

MESURES DE LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR SUR LES QUAIS DU RER C EN GARE SNCF DE MUSÉE D'ORSAY

Mars-Avril 2018

Janvier 2019





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 DE MUSEE D'ORSAY – MARS/AVRIL 2018

Janvier 2019

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

SYNTHESE

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.

Dans ce cadre, une campagne de mesure a été réalisée du **26/03/2018 au 15/04/2018** en gare de **Musée d'Orsay (RER C, quai B en direction d'Austerlitz)**. Les particules fines (PM_{10}) et très fines ($PM_{2.5}$) ont été suivies, ainsi que les métaux. Par ailleurs, la comparaison avec la station de référence Avenue Foch a été réalisée sur une **période spécifique (12 au 27/04/2018)** suite au déplacement de la station de référence (initialement à Saint-Michel-Notre-Dame).

Les principaux résultats :

Les concentrations en particules fines PM_{10} mesurées sur les quais du RER C en gare de Musée d'Orsay entre le 26/03 et le 15/04/2018 étaient en moyenne de $86 \mu\text{g}/\text{m}^3$, le maximum horaire atteint étant de $257 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (enregistré le soir).

Les niveaux moyens en particules très fines $PM_{2.5}$ atteignent $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pour un maximum horaire de $208 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (travaux nocturnes).



Hors jours de grève, les concentrations en particules fines PM_{10} mesurées sur les quais du RER C en gare de Musée d'Orsay étaient en moyenne de $119 \mu\text{g}/\text{m}^3$, celles de $PM_{2.5}$ de $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

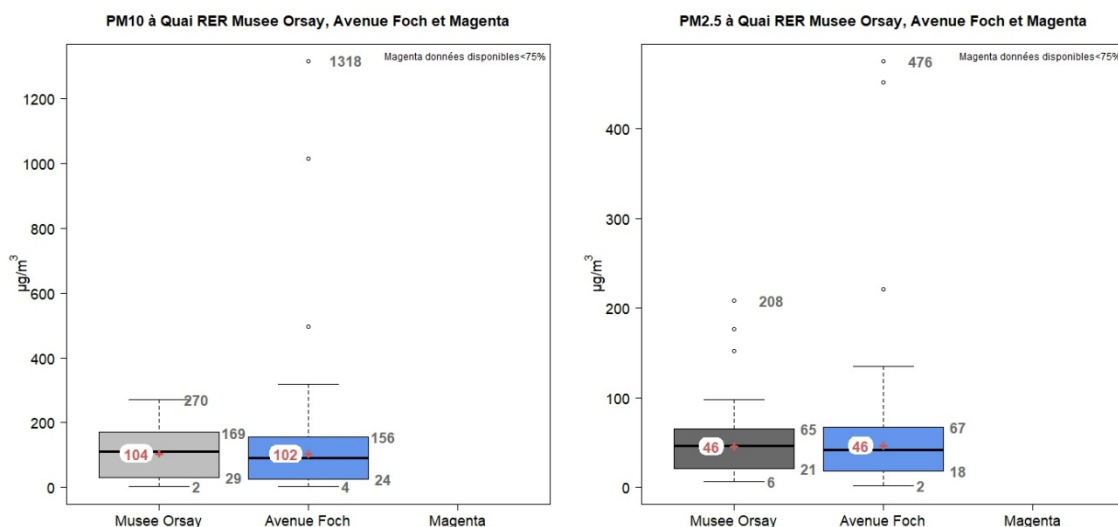
Comment se situent ces niveaux par rapport aux niveaux mesurés à Avenue Foch et à Magenta ?

Faute de donnée disponible, les niveaux n'ont pas pu être comparés à ceux de Magenta.

Les niveaux moyens en PM_{10} à Musée d'Orsay ($104 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont équivalents à ceux de la station de référence Avenue Foch ($102 \mu\text{g}/\text{m}^3$ enregistrés sur la même période).

Les niveaux moyens en $PM_{2.5}$ à Musée d'Orsay ($46 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont également équivalents à ceux de la station de référence Avenue Foch ($46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ enregistrés sur la même période).

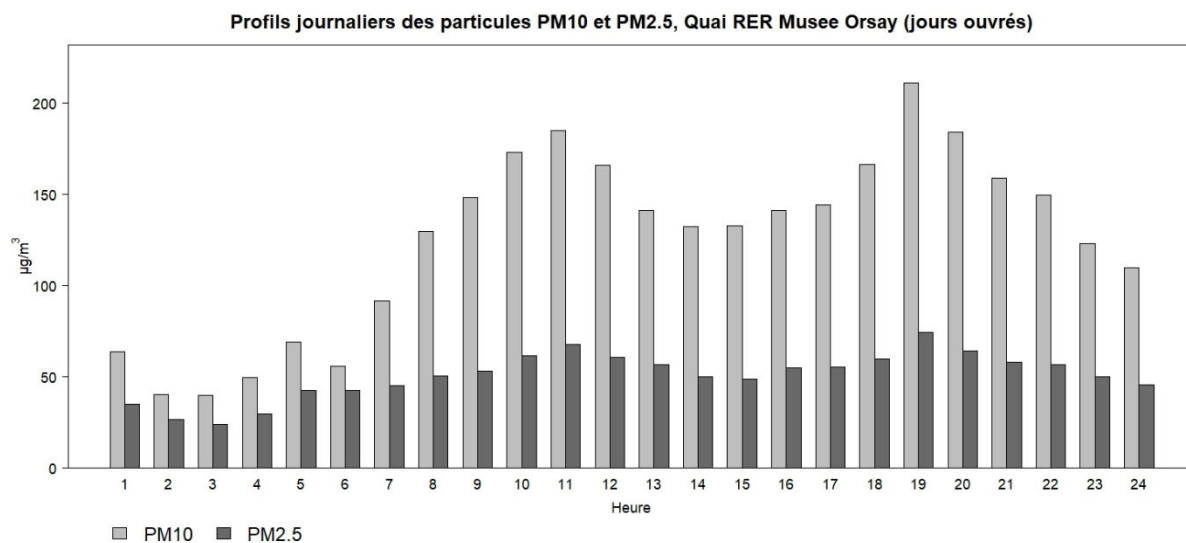
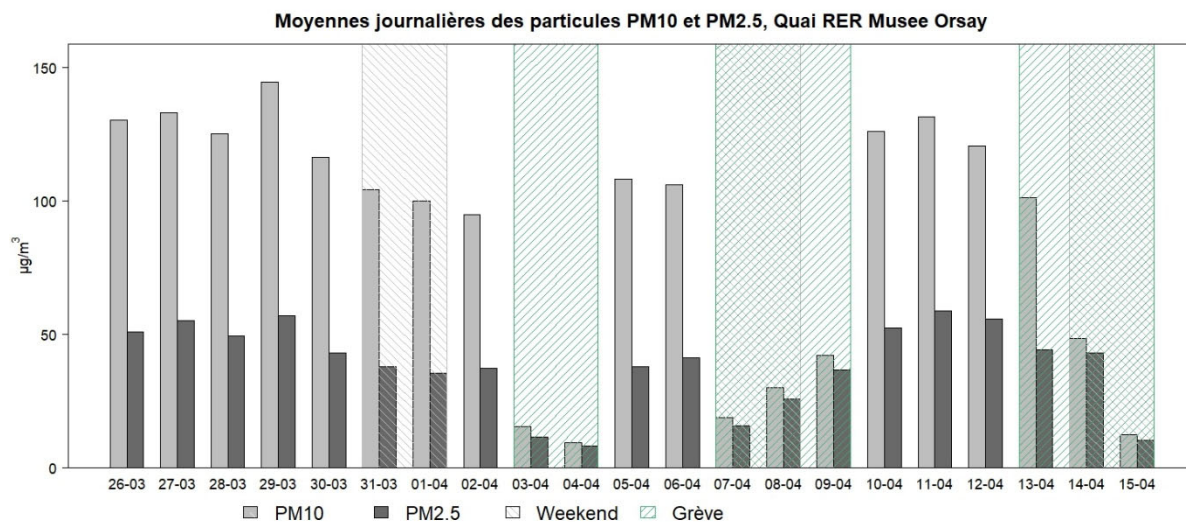
Pour les deux composés, les maxima horaires sont largement supérieurs en gare d'Avenue Foch, liés à des travaux nocturnes.



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

Les variations temporelles sont fortement liées au nombre de trains en circulation, qui fluctuent beaucoup au cours de la journée et selon les jours. La période de mesure a connu plusieurs jours de grève, ayant eu pour conséquence un nombre réduit de trains (en vert sur le graphique suivant). Ces journées-là, les teneurs en particules étaient nettement plus faibles.

Les évolutions temporelles sont équivalentes sur les gares de Musée d'Orsay et d'Avenue Foch.

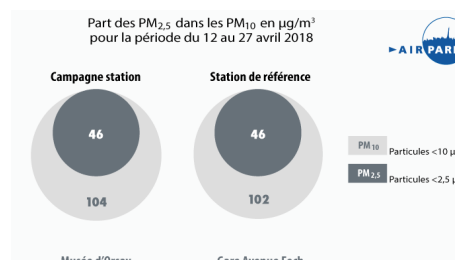


Sur une journée ouvrée moyenne (hors jours de grève), en gare de Musée d'Orsay, les niveaux nocturnes (entre 1h et 6h) sont les plus faibles, avec en moyenne 52 µg/m³ en PM₁₀ et 31 µg/m³ en PM_{2.5}. Les concentrations sont maximales vers 10 - 11h le matin et 19h en soirée. Les concentrations moyennes sur ces plages horaires sont de 184 µg/m³ en PM₁₀ et 66 µg/m³ en PM_{2.5}. Ces profils (variabilité temporelle et niveaux observés) sont similaires à ceux observés à la gare de référence de l'Avenue Foch, pour les PM₁₀ comme pour les PM_{2.5}, la seule différence étant les niveaux nocturnes en gare d'Avenue Foch (impact de travaux).

Cette similitude entre les gares de Musée d'Orsay et d'Avenue Foch s'explique par un même système de ventilation (naturelle), des gares géographiquement proches (dans Paris), sur la même ligne (RER C), malgré une différence en terme de fréquentation (5 fois plus de voyageurs en gare de Musée d'Orsay).

Ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$: quelle moyenne, quelle fluctuation temporelle ?

Le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ en gare de Musée d'Orsay est en moyenne de 0,59. Les $PM_{2.5}$ représentent en moyenne plus de la moitié des concentrations massiques de PM_{10} . Le ratio est relativement stable les jours ouvrés. A l'échelle journalière, le ratio est stable en journée à 0,4. Les pics ponctuels au-dessus de 0,7 s'observent surtout la nuit lorsque les émissions de PM_{10} dues à l'activité de la gare diminuent fortement. Ces résultats sont comparables à ceux observés à la station de référence Avenue Foch.



Quelle est la contribution des métaux au niveau des particules ? Est-ce différent de ce qui est observé à Avenue Foch ?

La part des métaux dans les prélèvements journaliers en particules PM_{10} varie de 39 à 47% sur la semaine de mesure (16 au 20/04/2018) en gare de Musée d'Orsay. Sur la même période, la part des métaux en gare de l'Avenue Foch a varié de 41 à 55%. Cet écart s'explique par des teneurs en particules PM_{10} légèrement plus importantes en gare de Musée d'Orsay (+ 15%), les concentrations en métaux étant équivalentes sur la période de mesure dans les deux gares.

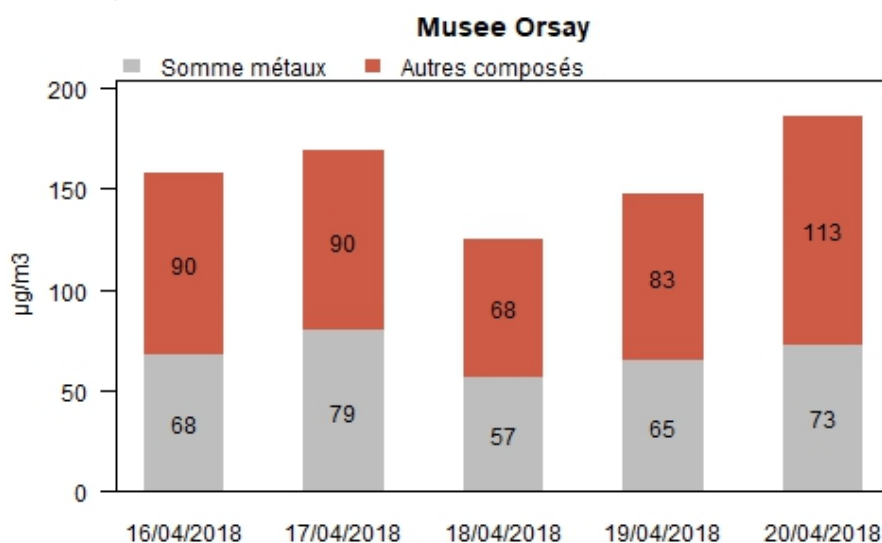
Quelles est la répartition entre les dix métaux suivis ?

Le **Fer** est l'élément majoritaire : il représente 96 % des métaux mesurés à Musée d'Orsay (97 % à Avenue Foch). Suivent ensuite le **Cuivre** (1.3 % à Musée d'Orsay), le **Zinc** (1.1 %), le **Manganèse** (0.9 %), suivi du **Chrome** (0.4 %). Les proportions en Nickel, Arsenic, Cadmium, Antimoine et Plomb sont négligeables par rapport aux métaux précédemment évoqués (< 0.1 %). Les données pour l'Aluminium ne sont pas disponibles pour cette gare. La proportion des métaux est proche de celle enregistrée en gare de l'Avenue Foch, la principale différence étant pour le Cuivre, qui présente 0.8% des métaux à la gare de référence.

Est-ce que la part des métaux est variable dans le temps ?

La part de chaque métal est stable sur les 5 jours de mesure, aussi bien en gare de Musée d'Orsay qu'à Avenue Foch. Une baisse des teneurs est observée lors des deux journées de grève (18 et 19 avril).

Les relevés journaliers ont varié sur la semaine de prélèvement à Musée d'Orsay, ainsi qu'à Avenue Foch, de la même façon que les teneurs en particules PM_{10} .



SOMMAIRE

SYNTHESE	4
SOMMAIRE	7
GLOSSAIRE	8
INTRODUCTION : CONTEXTE ET OBJECTIFS	9
1. DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE DE MESURE	11
1.1 DESCRIPTION DE LA GARE ET LOCALISATION DU POINT DE MESURE.....	11
1.2 PERIODE DE MESURE	12
2. NIVEAUX DE PARTICULES RENCONTRES DANS LA GARE	13
2.1 NIVEAUX MOYENS OBSERVES SUR LE QUAI	13
2.1.1. PARTICULES PM ₁₀	14
2.1.2. PARTICULES PM _{2.5}	15
2.2 VARIABILITE TEMPORELLE.....	16
2.2.1. VARIABILITE DES RELEVES HORAIRES PENDANT LA CAMPAGNE DE MESURE	16
2.2.2. VARIABILITE HEBDOMADAIRE	17
2.2.3. VARIABILITE JOURNALIERE.....	18
2.3 COMPARAISON DES NIVEAUX MOYENS OBSERVES SUR LE QUAI AVEC CEUX DE LA STATION DE REFERENCE AVENUE FOCH	19
2.3.1. PARTICULES PM ₁₀	20
2.3.2. PARTICULES PM _{2.5}	21
2.3.3. VARIABILITE TEMPORELLE.....	22
2.4 TENEURS DE METAUX DANS LES PARTICULES	26
2.4.1. PART DES METAUX DANS LES PARTICULES PM ₁₀	27
2.4.2. REPARTITION DES METAUX.....	27
2.4.3. NIVEAUX OBSERVES ET VARIATIONS TEMPORELLES.....	30
2.5 LIENS ENTRE PARTICULES FINES PM ₁₀ ET PARTICULES TRES FINES PM _{2.5}	32
2.5.1. NIVEAUX MOYENS.....	32
2.5.2. VARIABILITE HEBDOMADAIRE	32
2.5.3. VARIABILITE DES RATIOS HORAIRES	33
2.5.4. COMPARAISON AVEC AVENUE FOCH	34
3. FACTEURS D'INFLUENCE.....	37
3.1 INFLUENCE DE LA QUALITE DE L' AIR EXTERIEUR	37
3.2 CONFINEMENT DE LA GARE, PARAMETRES DE CONFORT	38
3.3 PARAMETRES TECHNIQUES, TRAFIC DE LA GARE	39
4. CONCLUSION	42

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 ;
- **Comprendre** la pollution atmosphérique et ses impacts en lien avec le climat, l'énergie et l'exposition des personnes ; prévoir la qualité de l'air au jour le jour, les épisodes de pollution et les évolutions futures ;
- **Accompagner** les décideurs dans l'amélioration de la qualité de l'air sur leur territoire, favoriser la concertation, informer les autorités, les médias et le public.

Airparif est agréée par le Ministère de l'Environnement. **Pour garantir la qualité et la fiabilité de ses résultats, ses activités sont certifiées ISO 9001 par l'AFQA et accréditées ISO/CEI 17025 Section Laboratoires par l'AFNOR.**

GLOSSAIRE

µg/m³ micro gramme par mètre cube

ng/m³ nano gramme par mètre cube

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

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

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. Les données recueillies alimenteront également les outils d'estimation de l'exposition individuelle des Franciliens développés par Airparif et elles seront mises à disposition du public.

Pendant 2 ans, 23 gares franciliennes souterraines ou mixtes seront, à tour de rôle, équipées d'une station de mesure de la qualité de l'air. Dans chaque gare sont mesurées en continu pendant 3 semaines les particules PM₁₀ et les particules fines 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) et Chrome (Cr). Enfin, les paramètres de confort (CO₂, Humidité et Température) sont suivis. Les mesures sont réalisées sur le quai de la gare.

Dans le cadre du partenariat, les mesures dans 16 gares sont assurées par Airparif, les 7 autres gares étant étudiées par AEF².

En parallèle, deux stations de référence mesurent en continu les particules pendant toute la durée du projet (2016-2018) : la station Magenta (RER E), gérée par AEF et la station Avenue Foch (RER C), gérée par Airparif. Les mesures avaient lieu initialement à la station Saint-Michel-Notre-Dame (de septembre 2016 à décembre 2017). Ces deux stations assurent le suivi au pas de temps horaire des particules fines (PM₁₀) et très fines (PM_{2.5}). La station Avenue Foch mesure également les oxydes d'azote (NO_x). Des relevés réguliers de métaux y sont également réalisés. Ces deux stations de référence ont été choisies pour leurs caractéristiques différentes : Magenta est une station récente, avec une ventilation contrôlée, alors que la gare Avenue Foch est une station ancienne, sans ventilation mécanique.

