



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

JANVIER-DÉCEMBRE 2020



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



MESURES DE LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR SUR LES QUAIS DU RER C EN GARE SNCF D'AVENUE FOCH (STATION DE REFERENCE) BILAN 2020

Septembre 2021

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

SYNTHESE

Un programme de partenariat entre la SNCF Gares d'Ile-de-France et Airparif a été signé en avril 2016. Son objectif était de mieux connaître et améliorer la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines. Dans ce cadre, des mesures ont été entreprises depuis septembre 2016 dans les gares du réseau Transilien. Des **mesures en continu en gare RER C d'Avenue Foch** ont été mises en place depuis avril 2018. En parallèle, un autre site de référence est opérationnel en gare de Magenta (RER E), géré par l'Agence d'Essais Ferroviaires (AEF).

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).

L'année 2020 a été marquée par une **période de grève en janvier, notamment de la SNCF, (du 1er au 12 janvier)** et par la crise sanitaire qui a entraîné deux périodes de confinements, du **17 mars au 10 mai et du 30 octobre au 14 décembre**. Lors du **premier confinement**, les maintenances des appareils de mesures n'ont pas pu être réalisées ; Aussi les données sur ces périodes **ne sont pas prises en compte dans ce bilan**. Les périodes de confinement, ainsi que celles des couvre-feux, les fermetures de lieux de vies et l'incitation au télétravail ont fortement modifié le nombre de trains en circulation au cours de l'année, comme le nombre de voyageurs. Aussi les résultats de l'année 2020 sont atypiques par rapport aux précédentes années (2018 et 2019).

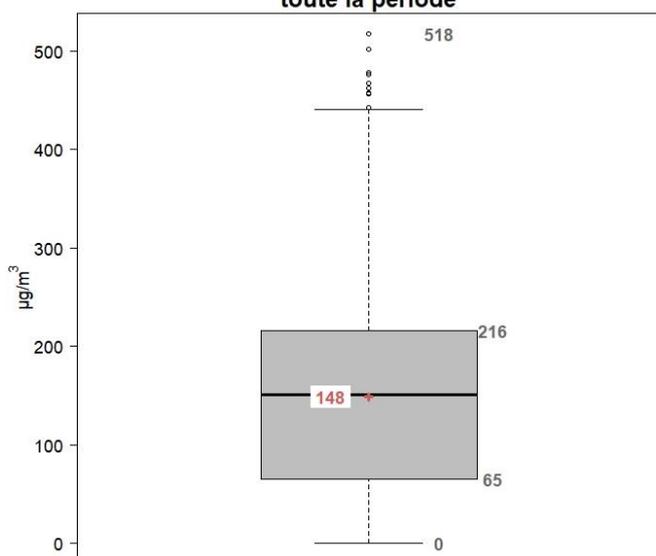
Les principaux résultats en particules

Les teneurs en particules fines PM_{10} mesurées sur les quais du RER C en gare d'Avenue Foch en 2020 sont en moyenne de $148 \mu g/m^3$, le maximum horaire atteint étant de $518 \mu g/m^3$ (enregistré le lundi 10 août entre 18 et 19h).

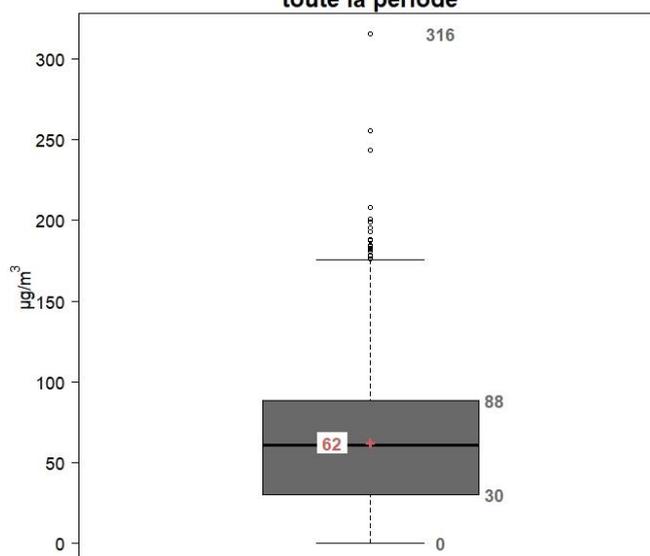
Les niveaux moyens en particules très fines $PM_{2.5}$ atteignent $62 \mu g/m^3$ sur la même période, pour un maximum horaire de $316 \mu g/m^3$ (atteint le mardi 10 mars entre 2 et 3h).



PM10 Quai RER Avenue Foch
toute la période

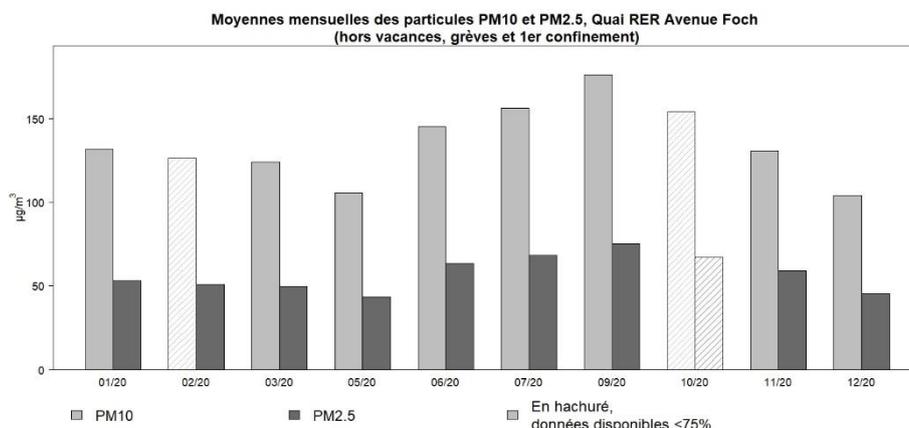


PM2.5 Quai RER Avenue Foch
toute la période



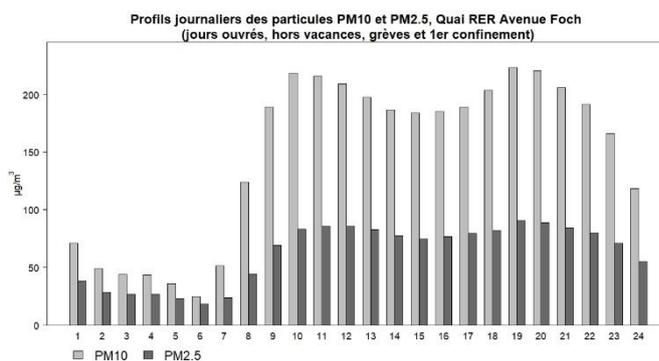
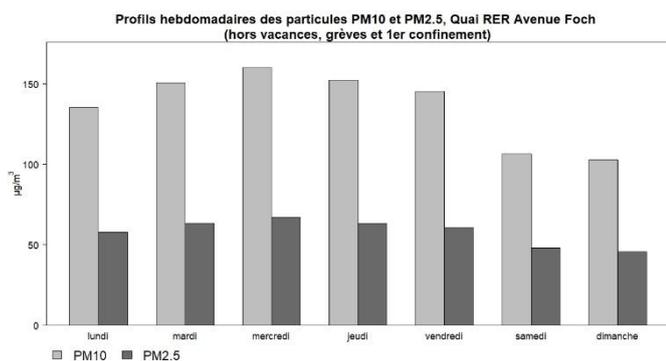
Est-ce que les résultats varient dans le temps (à l'échelle mensuelle, hebdomadaire, horaire) ?

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. Ainsi le mois de janvier (grève) et les mois concernés pour les confinements et couvre-feux (mars/avril/mai/novembre/décembre) présentent les teneurs les plus faibles. Cette variabilité est plus marquée pour les particules PM₁₀ que pour les PM_{2.5}.



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 - 31 %) et les PM_{2.5} (avec - 27 %), en lien avec la baisse de fréquentation et de trafic le week-end (nombre de voyageurs et nombre de trains).

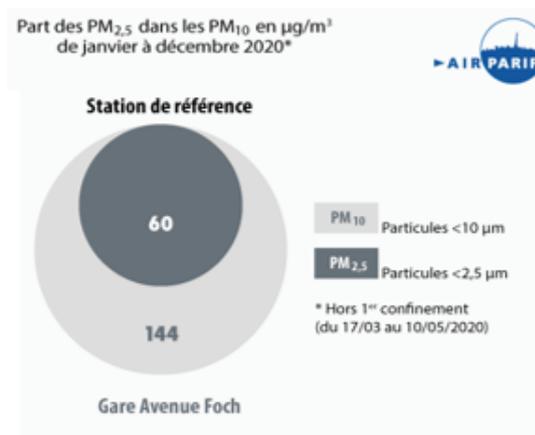


Sur une journée ouvrée, les niveaux nocturnes (1-5h) hors périodes de travaux, sont les plus faibles, avec en moyenne 42 µg/m³ en PM₁₀ et 25 µg/m³ en PM_{2.5}. Les niveaux augmentent en journée. Les concentrations sont maximales le matin (9-12h) et le soir (19-21h). A ces périodes, les concentrations sont en moyenne de 210 µg/m³ pour les PM₁₀ et 83 µg/m³ pour les PM_{2.5}.

Les concentrations sont plus importantes en service commercial (5h-1h) que sur une journée de 24h, de 13 % pour les PM₁₀ et de 12 % pour les PM_{2.5}.

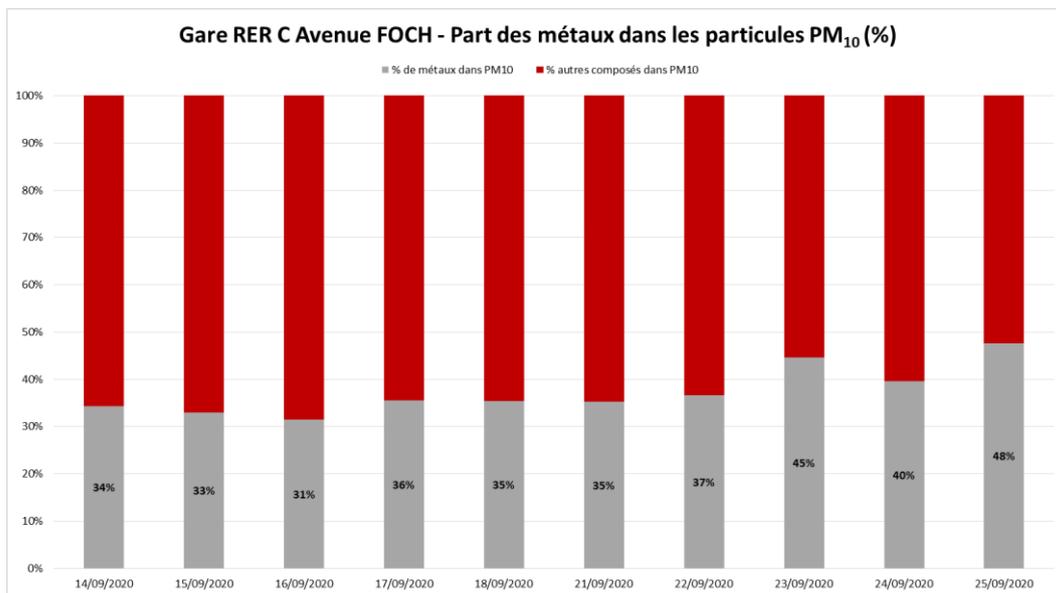
Ratio PM_{2.5}/PM₁₀ : quelle moyenne, quelle fluctuation temporelle ?

Le ratio horaire PM_{2.5}/PM₁₀ sur les quais de la gare RER C d'Avenue Foch est en moyenne de 0,49, légèrement supérieur à celui de Magenta (0,42). Les ratios varient peu à l'échelle mensuelle ou hebdomadaire. Le profil journalier montre des ratios stables en journée (0,42 entre 7h et 24h), et en hausse la nuit (0,69). Ceci est cohérent avec l'émission de particules plus grossières liée à la circulation des trains.



Quelle est la contribution des métaux au niveau des particules ?

La part des métaux dans les prélèvements journaliers en particules PM₁₀ varie de 31 à 48 % sur les 10 jours ouvrés de mesures réalisées du 14 au 27 septembre 2020. Elle est en moyenne de 37%.



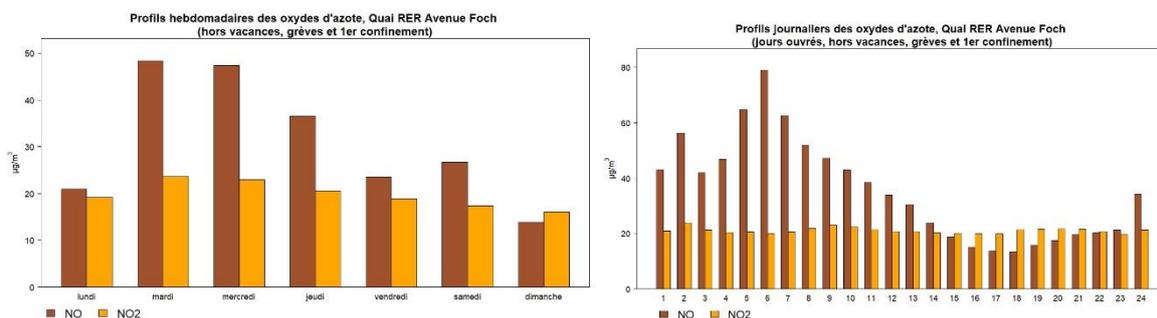
Quelle est la répartition entre les onze métaux suivis ?

Le **Fer** est l'élément majoritaire : il représente 95,7 % de la masse des métaux mesurés à Avenue Foch. Suivent ensuite l'**Aluminium** et le **Zinc** (1 % chacun), le **Manganèse** (0,9 %), le **Cuivre** (0,7 %) et le **Chrome** (0,4 %). 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)

La teneur moyenne relevée sur les quais de la gare RER C d'Avenue Foch en 2020, est de 26 µg/m³ en NO et 20 µg/m³ pour le NO₂.

A l'échelle hebdomadaire, les profils montrent des teneurs plus faibles les samedis et dimanches, comparativement aux jours ouvrés, de - 42 % pour le NO et de façon plus limitée pour le NO₂ avec une diminution de - 22 %, en partie en lien avec l'absence de travaux le week-end.



Sur une journée ouvrée, les niveaux en NO₂ sont constants, avec une moyenne de 20 µg/m³. Concernant le NO, les niveaux nocturnes (1-5h) sont les plus forts, avec en moyenne 38 µg/m³ contre 24 µg/m³ durant le service commercial. 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, probablement en lien avec la fréquence des travaux, la période de grève de janvier et la crise sanitaire qui ont entraîné une baisse globale du trafic.

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 PM_{10} 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 CO_2 , 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 d'Avenue Foch.
- Le faible impact de l'air extérieur sur les concentrations d'oxydes d'azote sur les quais de la gare a été mis en avant, notamment lors de fortes concentrations en air extérieur. Pour les particules PM_{10} , l'influence de l'air extérieur est négligeable par rapport aux teneurs observées sur les quais.
- Le matériel roulant pourrait avoir un impact sur les concentrations en particules en gare, tout comme la vitesse d'arrivée à quai ou le freinage.

SOMMAIRE

SYNTHESE	5
SOMMAIRE	9
GLOSSAIRE	11
INTRODUCTION : CONTEXTE ET OBJECTIFS	12
1. DESCRIPTION DE LA STATION DE REFERENCE AVENUE FOCH.....	14
1.1 DESCRIPTION DE LA GARE, POLLUANTS MESURES ET LOCALISATION DU POINT DE MESURE.....	14
1.2 PERIODE DE MESURE.....	15
2. NIVEAUX DE POLLUANTS RENCONTRES DANS LA GARE.....	16
2.1 NIVEAUX MOYENS OBSERVES SUR LE QUAI : PM ₁₀ , PM _{2.5} ET NO _x	16
2.1.1. PARTICULES PM ₁₀	17
2.1.2. PARTICULES PM _{2.5}	18
2.1.3. OXYDES D'AZOTE (NO _x)	19
2.2 VARIABILITE TEMPORELLE : PM ₁₀ , PM _{2.5} ET NO _x	20
2.2.1. VARIABILITE DES RELEVES HORAIRES PENDANT LA CAMPAGNE DE MESURE	20
2.2.2. VARIABILITE HEBDOMADAIRE	21
2.2.3. VARIABILITE JOURNALIERE	25
2.2.4. VARIABILITE MENSUELLE	26
2.2.5. VARIABILITE ANNUELLE	29
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	39
2.4.2. REPARTITION DES METAUX	40
2.4.3. NIVEAUX OBSERVES ET VARIATIONS TEMPORELLES	41
3. FACTEURS D'INFLUENCE.....	43
3.1 INFLUENCE DE LA QUALITE DE L' AIR EXTERIEUR.....	43
3.2 CONFINEMENT DE LA GARE, PARAMETRES DE CONFORT	46
3.3 PARAMETRES TECHNIQUES, TRAFIC DE LA GARE	48
4. CONCLUSION	50
ANNEXES.....	51
ANNEXE 1	51
ANNEXE 2	52

ANNEXE 3	53
ANNEXE 4	55
ANNEXE 5	56

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.

JOB : Jour Ouvré de Base (mardi, mercredi, jeudi)

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

FDMS Filter Dynamics Measurement System : méthode de mesure des particules intégrant la partie volatile.

TEOM Tapered Element Oscillating Microbalance : méthode de mesure des particules.

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 d'Ile-de-France et Airparif a été signé en avril 2016. Son objectif est de mieux connaître et d'améliorer la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines.

Ce programme s'inscrit dans le cadre du renforcement de la surveillance de la qualité de l'air intérieur, prévu par le Grenelle de l'environnement¹, afin de mieux documenter les niveaux et comprendre les facteurs d'influence. Aucun décret d'application spécifique aux enceintes souterraines ferroviaires n'est paru à ce jour et il n'existe pas de normes en vigueur dans ces espaces.

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

Pendant 2 ans, 24 gares franciliennes souterraines ou mixtes ont été, à tour de rôle, équipées d'une station de mesure de la qualité de l'air. Dans chaque gare ont été mesurées en continu pendant 3 semaines les particules PM₁₀ et les particules PM_{2.5}. S'ajoutent également des mesures de métaux, dont certains sont des traceurs du trafic ferroviaire : Fer (Fe), Cuivre (Cu), Zinc (Zn), Antimoine (Sb), Manganèse (Mn), Nickel (Ni), Plomb (Pb), Arsenic (As), Cadmium (Cd), Aluminium (Al) et Chrome (Cr). Enfin, les paramètres de confort (CO₂, Humidité et Température) ont été suivis. Les mesures ont été réalisées sur le quai de la gare. Dans le cadre du partenariat, les mesures dans 16 gares ont été assurées par Airparif, les 7 autres gares étant étudiées par AEF².

