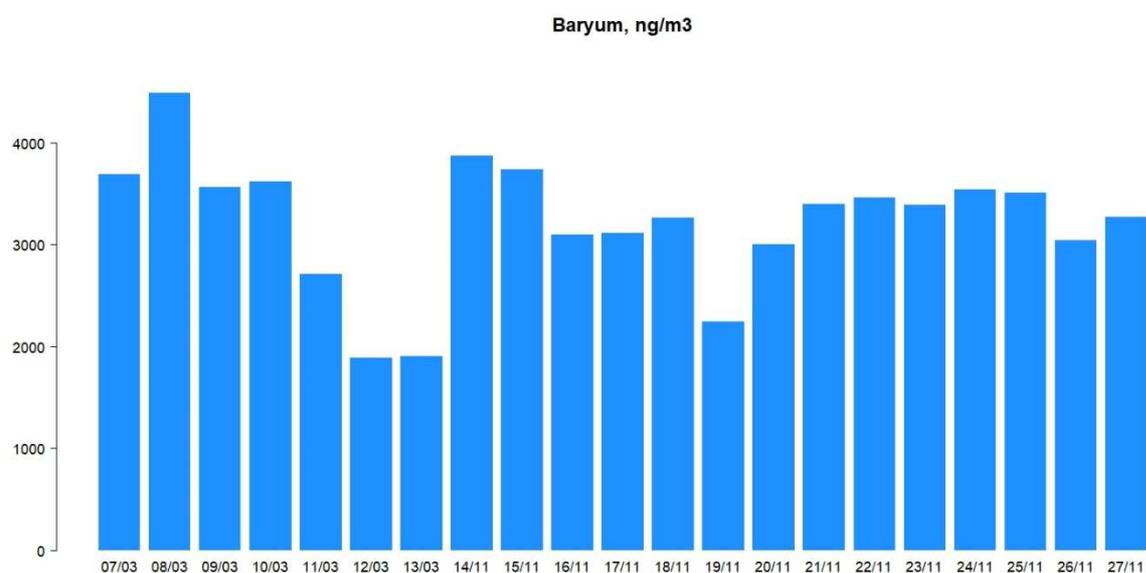
La partie centrale correspondant à une « boîte » représente 50 % des données. Ces données se situent dans les 2^{ème} et 3^{ème} quartiles. La différence entre les deux est appelée l'écart inter quartiles. Les moustaches réparties de chaque côté de la boîte représentent généralement près de 25 % des données, mais n'excèdent pas en terme de longueur, $1,5 \cdot I$ (I étant l'écart interquartile, c'est-à-dire la longueur de la boîte), ce qui peut amener la présence de points atypiques en dehors des moustaches. La fin de la moustache supérieure correspond donc soit à la valeur $3Q+1,5I$ (3^{ème} quartile + une fois et demi l'intervalle inter quartile), soit au maximum de l'échantillon s'il est plus faible que cette valeur.

La fin des moustaches est très proche des centiles 1 et 99, lorsque la distribution de l'échantillon est gaussienne (suit une loi Normale).