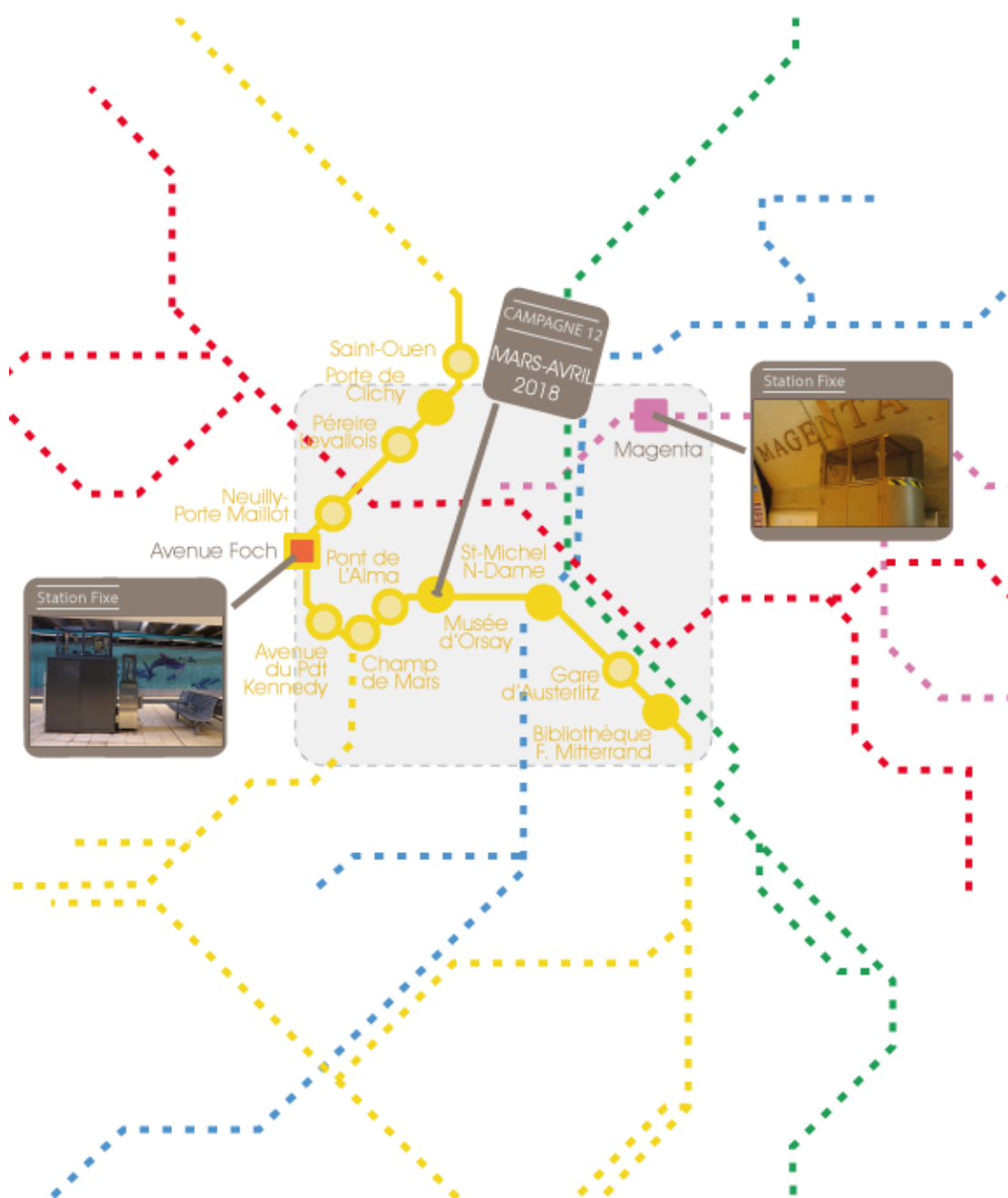
C'est dans le cadre de ce programme 2016-2018 qu'une campagne de mesure a été réalisée à la gare de Musée d'Orsay en mars/avril 2018, dont les résultats sont présentés dans ce rapport.

La figure suivante illustre la localisation de la gare étudiée (Musée d'Orsay), ainsi que celle des deux stations permanentes.

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).

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

Gares RER du réseau SNCF qui seront équipées par Airparif et calendrier des campagnes de mesure



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

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

Paris intra muros ■



Figure 1 - Localisation de la gare étudiée et des deux stations fixes (Magenta depuis janvier 2016 et Avenue Foch depuis avril 2018).

1. DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE DE MESURE

1.1 DESCRIPTION DE LA GARE ET LOCALISATION DU POINT DE MESURE

La gare de Musée d'Orsay, sur le RER C (branche centrale dans Paris) est concernée par le programme de partenariat. Elle est située Quai Anatole France, à Paris (VII^{ème}), à proximité de la Seine.

Cette gare est de configuration simple, c'est-à-dire sans correspondance.

Cette gare RER est souterraine (comme les tunnels de part et d'autre de la station), de faible profondeur (niveau -1), avec des quais de chaque côté de la voie. **Il n'y a pas de système de ventilation mécanique en place (ventilation naturelle).**

Tous les éléments techniques détaillés sur la gare (matériel roulant, etc.) sont présentés en ANNEXE 1.

Le nombre de voyageurs montant en gare de Musée d'Orsay (RER C) est de 9 800 par jour (source SNCF : carte des montants 2016).

Le nombre de trains circulant par jour en gare de Musée d'Orsay (2 sens confondus) est de 500 les jours ouvrés (jours JOB), 449 les samedis et 434 les dimanches (source SNCF).

La station de mesure a été installée au milieu du quai B (direction Austerlitz - point bleu sur la figure 2 ci-dessous).

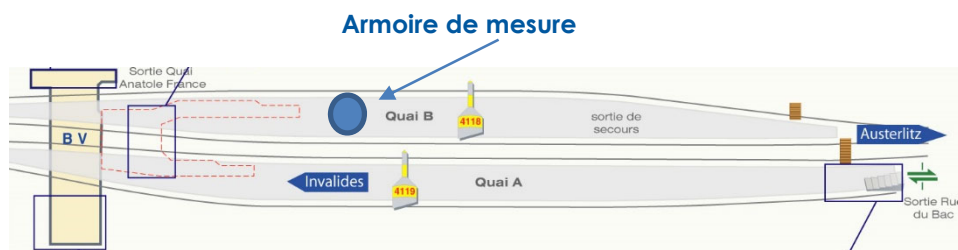


Figure 2 – Localisation du point de mesure (gare Musée d'Orsay, ligne RER C, quai B), photo de la station de mesure (quai) et photo extérieure de la gare.

Les détails sur les indicateurs de pollution retenus, les appareils de mesure mis en œuvre et la qualité des résultats, sont présentés en ANNEXE 2.

Pour rappel, des mesures en particules PM₁₀, PM_{2.5} et en métaux, ainsi que des relevés en CO₂, humidité et température ont été réalisés à cette station.

1.2 PERIODE DE MESURE

Les mesures de pollution atmosphérique à la gare de Musée d'Orsay ont été réalisées pendant 3 semaines, du **26/03/2018 au 15/04/2018**. Cette durée a été choisie afin d'avoir suffisamment de données pour assurer la robustesse des statistiques d'une part et, d'autre part, pour rencontrer potentiellement différentes conditions météorologiques et évaluer l'impact éventuel de l'air extérieur sur les niveaux sur les quais.

Au cours de cette période, le lundi de Pâques (02/04) a été traité comme un dimanche.

Pendant cette période de mesure, la station de référence Magenta n'a pas été opérationnelle. Par conséquent, ce rapport ne présente pas de comparaison avec la gare de Magenta.

De plus, la station Saint-Michel-Notre-Dame était fermée suite à des infiltrations d'eau (conséquences de la crue de la Seine de janvier 2018). Le transfert des mesures en gare RER C de l'Avenue Foch a permis un début des mesures le 12/04/2018 sur cette station.

Une comparaison avec les résultats de l'Avenue Foch a été réalisée du 12 au 27/04/2018.

Afin d'avoir une période de mesure commune avec les relevés en gare d'Avenue Foch, les prélèvements en métaux et en particules ont été réalisés **à partir du 16/04/2018** pour une semaine.

Enfin, a débuté le 03/04/2018 un **mouvement de grève** au sein de la SNCF. Le trafic a été perturbé sur la ligne du RER C (en gare de Musée d'Orsay et d'Avenue Foch) les jours suivants :

- Jours ouvrés : les 3, 4, 9, 13, 23, 24 avril (18 et 19 avril pendant les prélèvements métaux).
- Samedi : 14 avril.
- Dimanche : 8 avril.

Le mouvement de grève s'est également traduit par une perturbation de la circulation des trains les 7, 15 et 22 avril (source SNCF), journées qui seront traitées comme des journées de grève dans la suite du rapport.

2. NIVEAUX DE PARTICULES RENCONTRES DANS LA GARE

Ce paragraphe propose d'abord une analyse des données : présentation statistique sur la période de la campagne et évolution temporelle des relevés à l'échelle horaire et journalière, pour les particules ainsi que pour la teneur en métaux dans les particules.

Les niveaux observés sur le quai dans la gare de Musée d'Orsay sont ensuite comparés aux observations de la station de référence (Avenue Foch), pendant une période spécifique, à savoir du 12 au 27 avril (les données sur la station de référence Magenta n'étant pas disponibles pendant cette campagne).

2.1 NIVEAUX MOYENS OBSERVES SUR LE QUAI

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 de Musée d'Orsay, sur l'ensemble de la période de mesure (26/03-15/04/2018).

Les huit jours de grèves ayant eu lieu pendant la campagne de mesure ont eu pour conséquence une diminution du nombre de trains ces journées-là, non représentative d'une situation classique.

Aussi, les statistiques présentent d'une part les résultats globaux (toute la période de mesure), et d'autre part les résultats uniquement les jours hors grève (représentatives de la situation habituelle).

Gare Musée d'Orsay	PM ₁₀ (particules fines)		PM _{2.5} (particules très fines)	
	Toute la période (21 jours)	Hors grève (15 jours)	Toute la période (21 jours)	Hors grève (15 jours)
Statistiques (µg/m ³)				
Minimum horaire	2	3	4	4
Percentile 25 (P25)	15	88	13	37
Médiane ou Percentile 50	94	128	41	48
Moyenne	86	119	38	47
Percentile 75 (P75)	142	157	54	59
Maximum horaire	257	257	208	117
% de données horaires valides	99	98	99	98

Tableau 1 – Statistiques des relevés horaires à la gare RER C de Musée d'Orsay, sur toute la période de mesure et uniquement les jours hors grève, période du 26/03 au 15/04/2018.

Le niveau moyen en particules PM₁₀ relevé en gare de Musée d'Orsay sur l'ensemble de la période de mesure est de 86 µg/m³. Ce niveau est inférieur d'environ 25 % à celui enregistré uniquement les jours hors grève (moyenne à 119 µg/m³). L'ensemble des paramètres statistiques sur toute la période de mesure sont inférieurs à ceux enregistrés les jours hors grève, excepté le maximum horaire, observé hors jour de grève (le 29/03/2018, 19h, heure de pointe du soir). Ceci s'explique par un nombre de trains et un nombre de voyageurs réduits dans la gare les jours de grève.

Les résultats pour les PM_{2.5} à la gare RER C de Musée d'Orsay présentent des caractéristiques comparables aux PM₁₀ :

- Le niveau moyen en PM_{2.5} relevé en gare de Musée d'Orsay sur toute la période de mesure (38 µg/m³) est inférieur à celui enregistré uniquement les jours hors grève (47 µg/m³).

- Les paramètres statistiques en PM_{2.5} observés sur l'ensemble de la période de mesure sont également inférieurs à ceux enregistrés les jours hors grève, excepté pour le maximum horaire, enregistré un jour de grève (le 14/04/2018 à 5h).

2.1.1. PARTICULES PM₁₀

La variabilité des concentrations en PM₁₀ à la gare RER C de Musée d'Orsay, sur l'ensemble de la période de mesure et lors des jours de grève, est présentée à la Figure 3.

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, qui sont les bordures inférieure et supérieure de la boîte rectangulaire. Ces extrémités se prolongent par des traits terminés par des cercles (minimum et maximum). Dans la boîte rectangulaire, le trait est la médiane, et la marque '+' la moyenne. Des détails sont fournis en ANNEXE 3.

La boîte à moustaches présentant les résultats des relevés horaires en particules PM₁₀ en gare RER C de Musée d'Orsay montre une répartition « équilibrée » des mesures³ pour les jours hors grève, avec 50% des données horaires comprises entre 88 et 157 µg/m³, pour une moyenne à 119 µg/m³ et une médiane à 128 µg/m³. Sur l'ensemble de la campagne, 50 % des données horaires en PM₁₀ relevées à la gare RER C de Musée d'Orsay sont comprises entre 15 et 142 µg/m³, pour une moyenne de 86 µg/m³ et une médiane à 94 µg/m³.

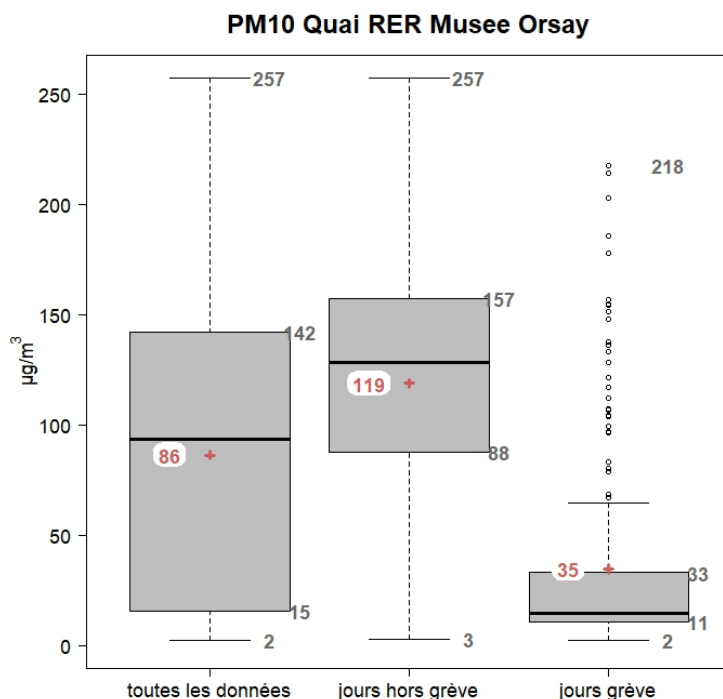


Figure 3 – Boîtes à moustaches des concentrations horaires en PM₁₀, en µg/m³ à la gare RER C de Musée d'Orsay, période du 26/03 au 15/04/2018, ensemble de la période, jours hors grève et jours de grève.

Les résultats des jours de grève sont largement inférieurs à ceux sur l'ensemble de la période (concentration moyenne de 35 µg/m³ contre 86 µg/m³). Cela s'explique par le nombre de trains en

³ 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. Cette répartition caractérise ainsi une distribution symétrique par rapport à la médiane.

circulation moindre les jours de grève. Le nombre de points extrêmes (au-delà de la moustache supérieure) est en revanche plus important les jours de grève.

2.1.2. PARTICULES PM_{2.5}

La boîte à moustaches des concentrations de PM_{2.5} relevées à la gare RER C de Musée d'Orsay est présentée Figure 4, sur l'ensemble de la période de mesure et lors des jours de grève.

La boîte à moustaches présentant les résultats des relevés horaires en particules PM_{2.5} en gare RER C de Musée d'Orsay montre une répartition « équilibrée » des mesures⁴ pour les jours hors grève, avec 50% des données horaires comprises entre 37 et 59 µg/m³, pour une moyenne à 47 µg/m³ et une médiane à 48 µg/m³. Sur l'ensemble de la campagne, 50 % des données horaires en PM_{2.5} relevées à la gare RER C de Musée d'Orsay sont comprises entre 13 et 54 µg/m³, pour une moyenne de 38 µg/m³ et une médiane à 41 µg/m³.

Comme pour les PM₁₀, les résultats des jours de grève sont inférieurs à ceux sur l'ensemble de la période (38 µg/m³ contre 47 µg/m³). Le même constat est fait pour les valeurs extrêmes. Cela s'explique par le nombre de trains en circulation moindre les jours de grève.

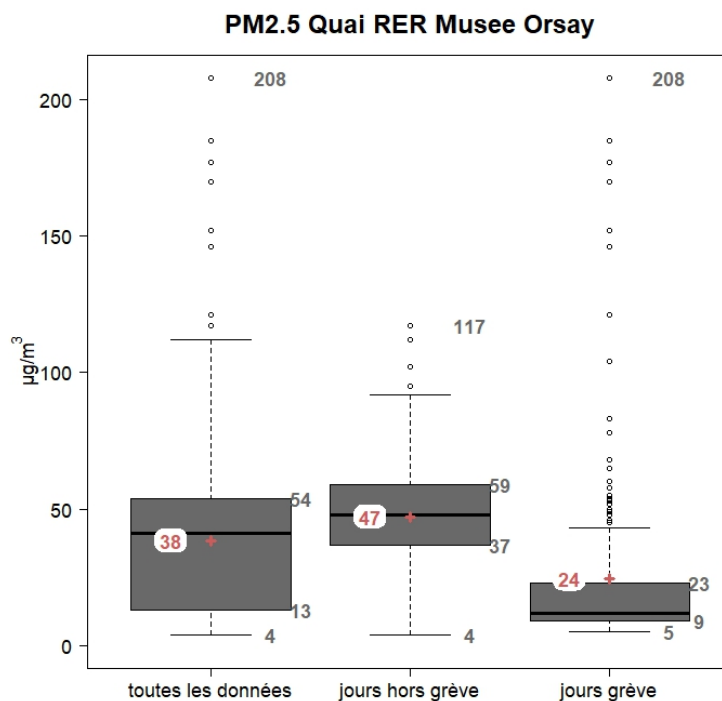


Figure 4 – Boîtes à moustaches des relevés horaires en PM_{2.5}, en µg/m³ à la gare RER C de Musée d'Orsay, période du 26/03 au 15/04/2018, sur l'ensemble de la période, jours hors grève et jours de grève.

⁴ 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. Cette répartition caractérise ainsi une distribution symétrique par rapport à la médiane.

La teneur moyenne relevée sur les quais de la gare RER C de Musée d'Orsay pendant la campagne de mesure est de $86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les particules PM_{10} et de $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les particules $\text{PM}_{2.5}$ sur l'ensemble de la période, elle est de $119 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10}) et $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\text{PM}_{2.5}$) sur la période hors grève.

Les niveaux moyens en particules (PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$), calculés sur l'ensemble de la période de mesure, sont inférieurs à la moyenne des particules les jours hors grève. Cela s'explique par un nombre de trains en circulation moindre les jours de grève.

2.2 VARIABILITE TEMPORELLE

2.2.1. VARIABILITE DES RELEVES HORAIRES PENDANT LA CAMPAGNE DE MESURE

2.2.1.1. PARTICULES PM_{10}

Les relevés horaires des concentrations en gare RER C de Musée d'Orsay sont présentés à la Figure 5. La comparaison avec les teneurs en gare de référence d'Avenue Foch sera présentée ultérieurement.