En parallèle, trois **stations de référence** mesurent en continu les particules pendant toute la durée du projet (2016-2022) : les stations Magenta (RER E)³ et Sevrans Beaudottes (RER B), gérées par AEF et la station Avenue Foch (RER C), gérée par Airparif, qui remplace celle initialement installée à Saint-Michel-Notre-Dame. Ces deux stations assurent le suivi au pas de temps horaire des particules fines (PM₁₀) et très fines (PM_{2.5}). Des relevés réguliers de métaux y sont également réalisés. Ces trois stations 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 de Sevrans Beaudottes sont plus anciennes, sans ventilation mécanique.

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.

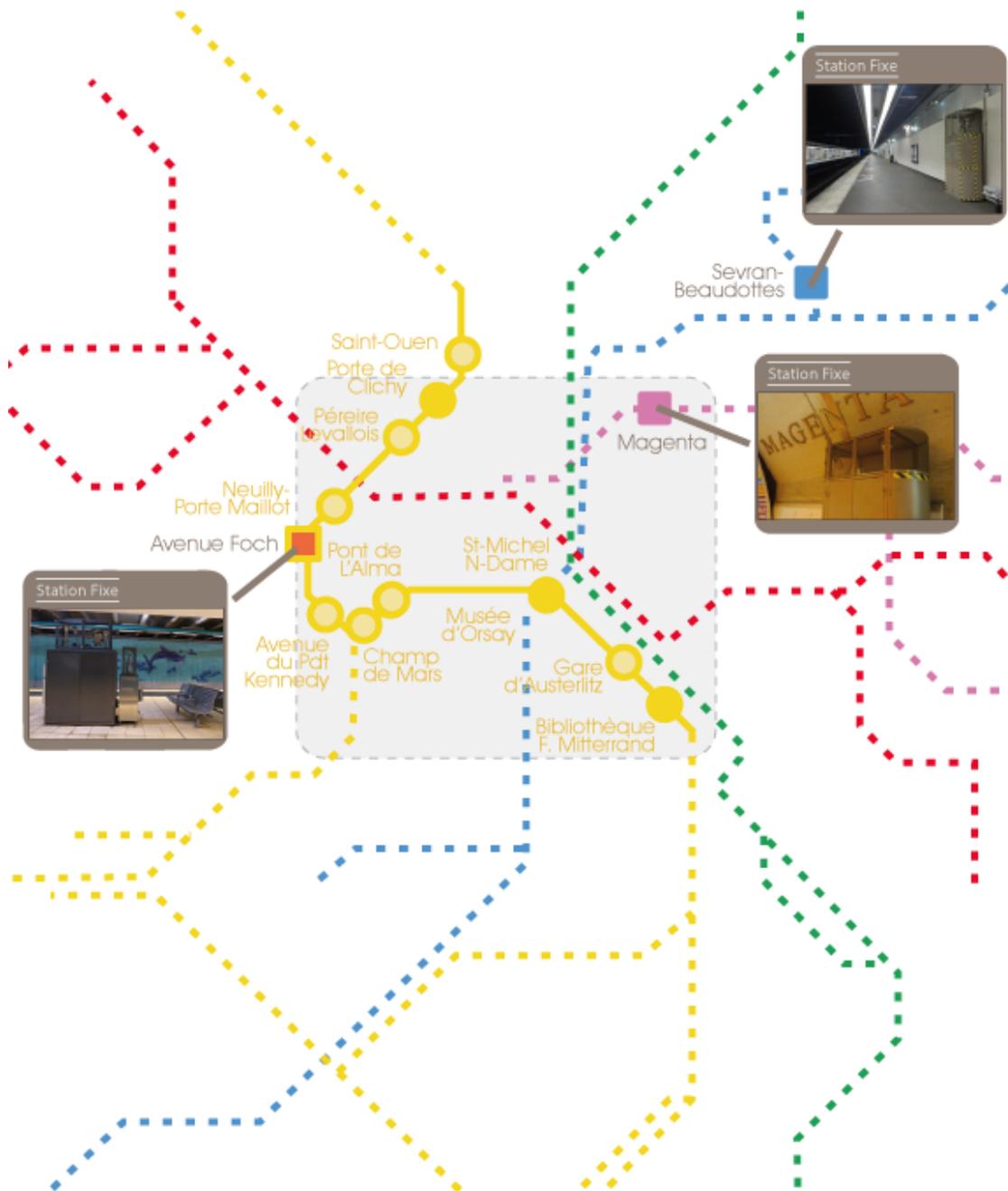
Ce rapport présente les résultats à la station de référence d'Avenue Foch en 2020, à l'exception de la période de grève de janvier (du 1^{er} au 12 janvier) et de la période du 17 mars au 10 mai (nommée 1^{er} confinement dans ce rapport). Durant le premier confinement, la maintenance des appareils de mesure n'a pas pu être assurée, la **qualité des données ne pouvant pas être garantie**, celles-ci ne sont pas prises en compte dans ce bilan.

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

² AEF : Agence d'Essais Ferroviaires, Laboratoire d'Essais de la SNCF.

³ Détails sur la station de Magenta : <http://www.iseo.fr/sncf/rapports/DOC050453-00vf.signed.pdf>

La figure suivante illustre la localisation des deux stations permanentes sur cette période.



Lignes de RER : **A** **B** **C** **D** **E**

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

Paris intra muros



Figure 1 - Localisation des deux stations fixes (Magenta et Avenue Foch).

1. DESCRIPTION DE LA STATION DE REFERENCE AVENUE FOCH

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

La gare d'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 sert de station de référence, à laquelle sont comparées les gares faisant l'objet de campagnes de mesure de durée plus réduite (3 semaines), en remplacement de la gare de Saint-Michel-Notre-Dame. Elle permet également de réaliser un suivi à moyen terme des niveaux de pollution sur le quai.

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

La gare RER est souterraine, de faible profondeur (niveau -1). Il n'y a pas de système de ventilation mécanique en place mais une ventilation naturelle. Le quai se trouve au niveau -1.

Tous les éléments techniques détaillés sur la gare (matériel roulant, etc.) sont présentés en ANNEXE 2.

Le nombre de voyageurs montant en gare d'Avenue Foch (RER C) est de 1 585, en moyenne par jour. C'est l'une des gares RER franciliennes les moins fréquentées (données SNCF 2020).

Si l'on ne prend pas en compte la première période de confinement (du 17 mars au 10 mai), le nombre de trains moyen circulant par jour en gare d'Avenue Foch (2 sens et jours ouvrés/week-end confondus) est de 139.

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

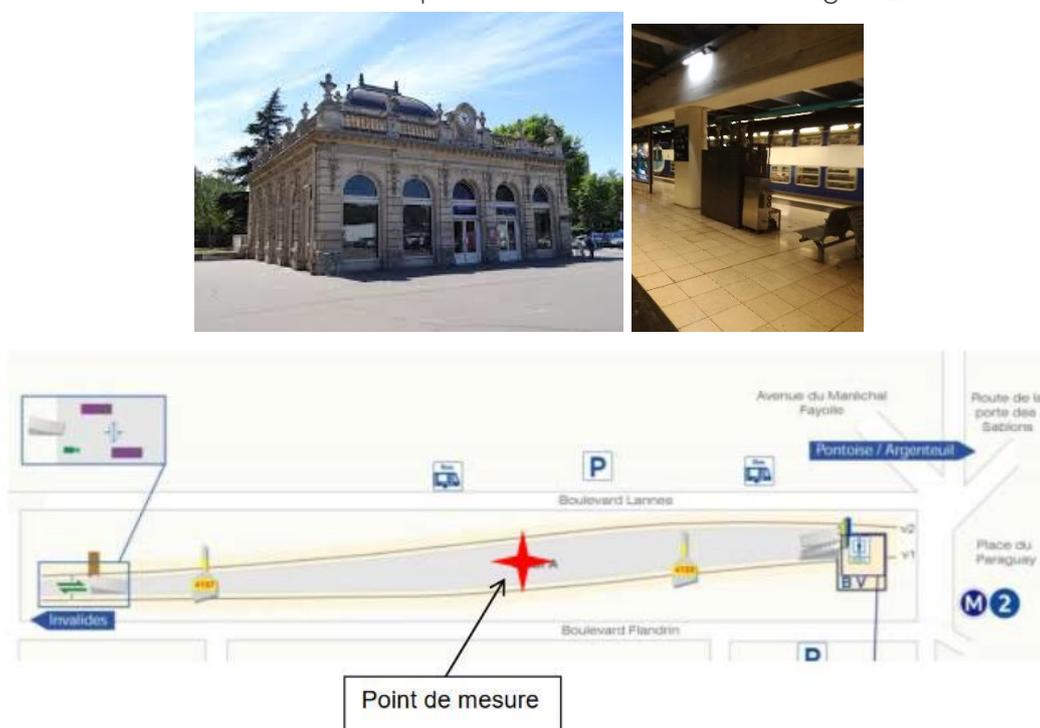


Figure 2 – Localisation du point de mesure (gare d'Avenue Foch, ligne RER C, quai central), photo de la station de mesure (quai) et photo extérieure de la gare

Des mesures de particules PM_{10} , $PM_{2.5}$, de métaux et d'oxydes d'azote (NO et NO_2) ont été réalisées dans cette gare. Les paramètres de confort complètent le dispositif de mesure avec des relevés en CO_2 , 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 1 et en Annexe 3.

Des informations détaillées sur le site instrumenté dans la gare de Magenta, géré par AEF, sont disponibles dans les bilans annuels de cette gare⁴.

1.2 PERIODE DE MESURE

La gare d'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**.

Durant l'année 2020, deux périodes de confinement, du 17 mars au 10 mai et du 30 octobre au 14 décembre, ont perturbé le fonctionnement du trafic ferroviaire. Lors du premier confinement, les appareils de mesure n'ont pas eu être maintenus et la qualité des données ne peut pas être garantie. Ainsi, cette période (du 17 mars au 10 mai) n'est pas prise en compte dans ce bilan.

Le présent rapport traite des mesures réalisées en 2020, entre janvier et décembre (à l'exception de la période de grève de janvier, du 1^{er} au 12 janvier et du 1^{er} confinement, du 17 mars au 10 mai).

Une expérimentation de réduction des concentrations en particules s'est déroulée sur plusieurs semaines⁵ sur le quai de la gare RER C Avenue Foch en 2020. Cette expérimentation s'inscrit dans le cadre de l'appel à projet de la région Ile-de-France « INNOVONS POUR L'AIR DE NOS STATIONS », permettant de tester des solutions innovantes pour améliorer la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines d'Ile-de-France. Les résultats de cette expérimentation feront l'objet d'une analyse et de rendu spécifiques.

⁴ <http://www.iseo.fr/sncf/rapports/DOC050453-00vf.signed.pdf>

⁵ Du 20 janvier au 17 mars, du 19 au 27 mars et du 2 au 16 juillet

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. La comparaison avec les niveaux observés en gare de Magenta n'a pas pu être réalisée sur l'année 2020, faute de suffisamment de données (le pourcentage de données horaires valides est de 70%, inférieur au seuil de 75 % fixé).

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 d'Avenue Foch, pour l'ensemble de l'année 2020 à l'exception de la période de grève de janvier (du 1^{er} au 12 janvier) et de la première période de confinement (du 17 mars au 10 mai).

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	1	4
Percentile 25 (P25)	65	30	4	14
Médiane ou Percentile 50	151	61	6	18
Moyenne horaire	148	62	26	20
Percentile 75 (P75)	216	88	19	23
Maximum horaire	518	316	1745	206
% de données horaires valides	87	88	85	85

Tableau 1 – Statistiques des relevés horaires aux stations de référence Avenue Foch, sur la période de mesure.

Le niveau moyen en PM₁₀ relevé en gare d'Avenue Foch sur l'année 2020 est de 148 µg/m³, celui en PM_{2.5} est de 62 µg/m³.

Concernant les polluants gazeux, le niveau moyen en NO₂ relevé en gare d'Avenue Foch est de 20 µg/m³, celui en NO est de 26 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 mesure, hors période de grèves de janvier et 1^{er} confinement (du 17 mars au 10 mai).

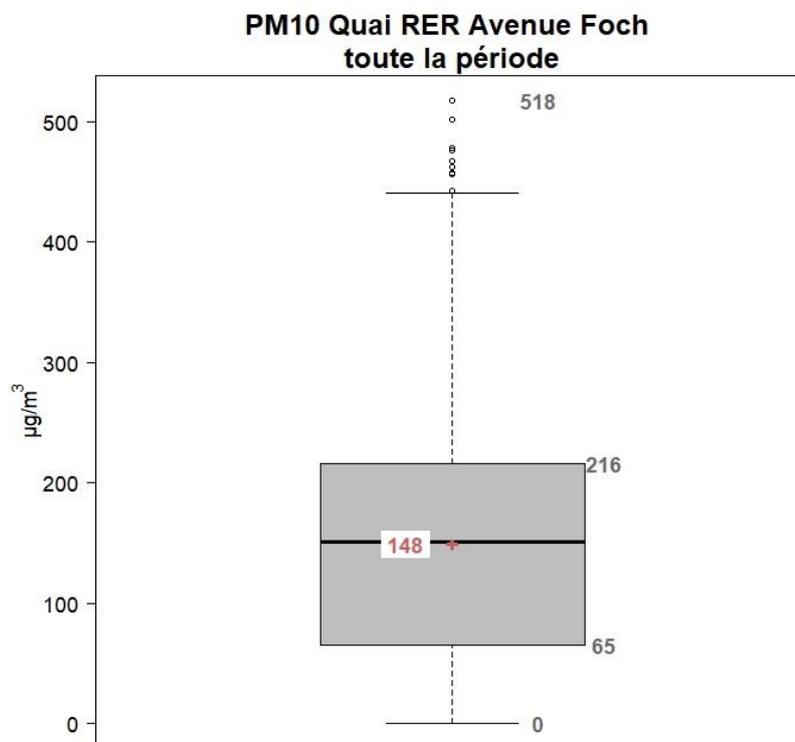


Figure 3 – Boîte à moustaches des relevés horaires en PM₁₀ (en µg/m³) à la gare RER C d'Avenue Foch, en 2020, à l'exception de la période de grève de janvier et du 1^{er} confinement (17 mars – 10 mai).

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 4.

La boîte à moustaches présentant les résultats des relevés horaires en particules PM₁₀ en gare RER C d'Avenue Foch montre une répartition « équilibrée⁶ » des mesures, avec toutefois des maxima horaires isolés (« valeurs atypiques ») élevés. En considérant toutes les données à l'exception de la période de grève de janvier et du 1^{er} confinement (du 17 mars au 10 mai), 50 % des données horaires relevées sont comprises entre 65 et 216 µg/m³, pour une moyenne de 148 µg/m³ (médiane légèrement supérieure, à 151 µg/m³). Le maximum atteint à Avenue Foch est de 518 µg/m³, enregistré le lundi 10 août entre 18 et 19h, soit lors d'une heure de pointe.

⁶ 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 mesure hors grèves et 1^{er} confinement.

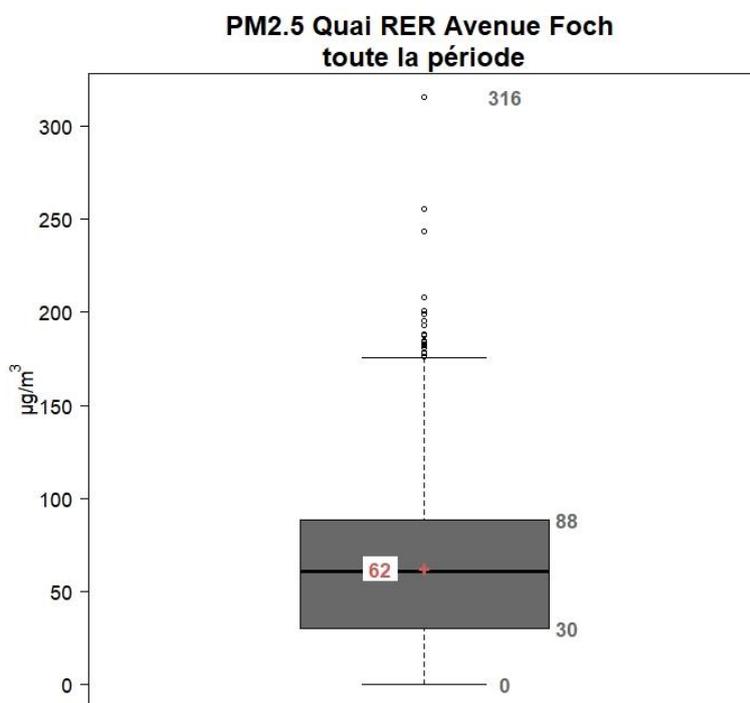
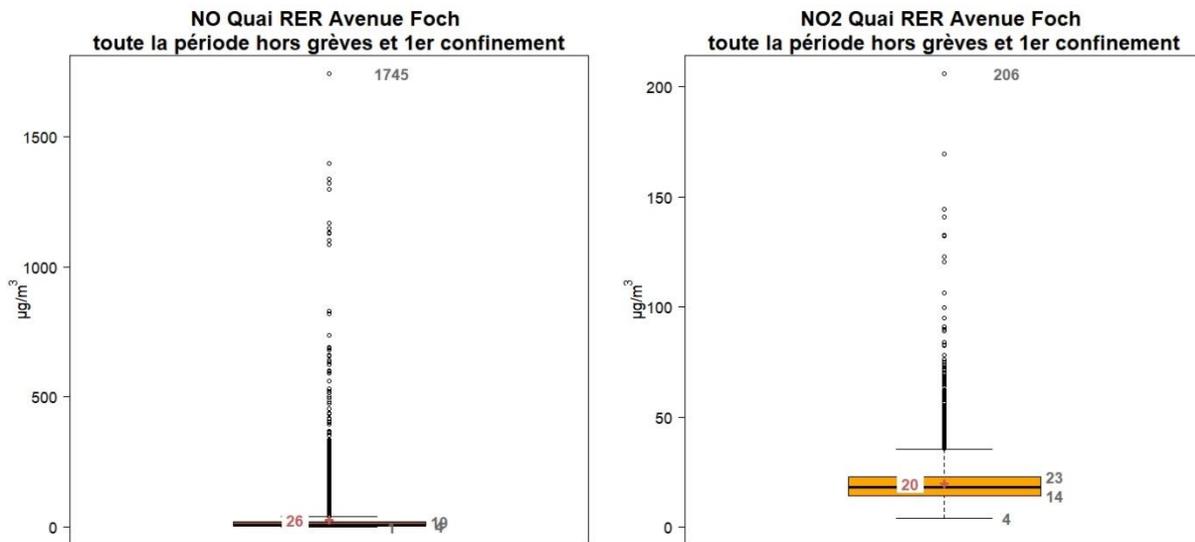


Figure 4 – Boîtes à moustaches des relevés horaires en PM_{2.5} (en µg/m³) à la gare RER C d'Avenue Foch, en 2020 à l'exception de la période de grève de janvier et du 1^{er} confinement.

