



# Mesures dans les enceintes souterraines de la RATP

CAMPAGNES DE MESURES SUR LE QUAI DU RER A À CHÂTELET-LES  
HALLES ET DU MÉTRO LIGNE 8 À ÉCOLE MILITAIRE





# **Mesures dans les enceintes souterraines de la RATP**

**Campagnes de mesures sur le quai du RER A à  
Châtelet-Les Halles et du métro ligne 8 à École  
militaire**

**Juin 2022**

**AIRPARIF – L'Observatoire de l'Air en Île-de-France**

7 rue Crillon - 75004 PARIS

Tel : 01 44 59 47 64 – [www.airparif.fr](http://www.airparif.fr)

# Sommaire

GLOSSAIRE .....	6
CONTEXTE ET OBJECTIFS .....	8
A. CAMPAGNE DE MESURES RER A – GARE DE CHATELET-LES HALLES .....	9
1. DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE.....	9
1.1. DESCRIPTION DE LA GARE.....	9
1.2. LOCALISATION DU POINT DE MESURES .....	10
1.3. POLLUANTS MESURES .....	11
1.4. PERIODE DE MESURES .....	11
2. NIVEAUX EN PARTICULES EN MASSE.....	13
2.1. NIVEAUX MOYENS OBSERVES EN PM <sub>10</sub> .....	13
2.2. VARIABILITE TEMPORELLE DES PM <sub>10</sub> .....	16
2.2.1. Variabilité des relevés horaires pendant la campagne de mesure.....	16
2.2.2. Variabilité hebdomadaire .....	17
2.2.3. Variabilité journalière .....	18
3. COMPOSITION CHIMIQUE DES PARTICULES PM <sub>10</sub> .....	20
3.1. TENEURS DES COMPOSES ANALYSES DANS LES PARTICULES .....	20
3.1.1. Contribution et niveaux moyens observés des composés chimiques .....	21
3.1.2. Variabilité journalière des composés chimiques .....	25
3.2. REPARTITION DES METAUX SUR LE QUAI DU RER A.....	26
4. NOMBRE DE PARTICULES ET PARTICULES ULTRAFINES .....	28
4.1. MESURES PAR COMPTAGES OPTIQUES (FIDAS) .....	28
4.1.1. Niveaux moyens par comptage optique (FIDAS) .....	28
4.1.2. Variabilité temporelle des comptages optiques.....	30
4.2. COMPORTEMENT DES PUF SUR LE QUAI DU RER.....	31
4.2.1. Nombre moyen de PUF .....	31
4.2.2. Variabilité des relevés horaires pendant la campagne de mesures .....	33
4.2.3. Profils granulométriques moyens .....	35
4.2.4. Évolutions horaires des profils granulométriques moyens .....	37

B.	CAMPAGNE DE MESURES METRO .....	39
1.	DESCRIPTION DE LA STATION DE REFERENCE.....	39
1.1.	DESCRIPTION DE LA GARE.....	39
1.2.	LOCALISATION DU POINT DE MESURE.....	41
1.3.	POLLUANTS MESURES .....	41
1.4.	PERIODE DE MESURES .....	42
2.	NIVEAUX EN PARTICULES RENCONTRES SUR LE QUAI DE LA STATION ÉCOLE MILITAIRE .....	43
2.1.	NIVEAUX MOYENS OBSERVES EN PM <sub>10</sub> .....	43
2.2.	VARIABILITE TEMPORELLE DES PM <sub>10</sub> .....	47
2.2.1.	Variabilité des relevés horaires pendant la campagne de mesures .....	47
2.2.2.	Variabilité hebdomadaire .....	48
2.2.3.	Variabilité journalière .....	49
2.2.4.	Niveaux en service commercial .....	50
3.	NOMBRE DE PARTICULES ET PARTICULES ULTRAFINES .....	51
3.1.	MESURES PAR COMPTAGES OPTIQUES (FIDAS) .....	51
3.1.1.	Niveaux moyens par comptage optique (FIDAS) .....	51
3.1.2.	Variabilité temporelle du nombre de particules .....	53
3.2.	COMPORTEMENT DES PARTICULES ULTRAFINES SUR LE QUAI DU METRO.....	54
3.2.1.	Niveaux moyens de PUF .....	54
3.2.2.	Variabilité des relevés horaires pendant la campagne de mesures .....	56
3.2.3.	Profils granulométriques moyens .....	58
3.2.4.	Évolutions horaires des profils granulométriques moyens .....	59
	CONCLUSIONS .....	62
	REFERENCES .....	63
	ANNEXES .....	64
	ANNEXE 1 - ÉLÉMENTS TECHNIQUES DE LA STATION CHATELET-LES HALLES .....	64
	ANNEXE 2 - DETAILS TECHNIQUES DES MESURES .....	65
	ANNEXE 3 - ANALYSES DE COMPOSITION CHIMIQUE.....	71
	ANNEXE 4 - ÉLÉMENTS TECHNIQUES DE LA STATION ÉCOLE MILITAIRE .....	75
	ANNEXE 5 - BOITE A MOUSTACHES – DEFINITION .....	76

# Glossaire

**µg/m<sup>3</sup>** : micro gramme par mètre cube

**ng/m<sup>3</sup>** : nano gramme par mètre cube

**Part/cm<sup>3</sup>** : particules par centimètre 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)

**EFS** : Enceintes ferroviaires souterraines

**PM<sub>10</sub>** : Particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm

**OC** : Carbone organique

**EC** : Carbone élémentaire

**PUF** : Particules Ultrafines, l'ensemble des particules ayant un diamètre aérodynamique compris entre 1 et 100 nanomètres (nm), soit de 0.001 à 0.1 micromètres (µm)

**TEOM** : Tapered Element Oscillating Microbalance : méthode de mesure en concentration massique des particules

**FIDAS** : Granulomètre optique permettant un comptage des particules suivant 64 classes granulométriques allant de 180 nm à 18 µm

**SMPS** : Granulomètre par mobilité électrique permettant un comptage des particules suivant 135 classes granulométriques allant de 5 nm à 400 nm

**Leckel** : Préleveur des polluants particulaires sur filtre (analyses réalisées en laboratoire)

**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 Île-de-France. Conformément à la Loi sur l'Air et l'utilisation rationnelle de l'Energie (LAURE), 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 quatre axes :

- **Surveiller** et prévoir la qualité de l'air via un dispositif robuste et fiable combinant des technologies de pointe d'observation et de calculs numériques renseignant ainsi les concentrations et les émissions des polluants.
- **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.
- **Innover** en facilitant l'émergence de solutions pour améliorer la qualité de l'air et sa surveillance.

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

Airparif remercie l'équipe du laboratoire de la RATP, les responsables et agents terrains de la ligne 8 et du RER A pour nous avoir donné l'autorisation d'implantation temporaire des mesures ainsi que l'appui technique apporté pour la mise à disposition et le raccordement du courant électrique.