Les différences de niveaux observées à l'échelle horaire sont importantes entre la journée et la nuit. Cela s'explique par la fréquentation de la gare, aussi bien en termes de trains que de voyageurs : en journée, la circulation des trains et les déplacements des voyageurs engendrent des émissions de particules PM_{10} et la remise en suspension de ces particules, phénomènes non présents la nuit lorsque toute activité dans la gare est arrêtée. Ainsi, à Musée d'Orsay, les teneurs dépassent fréquemment $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en journée, alors que la nuit, les niveaux sont de l'ordre d'une quarantaine de $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La relation entre les niveaux observés et le nombre de trains en circulation est présenté au paragraphe 3.3 PARAMETRES TECHNIQUES, TRAFIC DE LA GARE.

Un impact des jours de grève (en hachuré vert) sur les concentrations est également observé de façon très claire. Selon le nombre de trains en circulation, les niveaux sont très faibles (3, 4, 7, 8, 9, 14, 15 avril) ou intermédiaires aux niveaux habituels (13/04/2018).

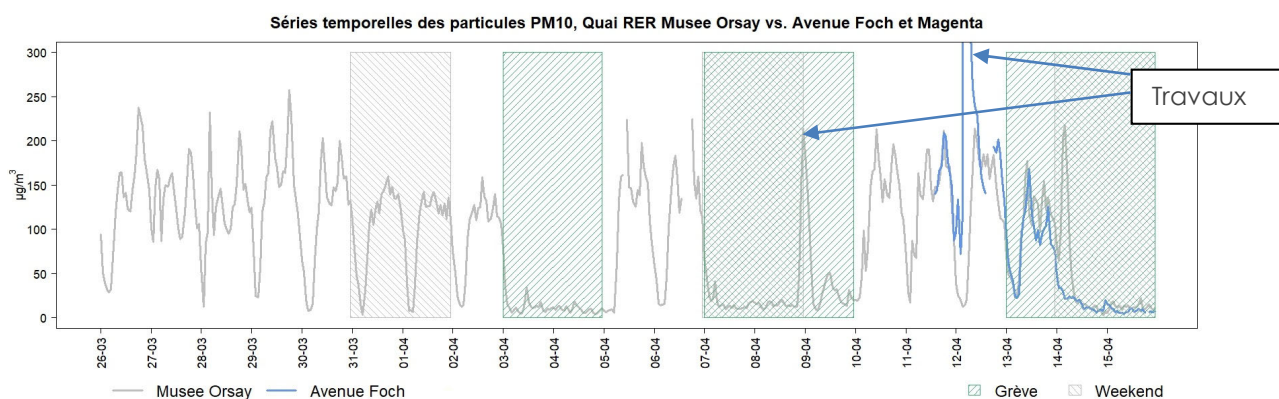


Figure 5 – Evolution des relevés horaires en PM_{10} , en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (gare RER C de Musée d'Orsay, période du 26/03 au 15/04/2018).

2.2.1.2. PARTICULES PM_{2.5}

Les relevés horaires, présentés en Figure 6 montrent, comme pour les PM₁₀, des fluctuations importantes entre la journée et la nuit. Cela s'explique par le nombre de trains en circulation : en journée, la circulation des trains et les déplacements des voyageurs engendrent des émissions de particules et la remise en suspension de ces particules, phénomènes non présents la nuit lorsque toute activité dans la gare est arrêtée (cf. paragraphe 3.3 PARAMETRES TECHNIQUES, TRAFIC DE LA GARE). Ainsi, en journée, les teneurs en PM_{2.5} avoisinent 50 µg/m³, alors que la nuit, les niveaux sont de l'ordre d'une trentaine de µg/m³.

L'impact des jours de grève (en hachuré vert) sur les concentrations est également clairement observé. Selon le nombre de trains en circulation, les niveaux sont très faibles (3, 4, 7, 8, 14,15 avril) ou plus proches des niveaux habituels (13/04/2018).

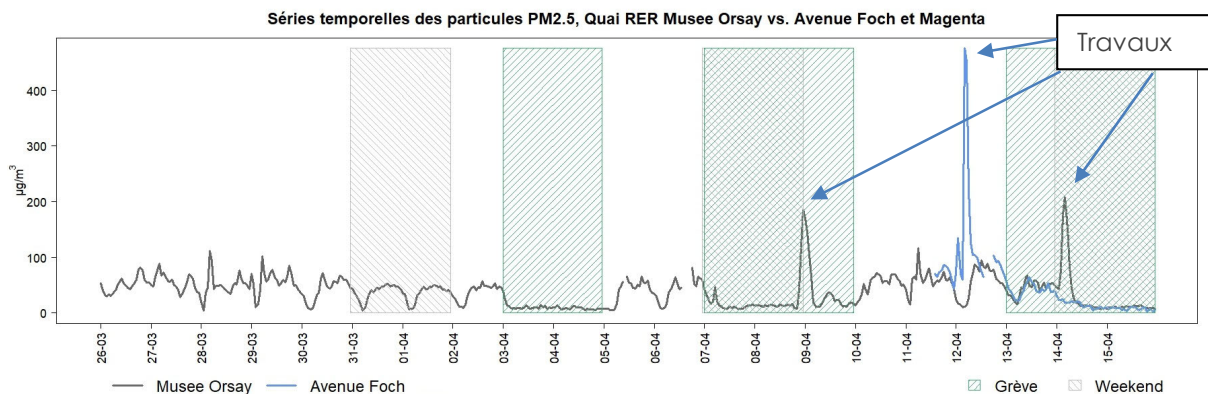


Figure 6 – Evolution des relevés horaires en PM_{2.5}, en µg/m³ (gare RER C de Musée d'Orsay, période du 26/03 au 15/04/2018).

2.2.2. VARIABILITE HEBDOMADAIRE

Les profils hebdomadaires à la gare de Musée d'Orsay sont présentés à la Figure 7 pour les PM₁₀ et les PM_{2.5}. Seuls les jours **hors grève** ont été considérés. Pour rappel, le lundi (2 avril) était férié (Lundi de Pâques) et considéré comme un dimanche pour le traitement des résultats.

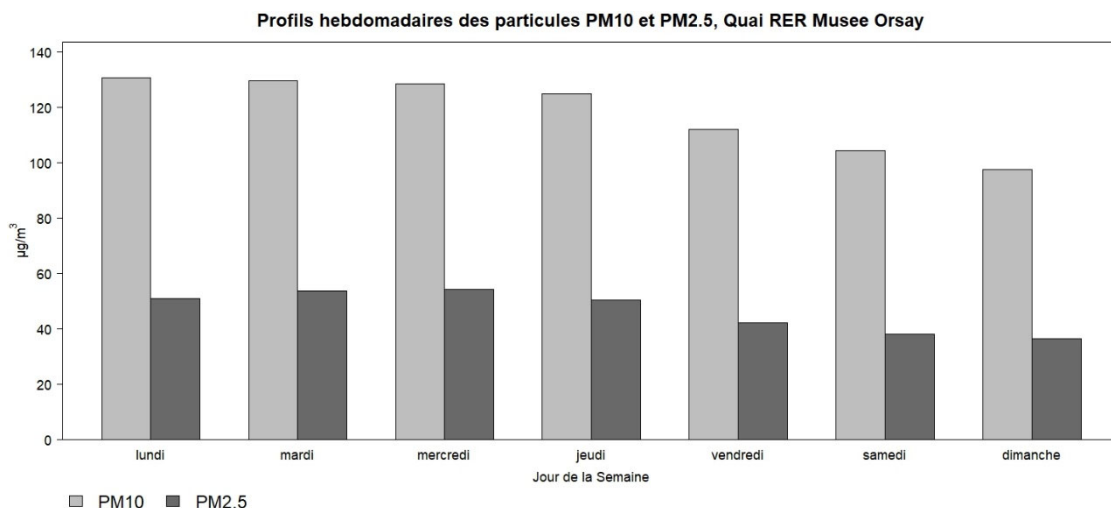


Figure 7 – Evolution des profils hebdomadaires moyens en PM₁₀ et PM_{2.5} à la gare RER C de Musée d'Orsay, période du 26/03 au 15/04/2018, hors jours de grève.

Les niveaux moyens en particules PM₁₀ avoisinent 125 µg/m³ sur une journée ouvrée et ceux en PM_{2.5} s'élèvent à 50 µg/m³. Ils diminuent les samedis et dimanches, de l'ordre de 20 % par rapport aux jours ouvrés pour les PM₁₀ et d'environ 25 % pour les PM_{2.5}.

La baisse des teneurs le week-end est en lien direct avec la baisse du nombre de trains en circulation et la fréquentation de la gare (cf. paragraphe 3.3 PARAMETRES TECHNIQUES, TRAFIC DE LA GARE).

2.2.3. VARIABILITE JOURNALIERE

Le profil journalier moyen, présenté à la Figure 8, montre les niveaux moyens observés chaque heure de la journée pour les jours ouvrés hors grève. Les particules PM₁₀ et les particules PM_{2.5} ont des profils journaliers très proches : les maxima horaires sont enregistrés pour les deux types de particules le matin (mesures de 10h-11h) et le soir (19h). Sur ces plages horaires, les niveaux sont en moyenne de 184 µg/m³ pour les PM₁₀ et 66 µg/m³ pour les PM_{2.5} en gare de Musée d'Orsay.

Ces profils journaliers en particules (PM₁₀ et PM_{2.5}) fluctuent en fonction de la circulation ferroviaire et de la fréquentation, les concentrations maximales étant enregistrées lorsque la circulation ferroviaire et la fréquentation sont également maximales (cf. paragraphe 3.3 PARAMETRES TECHNIQUES, TRAFIC DE LA GARE).

Le profil journalier en PM_{2.5} présente des variations horaires moindres (en valeur absolue) que celles des PM₁₀. Cette différence peut s'expliquer par le fait que les émissions liées à la circulation des trains concernent davantage la fraction la plus grossière des particules. Cela peut également s'expliquer en partie par un temps de déposition différent entre les particules (temps plus court pour les plus grosses particules).

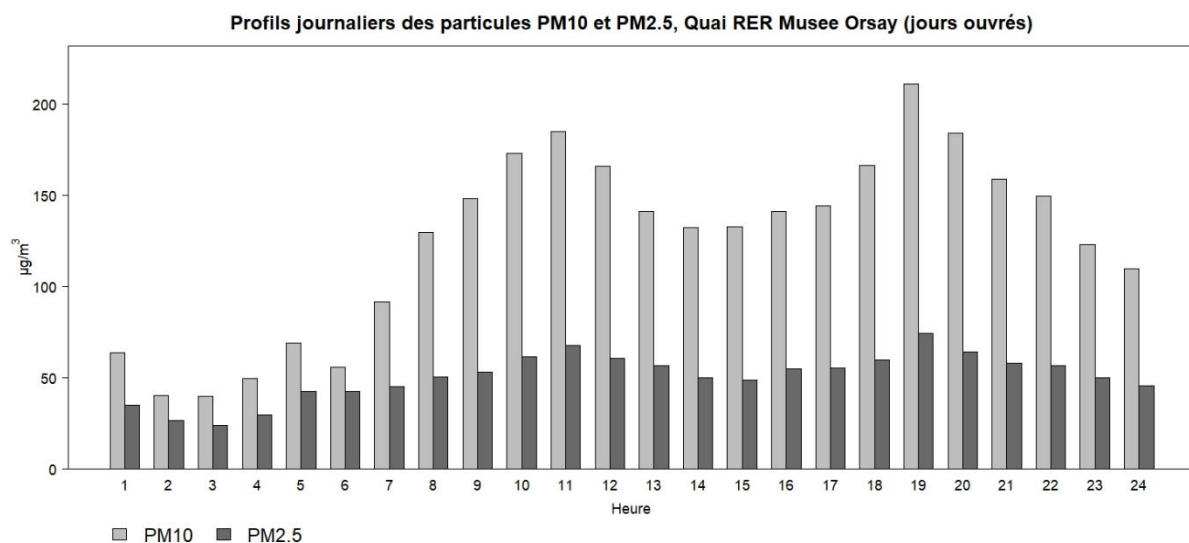


Figure 8 – Évolution des profils journaliers en PM₁₀ et PM_{2.5} à la gare RER C de Musée d'Orsay, période du 26/03 au 15/04/2018 – jours ouvrés hors jours de grève.

2.2.3.1. ZOOM SUR LES VARIATIONS HORAIRES SUR UNE SEMAINE

Le détail des variations horaires des concentrations en PM₁₀ et en PM_{2.5} en gare de Musée d'Orsay sur une semaine (moyenne sur les trois semaines de la campagne hors jours de grève) est présenté en Figure 9.

Les variations montrent d'une part les fluctuations les jours ouvrés (niveaux les plus faibles la nuit, puis hausse des teneurs en journée avec les maxima entre 9 et 12h et entre 19 et 20h) et d'autre part les niveaux plus faibles les samedis et dimanches (et jour férié).

Les niveaux moyens ont été stables les jours ouvrés.

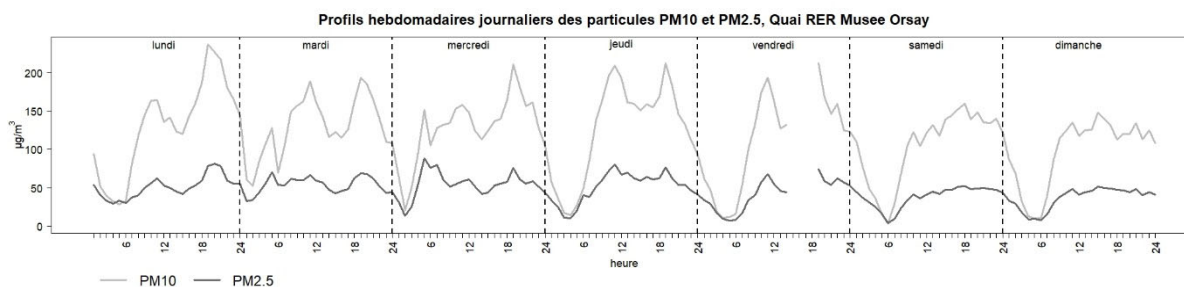


Figure 9 – Évolution des profils des concentrations horaires en PM₁₀ et PM_{2.5} à la gare RER C de Musée d'Orsay, période du 26/03 au 15/04/2018, hors jours de grève.

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

A l'échelle hebdomadaire, les profils montrent des teneurs plus faibles les samedis, dimanches et jours fériés, comparativement aux jours de semaine, ceci pour les PM₁₀ et les PM_{2.5} (baisse de 20 à 25 % des concentrations), en lien avec la baisse de trafic et de fréquentation le week-end.

Sur une journée ouvrée moyenne, les niveaux nocturnes (entre 1h et 5h) sont les plus faibles. Ils augmentent en journée. Les concentrations sont maximales lorsque la fréquentation de la gare est maximale, entre 10 et 11h le matin et à 19h le soir en gare de Musée d'Orsay. Sur ces plages horaires, les concentrations sur le quai atteignent 184 µg/m³ en moyenne pour les PM₁₀, et 66 µg/m³ pour les PM_{2.5}.

2.3 COMPARAISON DES NIVEAUX MOYENS OBSERVES SUR LE QUAI AVEC CEUX DE LA STATION DE REFERENCE AVENUE FOCH

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 de Musée d'Orsay et à la station de référence Avenue Foch, sur l'ensemble de la **période de comparaison (12-27/04/2018)**.

Les huit jours de grève ayant eu lieu pendant la période de comparaison (13, 18, 19, 23 et 24 avril et les 14, 15 et 22 avril pendant les week-ends) ont eu pour conséquence une diminution du nombre de trains ces journées-là, non représentative d'une situation classique. Toutefois, les deux gares, situées toutes les deux sur la ligne C du RER, ont été impactées de façon similaire par la grève.

Les statistiques présentées ci-dessous concernent l'ensemble de la période de comparaison (12-27/04/2018), jours de grève compris.

Statistiques ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM ₁₀ (particules fines)		PM _{2.5} (particules très fines)	
	Gare Musée d'Orsay	Avenue Foch	Gare Musée d'Orsay	Avenue Foch
Minimum horaire	2	4	6	2
Percentile 25 (P25)	29	24	21	18
Médiane ou Percentile 50	112	91	46	41
Moyenne	104	102	46	46
Percentile 75 (P75)	169	156	65	67
Maximum horaire	270	1318	208	476
% de données horaires valides	90	98	90	98

Tableau 2 – Statistiques des relevés horaires à la gare RER C de Musée d'Orsay et à la station de référence Avenue Foch, période du 12 au 27/04/2018.

Le niveau moyen en particules PM₁₀ relevé en gare de Musée d'Orsay sur l'ensemble de la période de comparaison est de 104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui est similaire à celui de la gare de référence Avenue Foch (102 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur la même période). Les autres éléments statistiques en PM₁₀ sont du même ordre de grandeur sur les deux gares, excepté le maximum horaire : sur la période considérée, il est de 1318 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Avenue Foch (enregistré le 12/04 à 5h, correspondant à des travaux nocturnes), contre 270 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ observé en gare de Musée d'Orsay.

Les résultats pour les PM_{2.5} à la gare RER C de Musée d'Orsay présentent des éléments comparables aux PM₁₀ :

- Le niveau moyen en PM_{2.5} relevé en gare de Musée d'Orsay est équivalent à celui de la gare de référence Avenue Foch, avec 46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Les paramètres statistiques en PM_{2.5} sont du même ordre de grandeur sur les deux gares, excepté pour le maximum horaire. Sur la période de comparaison, il s'élève à 208 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en gare de Musée d'Orsay, contre 476 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station de référence Avenue Foch. Ce maximum, simultané à celui de PM₁₀, est à associer à des travaux nocturnes.

2.3.1. PARTICULES PM₁₀

La variabilité des concentrations en PM₁₀ à la gare RER C de Musée d'Orsay, ainsi qu'à la station de référence Avenue Foch, est présentée à la Figure 10.

Les boîtes à moustaches montrent une répartition « équilibrée » des mesures⁵ en gare de Musée d'Orsay et d'Avenue Foch. Sur la période de comparaison (12-27/04/2018), 50 % des données horaires relevées à la gare RER C de Musée d'Orsay sont comprises entre 29 et 169 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui est comparable aux résultats de la gare d'Avenue Foch (50% des données comprises entre 24 et 156 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

⁵ 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. Cette répartition caractérise ainsi une distribution symétrique par rapport à la médiane.