La boîte à moustaches sur l'ensemble de la période de mesure montre une moyenne en PM_{2.5} de 62 µg/m³ en gare d'Avenue Foch ; 50% des données sont comprises entre 30 et 88 µg/m³ à Avenue Foch. Le maximum atteint à Avenue Foch (316 µg/m³) a été enregistré mardi 10 mars entre 2 et 3h, soit lors de la fermeture de la gare au public.

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, en 2020 à l'exception de la période de grève de janvier et du 1^{er} confinement (du 17 mars au 10 mai).

Les deux 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 4 et 19 µg/m³, pour une moyenne de 26 µg/m³ et une médiane à 6 µg/m³. Concernant le dioxyde d'azote, 50 % des données horaires relevées sont comprises entre 14 et 23 µg/m³, pour une moyenne de 20 µg/m³ et une médiane à 18 µg/m³.

La teneur moyenne relevée sur le quai de la gare RER C d'Avenue Foch est de 148 µg/m³ pour les particules PM₁₀ et de 62 µg/m³ pour les particules PM_{2.5}.

La teneur moyenne relevée sur le quai de la gare RER C d'Avenue Foch est de 26 µg/m³ pour le NO et 20 µg/m³ pour le NO₂. Ces niveaux moyens sont influencés par des teneurs ponctuellement très élevées mesurées lors de travaux (hors période d'ouverture au public).

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

2.2.1. VARIABILITE DES RELEVES HORAIRES 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.

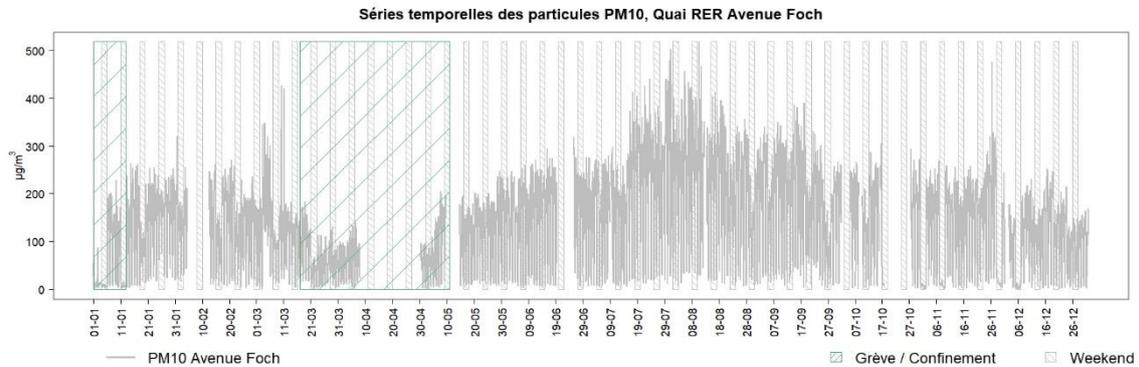


Figure 6 – Evolution des relevés horaires en PM₁₀, en µg/m³ : gare RER C d'Avenue Foch, en 2020.

Le graphique montre des teneurs maximales horaires relativement homogènes sur la période, à l'exception de certains pics notamment en été. Des niveaux moins importants ont été enregistrés au cours de la période de grève de janvier (1^{er} au 12 janvier) et du 1^{er} confinement (du 17 mars au 10 mai). Les maxima horaires sont majoritairement de l'ordre de 250 µg/m³. Sur l'ensemble de la campagne, 38 relevés horaires non consécutifs sont supérieurs à 400 µg/m³ (soit 0,4 % des relevés disponibles).

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.

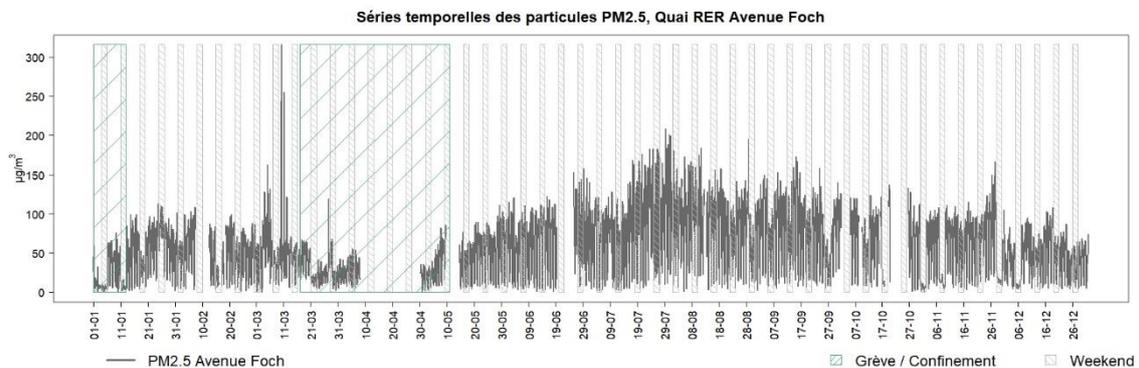


Figure 7 – Evolution des relevés horaires en PM_{2.5}, en µg/m³ : gare RER C d'Avenue, en 2020.

Le graphique montre des teneurs maximales horaires relativement homogènes sur l'année avec toutefois quelques pics atypiques. Le maximum horaire à Avenue Foch a été enregistré le 10 mars entre 2 et 3h, avec 316 µg/m³. Ce pic est très probablement lié à des travaux.

Les maxima horaires sont majoritairement de l'ordre de 100 µg/m³. Très ponctuellement, des teneurs (5 heures, soit 0,08% des relevés disponibles) supérieures à 200 µg/m³ ont été mesurées.

Les relevés horaires en particules PM₁₀ et PM_{2.5} sont globalement plus élevés au cours de l'été, en lien avec les travaux de maintenance de l'infrastructure (travaux CASTOR).

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.

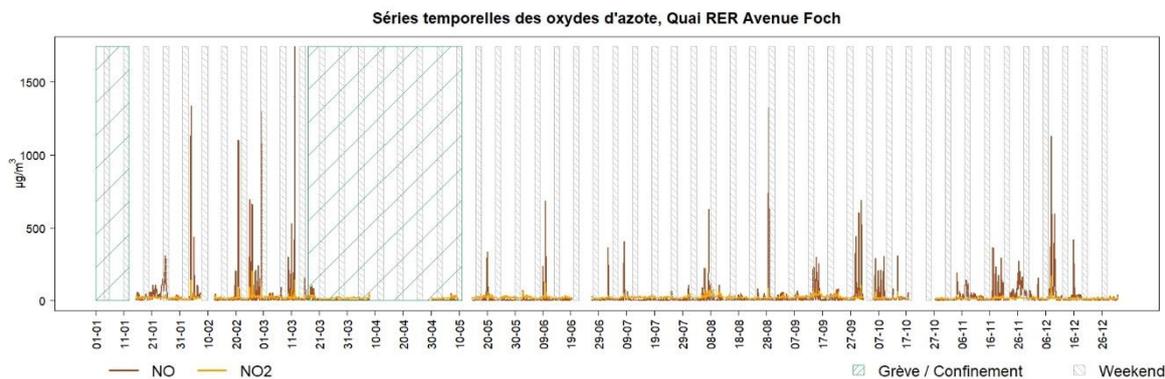


Figure 8 – Evolution des relevés horaires en NO_x, en µg/m³, à la gare RER C d'Avenue Foch, en 2020.

A l'exception de quelques pics, les teneurs en NO et NO₂ sont relativement homogènes sur l'ensemble de la période. 0,2 % des relevés horaires en NO dépassent 1000 µg/m³, valeurs majoritairement enregistrées entre 21h et 6h, probablement en lien avec la réalisation de travaux avec des trains diesel. Pour le NO₂, les niveaux les plus élevés sont mesurés simultanément aux teneurs les plus élevées de NO. Les niveaux les plus élevés de NO₂ peuvent ponctuellement dépasser les 100 µg/m³ (0,2 % des relevés horaires en NO₂ dépassent les 100 µg/m³).

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'Île-de-France, les grèves et hors premier confinement) est présenté en Figure 9.

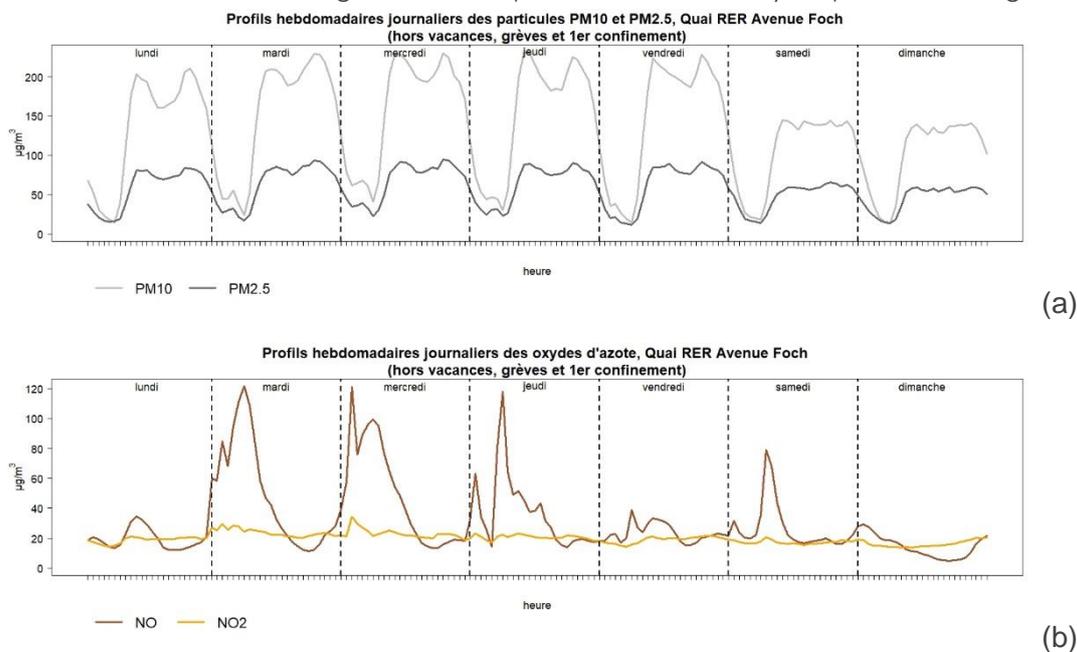


Figure 9 – Évolution des profils horaires en PM_{2.5} et PM₁₀ à la gare RER C d'Avenue Foch (a) et évolution des profils horaires en NO et NO₂ à Avenue Foch et en air extérieur (b), sur l'année 2020 - hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement.

Les graphiques a et b traitent des résultats pour les PM₁₀ et les PM_{2.5}, aussi bien 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 maximos 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 (c) est très différent de celui des particules : les niveaux les plus faibles sont enregistrés durant le service commercial.

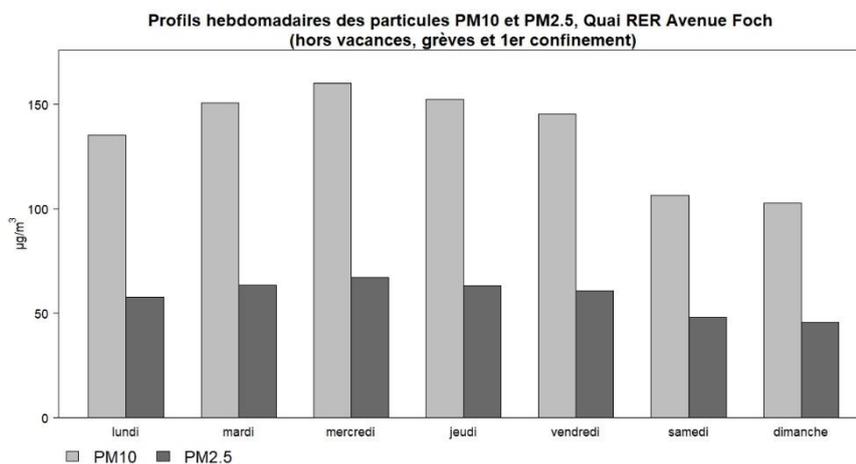
Les concentrations en dioxyde d'azote sont stables en semaine, comme le week-end. De légères augmentations des concentrations les nuits du lundi au mardi, du mardi au mercredi et du mercredi au jeudi, sont toutefois observées, probablement en lien avec des travaux sur la ligne de RER ou en gare.

Concernant le monoxyde d'azote, de fortes augmentations de concentrations -pouvant atteindre 120 µg/m³- 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.

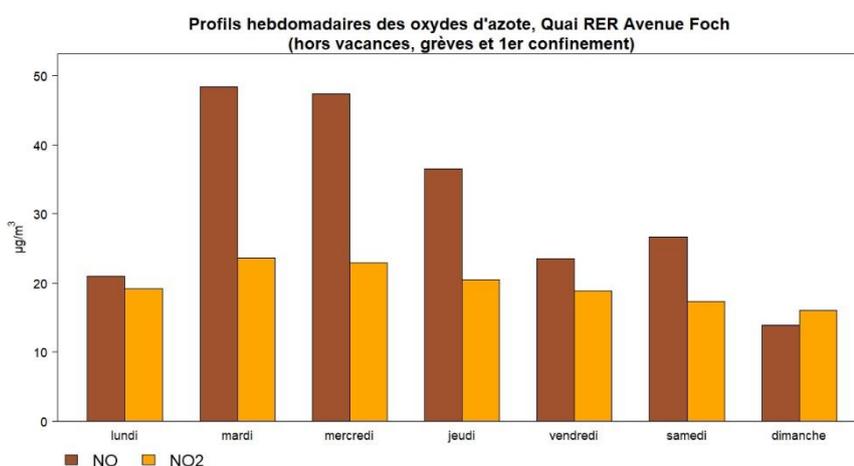
2.2.2.2. ZOOM SUR LES VARIATIONS JOURNALIERES SUR UNE SEMAINE

Les profils hebdomadaires à la gare RER C d'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 2.2.5.



(a)



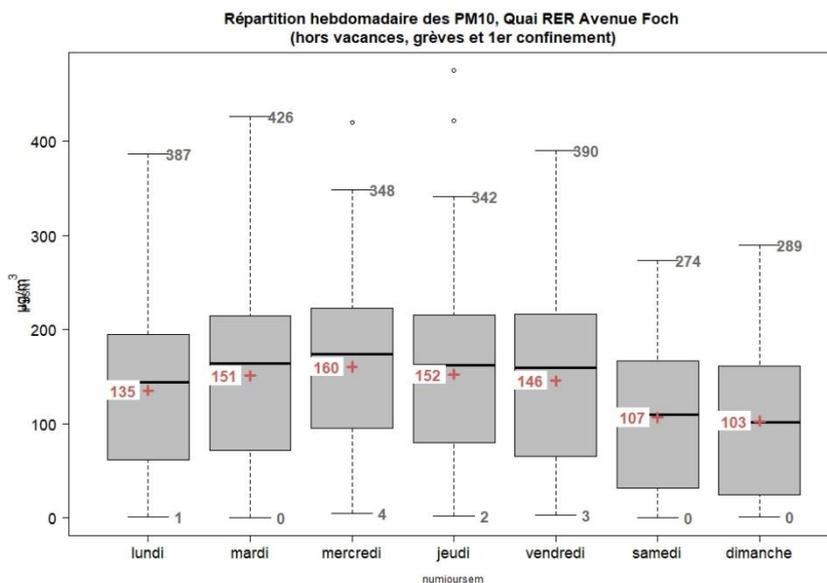
(b)

Figure 10 – Évolution des profils hebdomadaires en PM₁₀ et PM_{2.5} (a) à la gare RER C Avenue Foch et évolution des profils hebdomadaires en NO et NO₂ (b) à Avenue Foch, en 2020 (hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement).

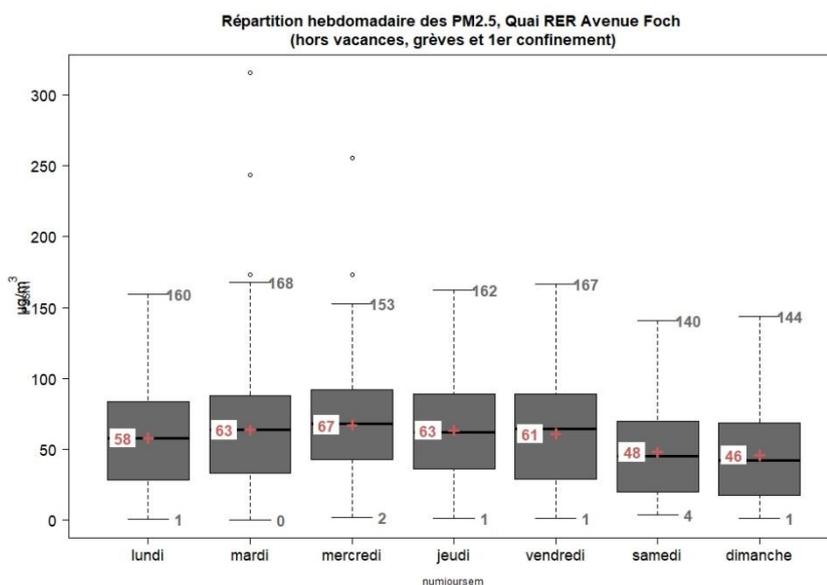
Les niveaux moyens en particules à la station Avenue Foch sont relativement stables les jours ouvrés : autour de 140 µg/m³ en moyenne sur une journée pour les PM₁₀ et 60 µg/m³ en moyenne pour les PM_{2.5}. Les niveaux moyens diminuent les samedis et dimanches par rapport aux jours ouvrés, de 31 % pour les PM₁₀ et 27 % 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 PM_{10} et dans une moindre mesure, sur les $PM_{2.5}$ (cf. paragraphe 3.3).

La Figure 11 présente les boîtes à moustaches des niveaux horaires de chaque jour, en particules fines PM_{10} et très fines $PM_{2.5}$ en gare d'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 2)).



(a)



(b)

Figure 11 – Boîtes à moustaches des relevés horaires selon les jours en PM_{10} (a) et $PM_{2.5}$ (b) à la gare RER C d'Avenue Foch, année 2020 - hors vacances scolaires, grèves et 1er confinement.

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 d'Avenue Foch (hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement).