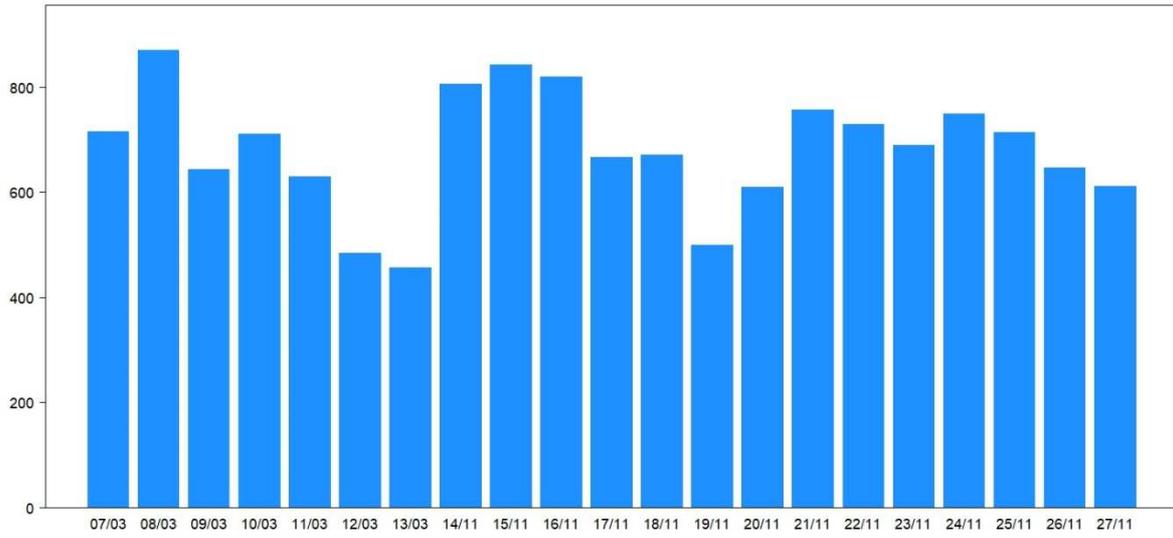
Annexe 4

Relevés journaliers du Baryum, Chrome, Manganèse, Fer, Nickel, Cuivre, Zinc, Arsenic, Cadmium, Antimoine et Plomb en gare RER C Avenue Foch

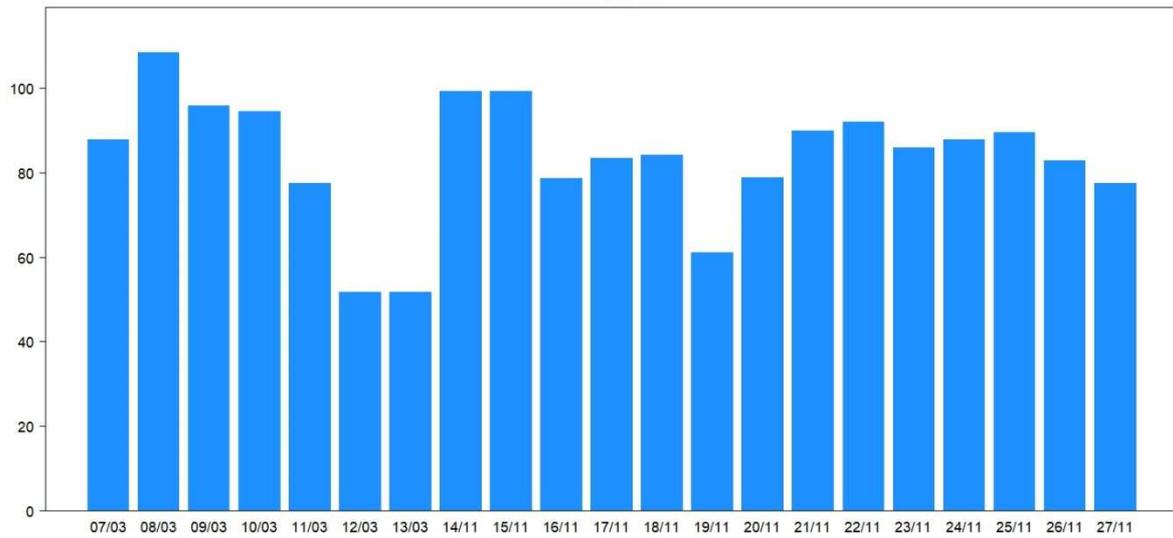
Mesures réalisées du 07 au 13 mars 2022 et du 14 novembre au 27 novembre 2022