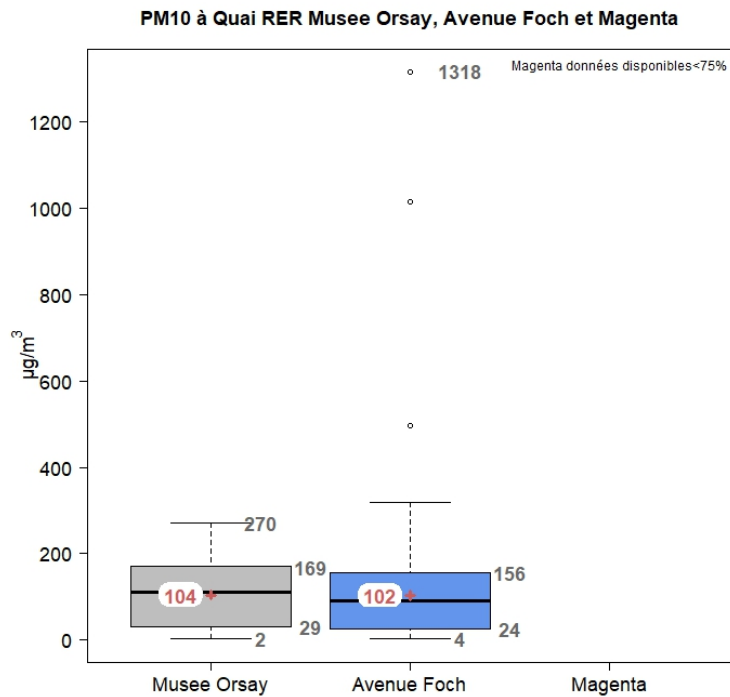


Figure 10 – Boîtes à moustaches des concentrations horaires en PM₁₀, en µg/m³ à la gare RER C de Musée d'Orsay et à la station de référence Avenue Foch, [période de comparaison du 12 au 27/04/2018](#).

Ces résultats proches s'expliquent par une configuration similaire des deux gares (gares souterraines, de configuration simple, sur la même ligne de RER), malgré certains paramètres qui diffèrent, comme le nombre de trains en circulation ou encore le nombre de voyageurs dans chacune des deux gares : la gare de Musée d'Orsay est beaucoup plus fréquentée que la station de référence d'Avenue Foch (5 fois plus de voyageurs – 9 800 voyageurs par jour montant en gare de Musée d'Orsay, contre 1 823 à Avenue Foch ; 3 fois plus de trains - 500 trains par jour JOB (Jour Ouvré de Base) en gare de Musée d'Orsay, contre 170 à Avenue Foch). Cette différence de paramètres provient de la situation des gares sur la ligne C : la gare de Musée d'Orsay est sur le tronçon commun de la ligne C, alors que la gare Avenue Foch est sur une des branches (branche nord ouest).

2.3.2. PARTICULES PM_{2.5}

La boîte à moustaches des concentrations de PM_{2.5} relevées à la gare RER C de Musée d'Orsay est présentée à la Figure 11, ainsi que celle de l'Avenue Foch.

Comme pour les PM₁₀, les boîtes à moustaches montrent une dispersion des données proche entre les deux gares : 50 % des données horaires sont comprises entre 21 et 65 µg/m³ à Musée d'Orsay, contre une fourchette de 18 à 67 µg/m³ à Avenue Foch.

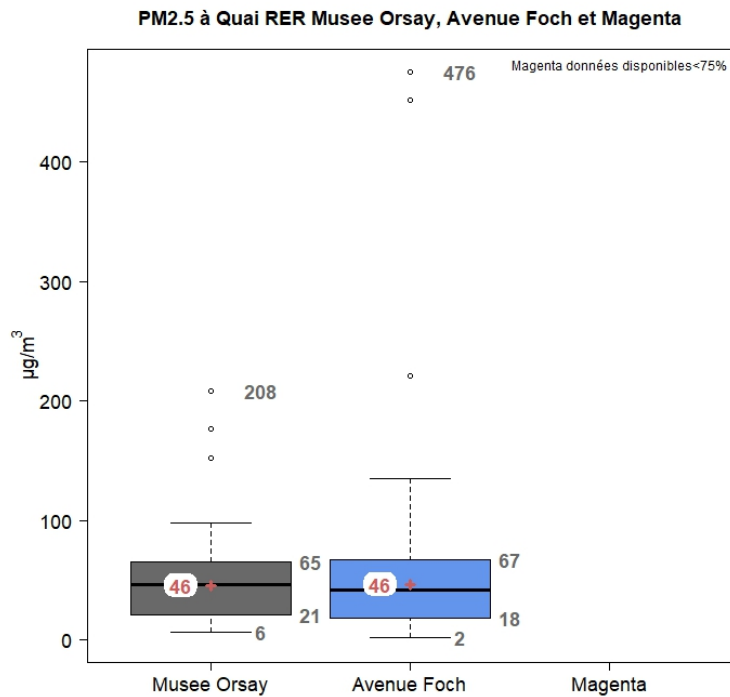


Figure 11 – Boîtes à moustaches des relevés horaires en PM_{2.5}, en µg/m³ à la gare RER C de Musée d'Orsay et à la station de référence Avenue Foch, [période de comparaison du 12 au 27/04/2018](#).

2.3.3. VARIABILITE TEMPORELLE

2.3.3.1. VARIABILITE DES RELEVES HORAIREs PENDANT LA CAMPAGNE DE MESURE

Cas des particules PM₁₀

Les relevés horaires en particules PM₁₀ des gares de Musée d'Orsay et d'Avenue Foch sont présentés à la Figure 12.

La comparaison de l'évolution temporelle des teneurs en PM₁₀ à la gare RER C de Musée d'Orsay avec celle des relevés à la gare RER C d'Avenue Foch montre des profils temporels proches, aussi bien en termes d'évolution que de niveaux, exceptés :

- pendant la nuit du 12/04/2018, des travaux ayant impacté les relevés en gare d'Avenue Foch.
- pendant les nuits des 14 et 22/04/2018, des travaux ayant impacté les relevés en gare de Musée d'Orsay.
- Le 21 avril : Il est probable qu'aucun train ne circulait en gare d'Avenue Foch à cette date, contrairement à Musée d'Orsay. Les teneurs observées en gare de Musée d'Orsay sont largement supérieures à celles enregistrées à Avenue Foch, et conformes à des niveaux potentiellement observables un week-end.

Ainsi, en dehors de ces dates, les variations temporelles sont proches entre les gares d'Avenue Foch et de Musée d'Orsay.

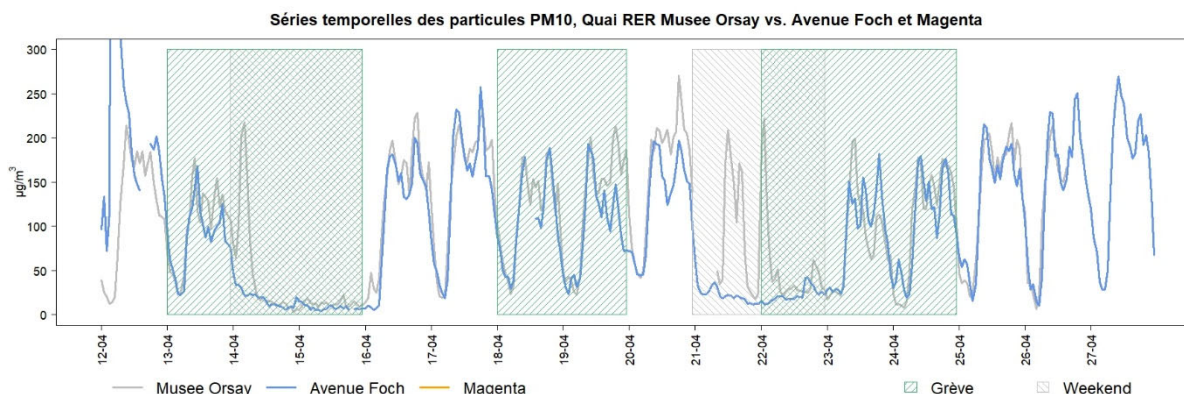


Figure 12 – Evolution des relevés horaires en PM₁₀, en µg/m³ (gare RER C de Musée d'Orsay et gare de référence Avenue Foch), [période de comparaison du 12 au 27/04/2018](#).

Cas des particules PM_{2.5}

Les relevés horaires en particules PM_{2.5} des gares de Musée d'Orsay et d'Avenue Foch sont présentés à la Figure 12.

La comparaison de l'évolution temporelle des teneurs en PM_{2.5} à la gare RER C de Musée d'Orsay avec celle des relevés à la gare RER C d'Avenue Foch montre des profils temporels proches, aussi bien en termes d'évolution que de niveaux, exceptés :

- pendant la nuit du 12/04/2018, des travaux ayant impacté les relevés en gare d'Avenue Foch.
- pendant la nuit du 14/04/2018, des travaux ayant impacté les relevés en gare de Musée d'Orsay.

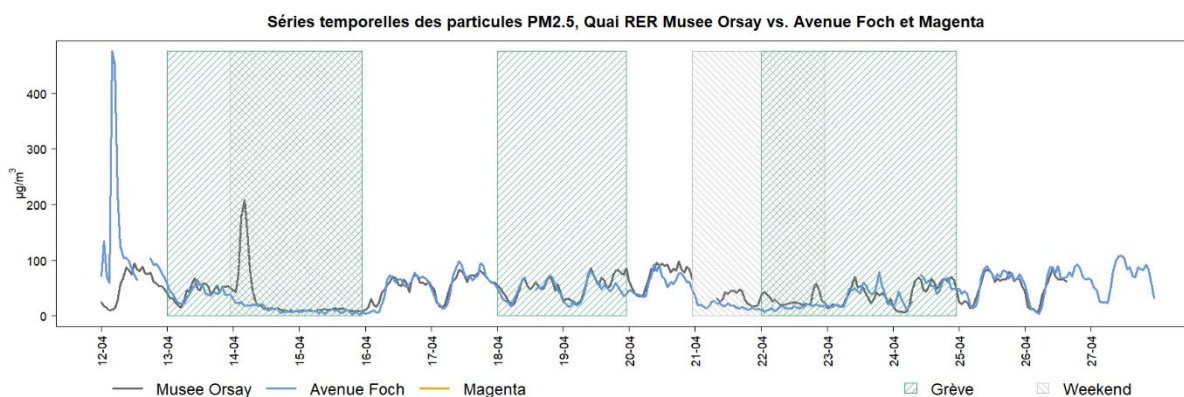
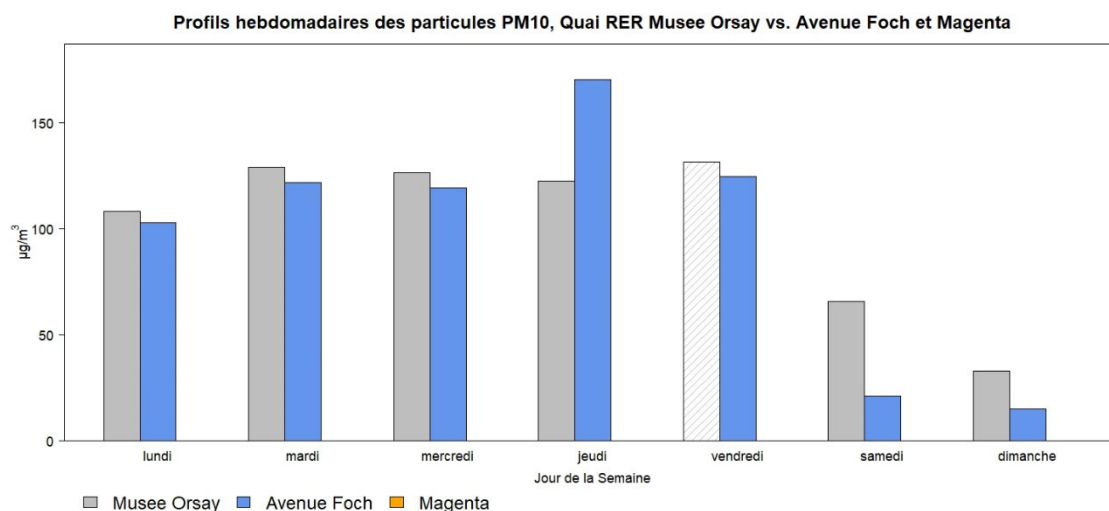


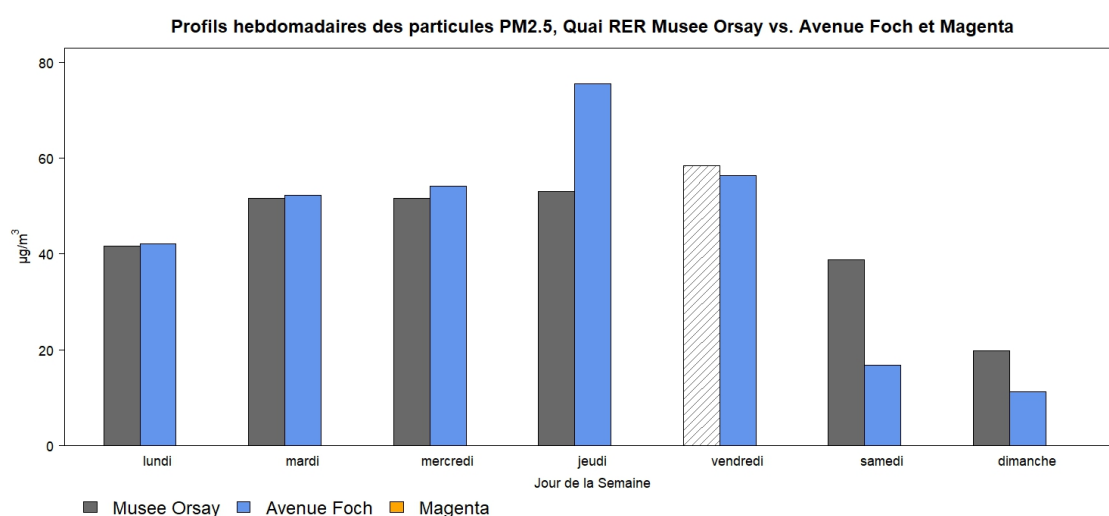
Figure 13 – Evolution des relevés horaires en PM_{2.5}, en µg/m³ (gare RER C de Musée d'Orsay et gare de référence Avenue Foch), [période de comparaison du 12 au 27/04/2018](#).

2.3.3.2. VARIABILITE HEBDOMADAIRE

Les profils hebdomadaires à la gare de Musée d'Orsay sont présentés à la Figure 14 pour les PM₁₀ (a) et les PM_{2.5} (b). Les graphiques comparent les résultats moyennés par jour à la gare de Musée d'Orsay à ceux de la station de référence Avenue Foch. Toutes les données ont été prises en compte (pas uniquement hors jours de grève). A noter toutefois que les deux mesures de week-ends ont été impactées par les grèves, les niveaux moyens les samedis et dimanches sont par conséquent non représentatifs mais fournis à titre indicatif.



(a)



(b)

Figure 14 – Évolution des profils hebdomadaires en PM₁₀ (a) et PM_{2.5} (b) à la gare RER C de Musée d'Orsay, période de comparaison du 12 au 27/04/2018 (jours de grève inclus), et comparaison avec les résultats de l'Avenue Foch. En hachuré, données disponibles < 75%.

Les niveaux moyens en particules PM₁₀ avoisinent 125 µg/m³ sur une journée ouvrée en gare de Musée d'Orsay et ceux en PM_{2.5} s'élèvent à 51 µg/m³. En gare d'Avenue Foch, les résultats sont proches (écart inférieur de 10%), les niveaux moyens du jeudi ayant toutefois été impactés par les travaux nocturnes du 12/04/2018 : ils avoisinent 127 µg/m³ sur une journée ouvrée pour les particules PM₁₀ et ils s'élèvent à 56 µg/m³ pour les PM_{2.5}.

Les moyennes sur les jours ouvrés hors jour de grève sont supérieures d'environ 13 % aux moyennes des jours de grève (quel que soit la taille des particules et le site de mesure).

2.3.3.3. VARIABILITE JOURNALIERE

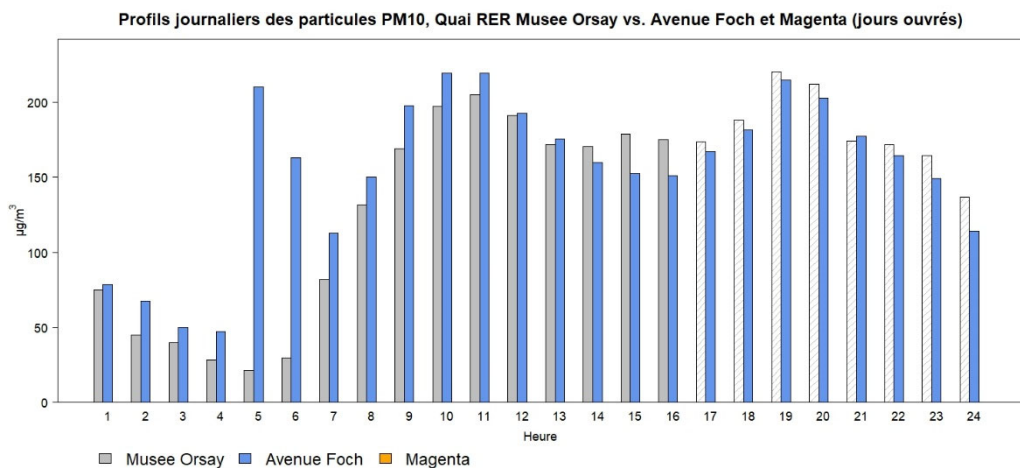
La Figure 15 montre les niveaux moyens observés chaque heure de la journée pour les jours ouvrés hors grève, en gares de Musée d'Orsay et d'Avenue Foch.

Les profils journaliers en particules PM₁₀ et PM_{2.5} sont très proches dans les deux gares, exception faite des niveaux nocturnes en gare d'Avenue Foch, impactés par les travaux nocturnes du 12/04/2018 (5 et 6h).

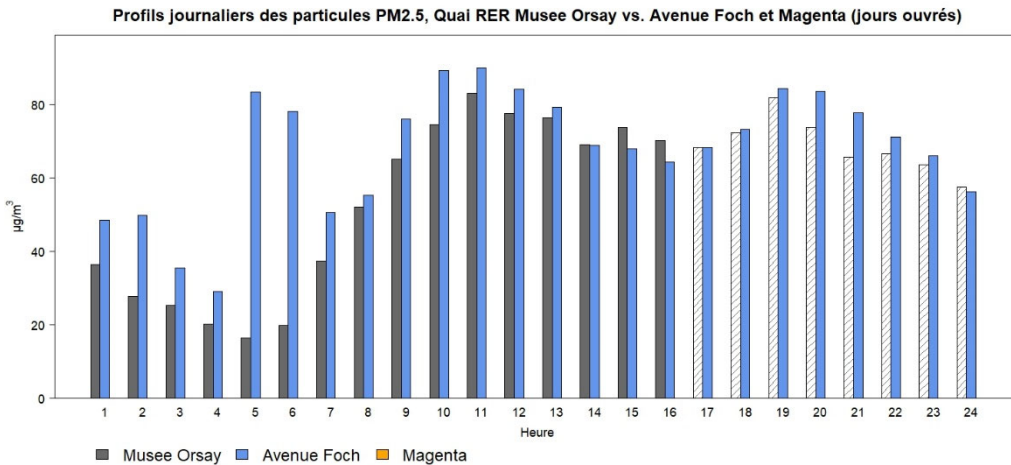
Les maxima horaires en PM₁₀ sont enregistrés sur les deux gares le matin (10h-11h) et le soir (19h - 20h), soit aux mêmes heures sur les deux gares, situées toutes les deux dans Paris. Sur ces plages horaires, les niveaux pour les PM₁₀ sont en moyenne de 209 µg/m³ en gare de Musée d'Orsay et 215 µg/m³ en gare d'Avenue Foch.