# Contexte et objectifs

Suite à plusieurs sollicitations d'Airparif en lien avec la communication de l'association Respire sur les niveaux de particules dans les enceintes ferroviaires souterraines (EFS) de la RATP, Airparif a proposé une étude en 3 volets :

- Expertise du dispositif de surveillance de la qualité de l'air et de son information de la RATP et le cas échéant proposition de préconisations d'amélioration.
- Évaluation du capteur utilisé pour réaliser les mesures de la publication Respire en collaboration avec le laboratoire des Sciences, du Climat et de l'Environnement, laboratoire CNRS et CEA.
- Caractérisation des niveaux de particules sur un quai de métro et un de RER.

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

Ces 3 volets font l'objet de rapports distincts. Ce rapport se focalise sur les deux campagnes de mesure de 3 semaines chacune. Le réseau de transport ferré de la RATP compte 379 stations et gares dont près de 300 ayant une configuration souterraine. Le réseau de métro et RER de la RATP comprend 14 lignes de métro desservant 303 stations et 2 lignes de RER partagées avec la SNCF, avec 7 gares souterraines pour le RER A et 6 gares souterraines pour le RER B.

La caractérisation des niveaux de particules a été réalisée en masse et en nombre, associée pour la campagne sur le quai du RER A à la composition chimique des particules la constituant.

La mesure en nombre fait l'objet d'une attention particulière car, si elle est réalisée sur toute la gamme granulométrique des particules, cette mesure permet de caractériser le nombre de particules ultrafines (PUF). La présence des PUF dans l'atmosphère constitue un risque avéré pour la santé humaine, leur faible taille leur permettant de pénétrer profondément dans l'organisme, alors que les particules les plus grosses sont naturellement arrêtées par le nez. Plus les particules sont petites, plus elles vont pouvoir pénétrer et rester dans l'organisme. Les particules plus petites pénètrent dans les voies respiratoires profondes en proportion nettement plus importante que les particules plus grosses. Elles atteignent ainsi les alvéoles pulmonaires, par lesquelles s'effectuent les échanges gazeux entre l'air et le sang (ANSES, 2019) et persistent longtemps dans l'organisme, car elles résistent en partie aux processus d'élimination. Elles peuvent également passer dans le sang.

Cette étude a été menée par Airparif sur un quai du RER A en gare de Châtelet-Les Halles et sur un quai de la station École militaire du métro ligne 8. La station de métro et de la gare de RER ont été choisies après discussion avec la RATP qui a pris en compte la fréquentation voyageurs, la configuration des stations, la faisabilité technique et les stations en travaux. Elles possèdent une fréquentation voyageur importante et ne présentent pas de travaux sur la période de mesure. Enfin, elles disposent d'un quai pouvant accueillir les moyens de mesure en toute sécurité pour les utilisateurs du réseau et respectant les consignes de sécurité mise en place par la RATP. Ces 2 points de mesure ne peuvent en aucun cas être considérés comme représentatifs des niveaux de l'ensemble du réseau RATP.

Les résultats obtenus dans cette étude sont comparés aux niveaux dans l'air ambiant du site de référence parisien Paris 1<sup>er</sup> – Les Halles, aux niveaux de proximité au trafic routier et ceux mesurés par les stations permanentes de la RATP.

Le rapport est décliné en 2 parties présentant les résultats des campagnes de mesure sur le quai du RER A de la gare Châtelet-Les Halles et de la station École militaire du métro ligne 8. Chacune de ces parties décrit la campagne et présente les résultats obtenus en concentration massique des PM10 puis en nombre de particules dont celui des PUF. Une analyse de la composition chimique des particules PM10 mesurées sur le quai du RER A complète les résultats.



# A. Campagne de mesures RER A – Gare de Châtelet-Les Halles

## 1. Description de la campagne

### 1.1. Description de la gare

La gare de Châtelet-Les Halles est située Place Marguerite de Navarre dans le 1<sup>er</sup> arrondissement de Paris. Elle se trouve au-dessous du centre commercial du Forum des Halles et de La Canopée. Cette gare forme avec les stations de métro Châtelet-Les Halles et Les Halles un vaste réseau souterrain. C'est une gare complexe, intégralement souterraine et située en plein cœur de la capitale.

La gare de Châtelet-Les Halles mise en service en 1977 est à présent desservie par trois lignes du réseau express régional d'Île-de-France (RER) et offre une correspondance avec cinq lignes de métro.



Figure 1 – Salle d'échanges du RER de la gare de Châtelet-Les Halles.

La gare RER est souterraine et profonde, ce type de configuration est propice à l'accumulation de polluants de l'air. Pour lutter contre cette pollution, un système de ventilation mécanique est en place dans cette station et entre les stations permettant un apport d'air neuf au niveau des quais et l'extraction de l'air des EFS vers l'extérieur.

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

La fréquentation annuelle est en hausse depuis plusieurs années, avec 33 581 162 voyageurs montés en gare de Châtelet-Les Halles en 2019 ce qui en fait l'une des gares les plus fréquentées d'Île-de-France. Un historique sur les 5 dernières années de la fréquentation de la gare de Châtelet-Les Halles est repris en Annexe 1 de ce rapport (les données 2020 et 2021 sont jugées non représentatives, compte-tenu des mesures de restrictions d'activités mises en place pour lutter contre la pandémie de COVID-19 – En 2020 et 2021, respectivement 18 301 464 et 24 100 383 voyageurs sont montés en gare de Châtelet-Les Halles soit près de 1,5 fois plus faible qu'habituellement pour 2021).

## 1.2. Localisation du point de mesures

La station de mesures a été installée au niveau du quai numéro 1 du RER A (direction Est : Boissy Saint-Léger et Marne La Vallée Chessy) comme illustré à la Figure 2.

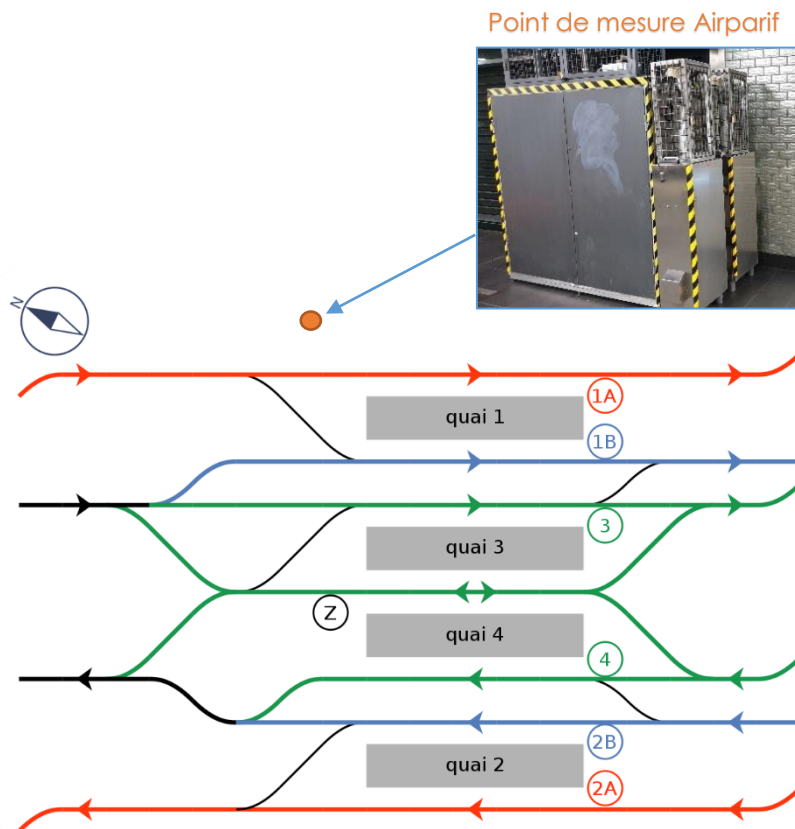


Figure 2 – Localisation du point de mesure (gare Châtelet-Les Halles, ligne RER A, quai 1), photo de la station de mesure (quai).