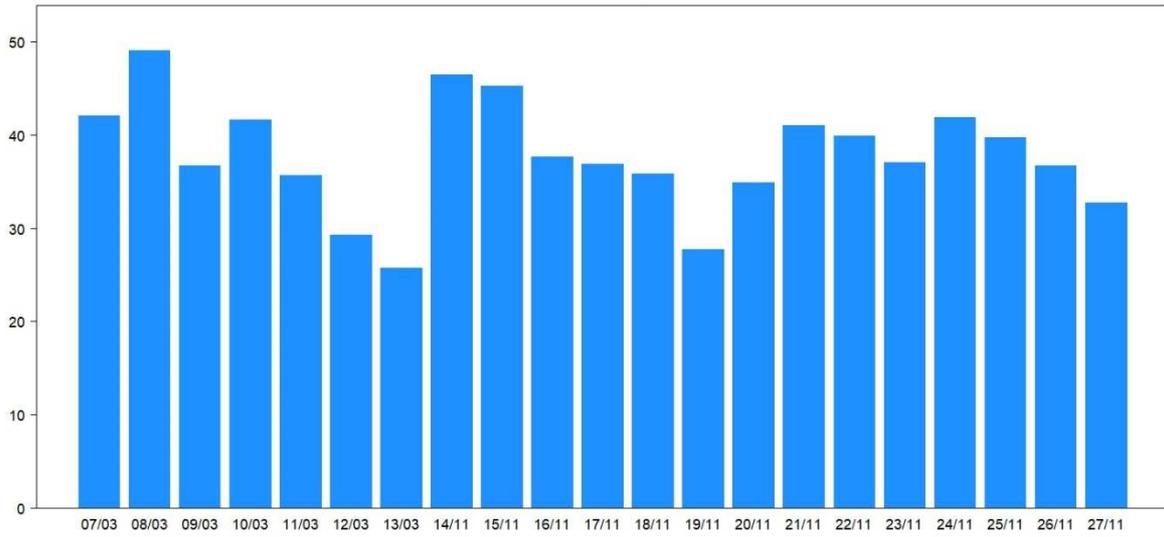
Manganese, ng/m3



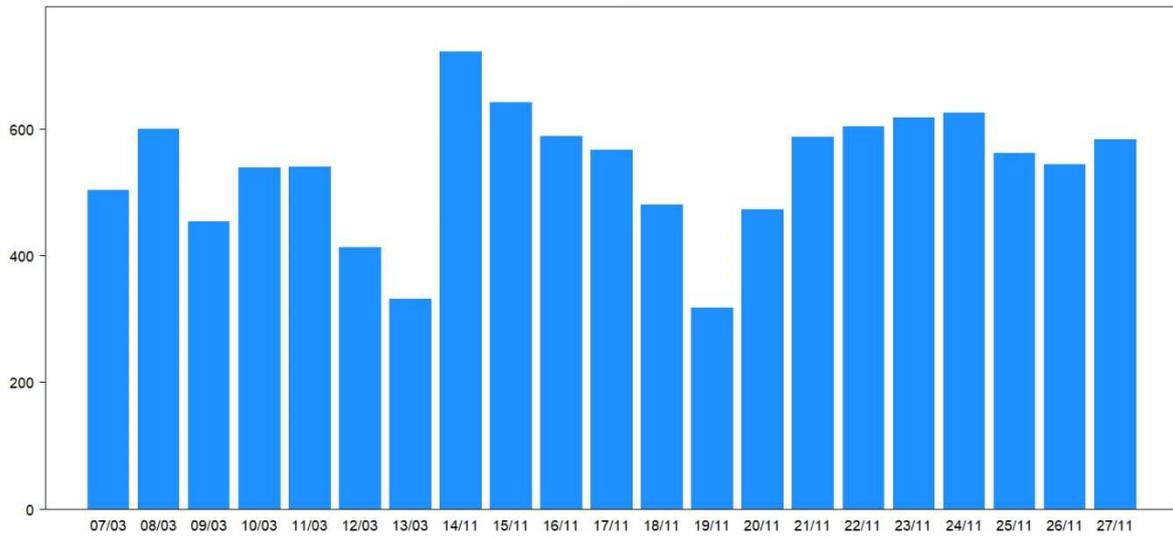
Fer, µg/m3