Concernant les particules PM_{2.5}, les concentrations ont tendance à rester plus longtemps élevées lors de la pointe du matin en gare de Musée d'Orsay, à savoir entre 10h et 12h, celle du soir ayant lieu en même temps que pour les PM₁₀. Sur ces plages horaires (10-11h et 19-20h), les niveaux en PM_{2.5} sont en moyenne de 78 µg/m³ en gare de Musée d'Orsay et 86 µg/m³ en gare d'Avenue Foch.

Ainsi les niveaux aux heures de pointe en gare de Musée d'Orsay sont légèrement plus faibles qu'en gare d'Avenue Foch, malgré une moindre fréquentation à la gare de référence.



(a)



(b)

Figure 15 – Évolution des profils journaliers en PM₁₀ (a) et PM_{2.5} (b) à la gare RER C de Musée d'Orsay, période de comparaison du 12 au 27/04/2018 – jours ouvrés hors grève, et comparaison avec les résultats de la station de référence Avenue Foch. En hachuré, données disponibles < 75%.

Sur la période de comparaison (12-27/04/2018), **les niveaux moyens en particules PM₁₀ en gare de Musée d'Orsay sont comparables à ceux de la station de référence Avenue Foch** (respectivement 104 et 102 µg/m³). **Les niveaux moyens en particules PM_{2.5} en gare de Musée d'Orsay sont équivalents à ceux de la station de référence Avenue Foch** (46 µg/m³).

Pour les PM₁₀ comme les PM_{2.5}, les maxima horaires ont été enregistrés à Avenue Foch lors de travaux nocturnes en début de mesures (le 12/04/2018).

A l'échelle hebdomadaire, sur toute la période de comparaison, les profils montrent des teneurs moyennes relativement stables en semaine et du même ordre de grandeur sur les deux gares (125 µg/m³ en PM₁₀ en gare de Musée d'Orsay et 127 µg/m³ à Avenue Foch, respectivement 51 et 56 µg/m³ pour les PM_{2.5}).

Sur une journée ouvrée moyenne (hors jour de grève), les concentrations sont maximales sur des plages horaires similaires entre les gares de Musée d'Orsay et d'Avenue Foch, à savoir entre 10 et 11h le matin et entre 19h et 20h. Lors de ces plages horaires, les concentrations en particules sur le quai sont proches entre les deux gares, atteignant 209 µg/m³ PM₁₀ en gare de Musée d'Orsay et 215 µg/m³ en gare d'Avenue Foch, malgré une moindre fréquentation en gare d'Avenue Foch.

Les observations sont identiques pour les PM_{2.5} : sur les mêmes plages horaires, les niveaux sont en moyenne de 78 µg/m³ en gare de Musée d'Orsay et 86 µg/m³ en gare d'Avenue Foch.

2.4 TENEURS DE METAUX DANS LES PARTICULES

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

Les concentrations des métaux d'intérêt ont été étudiées dans les particules PM₁₀ en gare de Musée d'Orsay chaque jour ouvré pendant une semaine (du 16 au 20 avril). A noter qu'une grève a eu lieu les 18 et 19 avril. Cependant, des trains ont circulé et les gares ont été fréquentées (cf. profils horaires des Figure 12 et Figure 13). Les prélèvements journaliers ont été réalisés sur la période d'ouverture de la gare au public, à savoir de 5h à 1h. Des mesures à la station Avenue Foch ont été réalisées en parallèle, selon le même protocole.

Les onze métaux suivants ont été étudiés : Aluminium, Fer, Cuivre, Plomb, Zinc, Antimoine, Manganèse, Nickel, Arsenic, Cadmium et Chrome. Ces métaux ont été choisis conformément à la littérature⁶. Les données d'Aluminium en gare de Musée d'Orsay ne sont pas disponibles sur la période de mesure suite à un problème technique.

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

2.4.1. PART DES METAUX DANS LES PARTICULES PM₁₀

Le graphique suivant (Figure 16) montre la part de métaux enregistrée dans les particules PM₁₀, pour chaque journée de mesure, en gares de Musée d'Orsay et Avenue Foch.

En gare de Musée d'Orsay, la concentration en métaux a varié, pendant la semaine de prélèvement, de 57 µg/m³ (le 18/04/18) à 79 µg/m³ (le 17/04/18). En comparaison avec la concentration en particules PM₁₀ enregistrée chaque jour, la part des métaux varie de 39 à 47%. En moyenne sur la semaine, la part des métaux dans les particules PM₁₀ est de 44 % en gare de Musée d'Orsay. Cette proportion est comparable à certaines gares précédemment instrumentées.

Les teneurs les moins élevées ont été enregistrées les 18 et 19/04, jours de grève (même si ces journées là, des trains ont circulé et les gares ont été fréquentées).

Sur la même période, à la station Avenue Foch, la concentration en métaux était comparable à celle de la gare de Musée d'Orsay, variant entre 54 µg/m³ (le 19/04/18) à 86 µg/m³ (le 17/04/18). La part de métaux a varié de 41 à 55 % sur toute la semaine. En moyenne sur la semaine, la part des métaux dans les particules PM₁₀ est de 50 % en gare Avenue Foch.

La part des métaux dans les particules est donc un peu plus faible en gare de Musée d'Orsay qu'en gare d'Avenue Foch.

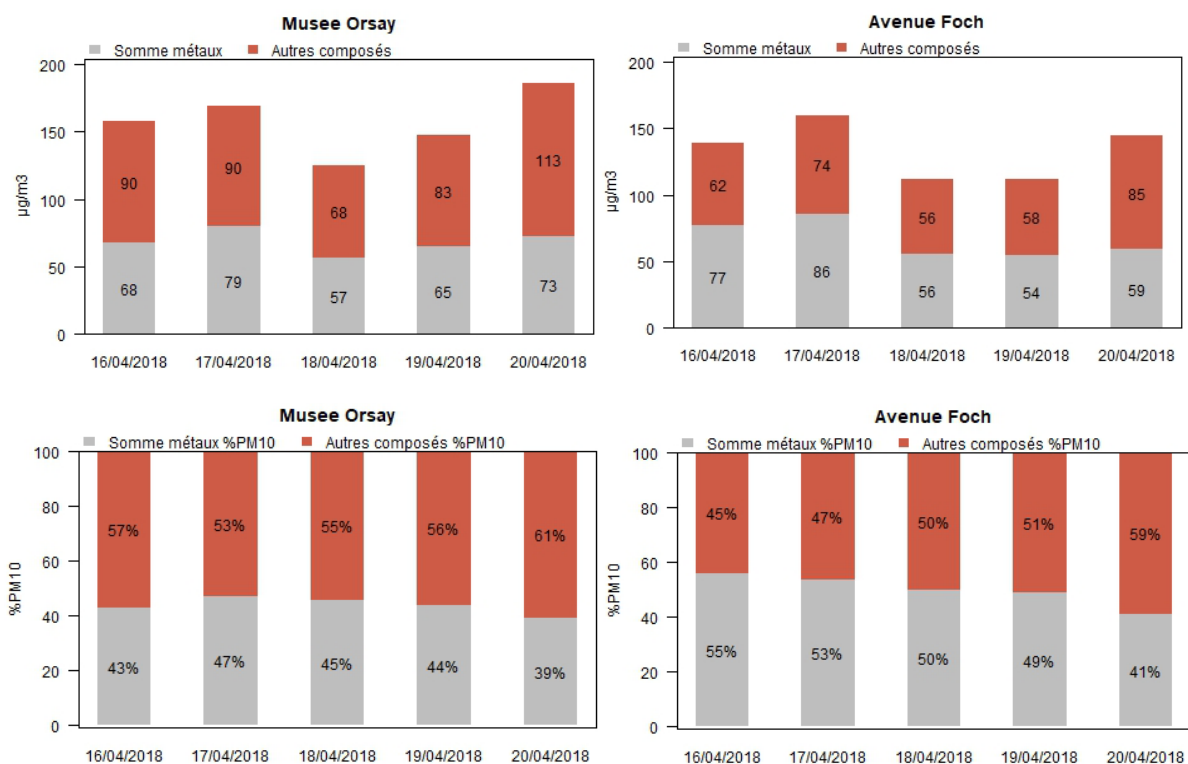


Figure 16 – Part des métaux dans les particules PM₁₀ et évolution des relevés journaliers sur la semaine de prélèvement (en concentration et en % de particules PM₁₀), à la gare RER C de Musée d'Orsay et à Avenue Foch (RER C), période du 16 au 20/04/2018.

2.4.2. REPARTITION DES METAUX

La Figure 17 représente la répartition moyenne des composés métalliques mesurés entre le 16 et le 20/04/2018, aussi bien en gare de Musée d'Orsay qu'à Avenue Foch. Les détails par jour sont présentés en ANNEXE 4.

Les graphiques journaliers montrent une répartition en métaux stable sur les différentes journées de mesure à chaque gare, et une répartition moyenne proche entre les gares de Musée d'Orsay et de l'Avenue Foch. Les teneurs en Aluminium étant uniquement disponibles en gare d'Avenue Foch, les données de ce composé n'ont volontairement pas été prises en considération dans la comparaison. Les teneurs en Aluminium représentent 1.8 % des métaux en gare d'Avenue Foch (moyenne de la campagne).

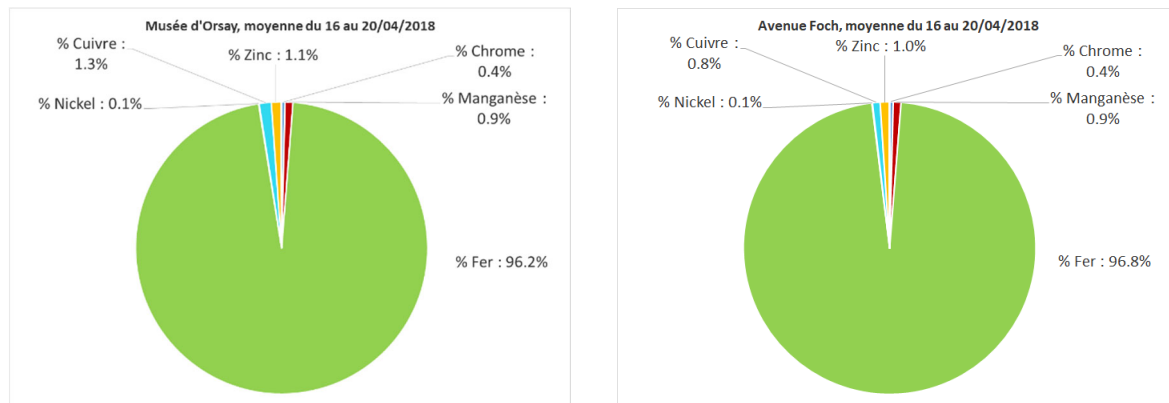


Figure 17 – Part de chaque métal dans les relevés en particules, en moyenne sur les mesures du 16 au 20/04/2018, en gare de Musée d'Orsay et à la station Avenue Foch.

La contribution moyenne de chaque métal est proche à Musée d'Orsay et Avenue Foch, excepté pour le **Cuivre** (1.3 % à Musée d'Orsay et 0.8 % à Avenue Foch).

Parmi les dix métaux étudiés, le **Fer** est l'élément majoritaire dans les deux gares : il représente 96 % des métaux mesurés à Musée d'Orsay et 97 % à Avenue Foch. Ce résultat est similaire aux précédentes campagnes.

En dehors du Fer, les trois métaux dont les concentrations sont les plus élevées sont le Zinc, le Manganèse et le Cuivre, mais dans des proportions beaucoup moins importantes que le Fer : 1.1 % pour le **Zinc** en gare de Musée d'Orsay (1 % à Avenue Foch), 1.3 % pour le **Cuivre** (0.8 % à Avenue Foch) et 0.9 % pour le **Manganèse** (proportion équivalente sur les deux sites).

Le **Chrome** représente 0.4% des métaux mesurés (proportion équivalente sur les deux sites).

Les proportions en **Arsenic, Cadmium, Antimoine, Nickel et Plomb** sont négligeables par rapport aux métaux précédemment évoqués, que ce soit à Musée d'Orsay ou à Avenue Foch.

La Figure 18 présente la part de chaque métal (Chrome, Manganèse, Cuivre, Zinc) par rapport à la somme totale en métaux, en gare de Musée d'Orsay et d'Avenue Foch, pour les cinq jours de mesure. La Figure 19 présente les résultats pour le Nickel, l'Arsenic, le Plomb, l'Antimoine et le Cadmium.

En ce qui concerne la part de l'Aluminium, disponible uniquement en gare d'Avenue Foch, elle fluctue entre 1.5 et 2% des métaux.

Hormis les différences précédemment évoquées, il existe un écart dans la part du plomb entre les deux gares.

La part relative du Manganèse, du Cuivre et du Zinc dans les métaux a très peu varié à Musée d'Orsay sur les cinq jours de mesure, comme en gare d'Avenue Foch.

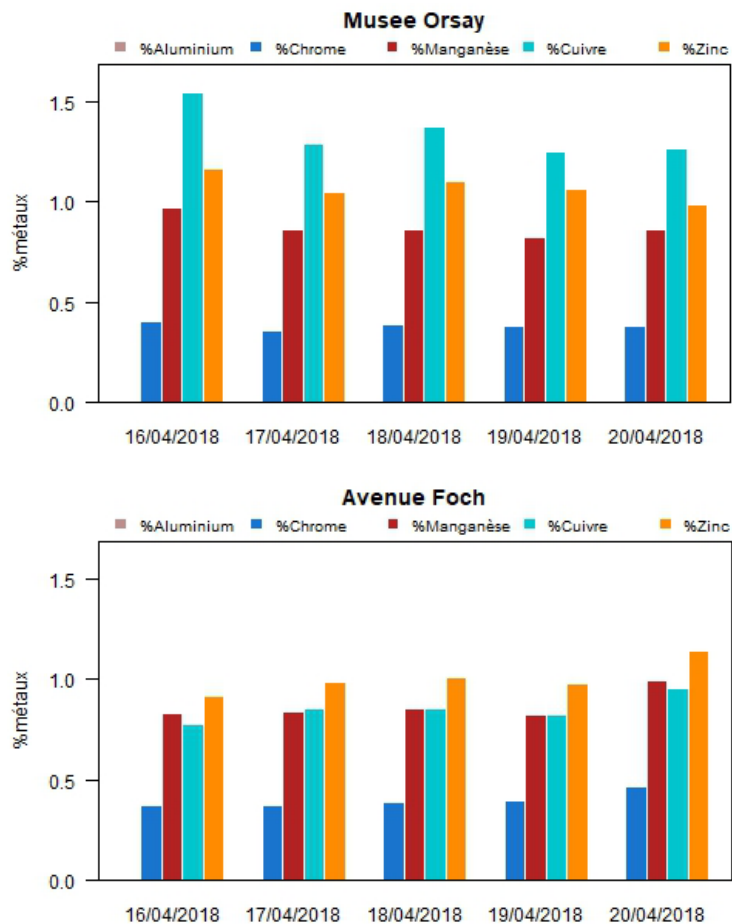


Figure 18 – Part journalière de l'Aluminium, Cuivre, Zinc, Manganèse et Chrome par rapport à la somme des métaux, à la gare RER C de Musée d'Orsay et à Avenue Foch (RER C), période du 16/04 au 20/04/2018.

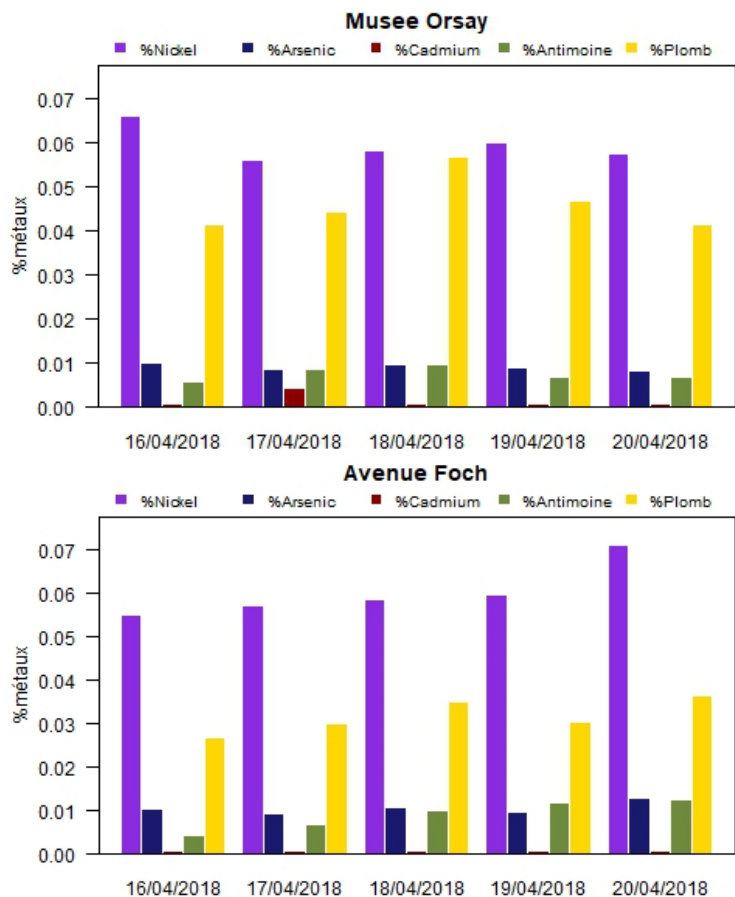


Figure 19 – Part journalière de Nickel, Arsenic, Plomb, Antimoine et Cadmium par rapport à la somme des métaux, à la gare RER C de Musée d'Orsay et à Avenue Foch (RER C), période du 16/04 au 20/04/2018.

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

- Les émissions lors du freinage. La plupart de ces composés (Manganèse, Fer, Aluminium, Silicium, 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 souterraines ferroviaires est l'usure des rails par friction (lors du freinage, mais également lors de la circulation des trains). Le Fer peut également être présent dans les semelles de frein.

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

Les concentrations des métaux présents 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, suivi du Cuivre, du Zinc, de l'Antimoine et du Manganèse.