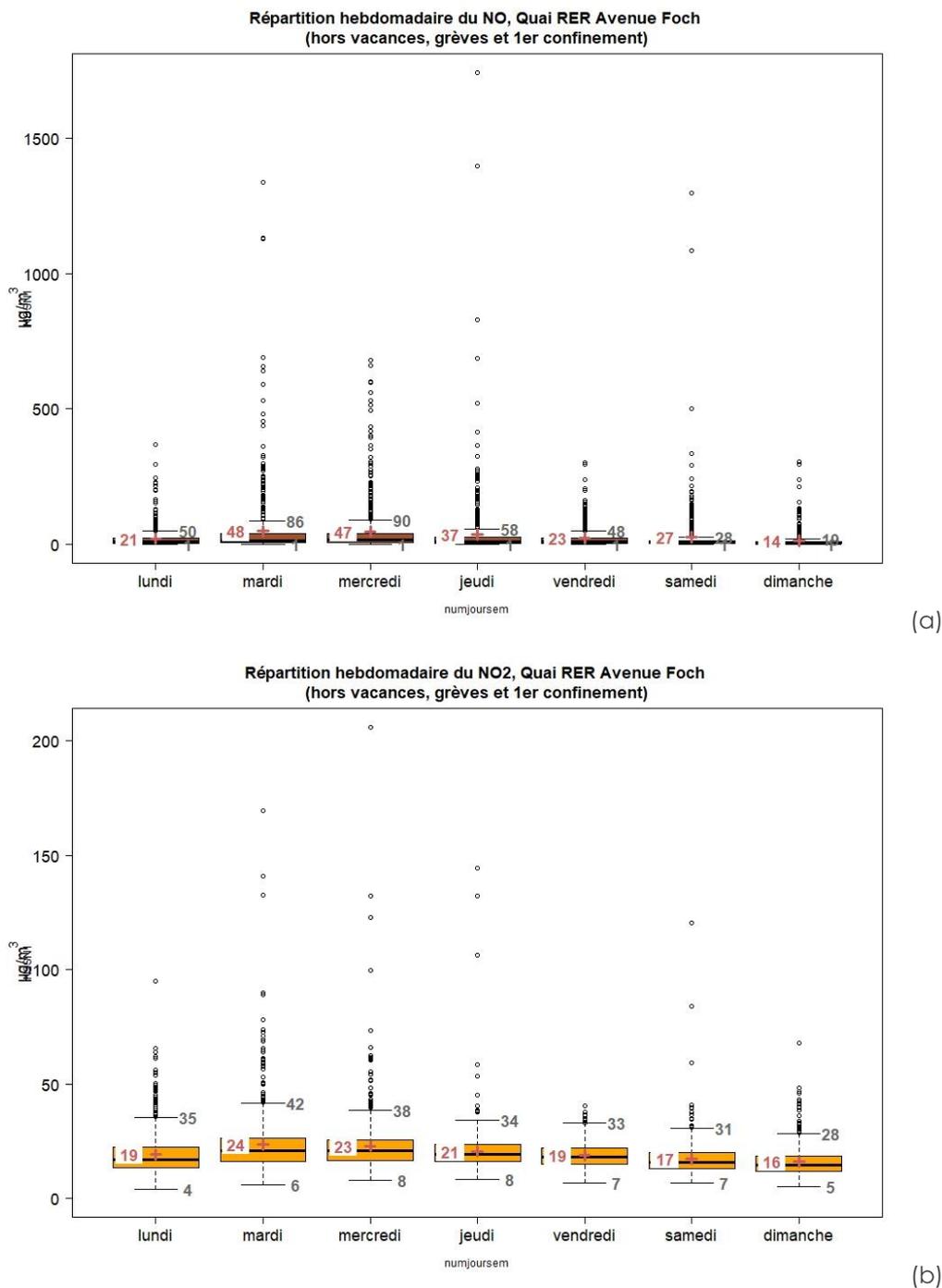


Figure 12 – Boîtes à moustaches des relevés horaires selon les jours en NO (a) et NO₂ (b) à la gare RER C d'Avenue Foch, année 2020 - hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement.

Les distributions des concentrations en NO₂ sont globalement stables les jours ouvrés comme le week-end. Concernant le NO, les concentrations 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 lors des jours ouvrés. Ainsi, les niveaux en NO diminuent de 42 % le week-end par rapport aux jours ouvrés.

Pour le NO₂, polluant secondaire et par conséquent moins impacté par la pollution directe émise par les locomotives diesel (trains travaux), la baisse des teneurs le week-end est moins importante avec - 22 %.

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, grèves et 1^{er} confinement).

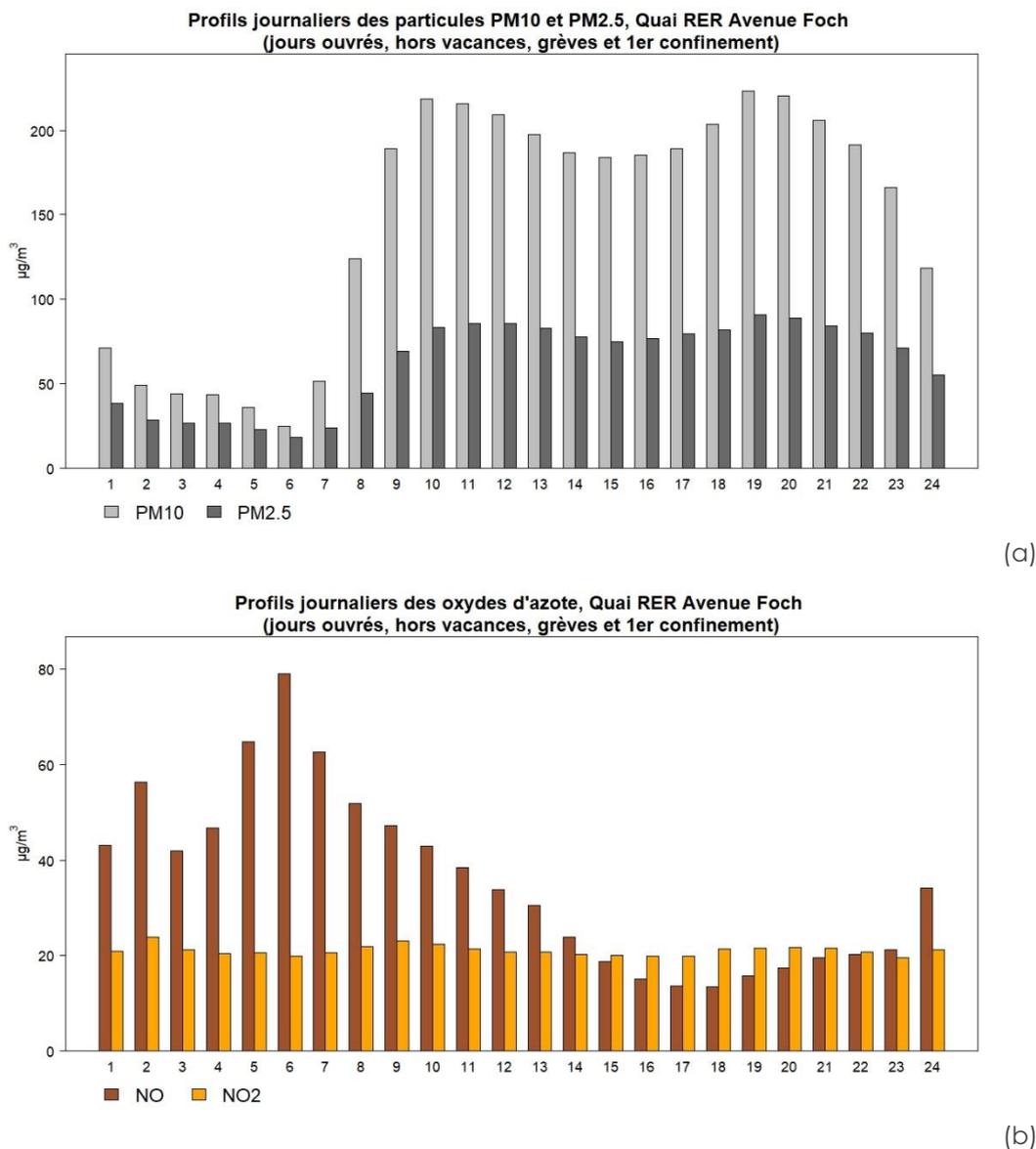


Figure 13 – Évolution des profils journaliers en PM₁₀ (a) et PM_{2.5} (b) à la gare RER C d'Avenue Foch et évolution des profils en NO et NO₂ (c) à Avenue Foch, année 2020 – jours ouvrés hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement.

Les particules PM₁₀ et PM_{2.5} ont des profils journaliers semblables. Les maxima horaires sont enregistrés lors des heures de pointe : le matin (09-11h) et le soir (18-20h). Les niveaux sur ces périodes de pointe sont en moyenne de 212 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM₁₀ et 83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{2.5} en gare RER C d'Avenue Foch.

Les niveaux les plus faibles en gare d'Avenue Foch sont enregistrés la nuit (entre 1h et 5h), lors de la fermeture de la gare au public : 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne pour les PM₁₀, et 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 moyennes minimales en particules PM₁₀ et PM_{2.5} sont respectivement de 24 et 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

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 d'Avenue Foch présente des variations horaires moindres (écart type de 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur la période d'ouverture de la gare) que celui de PM₁₀ (écart type de 95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). 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 d'Avenue Foch ont des profils journaliers différents de ceux des particules.

Pour le NO, les maxima horaires sont enregistrés la nuit entre 1h et 6h, en lien avec la source que représentent les trains travaux à motorisation thermique. Sur cette période, les niveaux sont en moyenne de 55 µg/m³ en gare d'Avenue Foch. Des niveaux intermédiaires (environ 40 µg/m³) sont mesurés en matinée (8 à 13h). Les niveaux les plus faibles (15 µg/m³ environ) sont observés en fin de journée (18-21h).

Concernant le NO₂, les variations horaires sur un jour ouvré sont plus limitées, avec des concentrations variant de 20 à 24 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 2020 (hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement, du 17 mars au 10 mai).

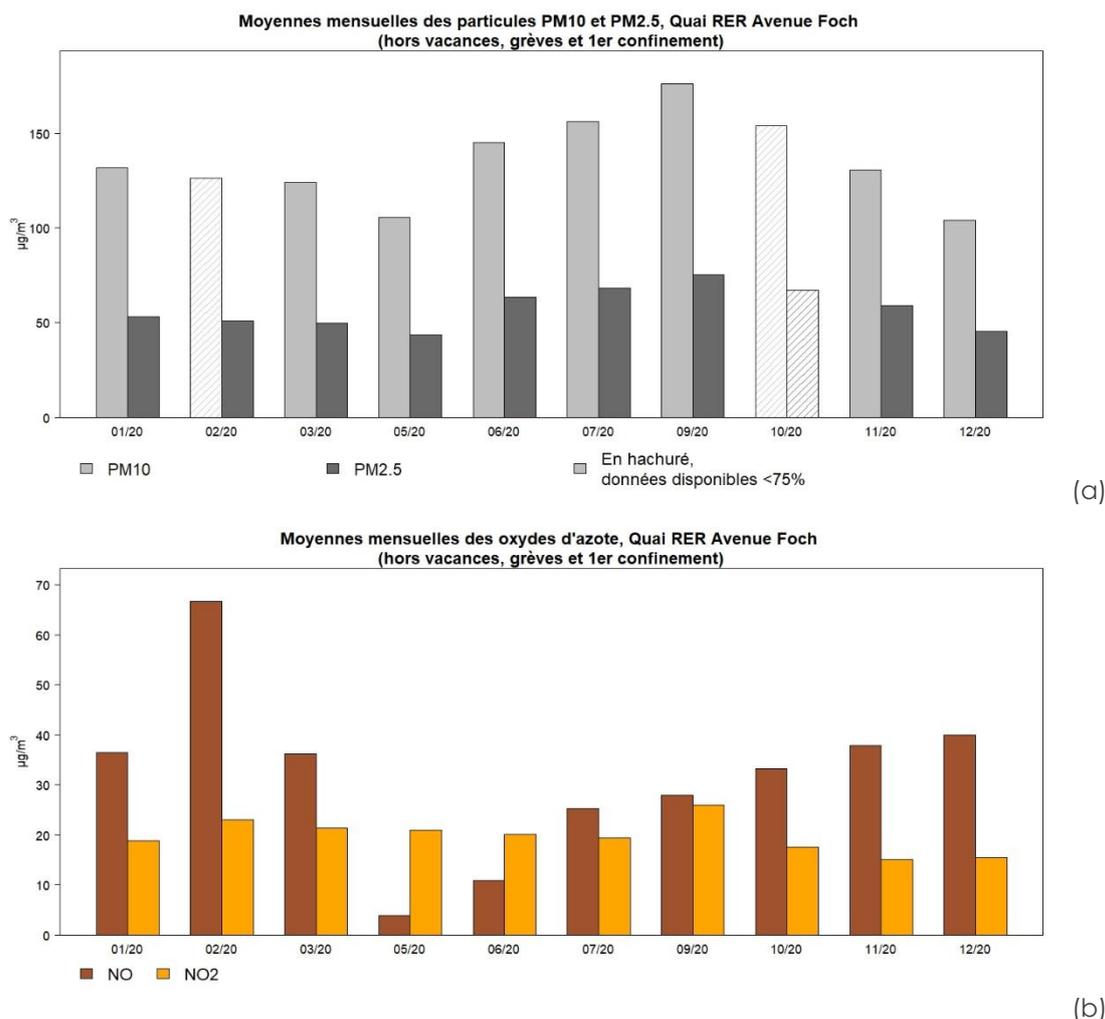


Figure 14 – Évolution des profils mensuels en PM₁₀, PM_{2.5} et NO_x (NO et NO₂) à la gare RER C d'Avenue Foch en 2020, hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement. En hachuré, données disponibles < 75 %.

Les particules PM₁₀ et les particules PM_{2.5} présentent des variations mensuelles comparables. Une baisse modérée des niveaux est observée au mois de mai, ainsi qu'une tendance à la hausse de juin à septembre et à l'inverse une baisse d'octobre à décembre. Le mois de mai 2020 présente les moyennes mensuelles les plus faibles en PM₁₀ et en PM_{2.5} (respectivement 106 µg/m³ et 43 µg/m³). Les maxima mensuels ont été enregistrés en septembre pour les PM₁₀ et les PM_{2.5}, avec respectivement 176 µg/m³ et 75 µg/m³. Les variations mensuelles sont en partie liées aux différentes grèves et restrictions mise en place en 2020 pour freiner la propagation de la covid 19, restrictions qui se sont traduites par une baisse du nombre de trains en circulation et du nombre de voyageurs lors du 2^{ème} confinement notamment (novembre et décembre).

Les variations mensuelles en **NO** et **NO₂** sont liées, du fait de sources de pollution identiques. Néanmoins, la nature des deux composés (l'un est un polluant primaire, l'autre secondaire - cf. ANNEXE 1) engendre des variations plus importantes sur le NO que sur le NO₂. Le mois présentant la plus faible valeur mensuelle en NO est le mois de mai 2020 (4 µg/m³) et le mois de novembre 2020 pour le NO₂ (15 µg/m³). Le maximum mensuel en NO a été le mois de février 2020 (67 µg/m³) et celui de septembre pour le NO₂ (26 µg/m³). Les variations mensuelles peuvent s'expliquer notamment par la fréquence des travaux ou le passage de trains diesel en période nocturne.

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

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

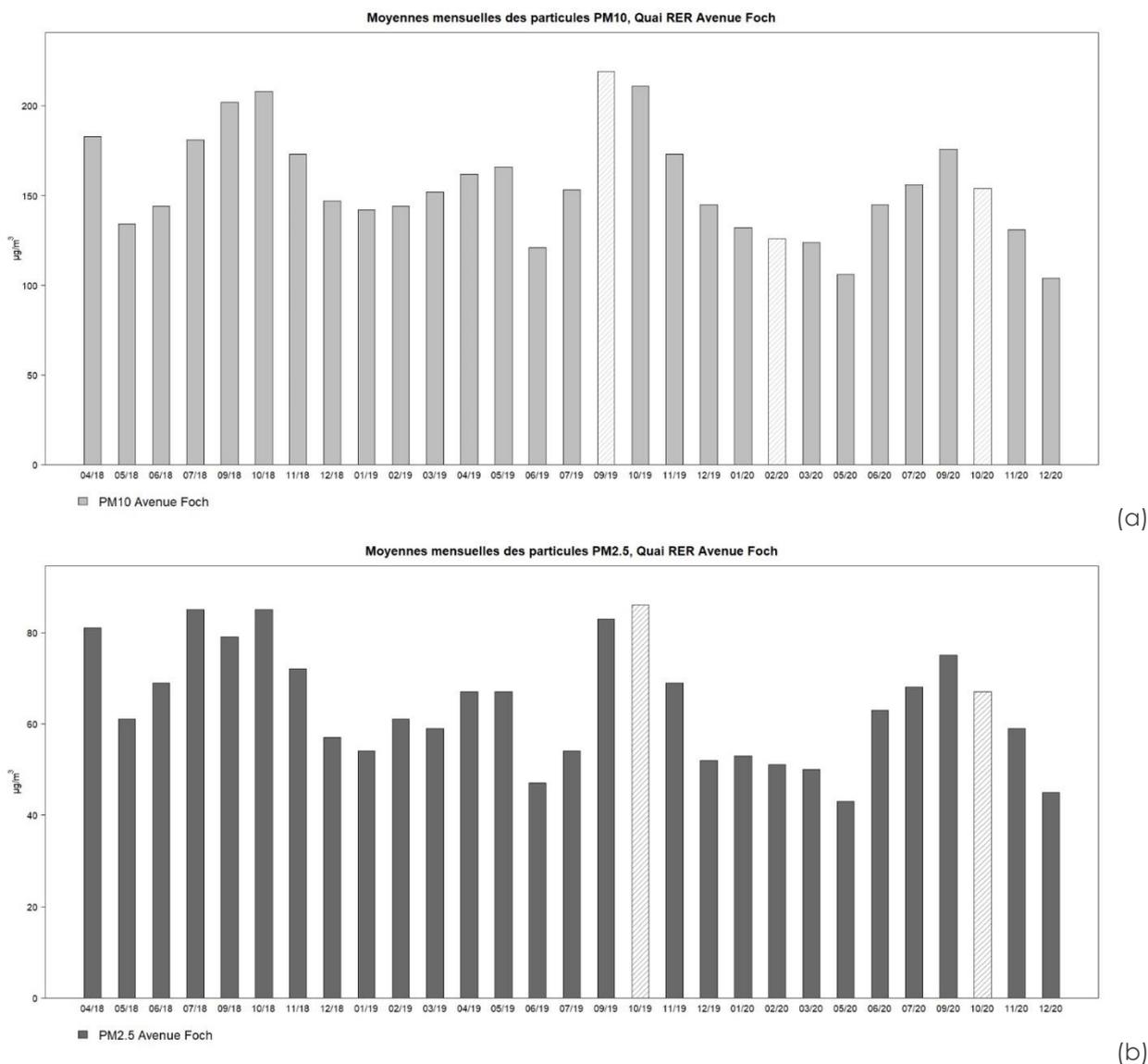


Figure 15 : Evolution des profils mensuels en particules PM₁₀ (a) et PM_{2.5} (b) à la gare RER C Avenue Foch depuis avril 2018 – hors vacances, grèves et 1^{er} confinement. En hachuré, données disponibles < 75%.