Comme présenté sur la Figure 2 et illustré sur la Figure 3, le quai numéro 1 du RER A de la gare Châtelet-Les Halles est situé dans un vaste complexe présentant 4 quais distribuant le RER A et B mais aussi les lignes de métro 3 et 4. Cette configuration peut être à l'origine d'une multitude de sources de polluant. L'armoire de mesure a été installée contre un mur situé au niveau du point orange de la figure 2 face RER A offrant un dégagement de 180° à environ 5 mètres des voies.

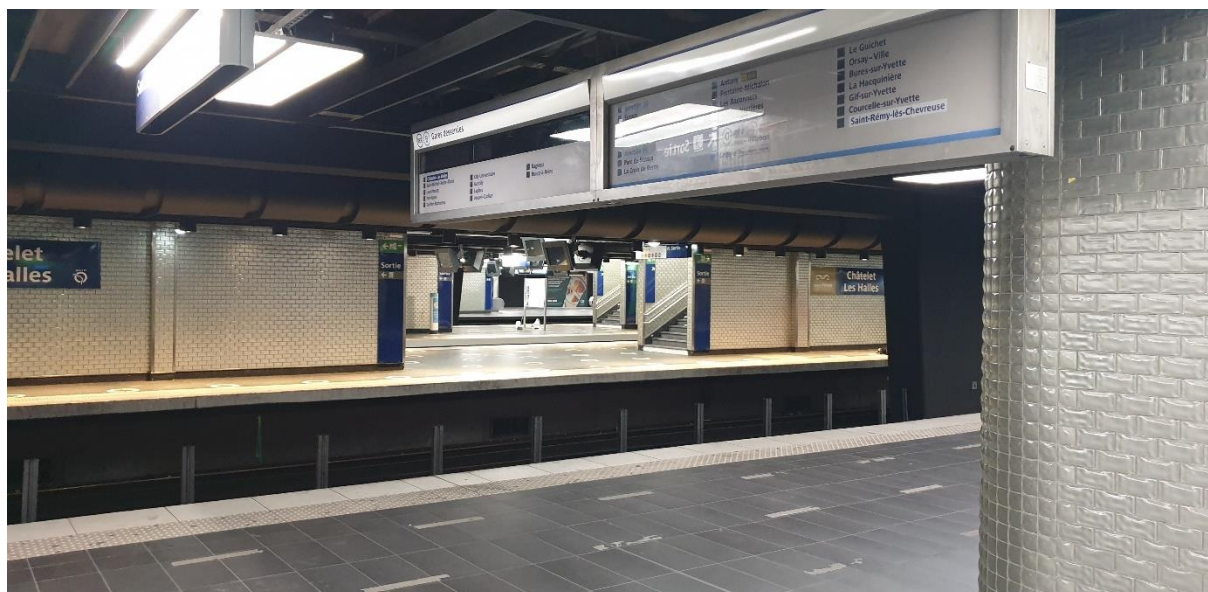


Figure 3 – Vue du quai du RER A vers les autres quais.

## 1.3. Polluants mesurés

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. C'est pour cette raison, que les concentrations massiques en particules PM<sub>10</sub> ainsi que le nombre de particules ont été suivis.

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. En complément des analyses métaux, des analyses de matière carbonée (carbone élémentaire et carbone organique), matières inorganiques et minérales ont été réalisées pour permettre d'estimer la part de chaque nature de composés dans les PM<sub>10</sub>.

L'ANSES, dans son rapport<sup>1</sup> confirme que les concentrations massiques de particules en suspension dans l'air (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>) des enceintes ferroviaires souterraines (EFS) sont nettement supérieures à celles mesurées dans l'air extérieur, même en proximité du trafic routier, et à celles mesurées dans l'air intérieur des logements. La source majeure de ces particules essentiellement submicroniques, riches en métaux dont principalement le fer, et en carbone, est l'usure des matériaux par la friction roue-frein, suivie du contact roue-rail et du contact entre le matériel roulant et le système d'alimentation électrique. Ce rapport précise que les particules de l'air des EFS ont des caractéristiques physicochimiques différentes des particules de l'air extérieur. Bien que leur toxicité ait été à ce jour peu documentée, les données toxicologiques disponibles suggèrent qu'à concentration massique équivalente, elles sont au moins aussi toxiques à court terme que les particules de l'air ambiant extérieur. Notamment, une étude ADEME sortie en mars 2022, nommée TOXinTRANSPORT, fait état de premiers résultats toxicologiques préoccupants qui illustrent des mesures de potentiel oxydant (PO) 4 à 10 fois plus élevées sur le quai et en rame qu'en air ambiant en fond urbain [1] caractérisant le besoin sanitaire de cette étude complémentaire.

Ainsi, dans le cadre de cette campagne de mesure sur le quai du RER A, l'armoire Airparif a été instrumentée avec des analyseurs permettant de suivre en continu les concentrations massiques de particules PM<sub>10</sub> mais aussi le nombre de particules avec des diamètres compris entre 5 nm et 18 µm, incluant la gamme des particules ultrafines (PUF).

La surveillance automatique a été complétée par des prélèvements sur filtre permettant après analyses en laboratoire de qualifier et quantifier la composition chimique des particules carbonées, organiques et inorganiques mais surtout de caractériser la fraction métallique dans ce type d'environnement [2].

Les détails sur les appareils de mesure mis en œuvre et la qualité des résultats, sont présentés en Annexe 1 et Annexe 2.

## 1.4. Période de mesures

**Les années 2020 et 2021 ont été des années très particulières, du fait de la crise sanitaire liée à la Covid-19 et des mesures gouvernementales adoptées pour y faire face.** Ces différentes mesures ont entraîné une **réduction importante des émissions de polluants en air extérieur et fortement impactées la fréquentation annuelle de la gare RER** confirmées par l'historique de fréquentation de la gare Châtelet-Les Halles disponible en Annexe 1. Il a été choisi une période avec une fréquence de train classique, hors congés ou situation spécifique de restriction liée à la crise sanitaire du type confinement ou couvre-feu.