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

2.4.3. NIVEAUX OBSERVES ET VARIATIONS TEMPORELLES

Le graphique suivant (Figure 20) présente les concentrations observées pour le Fer pendant la semaine de mesure, en gare de Musée d'Orsay et à la station de référence Avenue Foch.

Les teneurs en **Fer** sont légèrement plus élevées à Avenue Foch qu'en gare de Musée d'Orsay, en lien direct avec les particules PM_{10} : les moyennes journalières ont varié entre $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (18/04/2018) et $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (17/04/2018) en gare de Musée d'Orsay et entre 51 et $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Avenue Foch. A noter que la grève a concerné les 18 et 19 avril, dates pour lesquelles les concentrations de la semaine étaient les moins élevées (respectivement 125 (18/04) et $149 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (19/04), contre $171 \mu\text{g}/\text{m}^3$ le reste de la semaine en gare de Musée d'Orsay ; des résultats comparables sont enregistrés en gare d'Avenue Foch).

Le lien entre les niveaux de particules et de métaux est visible sur les graphiques : les teneurs en particules et en Fer évoluent de la même façon lors de la semaine de mesure.

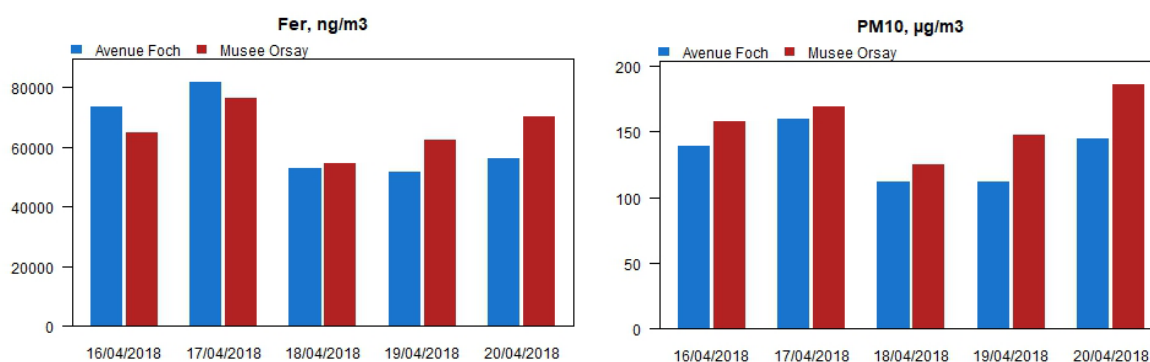


Figure 20 – Relevés journaliers en Fer et en PM_{10} à la gare RER C de Musée d'Orsay et à la station de référence Avenue Foch (RER C), période du 16 au 20/04/2018.

Cinq métaux présentent des teneurs de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de ng/m³. Il s'agit de l'**Aluminium**, du **Chrome**, du **Manganèse**, du **Cuivre** et du **Zinc**. Les relevés journaliers pour chacun de ces composés sont présentés en ANNEXE 5. Ils suivent globalement les relevés en particules PM10, sauf pour l'Antimoine et le Plomb en gare de Musée d'Orsay.

Les concentrations journalières d'**Aluminium**, uniquement disponibles à Avenue Foch, ont varié de 968 à 1542 ng/m³.

Concernant le **Cuivre**, les concentrations journalières ont varié entre 777 et 1042 ng/m³ à Musée d'Orsay, ces teneurs étant supérieures aux relevés de l'Avenue Foch (niveaux journaliers entre 438 et 702 ng/m³).

Les concentrations journalières en **Zinc** ont varié de 621 à 825 ng/m³ en gare de Musée d'Orsay, teneurs comparables à celles d'Avenue Foch (521 à 823 ng/m³ sur la même période).

Les teneurs journalières en **Manganèse** ont varié entre 486 à 679 ng/m³ à Musée d'Orsay, niveaux comparables à ceux d'Avenue Foch (niveaux entre 438 et 702 ng/m³).

Enfin, les concentrations journalières en **Chrome** étaient comprises entre 217 et 281 ng/m³ en gare de Musée d'Orsay, soit des teneurs journalières comparables à celles enregistrées à Avenue Foch (niveaux entre 208 et 310 ng/m³).

Pour les cinq autres métaux, en gare de Musée d'Orsay, les niveaux journaliers ont varié comme suit :

- Entre 33 et 45 ng/m³ pour le Nickel,
- Entre 28 et 31 ng/m³ pour le Plomb,
- Entre 5 et 7 ng/m³ pour l'Arsenic,
- Entre 4 et 6 ng/m³ pour l'Antimoine,
- Pour le Cadmium, les relevés journaliers sont tous inférieurs à 0,27 ng/m³ (valeur minimale de quantification), sauf le 17/04/2018, qui a présenté une concentration égale à 3 ng/m³.

La part des métaux dans les relevés journaliers en particules PM₁₀ en gare de Musée d'Orsay varie de 39 à 47% sur la semaine de mesure. A Avenue Foch, la part des métaux dans les particules PM₁₀ est supérieure, variant de 41 à 55%.

Le **Fer** est l'élément majoritaire : il représente 96 % des métaux mesurés à Musée d'Orsay (97% à Avenue Foch). Suivent ensuite le **Cuivre** (1.3 %), le **Zinc** (1.1 % à Musée d'Orsay), le **Manganèse** (0.9%), suivi du **Chrome** (0.4%). Les proportions en Arsenic, Nickel, Cadmium, Antimoine et Plomb sont négligeables par rapport aux métaux précédemment évoqués. Les données d'Aluminium sont indisponibles en gare de Musée d'Orsay.

Les parts respectives des métaux sont similaires entre les deux gares, sauf pour le Cuivre (0,3 contre 0,8 %).

Les teneurs étaient globalement moins élevées lors des journées de grève (18 et 19 avril).

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

La part relative des PM_{2.5} et des PM₁₀ peut servir à identifier des sources de particules différentes.

2.5.1. NIVEAUX MOYENS

Le ratio entre particules très fines (PM_{2.5}) et particules fines (PM₁₀) est présenté à la Figure 21.

En moyenne sur toute la période de mesure, en gare de Musée d'Orsay, le ratio PM_{2.5}/PM₁₀ est de 0,59. Il y a par conséquent plus de PM_{2.5} que de particules plus grossières (entre 2,5 et 10 µm). Le ratio moyen augmente les jours de grève (jusqu'à 0,8), en lien avec une fréquentation de la gare moindre (moins de trains et moins de voyageurs). Il diminue sur la période hors jours de grève (0,45). A titre de comparaison, en air extérieur, le ratio est plus proche de 0,7.

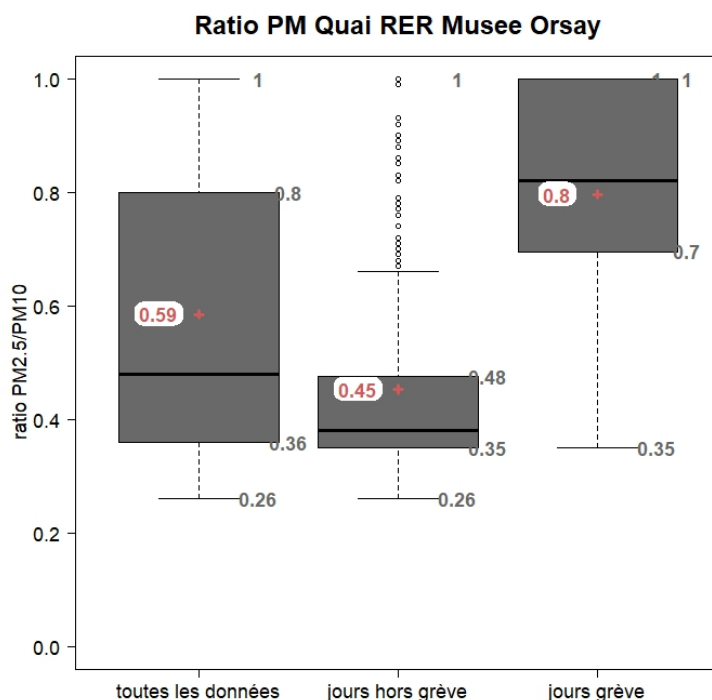


Figure 21 – Boîtes à moustaches des ratios horaires en PM_{2.5}/PM₁₀, à la gare RER C de Musée d'Orsay, période du 26/03 au 15/04/2018, toute la période ou hors grève.

2.5.2. VARIABILITE HEBDOMADAIRE

Les fluctuations hebdomadaires des ratios horaires de PM_{2.5}/PM₁₀, présentées à la Figure 22, montrent une stabilité des valeurs toute la semaine (autour de 0,46). Cette stabilité des ratios s'explique par des sources stables en PM_{2.5} et PM₁₀, quelle que soit la journée. Une légère baisse est observée les week-ends par rapport à la semaine (- 6 %).

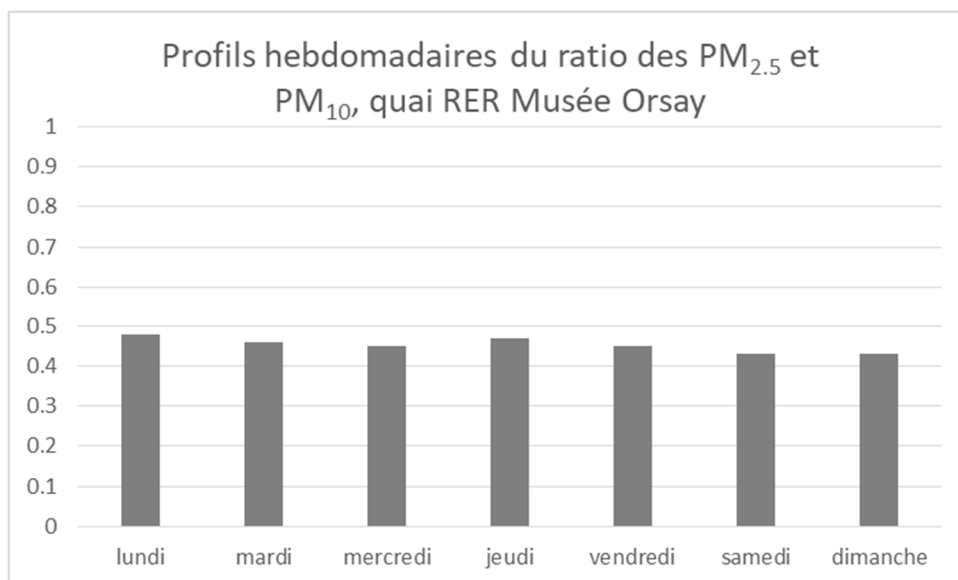


Figure 22 – Évolution du profil hebdomadaire des ratios PM_{2.5}/PM₁₀ à la gare RER C de Musée d'Orsay, période du 26/03 au 15/04/2018, [hors jours de grève](#).

2.5.3. VARIABILITE DES RATIOS HORAIRES

Les fluctuations horaires du ratio PM_{2.5}/PM₁₀ (ratios horaires moyennés sur une semaine) sont présentées à la Figure 23.

Les profils sont stables en journée en termes de niveaux du ratio et présentent une hausse nocturne (en lien avec une forte proportion de PM_{2.5} par rapport aux PM₁₀, du fait de l'absence de trains d'où moins de particules PM₁₀ produites).

Les profils moyens journaliers du ratio PM_{2.5}/PM₁₀ sont présentés à la Figure 24. Une certaine stabilité des ratios est observée en journée (de 7h à 24h), autour de 0,4. Les ratios augmentent la nuit (entre 1h et 6h, lors de la fermeture au public), en lien avec la dépose des particules PM₁₀ au sol et à l'absence de trains et de voyageurs, d'où une diminution importante des concentrations en PM₁₀.

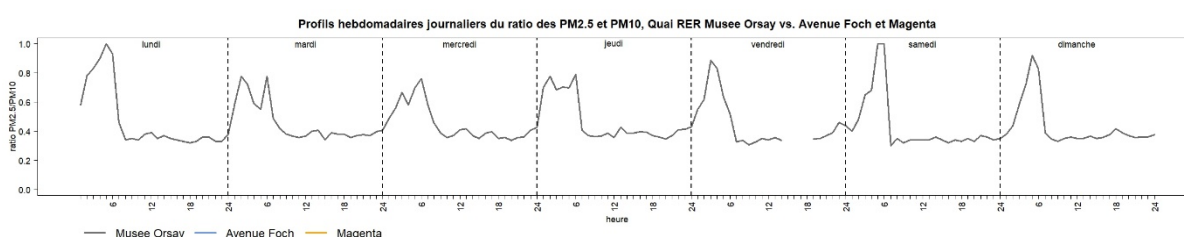


Figure 23 – Evolution des profils horaires des ratios PM_{2.5}/PM₁₀ à la gare RER C de Musée d'Orsay, période du 26/03 au 15/04/2018, [hors jours de grève](#).

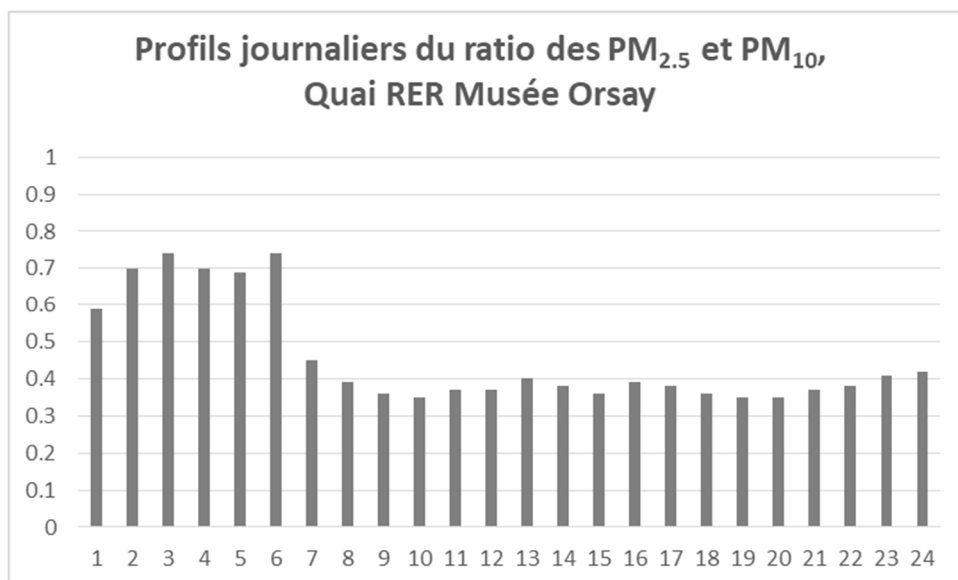


Figure 24 – Évolution des profils journaliers des ratios $PM_{2.5}/PM_{10}$ à la gare RER C de Musée d'Orsay, période du 26/03 au 15/04/2018 – jours ouvrés hors grève.

2.5.4. COMPARAISON AVEC AVENUE FOCH

Le ratio entre particules très fines ($PM_{2.5}$) et particules fines (PM_{10}) en gare RER C de Musée d'Orsay peut être comparé avec celui d'Avenue Foch sur la période du 12 au 27/04/2018. Le résultat est présenté à la Figure 25.

En moyenne sur toute la période de comparaison, le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ en gare de Musée d'Orsay est proche de celui de l'Avenue Foch (respectivement 0,55 et 0,57). Les résultats des deux gares varient de la même façon les jours de grèves (ratios plus élevés et équivalents à 0,6) et les jours hors grèves (ratios plus faibles).

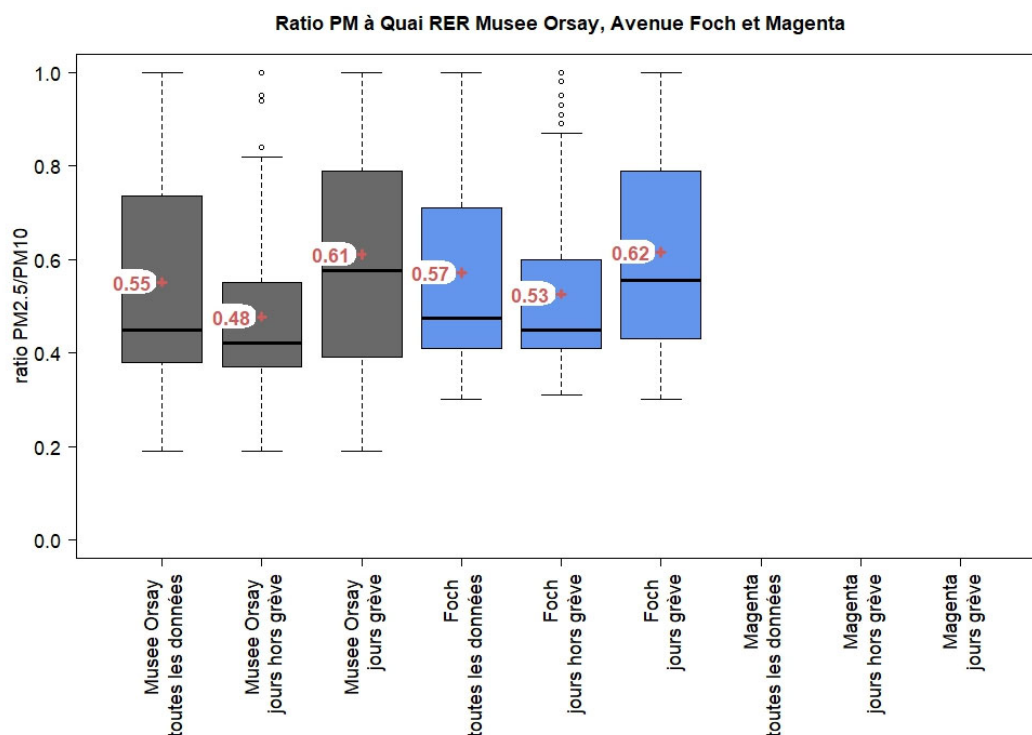


Figure 25 – Boîtes à moustaches des ratios horaires en $PM_{2.5}/PM_{10}$, à la gare RER C de Musée d'Orsay et à la station de référence Avenue Foch, période du 12 au 27/04/2018, toute la période ou hors grève.

Les fluctuations hebdomadaires des ratios horaires de $PM_{2.5}/PM_{10}$, présentées à la Figure 26, montrent une stabilité des valeurs toute la semaine et des ratios similaires sur les deux gares (0,48 en moyenne en gare de Musée d'Orsay les jours ouvrés). Les ratios les samedis et dimanches sont donnés à titre indicatif, car les deux week-ends ont eu lieu en période de grève. Les résultats ne sont par conséquent pas représentatifs d'une situation normale.