Les particules PM_{10} et $PM_{2.5}$ présentent des évolutions mensuelles comparables. Les concentrations varient de manière importante, entre 104 à 219 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} et de 43 à 86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 durant l'hiver.

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 (NOx) depuis le début de la surveillance de la gare en avril 2018.

Les niveaux relevés au cours de l'année 2020 ont diminué par rapport à 2018 et 2019, ce qui peut s'expliquer majoritairement par une baisse globale du trafic ferroviaire au cours de l'année 2020 liée à la crise sanitaire. La baisse des concentrations est toutefois plus marquée pour les particules PM₁₀ que pour les particules PM_{2.5}.

Statistiques (µg/m ³)	2018	2019	2020
Minimum horaire	0	0	0
Percentile 25 (P25)	83	86	65
Médiane ou Percentile 50	165	168	151
Moyenne horaire	168	163	148
Percentile 75 (P75)	241	229	216
Maximum horaire	1318	3278	518
% de données horaires valides	90	94	87

Tableau 2 : Statistiques des relevés horaires en PM₁₀ aux stations de référence Avenue Foch depuis 2018.

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

Tableau 3 : Statistiques des relevés horaires en PM_{2.5} aux stations de référence Avenue Foch depuis 2018.

Concernant les oxydes d'azote, une baisse globale des niveaux a également été observée en 2020 par rapport à 2018 et 2019. Cette baisse peut s'expliquer par la diminution globale des émissions de dioxyde d'azote en air extérieur au cours de l'année 2020, mais également par la diminution du nombre de passages de trains travaux.

Statistiques (µg/m ³)	2018		2019		2020	
	NO	NO ₂	NO	NO ₂	NO	NO ₂
Minimum horaire	2	13	0	8	1	4
Percentile 25 (P25)	8	26	3	23	4	14
Médiane ou Percentile 50	14	32	6	29	6	18
Moyenne horaire	38	35	29	34	26	20
Percentile 75 (P75)	32	40	18	38	19	23
Maximum horaire	1467	329	2257	468	1745	206
% de données horaires valides	91	91	96	96	85	85

Tableau 4 : Statistiques des relevés horaires en NOx aux stations de référence Avenue Foch depuis 2018.

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).

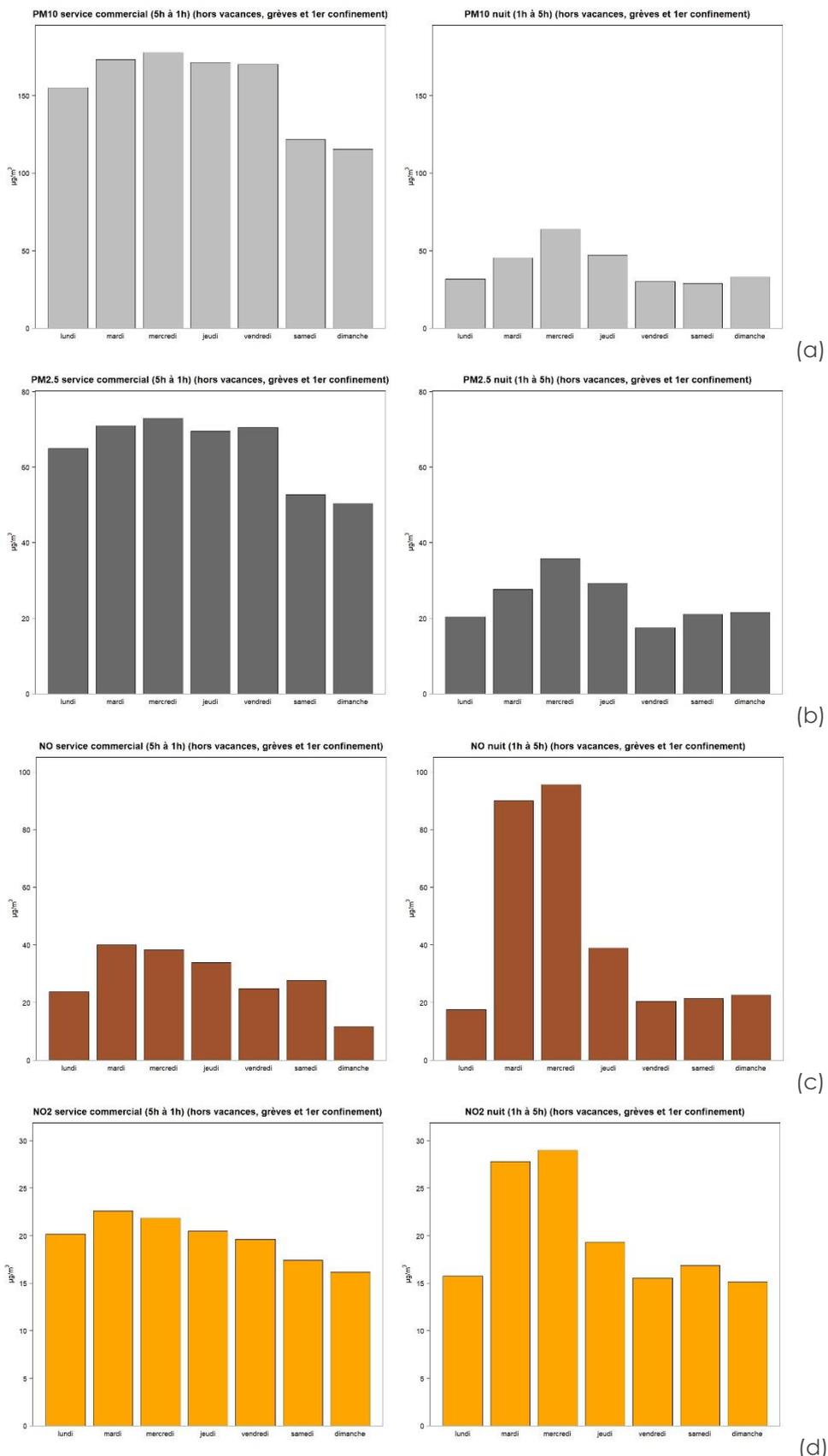


Figure 16 – Évolution des profils hebdomadaires en PM₁₀ (a), PM_{2.5} (b), NO (c) et NO₂ (d) à la gare RER C d'Avenue Foch en 2020 – hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement. Service commercial (5 à 1h) à gauche, Nuit (1 à 5h) à droite.

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 (24h) : pour les PM₁₀, la moyenne les jours ouvrés lors du service commercial est de 169 µg/m³, contre 148 µg/m³ en moyenne sur 24h, soit un écart de 13 %.

Concernant les PM_{2.5}, la moyenne les jours ouvrés lors du service commercial est de 69 µg/m³, contre 62 µg/m³ en moyenne sur 24h, soit un écart de 12 %.

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

Les **teneurs nocturnes** sont plus faibles, la principale source de particules sur les quais étant la circulation des trains, limitée aux trains de travaux la nuit. Concernant les PM₁₀, les concentrations nocturnes sont maximales les mercredis (64 µg/m³) et minimales les samedis (29 µg/m³). Les concentrations minimales en particules PM_{2.5} sont comprises entre 20 et 22 µg/m³ les lundis et les week-ends et les maxima sont observés les mercredis (36 µg/m³), comme pour les particules PM₁₀.

Lors du **service commercial**, la teneur moyenne en **NO** les jours ouvrés est de 32 µg/m³, contre 35 µg/m³ sur 24h, ce qui s'explique cette fois par des teneurs plus élevées la nuit, lors de travaux. Pour le **NO₂**, la concentration moyenne est de 21 µg/m³ pendant le service commercial et sur 24h.

Les **teneurs nocturnes** en NO s'élèvent en moyenne à 44 µg/m³, avec une forte variabilité selon les jours. Les minima sont enregistrés le lundi avec 18 µg/m³ et les maxima le mercredi (avec 96 µg/m³). Les niveaux moyens nocturnes les jours ouvrés s'élèvent à 53 µg/m³. Ceci s'explique par les travaux nocturnes, principaux responsables de ces fortes teneurs, qui ont lieu les nuits des jours ouvrés.

Les **teneurs nocturnes** en NO₂ sont en moyenne de 20 µg/m³, les concentrations varient de 15 µg/m³ (dimanche) à 29 µg/m³ (mercredi). Les niveaux moyens nocturnes les jours ouvrés s'élèvent à 22 µg/m³.

Les variations temporelles observées sur les concentrations en particules (PM₁₀ et PM_{2.5}) en gare d'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 42 µg/m³ pour les PM₁₀ et de 25 µg/m³ pour les PM_{2.5}. Les niveaux augmentent en journée. Les concentrations sont alors maximales lorsque la fréquentation de la gare est maximale, à savoir lors des heures de pointe, entre 9 et 11h le matin et entre 18h et 20h le soir. Les concentrations sur le quai atteignent alors 210 µg/m³ en moyenne pour les PM₁₀ et 83 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 31 % pour les PM₁₀ et 27 % 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}. Cette variabilité est notamment liée à la période de grève de janvier, mais surtout aux restrictions sanitaires mises en place en 2020, restrictions ayant eu un impact sur le nombre de trains en circulation et le nombre de voyageurs.

Enfin, **les concentrations sont plus importantes en service commercial** que sur une journée de 24h, de l'ordre de 13% pour les PM₁₀ et 12 % pour les PM_{2.5} 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 d'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 53 µg/m³ en NO et 20 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 32 µg/m³ et de 21 µg/m³ pour le NO₂.

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 42 % pour le NO et de 22 % pour le NO₂.

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

Le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ en air extérieur est généralement de l'ordre de 0,7. Le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ peut ainsi 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 (PM_{10}) en gare Avenue Foch est présenté à la Figure 17.

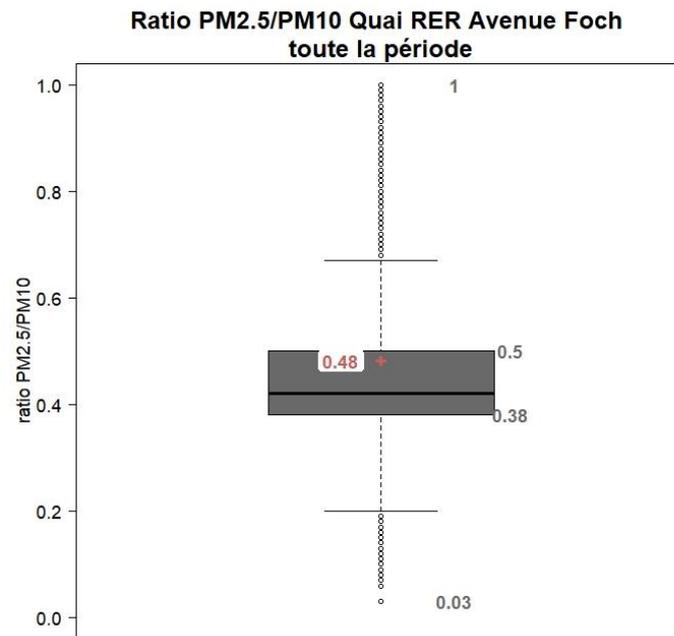


Figure 17 – Boîte à moustache des ratios horaires en $PM_{2.5}/PM_{10}$, à la Gare RER C d'Avenue Foch, en 2020 – [hors grèves et 1^{er} confinement](#).

En moyenne, en gare RER C d'Avenue Foch, sur toute la période de mesure, le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ est de 0,48. Le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ en air extérieur est généralement de l'ordre de 0,7. 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 que leur remise en suspension, bien illustré par le ratio plus faible.

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.

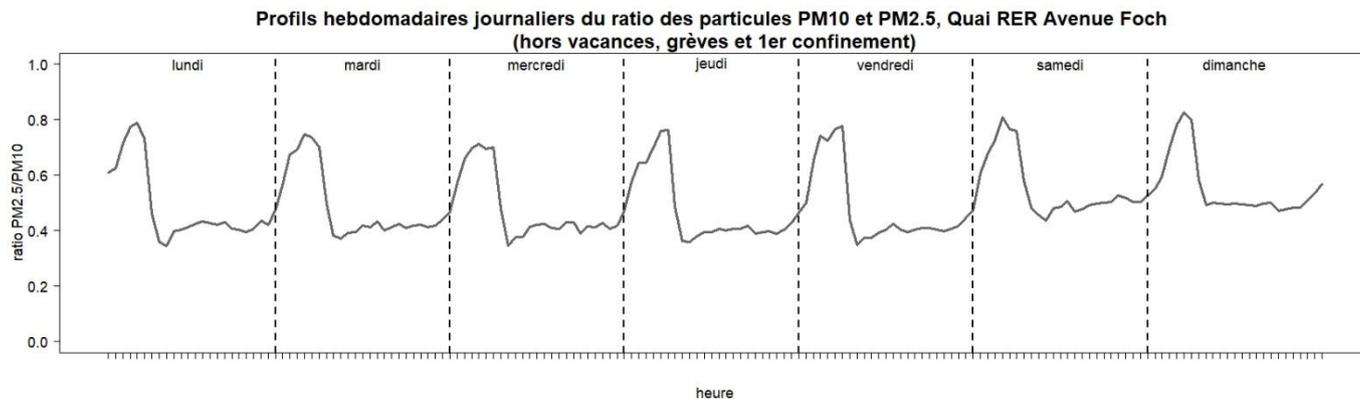


Figure 18 – Evolution du profil horaire du ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ à la gare RER C d'Avenue Foch, en 2020 [hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement](#).

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 0,7 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.

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.

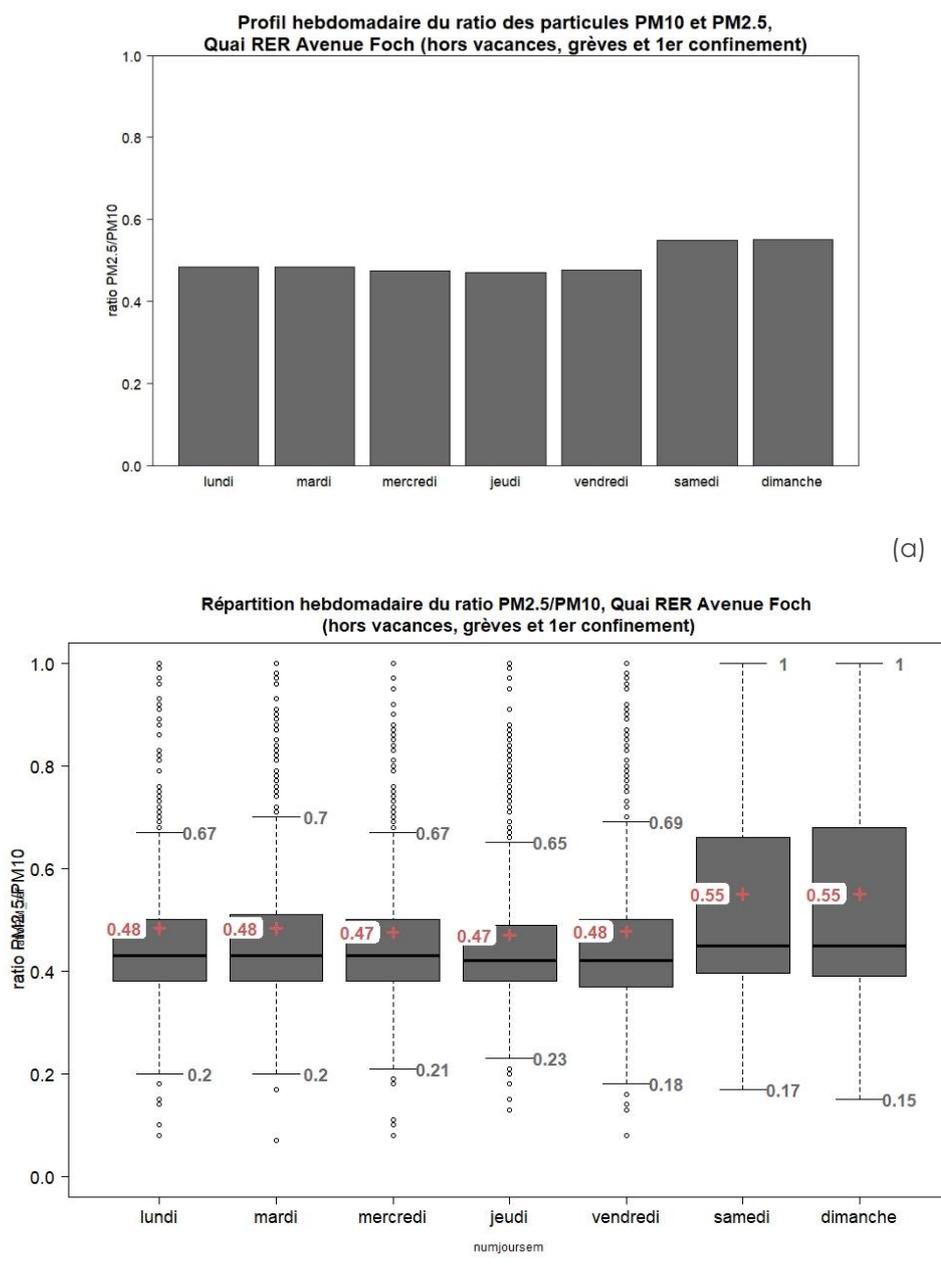


Figure 19 – Évolution des profils journaliers des ratios $PM_{2.5}/PM_{10}$ à la gare RER C d'Avenue Foch (a), en 2020 - hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement. Zoom sur les boîtes à moustaches (b).

En semaine les ratios sont stables, variant entre 0,47 et 0,48 en gare RER C Avenue Foch. Une hausse des ratios est observée les week-ends, ils atteignent 0,55 Avenue Foch. Cette augmentation des ratios s'explique par la diminution du nombre de trains le week-end par rapport aux jours ouvrés qui entraîne une baisse plus importante des concentrations en PM_{10} qu'en $PM_{2.5}$.