Les mesures ont été réalisées du **04 au 25 octobre 2021**. Les vacances scolaires de la Toussaint 2021 du 24 octobre au 8 novembre, qui présentent un service diminué les jours ouvrés, ont été évitées au maximum, seul le dernier jour de la campagne est concerné. Grâce aux données fournies par la RATP, il a été vérifié que la campagne de mesure a été menée sur une période conforme aux conditions habituelles.

---

<sup>1</sup> 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

## **Les polluants émis à l'extérieur pénètrent à l'intérieur des locaux par infiltration, aération, ventilation.**

L'air extérieur pouvant influencer les niveaux rencontrés en air intérieur par transfert de polluant, les niveaux de fond urbain seront exploités dans l'analyse des résultats.

En air extérieur, les variations des niveaux de pollution d'un jour à l'autre sont liées d'une part à l'évolution des émissions de polluants par les sources locales, mais également aux conditions météorologiques, qui ont une influence sur la dispersion de ces polluants. Sur la période de mesure aucun épisode de pollution n'a été enregistré et la météorologie est en accord avec la saison de campagne qualifié d'automne par Météo France [3].

En termes de qualité de l'air ambiant, seul fait marquant rencontré sur la période de campagne, une montée particulaire d'aérosols secondaires est enregistrée le dimanche 10 octobre, ayant engendré des niveaux soutenus sur toute la journée sans toutefois dépasser les seuils réglementaires.

Le reste du temps les niveaux en particules restent faibles à modérés présentant des moyennes journalières comprises entre 10 et 32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  sur la station de référence Airparif de Paris 1<sup>er</sup>-les Halles.

Sur cette campagne de mesure deux dysfonctionnements ont été rencontrés :

- Le premier concerne le matériel de mesure sur la première journée de campagne de mesure, le lundi 04 octobre du fait d'un problème d'alimentation électrique engendrant de nombreuses coupures électriques.
- Le second dans la nuit du 13 au 14 octobre résulte de l'arrêt d'un ventilateur dans l'interstation Châtelet-Les Halles/Gare de Lyon. Ce dernier est resté hors service jusqu'à la fin de la campagne.

## 2. Niveaux en particules en masse

Ce paragraphe présente les résultats des mesures de particules PM<sub>10</sub> en masse sur le quai du RER A de la gare Châtelet-Les Halles : présentation des statistiques sur la période étudiée et de l'évolution temporelle des relevés à l'échelle horaire et journalière.

Les niveaux observés sur le quai du RER A de la gare Châtelet-Les Halles sont comparés aux données en air extérieur de la station fixe de fond urbain du réseau réglementaire d'Airparif Paris 1<sup>er</sup>-Les Halles. Cette station, située Jardin des Halles dans le 1<sup>er</sup> arrondissement de Paris, se trouve à proximité direct notre point de mesure en EFS. Ils sont également comparés aux mesures permanentes de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires de la RATP (réseau SQUALES), disponibles sur la période de mesure (station Franklin Roosevelt (Ligne 1) et sur la ligne 4 à la station Châtelet).

La typologie « fond » en air extérieur désigne des points de mesure qui ne sont pas sous l'influence directe d'une source spécifique (trafic routier, site industriel). Ils permettent une mesure d'ambiance générale de la pollution, représentative d'un secteur géographique plus ou moins large selon leur environnement (à l'échelle d'un quartier dans Paris).

### 2.1. Niveaux moyens observés en PM<sub>10</sub>

La concentration moyenne en PM<sub>10</sub> relevée au niveau du quai du RER A en gare de Châtelet-Les Halles entre le 4 et le 25 octobre 2021 est de 55 µg/m<sup>3</sup>. Elle est nettement supérieure au niveau moyen relevé en air extérieur (21 µg/m<sup>3</sup> en moyenne sur la même période). **En moyenne sur la période, les concentrations massiques sont près de 3 fois plus élevées en EFS sur le quai du RER A en comparaison au point de référence en air extérieur.**

Les principaux résultats statistiques pour la période de mesure, soit du 4 au 25 octobre 2021 (minimum et maximum horaire, moyenne, médiane et percentiles 25 et 75 des données horaires) sont présentés dans les tableaux suivants, pour le quai RER A de la gare de Châtelet-Les Halles et pour la station de mesure d'air ambiant de Paris 1<sup>er</sup>-Les Halles, pour les particules PM<sub>10</sub>.

<i><b>Statistiques (en µg/m<sup>3</sup>)</b></i>	<b>PM<sub>10</sub></b>	
	<i><b>RER A - Châtelet- Les Halles</b></i>	<i><b>Paris 1er</b></i>
<i><b>Minimum horaire</b></i>	4	6
<i><b>Percentile 25 (P25)</b></i>	34	14
<i><b>Médiane ou Percentile 50</b></i>	55	19
<i><b>Moyenne</b></i>	<b>55</b>	<b>21</b>
<i><b>Percentile 75 (P75)</b></i>	72	24
<i><b>Maximum horaire</b></i>	149	71
<i><b>% de données horaires valides</b></i>	96	99

Tableau 1 : Statistiques des relevés horaires au niveau du quai du RER A de la gare de Châtelet-Les Halles et à la station de référence Paris 1<sup>er</sup>, période du 04/10 au 25/10/2021.

À l'exception du minimum horaire, l'ensemble des paramètres statistiques au niveau du quai du RER A en gare de Châtelet-Les Halles sont supérieurs à ceux de la station Airparif Paris 1<sup>er</sup>-Les Halles. Les taux de fonctionnement des analyseurs de 96 % et de 99 % respectivement pour le RER A et Paris 1<sup>er</sup> sont conformes<sup>2</sup> et valident l'analyse statistique réalisée.

<sup>2</sup> Conforme : le taux des données valides est considéré comme satisfaisant s'il est supérieur ou égal à 85 %



Le maximum horaire relevé au niveau du quai du RER A Châtelet-Les Halles est plus de deux fois supérieur à celui relevé par la station Paris 1<sup>er</sup>, avec 149  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  contre 71  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  au niveau de la station Paris 1<sup>er</sup>.

La variabilité des concentrations en  $\text{PM}_{10}$  au niveau du quai RER A de la gare de Châtelet-Les Halles ainsi qu'à la station de référence Paris 1<sup>er</sup>, est présentée à la Figure 4 par des boîtes à moustaches sur toute la période de mesure, du 4 au 25 octobre 2021. Les boîtes à moustaches permettent de comparer facilement plusieurs grandeurs statistiques. Une boîte à moustaches 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. 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 5.