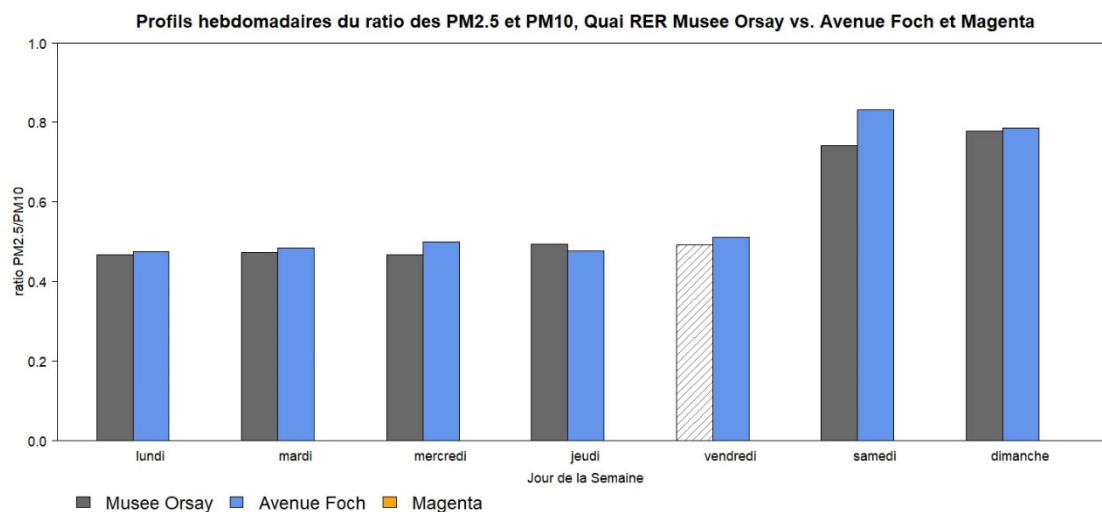


Figure 26 – Évolution du profil hebdomadaire des ratios $PM_{2.5}/PM_{10}$ à la gare RER C de Musée d'Orsay et à la station de référence Avenue Foch, période du 12 au 27/04/2018. En hachuré, données disponibles < 75%.

Les profils hebdomadaires du ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ (ratios horaires moyennés sur une semaine) sont présentées à la Figure 27.

Les profils sont proches à Musée d'Orsay et à Avenue Foch en termes de niveaux. Les résultats plus fluctuants le week-end ne sont pas représentatifs car ils concernent des jours de grève.

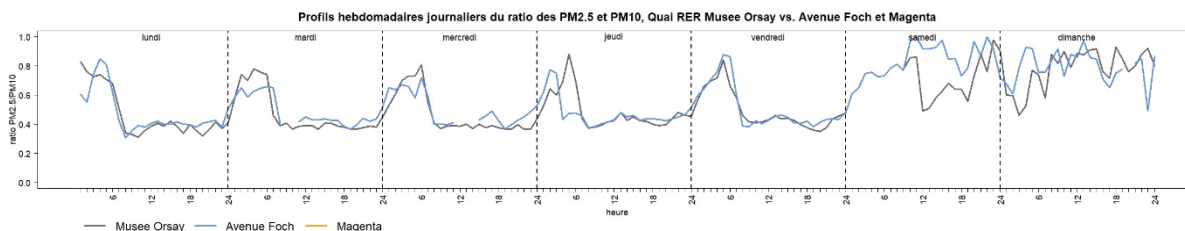


Figure 27 – Evolution des profils horaires des ratios $PM_{2.5}/PM_{10}$ à la gare RER C de Musée d'Orsay et à la station Avenue Foch, période du 12 au 27/04/2018.

Les profils moyens journaliers du ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ sont présentés à la Figure 28. Une certaine stabilité des ratios est observée en journée (de 7h à 24h), aussi bien en gare de Musée d'Orsay qu'à Avenue Foch, autour de 0,4. La nuit (entre 1h et 6h, lors de la fermeture au public), les ratios augmentent sur les deux gares jusqu'à 0,8 en gare de Musée d'Orsay (0,8 à Avenue Foch), en lien avec l'absence de sources de particules PM_{10} et à la dépose des particules PM_{10} au sol, d'où une diminution importante des concentrations en PM_{10} .

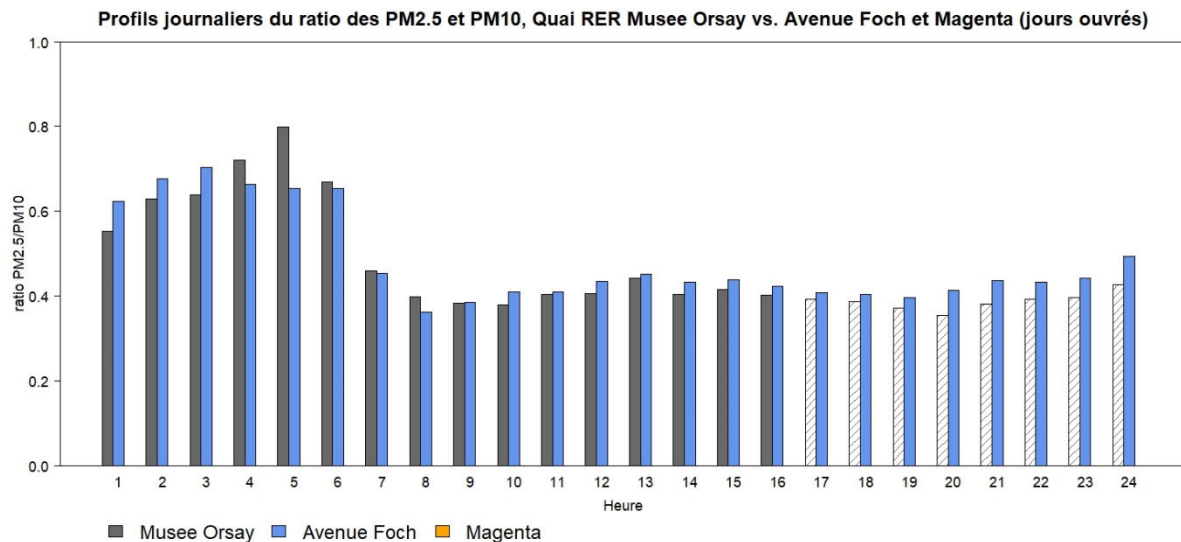


Figure 28 – Évolution des profils journaliers des ratios PM_{2.5}/PM₁₀ à la gare RER C de Musée d'Orsay et à la station Avenue Foch, période du 12 au 27/04/2018 – jours ouvrés hors grève. En hachuré, données disponibles < 75%.

Le ratio PM_{2.5}/PM₁₀ moyen est de 0,59 à Musée d'Orsay sur l'ensemble de la période de mesure. Les particules PM₁₀ mesurées en gare de Musée d'Orsay sont composées à plus de la moitié de particules PM_{2.5}. Le ratio moyen augmente les jours de grève (jusqu'à 0,8), en lien avec une fréquentation de la gare moindre (moins de trains et moins de voyageurs). Il diminue sur la période hors jours de grève (0,45). Plus de la moitié des particules sont alors des particules grossières.

A titre de comparaison, en air extérieur, le ratio est plus proche de 0,7.

Le ratio PM_{2.5}/PM₁₀ est relativement stable les **jours ouvrés**.

A l'échelle horaire, le ratio est stable autour de 0,4 en journée, puis augmente la nuit, lorsque les particules PM₁₀ se déposent au sol et que leurs concentrations diminuent fortement du fait de l'arrêt de l'activité en gare pour se rapprocher de celles de PM_{2.5}.

La comparaison avec les ratios à la station de référence Avenue Foch montre des résultats comparables, tant en terme de concentrations que d'évolution.

3. FACTEURS D'INFLUENCE

3.1 INFLUENCE DE LA QUALITE DE L'AIR EXTERIEUR

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

La qualité de l'air extérieur est influencée au quotidien par les émissions anthropiques, les conditions météorologiques et les imports de polluants (essentiellement pour les particules). Aussi il est important de préciser si les paramètres météorologiques observés pendant la période de mesure ont été ou non favorables à l'accumulation de la pollution atmosphérique. Des conditions dispersives des polluants atmosphériques correspondent à des états dépressionnaires, avec un temps pluvieux ou venteux. A l'inverse, des temps anticycloniques, avec peu de vents ou des inversions de température, sont souvent synonymes de conditions météorologiques défavorables pour la qualité de l'air extérieur.

Pendant cette campagne de mesure, les conditions météorologiques ont été conformes aux observations habituelles pour la saison : des températures douces et un temps souvent perturbé, avec des précipitations. Ces conditions météorologiques se sont traduites par un **indice de la qualité de l'air** (CITEAIR⁷, variant de 0 « très faible » à > 100 « très élevé ») faible pendant 66% du temps de la campagne de mesure (14 jours). L'indice « moyen » a été enregistré pendant 7 jours (34 % du temps).

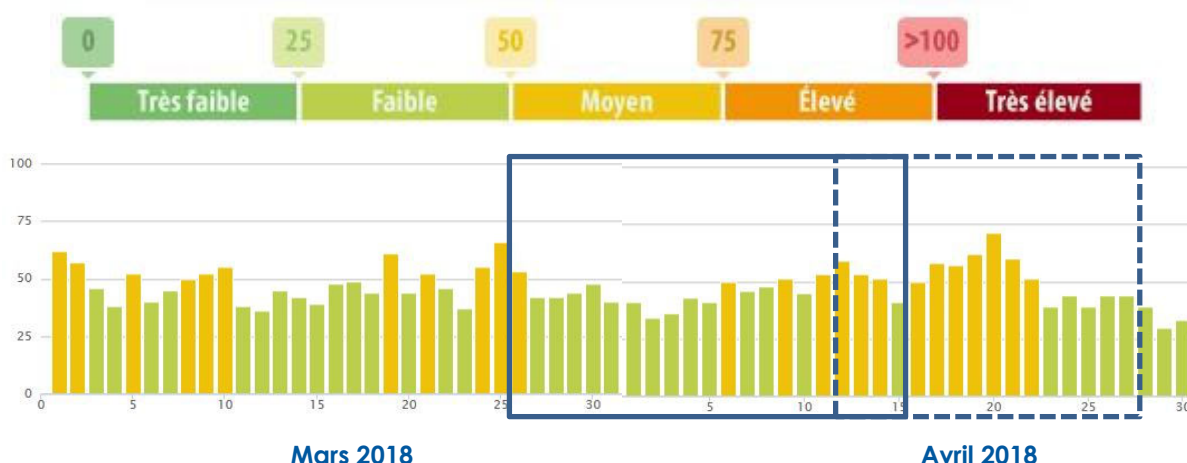
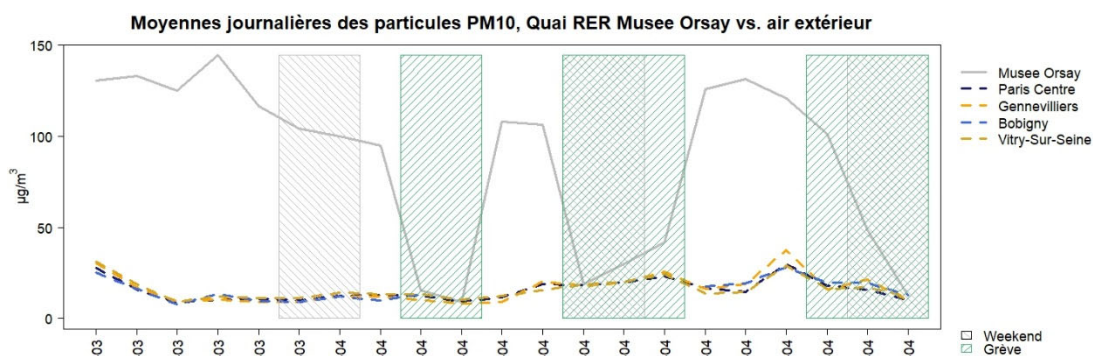


Figure 29 – Historique de l'indice CITEAIR pour les mois de mars et avril 2018. En pointillé, période additionnée pour la comparaison avec la gare d'Avenue Foch.

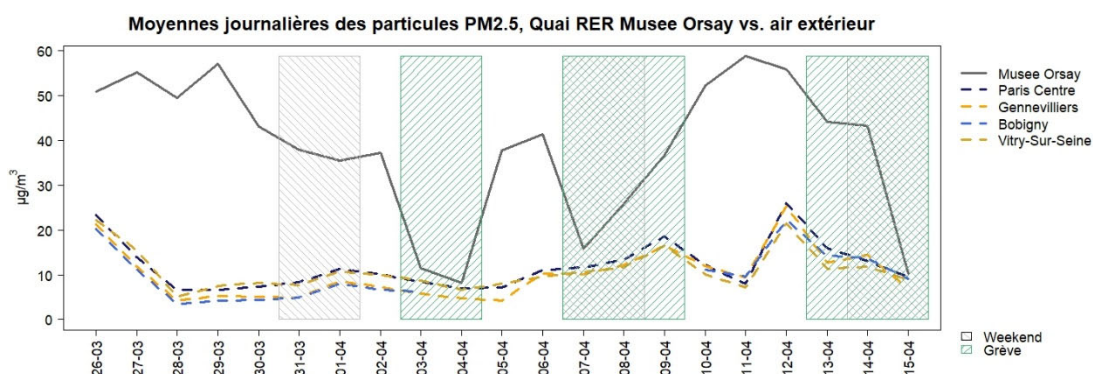
Une comparaison des moyennes journalières en particules sur le quai de la gare de Musée d'Orsay avec les niveaux enregistrés en air extérieur est présentée à la Figure 30, pour les particules PM_{10} et les particules fines $PM_{2,5}$.

Il est difficile d'établir un lien entre les teneurs enregistrées sur le quai à Musée d'Orsay et celles observés en air extérieur. A noter que les jours de grève, les teneurs sur le quai ont tendance à se rapprocher de celles observées en air extérieur.

⁷ http://www.airqualitynow.eu/fr/about_indices_definition.php : A travers une échelle de 5 couleurs allant du vert au rouge en passant par l'orange (5 classes et 5 qualificatifs, qualité de l'air " très faible " à " très élevée "), l'indice CITEAIR informe sur la qualité de l'air en situation de fond à travers un indice général. Les polluants pris en compte sont les polluants les plus problématiques, à savoir le NO_2 , les PM_{10} et l'ozone. Les données de CO , $PM_{2,5}$ et SO_2 sont facultatives.



(a)



(b)

Figure 30 – Evolution des teneurs journalières en PM₁₀ (a) et en PM_{2.5} (b) en gare de Musée d'Orsay et en air extérieur (situation de fond), période du 26/03 au 15/04/2018.

3.2 CONFINEMENT DE LA GARE, PARAMETRES DE CONFORT

Le confinement de la gare a été suivi via les teneurs en CO₂, qui permettent de suivre le renouvellement de l'air dans des espaces soumis potentiellement à diverses sources de CO₂ (combustion, respiration humaine, source extérieure). Les paramètres de confort (température ambiante et humidité) ont également être suivis. Les relevés horaires sont présentés à la Figure 31.

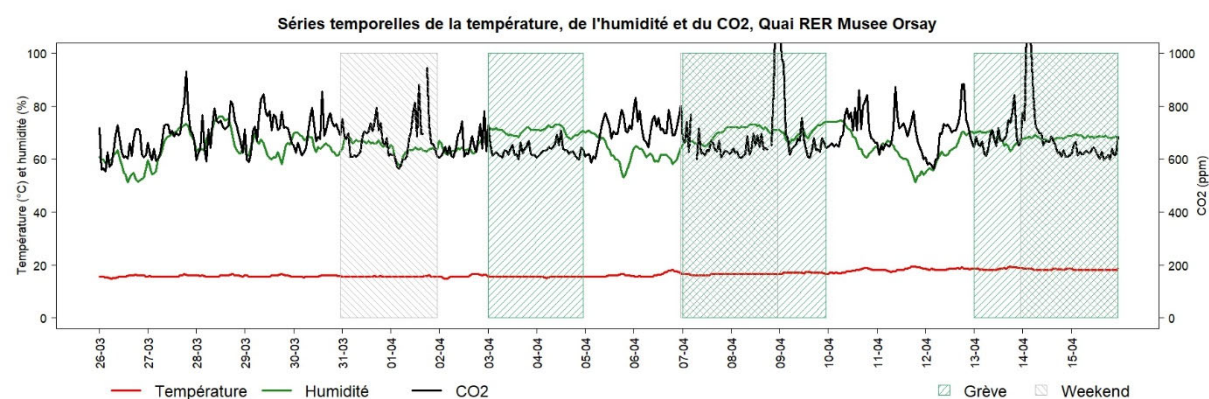


Figure 31 – Relevés horaires de dioxyde de carbone (CO₂) de température (T) et d'humidité relative (H) à la gare RER C de Musée d'Orsay, période du 26/03 au 15/04/2018.

La température moyenne en gare de Musée d'Orsay est de 17°C, les relevés horaires ayant varié entre 15 et 20°C (similaire à de précédentes mesures à cette période ; moyenne équivalente à celle d'Avenue Foch sur la période de comparaison du 12 au 27/04/2018). L'humidité relative moyenne en gare de Musée d'Orsay est de 66%, les relevés horaires ayant varié fortement de 51% à 76%. Ces relevés sont proches de précédentes mesures réalisées à cette période de l'année (gare de Saint-

Ouen) et comparables aux relevés en gare d'Avenue Foch sur la période de comparaison (12 au 27/04/2018).

Les relevés horaires en CO₂ sont fluctuants, ceci en lien avec la fréquentation de la gare. En moyenne de 684 ppm sur la période de mesure, les relevés varient entre 552 ppm et 1182 ppm (les maxima supérieurs à 1000 ppm ont été observés entre 23 et 5h). Les cinq relevés horaires supérieurs à 1000 ppm, seuil à respecter dans des conditions normales d'occupation d'un bâtiment non résidentiel⁸, ont été enregistrés la nuit. Aussi tous les relevés lors de l'ouverture de la gare au public sont inférieurs à 1000 ppm.

Le profil journalier des niveaux de CO₂ (jours ouvrés hors jours de grève) en gare de Musée d'Orsay, comparé à celui des PM₁₀, est présenté Figure 32.

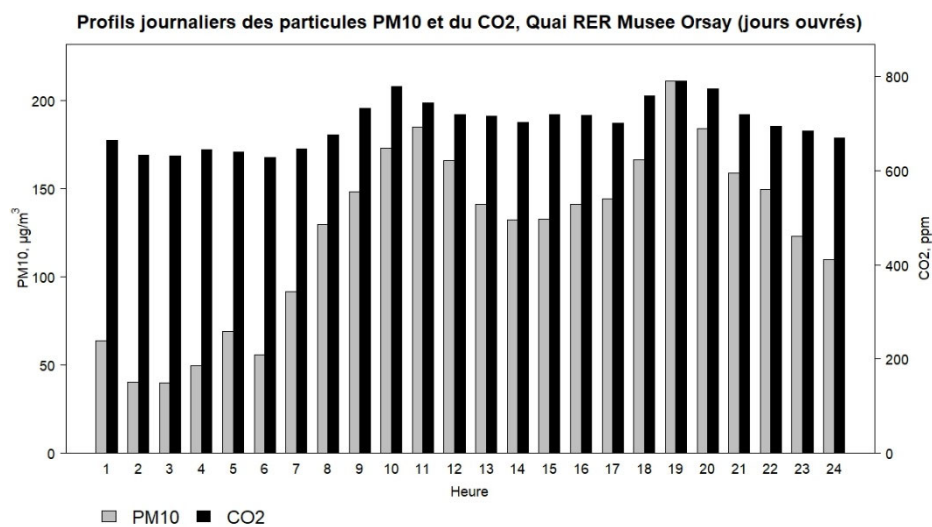


Figure 32 – Profils journaliers en PM₁₀ et CO₂ à la gare RER C de Musée d'Orsay, période du 26/03 au 15/04/2018 – [jours ouvrés hors grèves](#).