2.3.3. VARIABILITE JOURNALIERE

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

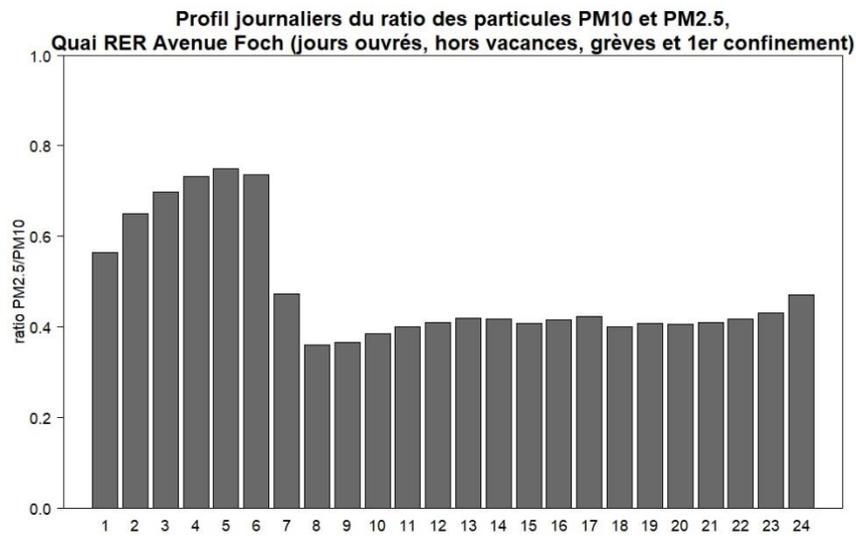


Figure 20 – Évolution du profil journalier du ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ à la gare RER C d'Avenue Foch, en 2020– jours ouvrés hors vacances, grèves et 1^{er} confinement.

Une certaine stabilité des ratios en journée (de 7h à 24h) est observée en gare RER C Avenue Foch (moyenne à 0,41 - écart-type de 0,03). 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 (0,75 à 5h pour Avenue Foch).

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 2020, hors vacances scolaires et 1^{er} confinement, en gare RER C Avenue Foch.

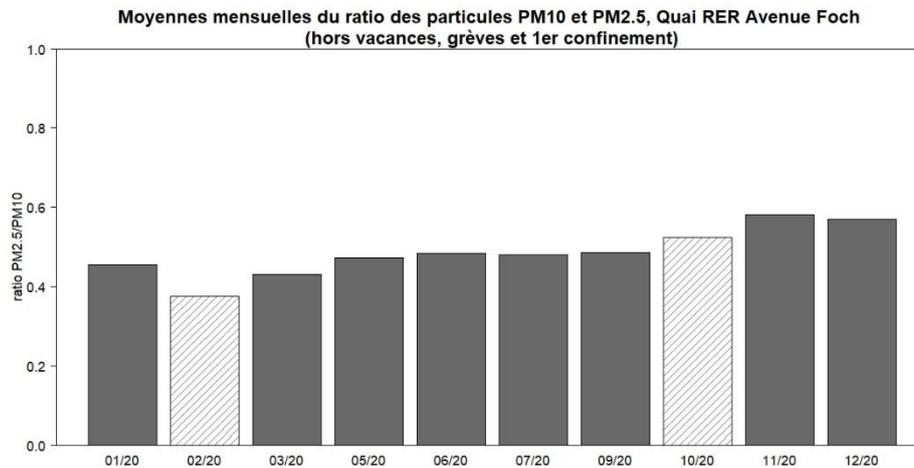


Figure 21 – Évolution du profil mensuel du ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ (a) à la gare RER C d'Avenue Foch, en 2020 – [jours ouvrés hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement](#). En hachuré, données disponibles < 75%.

Les ratios $PM_{2.5}/PM_{10}$ en gare d'Avenue Foch présentent de faibles variations mensuelles. Le mois de mars 2020 présente le ratio le plus faible (0,43 en moyenne), le maximum (0,58) 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 d'Avenue Foch.

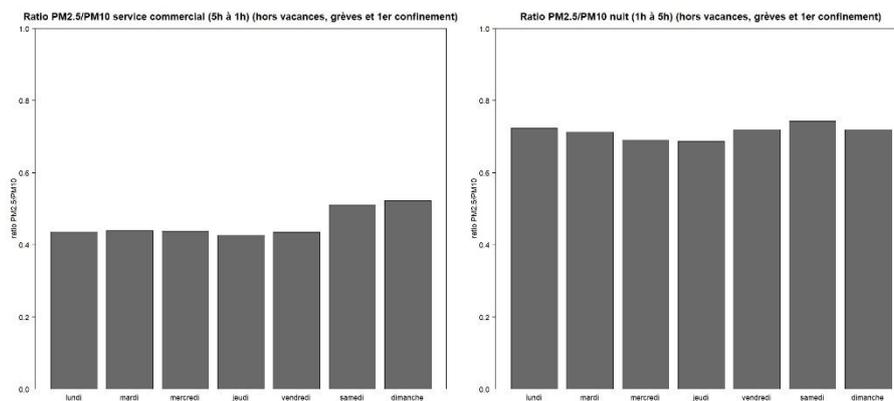


Figure 22 – Évolution des profils hebdomadaires du ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ à la gare RER C d'Avenue Foch, en 2020 – [hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement](#). Service commercial à gauche, Nuit à droite.

Le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ est stable tous les jours de la semaine lors du **service commercial, avec des ratios** proches de 0,4. Les **ratios nocturnes** sont plus élevés, autour de 0,7. 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 2018.

Statistiques ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2018	2019	2020
Minimum horaire	0,04	0	0,03
Percentile 25 (P25)	0,38	0,35	0,38
Médiane ou Percentile 50	0,42	0,39	151
Moyenne horaire	0,47	0,43	0,48
Percentile 75 (P75)	0,49	0,44	0,5
Maximum horaire	1	1	1
% de données horaires valides	89	88	85

Tableau 5 : 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 en 2019 et 0,48 en 2020. 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 0,48 en gare d'Avenue Foch en 2020, et il varie peu depuis le début de la surveillance de la gare

A l'échelle journalière, les ratios sont stables en journée (0,41 entre 7h et 24h) et en hausse la nuit (autour de 0,7 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. Néanmoins, le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ est légèrement plus élevé le week-end du fait du plus faible impact du trafic ferroviaire.

A l'échelle mensuelle, le mois de mars 2020 présente les ratios les plus faibles avec 0,43 en moyenne, le maximum ayant été observé en novembre 2020 avec 0,58.

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 freinage⁷, 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 d'Avenue Foch. Les mesures ont été réalisées du 14 au 27 septembre 2020. Les prélèvements journaliers ont été réalisés sur la période d'ouverture de la gare au public, à savoir de 5h à 1h, chaque jour du lundi au vendredi. Des résultats de mesure des métaux sont donc disponibles pour **10 jours ouvrés**.

Onze métaux ont été étudiés : Aluminium, Fer, Cuivre, Plomb, Zinc, Antimoine, Manganèse, Nickel, Arsenic, Cadmium et Chrome. Ces métaux ont été choisis conformément à la littérature⁷.

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.

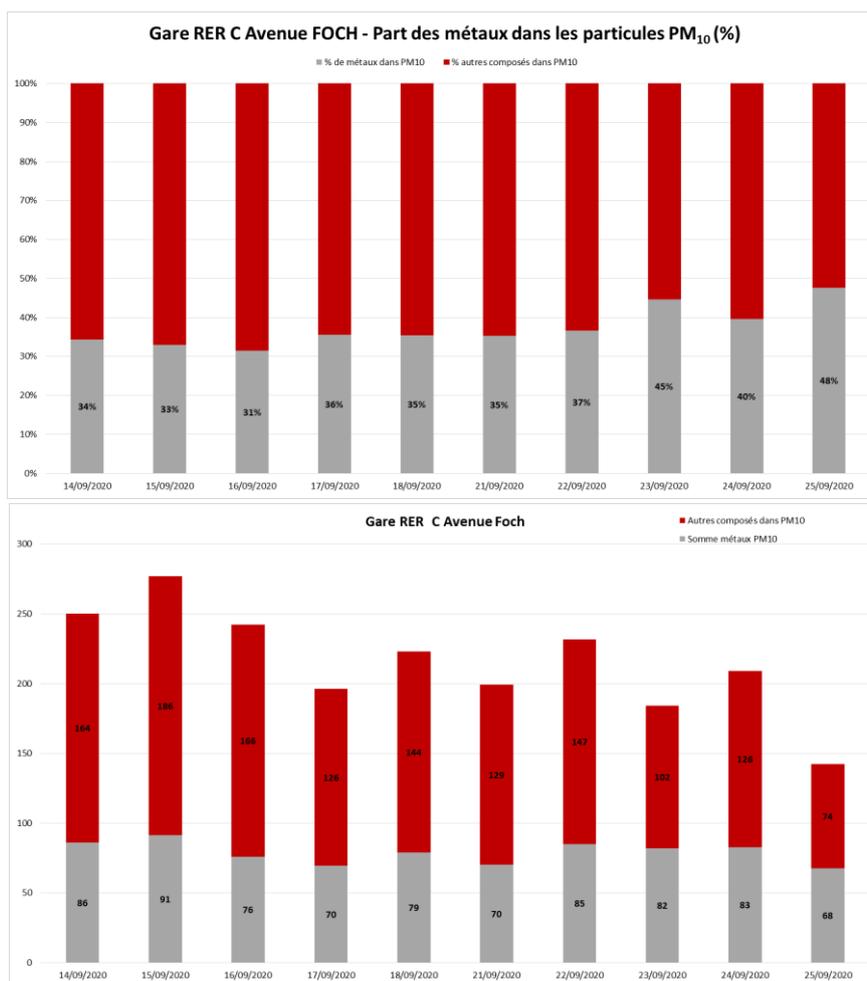


Figure 23 – Part des métaux dans les particules PM₁₀ (en % de particules PM₁₀) et évolution des relevés journaliers (concentrations en µg/m³) sur les périodes de prélèvement entre le 14 et le 27 septembre 2020, à la gare RER C Avenue Foch (jours ouvrés).

⁷ 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.

Sur l'ensemble des données disponibles (10 jours ouvrés de mesure), les concentrations en métaux varient de 68 µg/m³ (le 25/09/20) à 91 µg/m³ (le 15/09/20). En comparaison avec la concentration en particules PM₁₀ enregistrée les mêmes journées lors des même tranches horaires, **la part des métaux** a varié de 31 % (le 16 septembre 2020) à 48 % (le 25/09/2020). Elle est **en moyenne de 37 %**.

La part des métaux dans les particules PM₁₀ est plus faible en 2020 qu'en 2019 ou 2018, avec 37 % contre 50 et 47 % en 2018 et 2019 respectivement. Cette diminution peut s'expliquer par la baisse globale du trafic ferroviaire en 2020, en lien avec la crise sanitaire.

2.4.2. REPARTITION DES METAUX

La figure suivante (Figure 24) représente la répartition moyenne des composés mesurés entre le 14 et le 27 septembre (10 jours ouvrés disponibles).

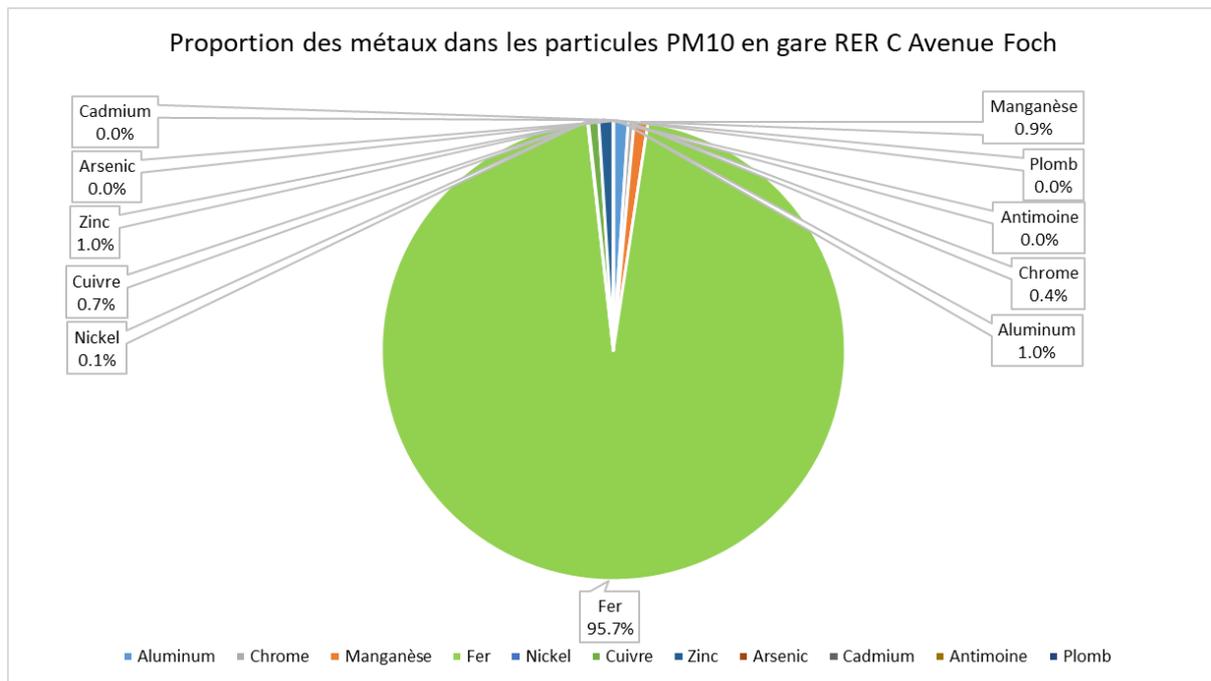


Figure 24 – Part de chaque métal dans les relevés en particules, en moyenne des mesures entre le 14 et le 27 septembre 2020, en gare RER C de Avenue Foch.

Parmi les onze métaux étudiés, le **Fer** est l'élément majoritaire : il représente 96 % des métaux mesurés à Avenue Foch. Ce résultat est stable sur toutes les journées de mesure, le pourcentage variant de 94 à 96 %.

Les métaux les plus abondants sont ensuite l'**Aluminium** et le **Zinc**, mais dans des proportions bien plus faibles que le fer : 1,0 % en moyenne. L'aluminium varie entre 0,8 et 1,3 %, le zinc entre 0,9 et 1,1 %

Vient ensuite le **Manganèse**, qui représente en moyenne 0,9 % des métaux mesurés dans les particules PM₁₀. Il varie entre 0,9 % et 1,0 %.

Suivent ensuite le **Cuivre** (0,7 % en moyenne), le **Chrome** (0,4%) et le **Nickel** (0,1%).

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

Les graphiques journaliers en Annexe 5 montrent une répartition en métaux (hors fer) relativement stable sur les différentes journées de mesure.

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) 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 caténaies (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 premières 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 (10 jours ouvrés de mesures) à la gare Avenue Foch. Les relevés journaliers pour chacun des autres métaux sont présentés en Annexe 5.

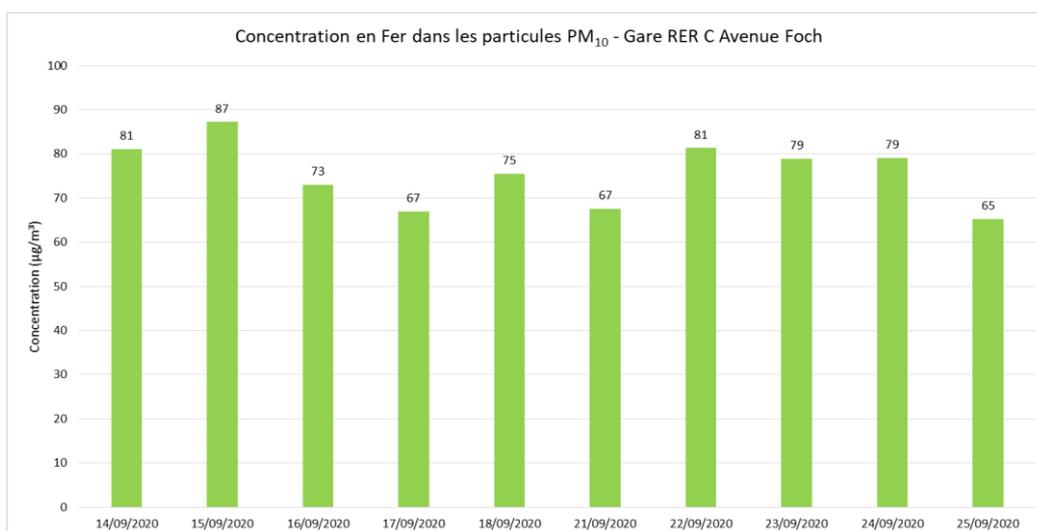


Figure 25 – Relevés journaliers en fer à la gare RER C de Avenue Foch, période de mesure entre le 14 et 27 septembre 2020.

Les teneurs en **Fer** ont légèrement varié en gare RER C Avenue Foch au cours de de la période de mesure, de 65 µg/m³ le vendredi 25 septembre 2020 à 87 µg/m³ le mardi 15 septembre 2020. Ces niveaux sont en lien direct avec les concentrations en particules PM₁₀ observées sur ces mêmes journées, comme évoqué au paragraphe précédent.

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

Les concentrations journalières en **Aluminium** ont varié de 585 à 1039 ng/m³, les résultats sont en moyenne de 820 ng/m³. Les teneurs journalières en **Zinc, Cuivre et Manganèse** sont du même ordre de grandeur. Les teneurs en **Zinc** varient de 580 à 994 ng/m³, pour une moyenne de 780 ng/m³. Celles du **Cuivre** varient de 450 à 704 ng/m³, pour une moyenne de 564 ng/m³. Les teneurs **Manganèse** varient de 593 à 936 ng/m³ pour une moyenne de 744 ng/m³

Enfin, les concentrations journalières en **Chrome** sont plus faibles, entre 261 à 417 ng/m³, pour une moyenne de 324 ng/m³.

Pour les cinq autres métaux, des variations temporelles existent, les maxima sont généralement observés aux mêmes périodes pour ces 5 métaux. Les niveaux journaliers varient :

- Entre 35 et 55 ng/m³ pour le Nickel⁸, pour une moyenne de 44 ng/m³.
- Entre 6 et 1351 ng/m³ pour le Plomb⁸, pour une moyenne de 154 ng/m³,
- Entre 3 et 8 ng/m³ pour l'Antimoine⁸, pour une moyenne de 5 ng/m³.
- Entre 6 et 51 ng/m³ pour l'Arsenic⁸, pour une moyenne de 12 ng/m³.
- Pour le Cadmium⁸, les relevés journaliers sont tous inférieurs au seuil de détection (0.27 ng/m³).

⁸ 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.