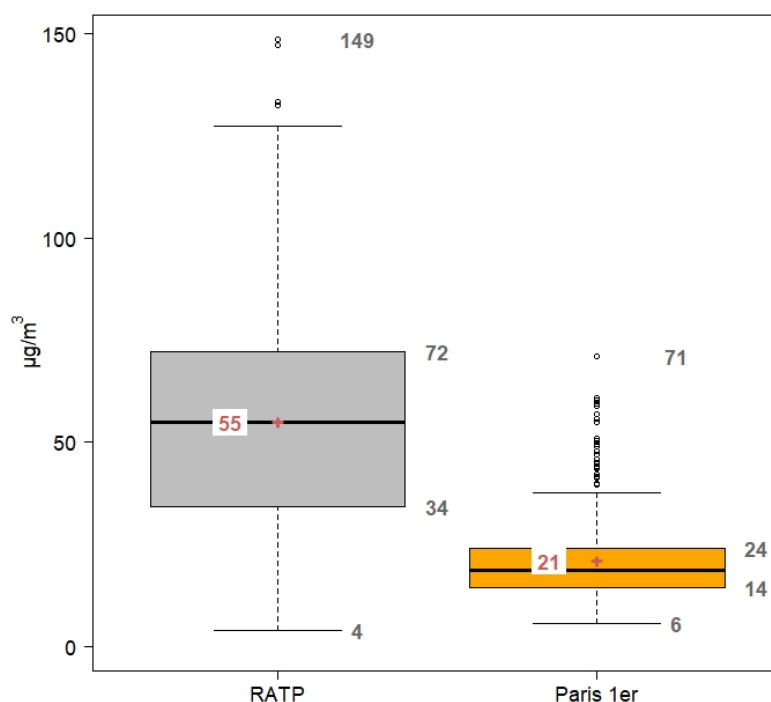


Figure 4 – Boîte à moustaches des relevés horaires en  $\text{PM}_{10}$  (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) au niveau du quai RER A de la gare de Châtelet-Les Halles et à la station Paris 1<sup>er</sup>, du 4 au 25 octobre 2021.

Les relevés horaires en particules  $\text{PM}_{10}$  au niveau du quai du RER A de la gare de Châtelet-Les Halles montrent une répartition « équilibrée<sup>3</sup> » des mesures, avec toutefois quelques maxima horaires isolés (« valeurs atypiques ») élevés. **En considérant toutes les données validées, 50 % des données horaires relevées sont comprises entre 34 et 72  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , pour une moyenne (égale à la médiane) de 55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Le maximum atteint sur le quai du RER A est de 149  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , enregistré le lundi 25 octobre entre 09 et 10h.**

L'étendue des concentrations horaires observées au droit de la station Paris 1<sup>er</sup> est beaucoup plus faible que celles au niveau du quai RER A Châtelet-Les Halles. Les relevés horaires à la station Paris 1<sup>er</sup>, sur la même période, présentent une moyenne de 21  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  avec 50 % des données comprises entre 14 et 24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Le maximum horaire atteint 71  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , le vendredi 15 octobre 2021 entre 10 et 11 h.

<sup>3</sup> 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.

La variabilité des niveaux horaires représentée sur la boîte à moustache obtenue sur le quai du RER A est également comparée sur cette même période à la surveillance permanente de la qualité de l'air réalisée par la RATP dans ses enceintes ferroviaires souterraines (réseau SQALES) dont les données sont disponibles sur l'open data du site de la RATP. Sur cette période, seules les données des stations de métro Châtelet-Les Halles-ligne 4 et Franklin D Roosevelt-ligne 1 sont disponibles. Précisons que les données de la station Auber sur le RER A étaient renseignées non disponibles (N/D) sur l'open data et que les mesures sur les stations RER A de la gare de Châtelet-Les Halles et Nation sont disponibles qu'à partir du 03 janvier 2022.

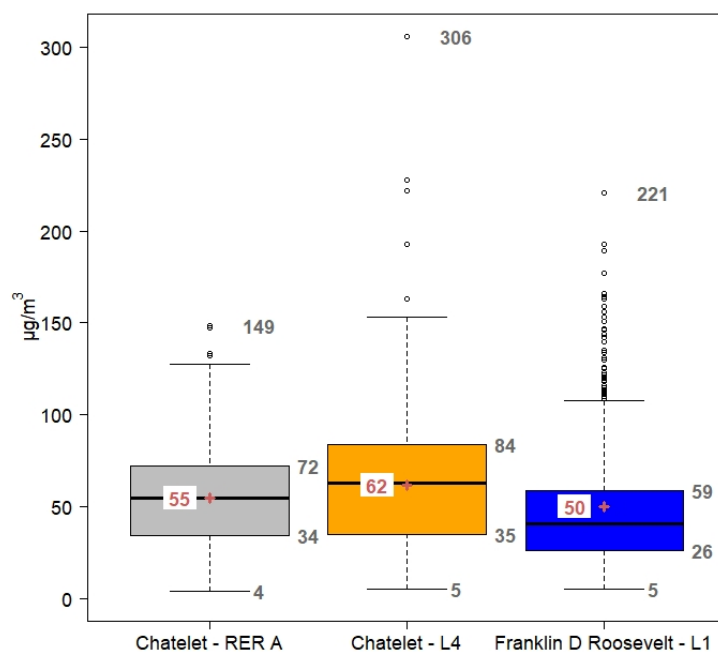


Figure 5 - Boîte à moustaches des relevés horaires en PM<sub>10</sub> (en µg/m<sup>3</sup>) au niveau des quais du RER A de la gare de Châtelet-Les Halles, du métro Ligne 4 de Châtelet-Les Halles et du métro Ligne 1 FD Roosevelt, du 4 au 25 octobre 2021.

En concentration massique PM<sub>10</sub>, le point de mesure de l'étude situé sur le quai du RER A de la gare de Châtelet-Les Halles présente une concentration moyenne mesurée à 55 µg/m<sup>3</sup> comprise entre les points de mesure du réseau SQALES de la ligne 1 de la station FD Roosevelt et de la station Châtelet-Les Halles ligne 4 respectivement de 50 et 62 µg/m<sup>3</sup>.

Les concentrations minimales sont similaires, comprises entre 4 et 5 µg/m<sup>3</sup> avec des boîtes comparables entre ces 3 points de mesure en EFS au regard de l'air extérieur présenté figure 2. Des concentrations horaires extrêmes sont plus importantes sur les métros Ligne 4 et Ligne 1 avec des concentrations horaires maximales respectivement de 306 et 221 µg/m<sup>3</sup> contre 149 µg/m<sup>3</sup> pour le quai du RER A, à l'emplacement du point de mesure d'Airparif. Ces valeurs extrêmes pouvant dépasser les 200 µg/m<sup>3</sup> ne sont rencontrées que quelques heures sur la période de mesure.