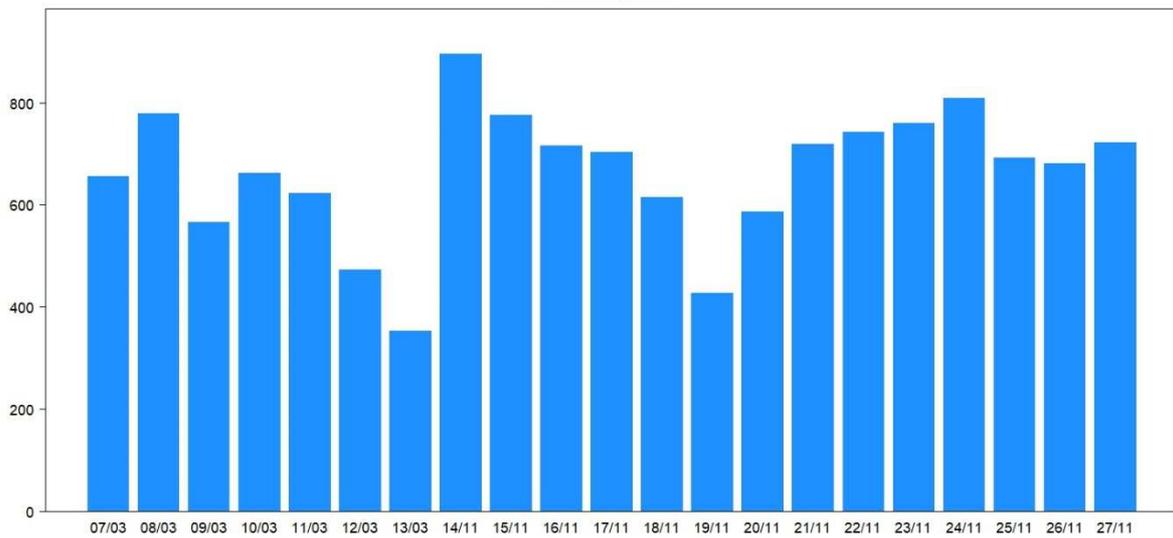
Nickel, ng/m3

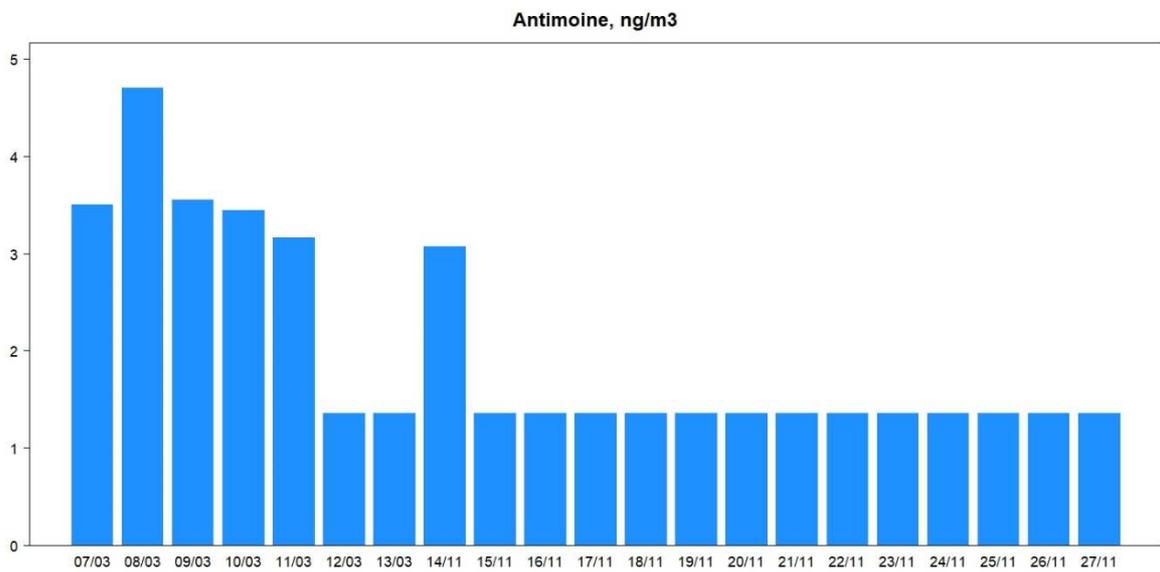
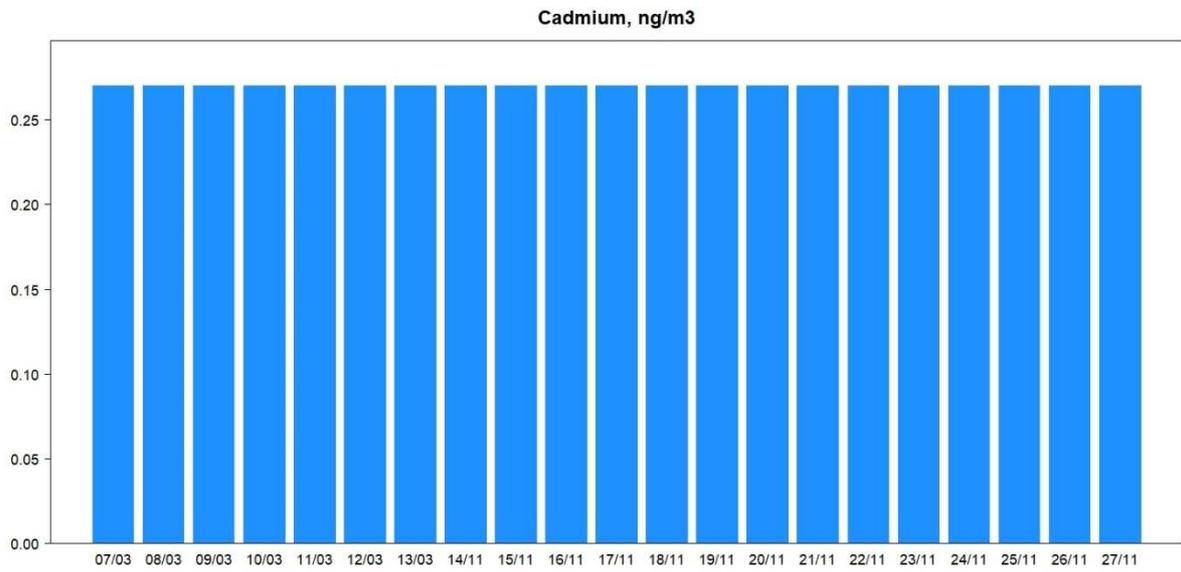