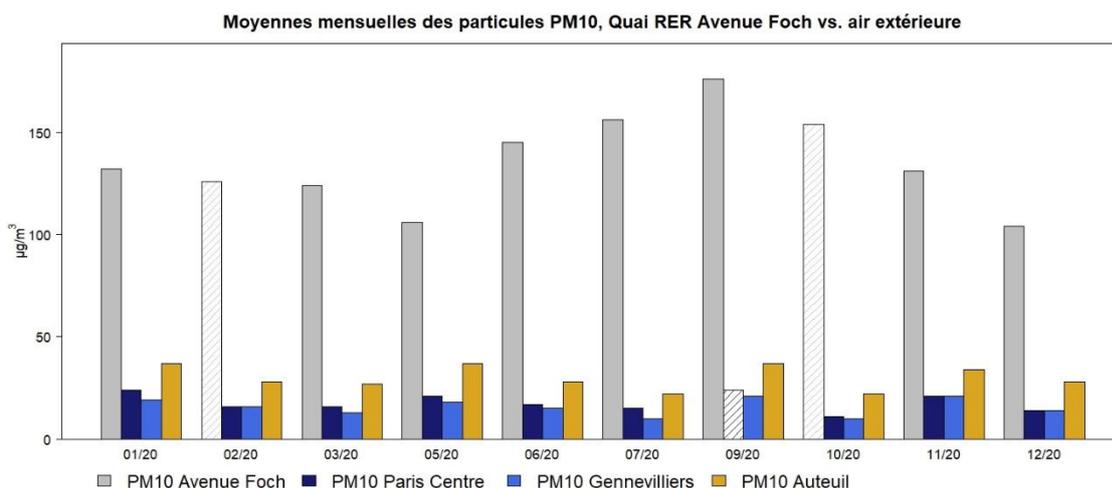
3. FACTEURS D'INFLUENCE

3.1 INFLUENCE DE LA QUALITE DE L'AIR EXTERIEUR

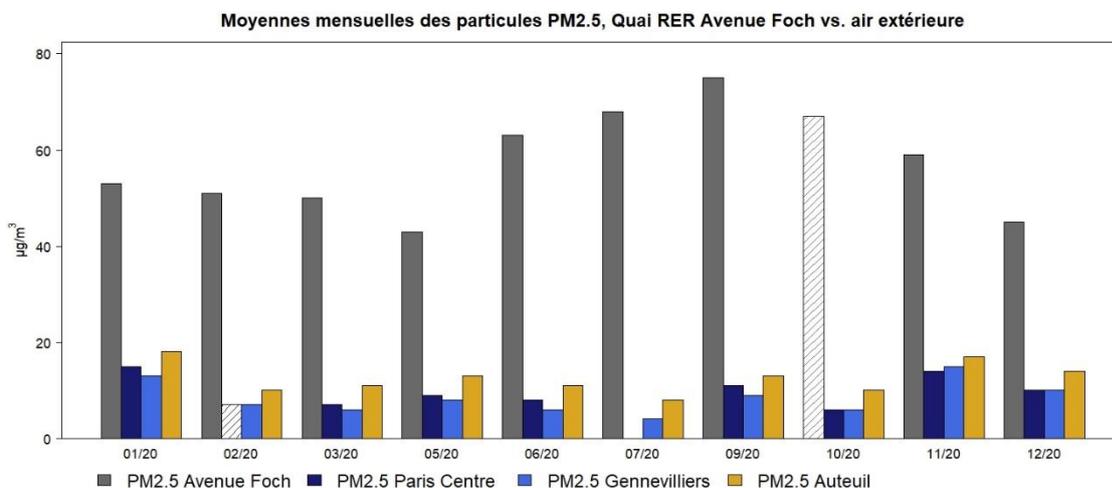
Les polluants de l'air extérieur peuvent se retrouver dans les enceintes souterraines, de façon plus ou moins marquée selon la profondeur de la gare, les accès et ouvertures vers l'extérieur et le système de ventilation en place. L'influence sera d'autant plus importante que la gare est peu profonde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

La Figure 26 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 (mesures en situation de fond aux stations Paris Centre et Gennevilliers, mesures à proximité du trafic routier au Boulevard Périphérique Porte d'Auteuil).

Les concentrations moyennes en particules PM₁₀ sur les quais de la gare RER C Avenue Foch sont quatre à dix fois supérieures aux concentrations mesurées par les stations extérieures d'Airparif⁹ 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. De plus, les concentrations maximales ont été relevées en Février en air extérieur alors que le maximum a été atteint en septembre en gare RER C Avenue Foch.



(a)



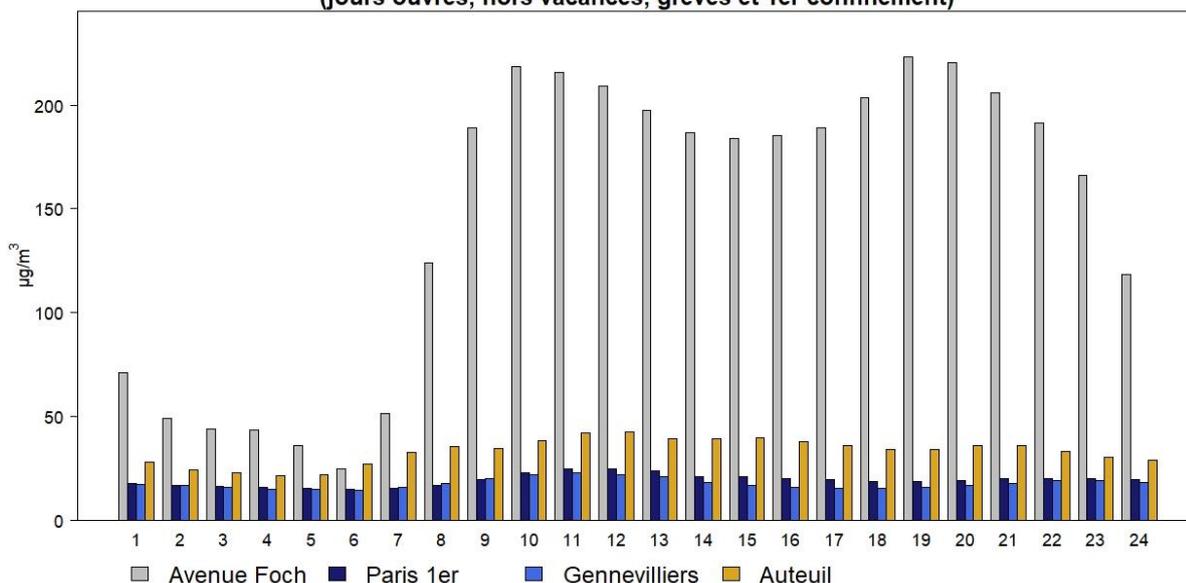
(b)

Figure 26 – Moyennes mensuelles des concentrations en PM₁₀ (a) et PM_{2.5} (b), en air extérieure et en gare d'Avenue Foch, en 2020 - hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement.

⁹ Gennevilliers, 60 Rue Richelieu (situation de fond) ; Boulevard Périphérique Porte d'Auteuil (proximité du trafic routier) et Paris centre, jardin des Halles-Allée J. Supervielle Paris 1^{er} (situation de fond).

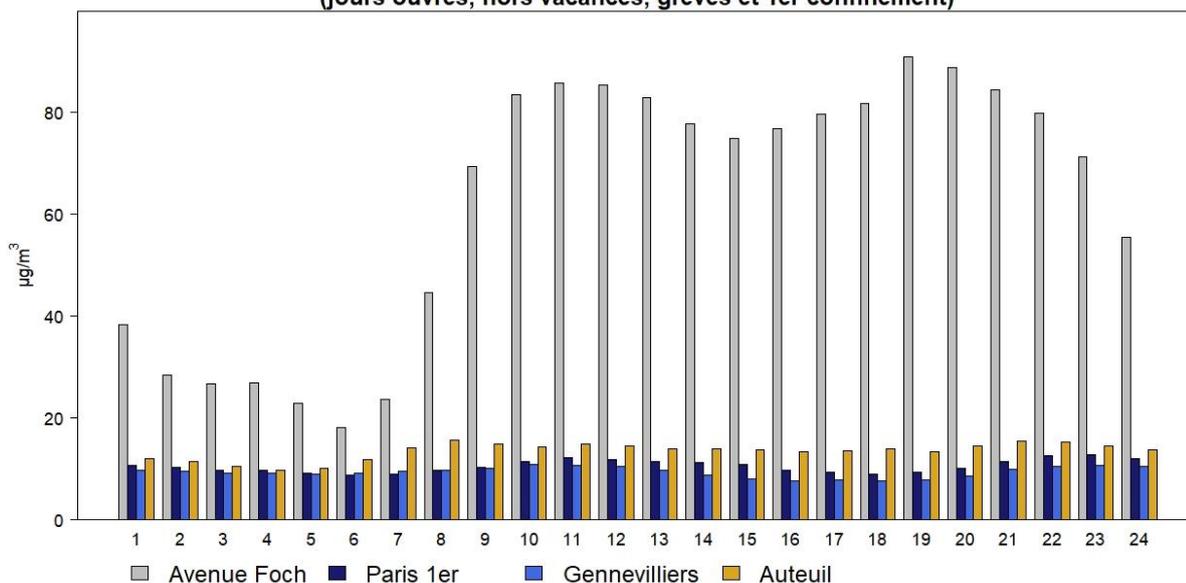
Les graphiques suivants présentent les profils journaliers en particules PM₁₀ (a) et PM_{2.5} (b) en gare RER C Avenue Foch ainsi qu'aux stations Paris 1^{er}, Gennevilliers et Auteuil du réseau Airparif.

Profils journaliers des particules PM₁₀, Quai RER Avenue Foch vs. air extérieure (jours ouvrés, hors vacances, grèves et 1^{er} confinement)



(a)

Profils journaliers des particules PM_{2.5}, Quai RER Avenue Foch vs. air extérieure (jours ouvrés, hors vacances, grèves et 1^{er} confinement)



(b)

Figure 27 : Profils journaliers en particules PM₁₀ (a) et PM_{2.5} (b), en air extérieur et en gare d'Avenue Foch, en 2020 – [jours ouvrés hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement](#).

Les concentrations en particules PM₁₀ et PM_{2.5} relevées en gare RER C Avenue Foch sont, à toute heure, supérieures à celles relevées par les stations de fond du réseau Airparif, à savoir Paris 1^{er} 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 28) représente les moyennes mensuelles en NO₂ sur les quais de la gare RER C Avenue Foch et en air extérieur¹⁰. Les fluctuations mensuelles des concentrations en NO₂ sur le quai ne suivent pas celles des concentrations mesurées en air extérieur, en situation de fond et à proximité du trafic routier. A l'échelle mensuelle, une influence de l'air extérieur sur les concentrations mesurées en gare est difficile à mettre en avant.

¹⁰ Station Champs Elysées, avenue des Champs-Elysées Paris 8^{ème} (proximité trafic) ; Station de Neuilly, 11 Rue du Commandant Pilot à Neuilly-sur-Seine (situation de fond).

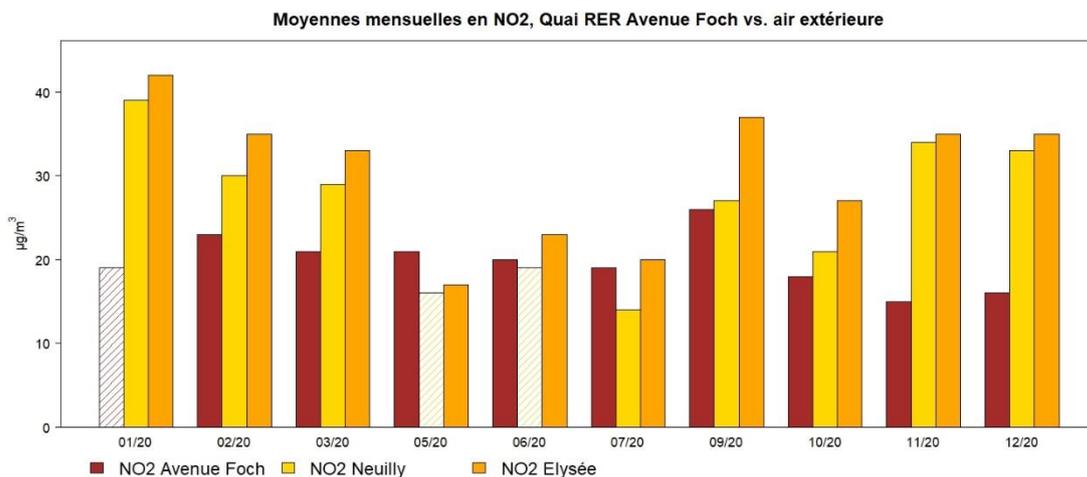


Figure 28 – Moyennes mensuelles des concentrations en NO₂, en air extérieur et en gare d'Avenue Foch, en 2020 - [hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement.](#)

Le graphique suivant (Figure 30) représente les profils journaliers (concentrations moyennes horaires) en NO₂ sur le quai de la gare et en air extérieur. Les concentrations en NO₂ en gare RER C Avenue Foch varient très peu sur une journée, contrairement aux stations extérieures où les pics du matin et du soir sont nettement plus marqués. La dynamique des niveaux extérieurs est ainsi plus marquée avec les teneurs les plus élevées lors des heures de pointe du trafic routier et les plus faibles en heures creuses (la nuit et l'après-midi).

Pendant la campagne de mesure, le niveau moyen en NO₂ relevé en gare d'Avenue Foch est de 20 µg/m³, celui en NO est de 26 µg/m³. A titre de comparaison sur la même période, une moyenne de 25 µg/m³ en NO₂ et 7 µg/m³ en NO a été enregistrée à la station de Neuilly-sur-Seine caractérisant l'air extérieur en situation de fond. A proximité du trafic routier, à la station Ellysée, la moyenne atteint 30 µg/m³ en NO₂ (et 16 µg/m³ en NO) compte tenu de l'influence des émissions du trafic routier.

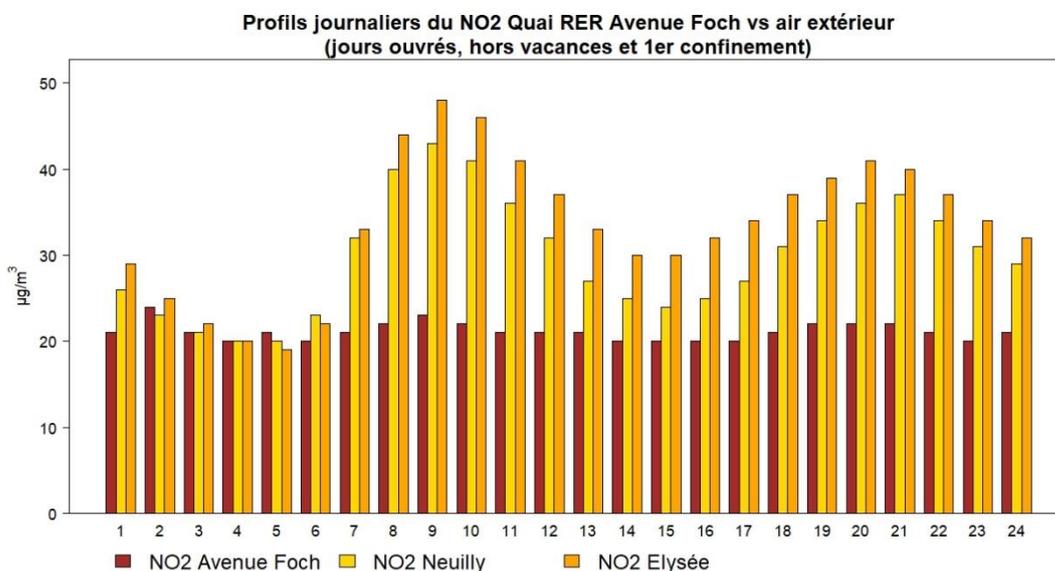


Figure 29 : Profils journaliers des concentrations en NO₂, en air extérieur et en gare d'Avenue Foch, en 2020 - [jours ouvrés hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement.](#)

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.

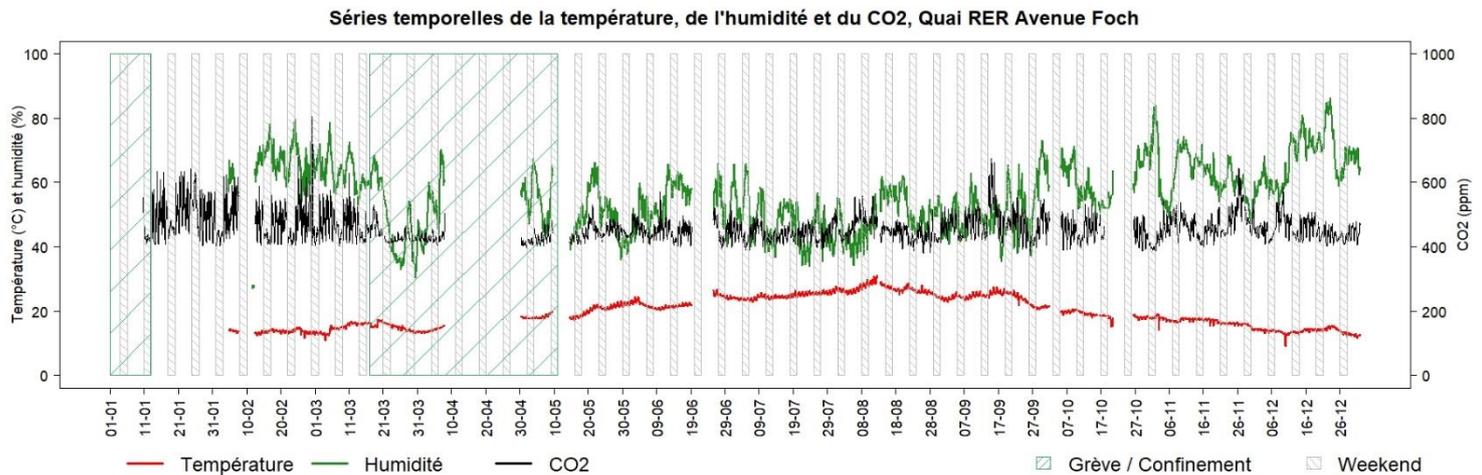
Concernant les particules, à l'échelle mensuelle ou journalière, l'impact de l'air extérieur sur les quais n'est pas visible ; la source prédominante de pollution reste la circulation ferroviaire.

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

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 et humidité à la gare Avenue Foch sont présentés à la Figure 30.



Sur l'ensemble de la période étudiée (année 2020 sans la période de grève de janvier et du 1^{er} confinement), la **température** moyenne en gare d'Avenue Foch est de 20°C. Les relevés horaires ont varié entre 9 et 31°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 57 % en 2020, les relevés horaires ont varié entre 27 % et 86 %.

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 pour 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 458 ppm, et les relevés horaires ont varié entre 379 ppm et 806 ppm.

La comparaison des concentrations horaires en particules (PM₁₀ d'une part, PM_{2,5} d'autre part) et en CO₂ les jours ouvrés (cf. Figure 31) montre que les teneurs maximales sont observées en même temps pour le CO₂ et pour les particules (léger décalage le matin), à savoir aux heures de pointe du matin (10h) et du soir (18 - 20h). Cela confirme que les concentrations en particules sont plus importantes lorsque la fréquentation de la gare est élevée. Toutefois l'amplitude des variations des niveaux de dioxyde de carbone est au cours d'une journée moins importante que pour les particules.