**Cette hiérarchie des résultats est à prendre avec précaution. En effet, les appareils de mesure d'Airparif étaient disposés à un emplacement, où ils étaient principalement influencés par les émissions du RER A et moins du RER B. En effet, ce dernier situé sur le même quai, était séparé par un local commercial du site de mesure, protégeant ainsi le site de mesure du RER B. Les niveaux sur le quai du RER Châtelet-Les Halles ne sont pas homogènes. Sur cette campagne, des mesures mises à disposition par la RATP montrent un écart de 40 %.**

## 2.2. Variabilité temporelle des PM<sub>10</sub>

### 2.2.1. Variabilité des relevés horaires pendant la campagne de mesure

Les relevés horaires en particules PM<sub>10</sub> au niveau du quai du RER A à la station Châtelet-Les Halles ainsi qu'à la station Airparif Paris 1<sup>er</sup>-Les Halles sont présentés sur la Figure 6.

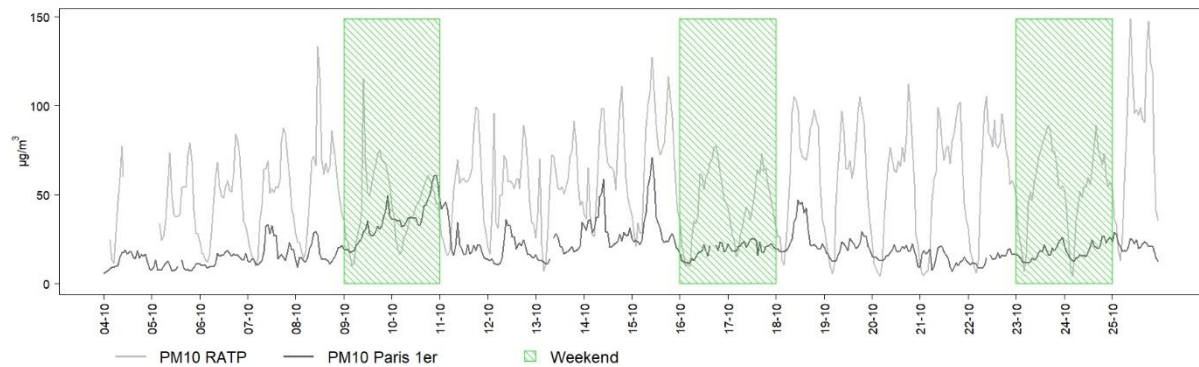


Figure 6 – Évolution des relevés horaires en PM<sub>10</sub>, en µg/m<sup>3</sup> : quai du RER A de la station Châtelet-Les Halles et Station Airparif Paris 1<sup>er</sup>, du 4 au 25 octobre 2021.

Au niveau du quai du RER A de la station Châtelet-Les Halles, les évolutions de concentrations sont globalement similaires d'un jour ouvré à l'autre. **Pour chaque jour ouvré, deux pics de concentrations sont observés, correspondant aux heures de pointes du matin et du soir**, lors des fréquences de train les plus élevées. En semaine, à ces deux pics du matin et du soir s'adjoint sur plusieurs journées de l'étude une hausse des concentrations en PM<sub>10</sub> sur la plage horaire du midi. Ce constat est particulièrement visible la journée du 06 octobre et sur les journées du 19 au 22 octobre. Il n'est pas corrélé à la fréquence des trains, mais pourrait être lié à la fréquentation des voyageurs.

Les niveaux les plus faibles ont été observés la nuit lors de la décroissance nocturne obtenue après l'arrêt du service commercial avec des concentrations au niveau du quai du RER A pouvant rejoindre le niveau de fond en air extérieur. Au cours de la campagne de mesures, des niveaux ponctuellement plus faibles ont été relevés au niveau du quai du RER A de Châtelet-Les Halles qu'au niveau de la station Paris 1<sup>er</sup>, notamment la nuit. Au-delà des incertitudes de mesures plus importantes sur les concentrations faibles, aucune explication n'a été trouvée à ce stade.

**Sur les jours de week-end**, représentés par les cadres verts hachurés sur la figure 2, à l'exception du samedi 09 octobre, **un seul pic modéré est observé autour de 70 µg/m<sup>3</sup> en milieu de journée**.

Au niveau de la station Paris 1<sup>er</sup>, l'évolution des concentrations présente une plus grande variabilité d'une journée à l'autre, en lien avec l'évolution des conditions météorologiques et des émissions de polluants atmosphériques. Sur cette période automnale, les concentrations en particules PM<sub>10</sub> sont globalement plus élevées au cours de la journée que la nuit en lien avec l'activité anthropique parisienne.

**Globalement, les niveaux observés en EFS au niveau du quai du RER A enregistrent une augmentation quand les concentrations en air extérieur augmentent, confirmant l'influence de l'air extérieur sur l'air intérieur des EFS.**

Néanmoins, deux journées de l'étude, le dimanche 10 octobre et la dernière journée de mesure le lundi 25 octobre, ne semblent pas en accord avec le constat précédent.

La journée du dimanche 10 octobre a été marquée par la formation de particules secondaires ayant entraîné une forte hausse des concentrations sur la région incluant la zone géographique de l'étude. Sur cette journée, le maximum journalier est obtenu avec 42 µg/m<sup>3</sup> sur la station de Paris 1<sup>er</sup>. Sur cette même journée, la moyenne journalière obtenue sur le quai du RER est similaire avec 41 µg/m<sup>3</sup> et présente une dynamique différente en comparaison aux autres journées de l'étude, en particulier sur le week-end. L'air extérieur sur cette journée a été caractérisé par des niveaux importants d'aérosols secondaires. Il est possible que ces composés n'aient pas été bien mesurés dans la gare. L'appareil de mesure utilisé est celui préconisé dans le protocole gare de l'INERIS ; son



mode de prélèvement avec un chauffage à 50°C de la colonne de prélèvement de l'analyseur sublimant la fraction particulaire, peut engendrer des sous-estimations dans ces conditions spécifiques. **Une sous-estimation ponctuelle des mesures EFS est probable lors de forte pollution aux aérosols secondaires. Par ailleurs, cette journée est également caractérisée par une concentration en Fer beaucoup plus faible que les autres (cf. partie 3.2.1)**

A contrario, **la journée du lundi 25 janvier** est caractérisée par des niveaux moyens en air extérieur avec une concentration moyenne journalière de 20 µg/m<sup>3</sup> contre 83 µg/m<sup>3</sup> sur le quai du RER. Cette journée présente le ratio le plus important de la campagne de mesure avec **des niveaux PM<sub>10</sub> plus de 4 fois supérieurs en comparaison au site de Paris 1<sup>er</sup>** sans explication spécifique à y apporter.

Les dysfonctionnements de ventilateurs au sein de la gare de Châtelet-Les Halles, remontés par la RATP, ne semblent pas avoir eu d'impact spécifique sur les concentrations enregistrées, avec des ratios entre air extérieur et quai du RER avant et pendant le dysfonctionnement, relativement stables. Ils étaient de 2,7 la journée du 13 octobre avant le dysfonctionnement et de 2,0 la journée du 14 octobre après l'arrêt du ventilateur.

## 2.2.2. Variabilité hebdomadaire

Une comparaison entre les résultats en période commerciale et en période nocturne est présentée au paragraphe Figure 7.