La comparaison des concentrations horaires en particules (PM₁₀) et en CO₂ les jours ouvrés montre que les teneurs maximales en particules sont observées en même temps que pour le CO₂, avec un décalage d'une heure le matin (en lien avec la fréquentation des lieux par les voyageurs).

3.3 PARAMETRES TECHNIQUES, TRAFIC DE LA GARE

Certains paramètres techniques de la gare, tels que la fréquence des trains, la ventilation de la gare ou encore des perturbations du trafic, doivent être pris en compte en tant qu'éléments potentiellement explicatifs des niveaux de particules et de leurs variations.

La gare de Musée d'Orsay ne bénéficie pas de système de ventilation mécanique, les entrées et sorties d'air sont « naturelles ». La situation est identique en gare d'Avenue Foch.

Il existe une différence du nombre de voyageurs entre les gares de Musée d'Orsay et d'Avenue Foch, mais cette variable n'est pas corrélée avec les concentrations (même niveau de pollution particulaire) : 9 800 voyageurs par jour montant en gare de Musée d'Orsay, contre 1 823 à Avenue Foch (source interne SNCF : carte des montants 2016).

Le nombre de trains théorique circulant en gare de Musée d'Orsay (et à Avenue Foch) pendant la campagne de mesure a été transmis par la SNCF Gares d'Ile-de-France, ceci selon différentes

⁸ Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur et effets sur la santé, Avis de l'Anses, rapport d'expertise collective, juillet 2013, Edition scientifique.

périodes : JOB (jours ouvrés du mardi au jeudi) d'une part, et samedi et dimanche, d'autre part (trafic normal, donc hors jour de grève).

En moyenne, les jours ouvrés, 500 trains circulent en gare de Musée d'Orsay (contre 170 en gare d'Avenue Foch). Le samedi, ce sont 449 trains qui circulent en moyenne en gare de Musée d'Orsay (143 à Avenue Foch) et 434 trains le dimanche (145 à Avenue Foch). Les chiffres, pour la gare de Musée d'Orsay, sont présentés en Figure 33 à l'échelle horaire.

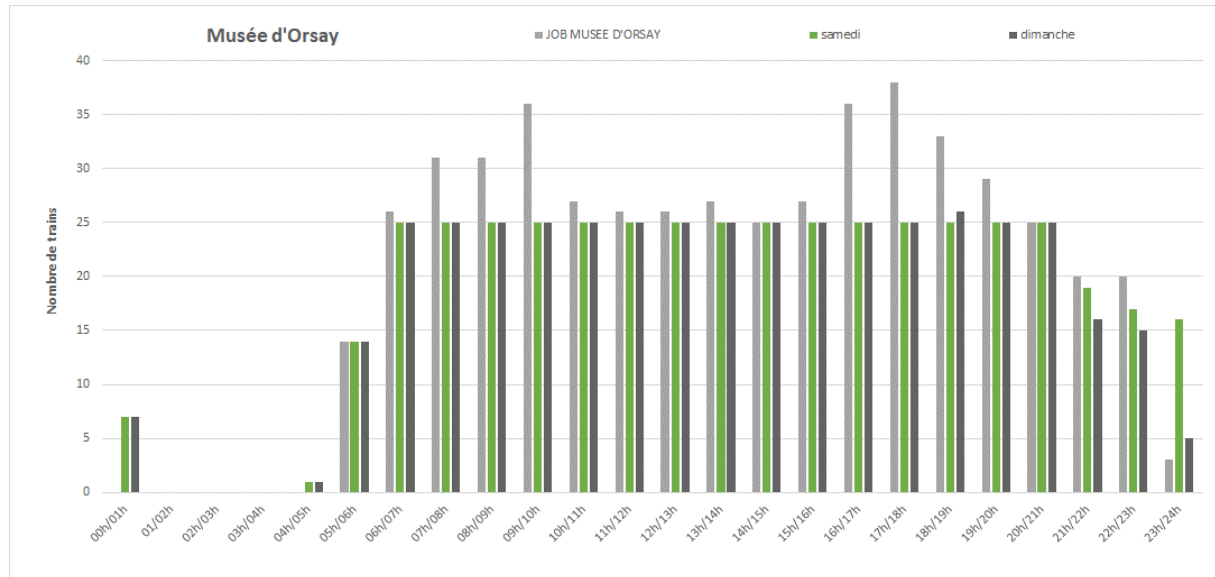


Figure 33 – Nombre théorique de trains enregistrés chaque heure à la gare RER C de Musée d'Orsay (jours ouvrés hors jours de grève).

Un croisement du nombre de trains en circulation avec les relevés en particules à l'échelle journalière est présenté à la Figure 34, pour les jours ouvrés (hors jours de grève), pour la gare de Musée d'Orsay. Le profil des teneurs en particules PM₁₀ est corrélé au nombre de trains en circulation, avec un décalage de 1 heure, dû à l'inertie des particules (effet de retard).

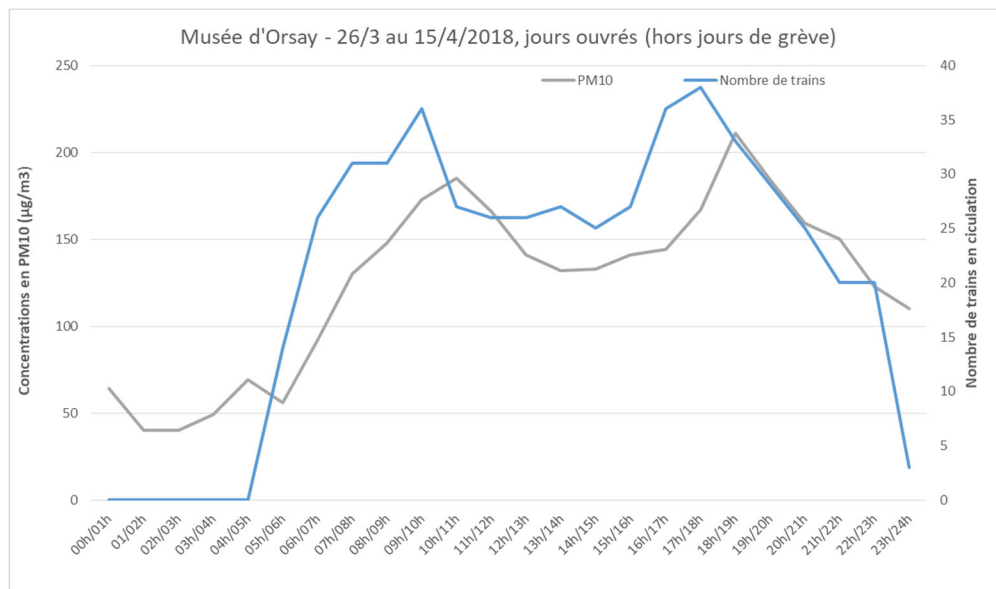


Figure 34 – Croisement entre les teneurs horaires en particules PM₁₀ observées les jours ouvrés (hors jours de grève) et le nombre de trains en circulation à la gare RER C de Musée d'Orsay, période du 26/03 au 15/04/2018.

L'influence de paramètres comme les concentrations en air extérieur et les paramètres techniques de la gare de Musée d'Orsay a été étudiée.

- **Le nombre de trains en circulation influence directement les teneurs en particules** sur le quai, d'où des maxima observables aux heures de pointe en semaine.
- Les niveaux en CO₂, directement liés à la respiration humaine et par conséquent à la fréquentation de la gare, sont corrélés aux niveaux de particules en gare de Musée d'Orsay.
- Les teneurs en particules mesurées sur le quai en gare de Musée d'Orsay ne sont pas corrélées à celles mesurées en air extérieur dans l'ambiance générale de fond.

La gare ne dispose pas de ventilation mécanique, celle-ci ne peut donc avoir d'influence sur les teneurs observées sur le quai.

La ventilation naturelle ne semble pas avoir la même efficacité en gare d'Avenue Foch et à Musée d'Orsay.

4. CONCLUSION

Le présent rapport a permis de présenter les niveaux de pollution observés en gare de Musée d'Orsay, pour les particules PM₁₀ et PM_{2.5} :

- La teneur en particules fines PM₁₀ mesurée sur les quais du RER C en gare de Musée d'Orsay entre le 26/03 et le 15/04/2018 était en moyenne de 86 µg/m³, le maximum horaire atteint étant de 257 µg/m³ (enregistré lors de pointe du soir le 29 mars).
- Le niveau moyen en particules très fines PM_{2.5} atteint 38 µg/m³, pour un maximum horaire de 208 µg/m³ enregistré le 14 avril à 5h (lors de travaux nocturnes).
- En période hors grève, la teneur en particules fines PM₁₀ mesurée sur les quais du RER C en gare de Musée d'Orsay entre le 26/03 et le 15/04/2018 était en moyenne de 119 µg/m³ et de 47 µg/m³ pour les particules très fines PM_{2.5}, soit des niveaux plus importants, en lien avec un nombre plus important de trains et de voyageurs.

La comparaison des concentrations en particules en gare de Musée d'Orsay avec la station de référence Magenta n'a pas été possible, faute de données disponibles à Magenta.

La comparaison avec les mesures à la station de référence Avenue Foch a pu être réalisée sur une courte période entre le 12.04 et le 27.04.2018. Sur cette période, les concentrations en particules PM₁₀ à la gare de Musée d'Orsay sont similaires à celles enregistrées à Avenue Foch (RER C, station non ventilée), aussi bien en termes de niveaux que d'évolution temporelle.

Les observations émises pour les concentrations en PM_{2.5} en gare de Musée d'Orsay sont identiques à celles des PM₁₀.

Comme pour les autres gares étudiées jusqu'ici, l'analyse des teneurs en métaux dans les particules PM₁₀ confirme la présence majoritaire du Fer (environ 96 % des métaux mesurés). Suivent ensuite en proportion le Cuivre (1.3 %), le Zinc (1.1 %) et le Manganèse (0.9 %). Ces résultats sont proches de ceux observés en gare d'Avenue Foch, excepté pour le Cuivre (0.8 % à la station de référence).

L'étude des paramètres potentiellement influents confirme la corrélation entre les concentrations en particules et le nombre de trains en circulation les jours ouvrés.

En complément des mesures présentées dans ce rapport, des mesures spécifiques dans les microenvironnements de la gare sont réalisés avec un appareil portable, afin de caractériser la variabilité des niveaux de particules au cours de la journée de travail des agents SNCF et dans les microenvironnements fréquentés. Ces mesures feront l'objet d'un rapport global (toutes mesures confondues) à part.

ANNEXE 1 : ELEMENTS TECHNIQUES DE LA GARE DE MUSÉE D'ORSAY

Configuration de la gare :

Pas de portes palières, 2 voies, 2 quais, pas de correspondance.

Ventilation : Naturelle

Fréquentation de la gare :

Nombre de voyageurs montants /jour :
9 800 (source SNCF, carte des montants 2016)

Caractéristiques du matériel roulant :

Matériel : type RER

Modèle : automotrices Z5600, Z8800, Z20500, Z20900

Véhicules compartimentés (4 à 6 voitures par rame)

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

Energie motrice : caténaire

Type de roulement : fer

Conditions de circulation pendant la campagne :

Un mouvement social a perturbé la circulation des trains entre avril et juin 2018. Les jours de grève (alternance de 2 jours de grève et de 3 jours de circulation normale) pendant la campagne de mesure ont été les suivants :

3 et 4 avril, 8 et 9 avril, 13 et 14 avril, 18 et 19 avril, 23 et 24 avril.

Des perturbations ont concerné également les 7, 15 et 22 avril.



ANNEXE 2 :

DETAILS TECHNIQUES DES MESURES

Indicateurs de la pollution retenus

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

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

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

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

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

Moyens techniques mis en œuvre

ANALYSEURS AUTOMATIQUES

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

La station de mesure se présente sous forme d'une station classique de mesure de la qualité de l'air, équipée d'analyseurs automatiques installés au sein d'une armoire dans le cadre de cette étude. 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)⁹ et particules fines (PM_{2,5}) ont été mesurées par analyseurs automatiques, ainsi que les NO_x sur le site de l'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 Micropolluant¹⁰.

Afin d'être conforme aux pratiques existantes dans les enceintes souterraines, les prélèvements de métaux sont réalisés pendant 5 jours ouvrés (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'ANSES⁶ dans les enceintes souterraines ferroviaires, à savoir :

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

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

L'analyse est réalisée par ICPMS (Analyse par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif) (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 événement extérieur (coupure électrique par exemple) rendant la donnée non représentative, etc.

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

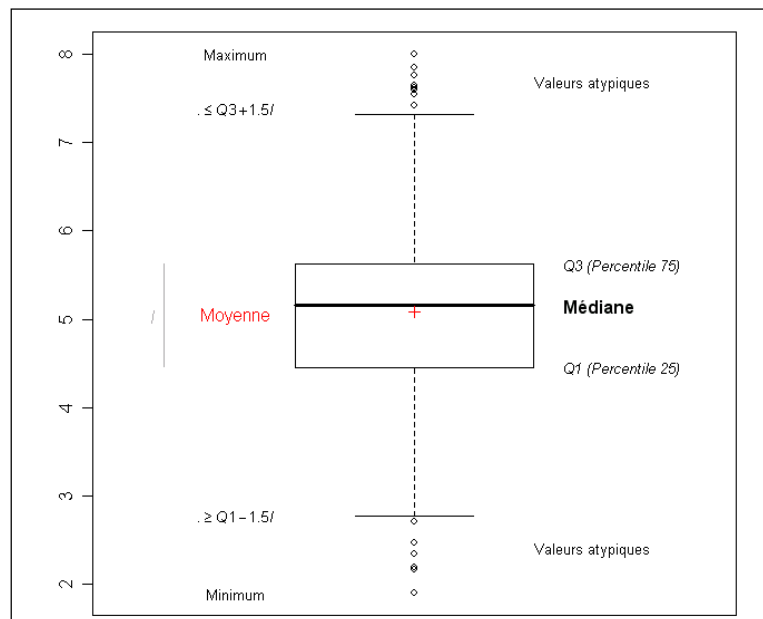
⁹ Mesures des PM₁₀ et PM_{2,5} selon la norme NF EN 12341 par FDMS (mesure par micro-balance, prise en compte de la fraction volatil des particules). A la station Magenta (mesures par AEF), mesure des PM₁₀ et des PM_{2,5} par micro-balance à l'aide des analyseurs automatiques de type RP1400 (R&P) appelés aussi TEOM, en prenant en compte la norme NF EN 12341.

¹⁰ Micropolluant : <http://www.micropolluants-tech.fr/>

ANNEXE 3 : BOITE A MOUSTACHE

Définition statistique d'une « boîte à moustache » (box plot)

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).



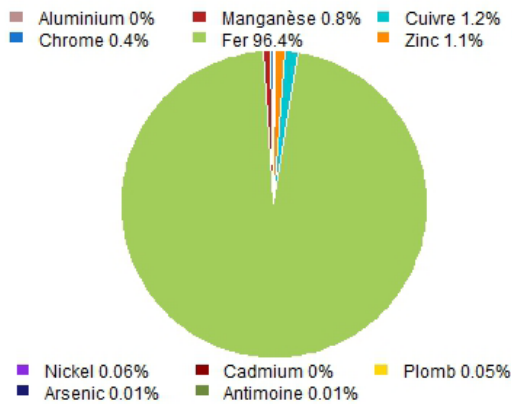
La partie centrale correspondant à une « boîte » représente 50 % des données. Ces données se situent dans les 2^{ème} et 3^{ème} quartiles. La différence entre les deux est appelée l'écart inter quartiles. Les moustaches réparties de chaque côté de la boîte représentent généralement près de 25 % des 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).

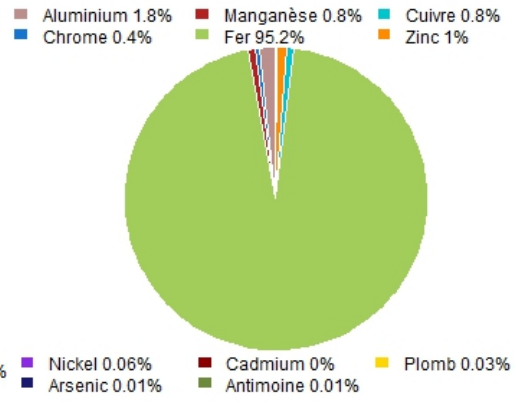
ANNEXE 4 : REPARTITION EN METAUX SUR LA PERIODE DE MESURE



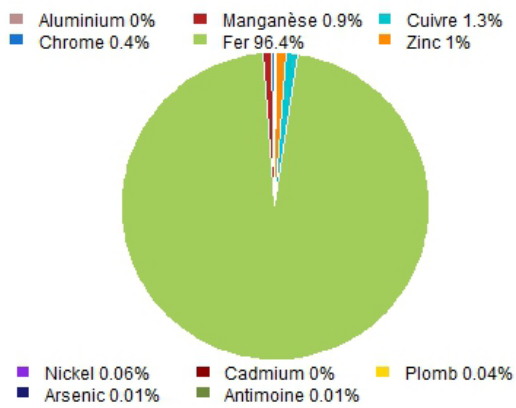
Musee Orsay, 19/04/2018



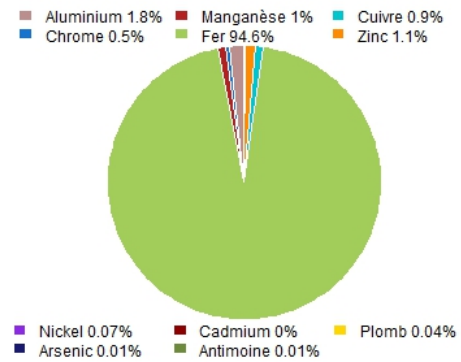
Avenue Foch 19/04/2018



Musee Orsay, 20/04/2018



Avenue Foch 20/04/2018



ANNEXE 5 :

RELEVES JOURNALIERS DE CUIVRE, ZINC, MANGANESE, CHROME, NICKEL, ANTIMOINE, ARSENIC, CADMIUM, ALUMINIUM ET PLOMB A LA GARE RER C DE MUSEE D'ORSAY ET A AVENUE FOCH, PERIODE DU 16/04/2017 AU 20/04/2017.