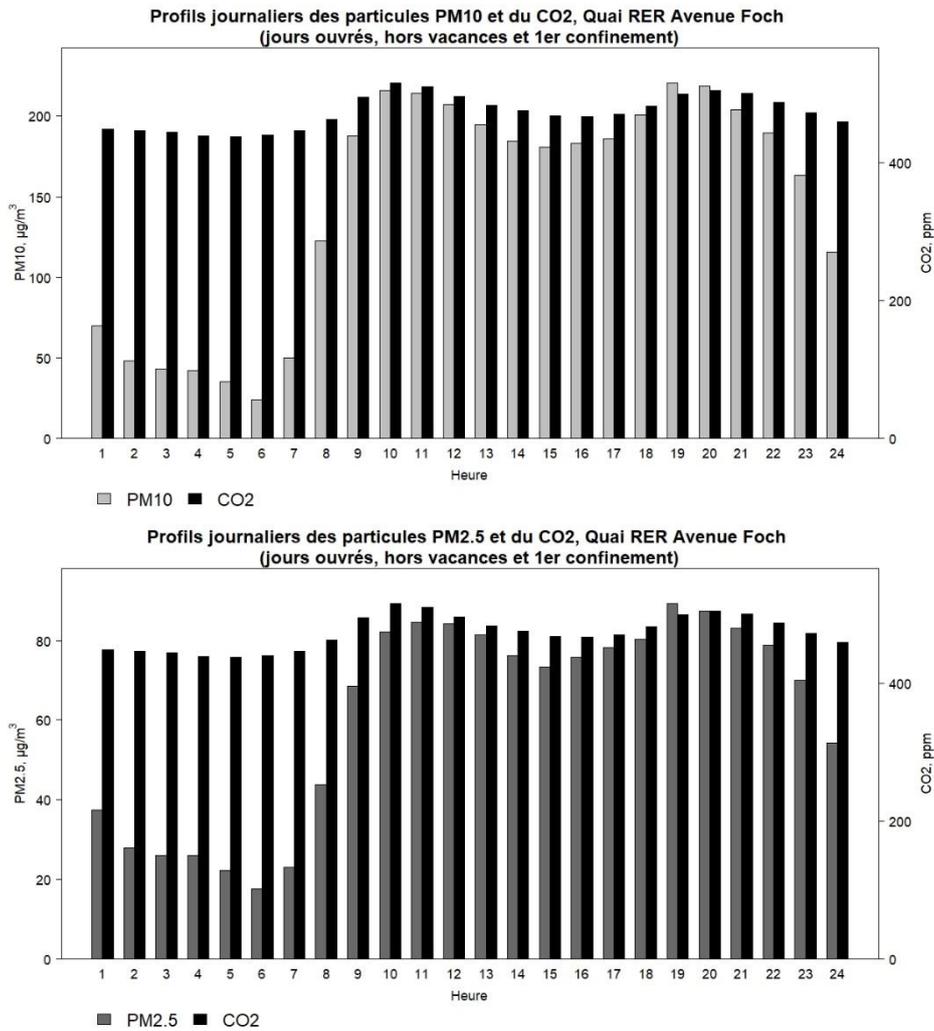


Figure 31 – Profils journaliers en PM₁₀ et CO₂ et en PM_{2,5} et CO₂, à la gare RER C de Avenue Foch, en 2020 – [jours ouvrés, hors vacances scolaires, grèves et 1^{er} confinement.](#)

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 d'Avenue Foch ne bénéficie pas de ventilation mécanique, aussi aucune influence de changement de ventilation, au cours des mesures, n'a pu être étudiée. En revanche, les niveaux relevés en gare RER C Avenue Foch peuvent être comparés aux niveaux de la gare Magenta, qui possède une ventilation mécanique. Bien que le pourcentage de disponibilité des données ne soit pas suffisant à Magenta, avec 70 % de données disponibles, les concentrations en particules PM₁₀ et PM_{2.5} sont nettement plus faibles qu'à la gare RER C Avenue Foch, avec respectivement 55 et 20 µg/m³. Cette différence de niveaux serait liée à la ventilation mécanique.

Le **nombre de trains circulant** par mois en gare d'Avenue Foch a été transmis par la SNCF Gares d'Ile-de-France sur l'ensemble de l'année 2020.

En moyenne, 139 trains circulent en gare d'Avenue Foch. Les chiffres sont présentés en Figure 32.

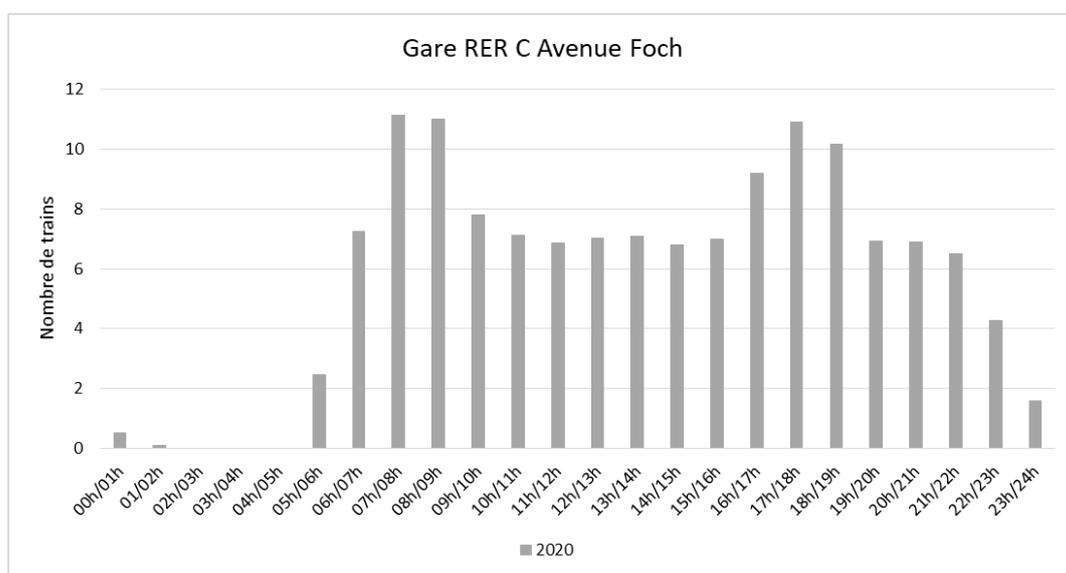


Figure 32 – Nombre de trains enregistrés chaque heure à la gare RER C de Avenue Foch en 2020.

Un croisement du nombre de trains en circulation avec les concentrations moyennes en **particules** à l'échelle journalière est présenté à la Figure 33 pour les jours ouvrés en gare d'Avenue Foch.

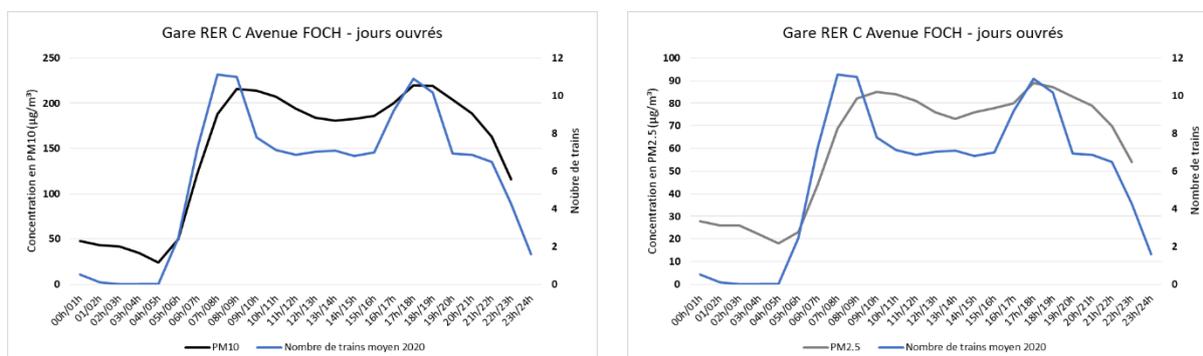


Figure 33 – Teneurs en particules PM₁₀, PM_{2.5} et nombre de trains en circulation (jours ouvrés et week-end confondus) à la gare RER C de Avenue Foch en 2020.

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 avec les teneurs en **NO** et **NO₂** ne montre pas de corrélation (cf. Figure 34) 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).

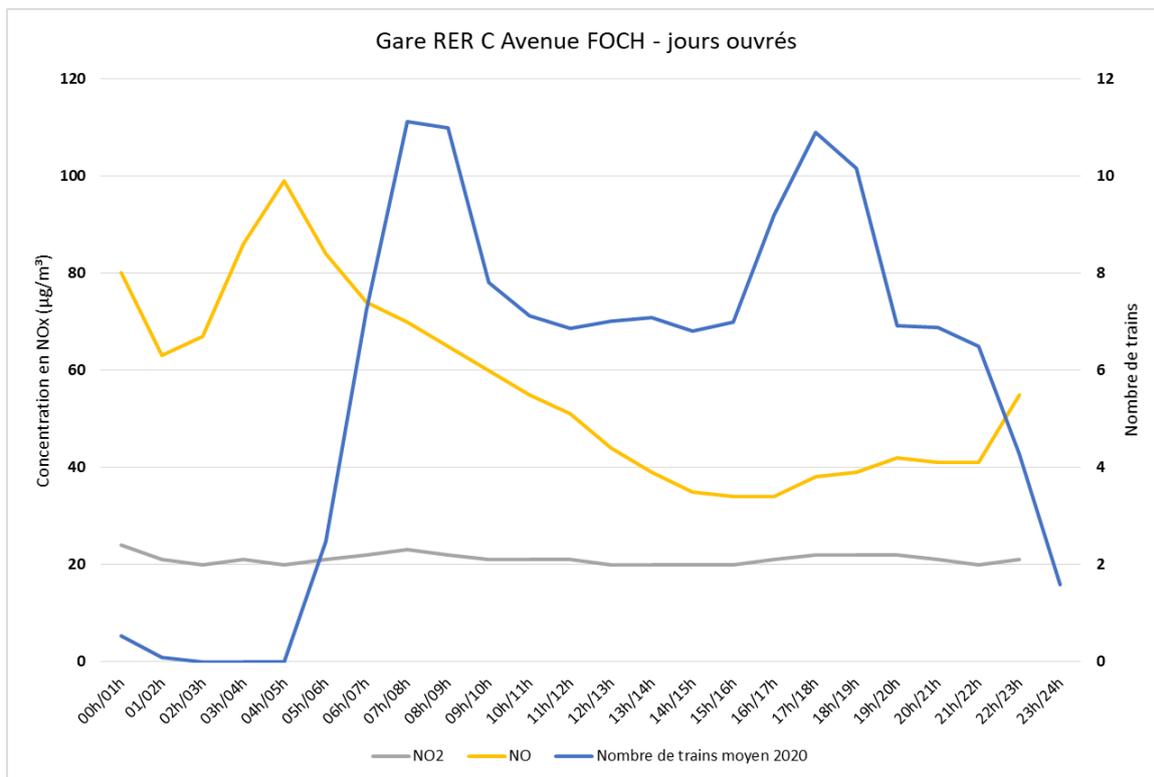


Figure 34 – Teneurs en NO_x, et nombre de trains en circulation à la gare RER C d'Avenue Foch, en 2020.

L'influence de divers paramètres de la gare d'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 d'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 2020 à l'exception de la période de grève de janvier et la 1^{ère} période de confinement (du 17 mars au 10 mai). Cette gare bénéficie d'un suivi en continu mis en place dans le cadre du partenariat entre Airparif et SNCF Gares d'Ile-de-France.

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 d'Avenue Foch au cours de la période de mesure **étaient en moyenne de 144 µg/m³**, le maximum horaire atteint étant de 518 µg/m³ (enregistré le 10 août entre 18 et 19h, soit lors d'une heure de pointe).
- **Les niveaux moyens en particules très fines PM_{2.5} étaient de 60 µg/m³**, pour un maximum horaire de 316 µg/m³ (enregistré le 10 mars entre 2 et 3h, probablement lors de travaux).

La répartition mensuelle montre des fluctuations dans des proportions similaires en PM₁₀ et PM_{2.5}. Le mois de mai présente les niveaux moyens les plus faibles. Ces fluctuations sont notamment liées aux restrictions mises en place pour freiner la propagation de la covid-19, restrictions qui se sont traduites par des baisses du nombre de trains en circulation, ainsi que du nombre de voyageurs.

L'évolution des profils hebdomadaires montre des concentrations plus faibles les samedis et dimanches, comparativement aux jours ouvrés : une baisse de l'ordre de 31 % pour les PM₁₀ et 27 % 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 (9-12h) et du soir (18-21h). Enfin, les concentrations sont plus importantes en service commercial que sur une journée de 24h, de l'ordre de 13 % 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 **26 µg/m³ en NO** et **20 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 42 % pour le NO et de 22 % pour le NO₂.

Sur une journée ouvrée moyenne, les niveaux nocturnes sont les plus forts (entre 23h 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 44 µg/m³ en NO et 20 µg/m³ en NO₂). Les niveaux sont plus faibles le reste de la journée (le teneur moyenne de NO est de 32 µg/m³ et celle de NO₂ de 21 µg/m³).

La part des **métaux** dans les **particules PM₁₀**, suivie périodiquement, est en moyenne de 37 %. Le **Fer** est l'élément majoritaire : il représente 95,7 % de la masse des métaux mesurés. Suivent ensuite **l'Aluminium** et le **Zinc** (1,0 %), **Manganèse** (0,9 %), le **Cuivre** (0,7 %) et le **Chrome** (0,4 %). 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 2018. L'année 2020 présente toutefois les niveaux les plus faibles enregistrés, en lien avec la baisse globale du trafic ferroviaire liée à la crise sanitaire.

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 d'Avenue Foch ne sont pas liées à la circulation des trains de voyageurs mais aux travaux nocturnes 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 sur les composés suivis

Les Oxydes d'Azote (NO_x) regroupent le Monoxyde d'Azote (NO) et le Dioxyde d'Azote (NO₂). Ils sont émis lors des combustions, à haute température, de combustibles fossiles (charbon, fuel, pétrole, etc.). Ainsi le NO₂ est un polluant indicateur des activités de combustion, notamment du trafic routier en air extérieur. Il est en effet directement émis par les sources motorisées de transport (émission directe ou « primaire »), et dans une moindre mesure par le chauffage résidentiel. Il est également produit dans l'atmosphère à partir des émissions de Monoxyde d'Azote, (NO) sous l'effet de leur transformation chimique en NO₂ (polluant « secondaire »). Les processus de formation du NO₂ sont étroitement liés à la présence d'Ozone dans l'air ($\text{NO} + \text{O}_3 \leftrightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$). C'est un polluant dont la source est essentiellement extérieure. Dans les enceintes souterraines, les seules sources de NO_x sont les locomotives diesel des trains de travaux.

Le Monoxyde d'Azote (NO) n'est pas toxique pour les humains aux concentrations généralement rencontrées dans l'environnement. Le Dioxyde d'Azote (NO₂) est un gaz irritant pour les bronches. Des études épidémiologiques ont montré que les symptômes bronchitiques chez l'enfant asthmatique augmentent avec une exposition de longue durée au NO₂. Une diminution de la fonction pulmonaire est également associée aux concentrations actuellement mesurées dans les villes d'Europe et d'Amérique du Nord. A des concentrations dépassant 200 µg/m³, sur de courtes durées, c'est un gaz toxique entraînant une inflammation importante des voies respiratoires.

Sur l'environnement, il contribue au phénomène des pluies acides, qui appauvrissent les milieux naturels (sols et végétaux), ainsi qu'à la formation de l'ozone.

Annexe 2

Éléments techniques de la gare Avenue Foch

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) : 1 585 par jour (source SNCF)

Nombre de trains/jour ; 139 jours ouvrés et week-end confondus

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 pendant la campagne :

Réduction du nombre de trains et de voyageurs suite aux différentes restrictions mises en place pour réduire la propagation de la covid-19 (confinements, couvre-feux, etc.).

Annexe 3

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.

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)¹¹ et particules fines (PM_{2.5}) ont été mesurées par analyseurs automatiques, ainsi que les NO_x¹² 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 réalisés sur des filtres quartz. L'analyse est réalisée selon une méthode normalisée par le laboratoire Micropolluant¹³.

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'ANSES⁷ dans les enceintes souterraines ferroviaires, à savoir :

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

Les 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.

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 % (≥) de données 15 minutes sont valides, consécutives ou non sur l'heure.

¹¹ Mesures des PM₁₀ et PM_{2.5} selon la norme NF EN 12341 par FDMS (mesure par micro-balance, prise en compte de la fraction 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 TEOM, en prenant en compte la norme NF EN 12341.

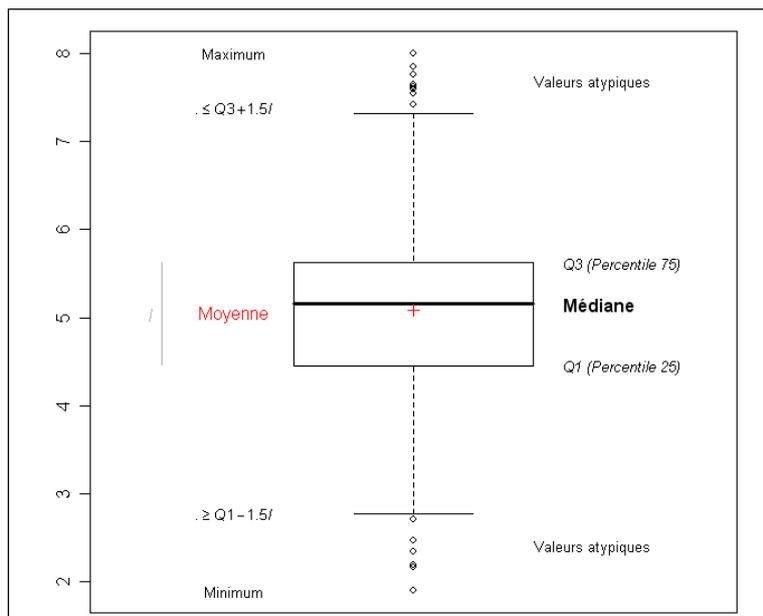
¹² Mesures des NO_x selon la norme NF EN 14211 par réduction catalytique et chimiluminescence.

¹³ Micropolluant : <http://www.micropolluants-tech.fr/>

Annexe 4

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, $1.5 * I$ (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 5

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

Mesures réalisées du 14 au 25 septembre 2020