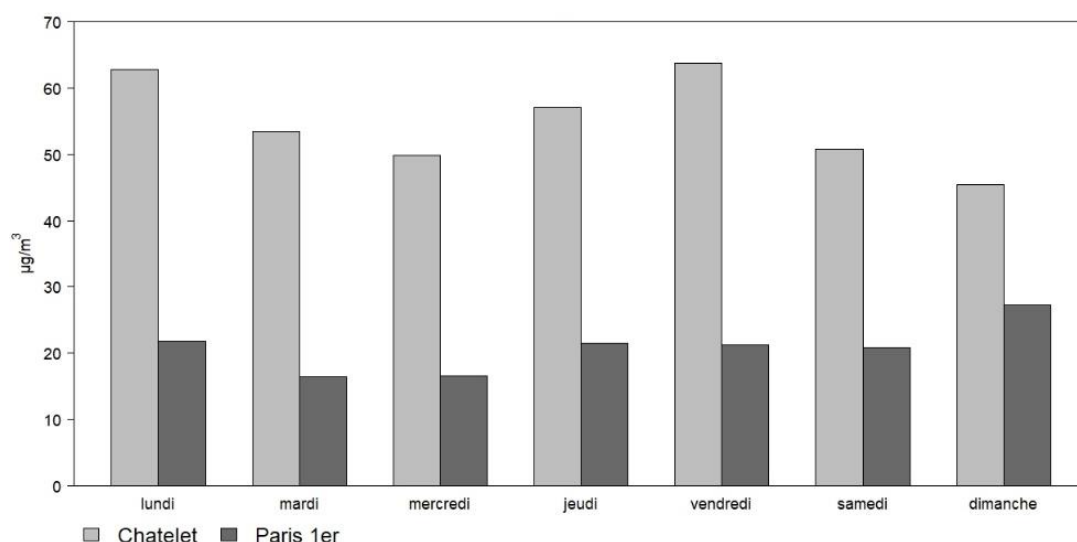


Figure 7 – Évolution des profils hebdomadaires en PM<sub>10</sub> au niveau du quai du RER A Châtelet-Les Halles et à la station Paris 1<sup>er</sup>, du 4 au 25 octobre 2021.

**Les niveaux moyens en particules PM<sub>10</sub>** au niveau de la station air extérieur Paris 1<sup>er</sup> sont relativement stables les jours ouvrés sur la période d'étude, autour de 20 µg/m<sup>3</sup> en moyenne. À l'inverse, les concentrations moyennes relevées au niveau du quai du RER A de la station Châtelet-Les Halles sont plus variables, variant de 45 à 64 µg/m<sup>3</sup>.

Au niveau du quai du RER, les niveaux moyens diminuent sensiblement les samedis et avec une baisse plus marquée les dimanches par rapport aux lundis et aux vendredis, les deux journées les plus fortes sur les jours ouvrés. Cette baisse pour le samedi est d'environ 20 % et est plus marquée le dimanche avec près de 30%.

A la station air extérieur Paris 1<sup>er</sup>, les niveaux sont légèrement plus élevés les dimanches par rapport aux jours ouvrés. Cette hausse dominicale enregistrée sur le site de Paris 1<sup>er</sup> - Les Halles est à mettre en lien direct avec la pollution particulaire rencontrée en air ambiant le dimanche 10 octobre ayant entraîné des niveaux soutenus toute cette journée et ayant pris un poids important sur la moyenne des 3 dimanches de campagne de mesure.

### 2.2.3. Variabilité journalière

La Figure 8 présente les niveaux moyens observés chaque heure de la journée pour les **jours ouvrés** en particules PM<sub>10</sub>, au niveau du quai du RER A Châtelet-Les Halles et à la station Paris 1<sup>er</sup>-Les Halles.

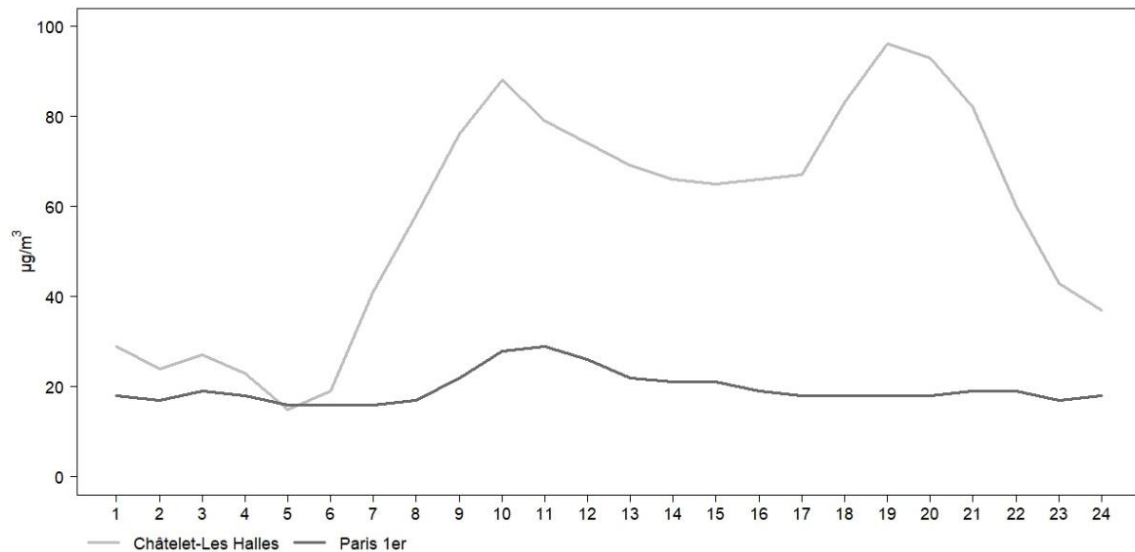


Figure 8 – Profils journaliers moyens en PM<sub>10</sub> (a) des jours ouvrés au niveau du quai du RER A Châtelet-Les Halles et à la station Paris 1<sup>er</sup>-Les Halles, du 4 au 25 octobre 2021.

Les profils en particules PM<sub>10</sub> de la station air extérieur Paris 1<sup>er</sup> et au niveau du quai du RER A de la station Châtelet-Les Halles sont très différents.

Au niveau du quai du RER A, deux pics de particules sont observés aux heures de pointes du matin (9-11h) et du soir (18-20h). Durant les heures de pointes du matin, les niveaux moyens sont de 72 µg/m<sup>3</sup>, et le maximum (76 µg/m<sup>3</sup>) est atteint entre 9 et 10h. Le soir, les niveaux sont plus importants du fait de l'accumulation des particules PM<sub>10</sub> en journée et atteignent 85 µg/m<sup>3</sup> (maximum atteint entre 18 et 19h, avec 89 µg/m<sup>3</sup>). Les niveaux les plus faibles sont enregistrés la nuit (entre 1h et 5h), lors de la fermeture de la gare et sont minimums entre 4 et 5h avec 14 µg/m<sup>3</sup>. Sur cette période sans activité commerciale, une décroissance rapide des niveaux est constatée pour rejoindre le niveau de fond en air extérieur entre 4h et 5h. En moyenne horaire, une baisse des concentrations de plus de 70 µg/m<sup>3</sup> est enregistrées entre 19h et 5h du matin.