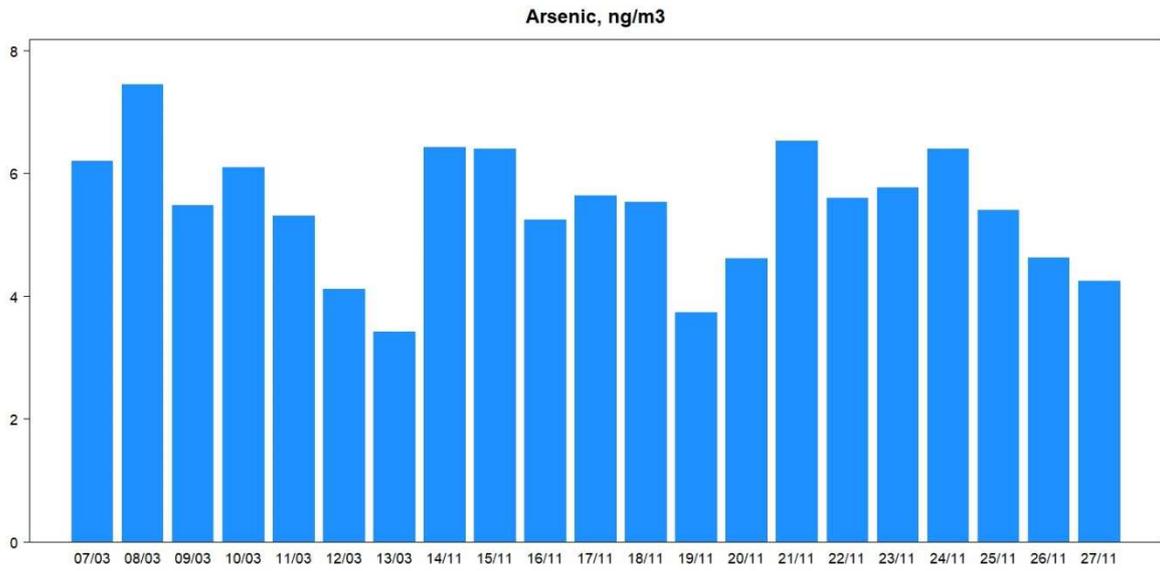


Cuivre, ng/m3



Zinc, ng/m3





Plomb, $\mu\text{g}/\text{m}^3$