Le profil journalier moyen en particules PM<sub>10</sub> de la station air extérieur Paris 1<sup>er</sup> est moins marqué avec un seul pic, aux heures de pointes du matin. A ces heures, le niveau moyen en particules PM<sub>10</sub> est de 25 µg/m<sup>3</sup>. Le reste de la journée, les niveaux varient relativement peu, allant de 16 à 25 µg/m<sup>3</sup>. Les niveaux les plus faibles sont enregistrés la nuit, entre 5h et 6h, avec 16 µg/m<sup>3</sup>.

La Figure 9 présente les moyennes hebdomadaires des concentrations en particules PM<sub>10</sub> 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) au niveau du quai du RER A de Châtelet-Les Halles et à la station Paris 1<sup>er</sup> du réseau Airparif.

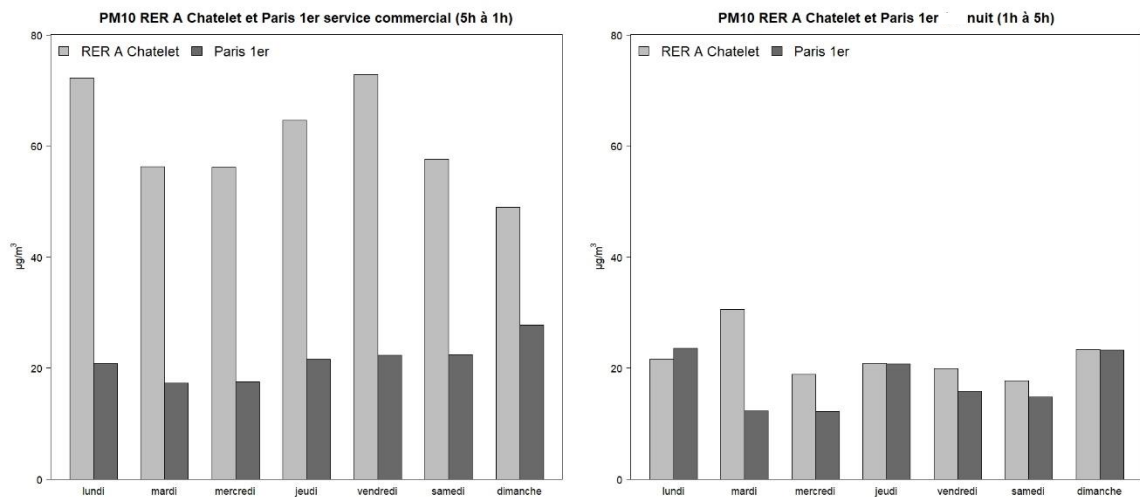


Figure 9 – Évolution des profils hebdomadaires en PM<sub>10</sub> au niveau du quai du RER A de la station Châtelet-Les Halles et à la station Paris 1<sup>er</sup>. Service commercial (5 à 1h) à gauche, Nuit (1 à 5h) à droite.

Au niveau du quai du RER A de la station Châtelet-Les Halles, les niveaux présentent une grande variabilité lors du service commercial, allant de 56 µg/m<sup>3</sup> le mercredi à 73 µg/m<sup>3</sup> le vendredi. Les niveaux nocturnes relevés durant la période de mesures sont largement plus faibles que ceux relevés durant le service commercial et proches des relevés de la station Paris 1<sup>er</sup>. Seule la nuit du mardi enregistre un écart significatif entre le RER et Paris-1<sup>er</sup>, illustrant de probables travaux intervenus dans la gare de Châtelet-Les Halles la deuxième semaine de campagne.

**Les niveaux en particules PM<sub>10</sub>** relevés par la station Airparif de référence Paris 1<sup>er</sup> sont globalement stables les jours ouvrés et le week-end lors du **service commercial**, variant de 17 (le mardi) à 28 µg/m<sup>3</sup> (le dimanche, du fait de la pollution du dimanche 10 octobre identifiée dans les parties 2.2.1 et 2.2.2 jouant un poids important sur cette journée). Les niveaux nocturnes sont du même ordre de grandeur compris entre 12 et 24 µg/m<sup>3</sup> que ceux relevés durant le service commercial.

Les ratios journaliers entre air extérieur et le quai du RER sont compris entre 1,8 et 3,4 sur les heures de service commercial contre 0,9 et 2,6 sur les heures de nuit illustrant le fort impact du trafic des trains et des passagers sur la qualité de l'air au niveau du quai du RER A de la gare de Châtelet-Les Halles.

## 3. Composition chimique des particules

### PM<sub>10</sub>

#### 3.1. Teneurs des composés analysés dans les particules

De manière générale, les particules sont composées des cinq types d'éléments suivants : le carbone élémentaire (EC), les ions, la matière organique (dont le carbone organique (OC)), les métaux et les poussières minérales. Les métaux sont clairement caractéristiques des enceintes ferroviaires souterraines, ils sont notamment issus des systèmes de freinage. Ils sont également présents dans l'air extérieur mais en nettement moindre quantité. Les mesures de composition des particules ont concerné ces différents éléments avec un focus spécifique sur l'analyse des métaux.

Ces concentrations ont été étudiées dans les particules PM<sub>10</sub> au niveau du quai du RER A de la station Châtelet-Les Halles. Des mesures journalières ont été réalisées durant l'ensemble de la campagne de mesures, du 5 au 25 octobre. Le prélèvement du lundi 4 octobre a dû être invalidé suite à une coupure de courant.

Ces prélèvements journaliers ont été réalisés sur la période d'ouverture de la gare au public, à savoir de 5 h à 1h.

L'analyse en laboratoire des prélèvements sur filtres réalisés a permis de caractériser les concentrations auxquelles sont exposés les voyageurs en :

- Carbone élémentaire et Carbone organique
- Anions et Cations
- Poussière minérale dont la silice qui a fait l'objet d'une analyse spécifique
- Métaux sur 31 composés métalliques dont les onze métaux déjà étudiés dans le cadre des études SNCF menées par Airparif [2] référencés par l'ANSES [4] : Baryum, Fer, Cuivre, Plomb, Zinc, Antimoine, Manganèse, Nickel, Arsenic, Cadmium et Chrome.

Les mesures brutes des analyses communiquées par les laboratoires sont disponibles en Annexe 3.

La masse des PM<sub>10</sub> est reconstituée en faisant la somme des masses des composés analysés.

Les métaux ont été choisis conformément à la littérature [4] et ont fait l'objet d'une analyse à large spectre visant à identifier de possibles sources propres à l'environnement du quai du RER A de la gare de Châtelet-Les Halles.

### 3.1.1. Contribution et niveaux moyens observés des composés chimiques

En air extérieur, les différents composés présents dans les particules (carbone suie, carbone organique, inorganique, etc.) ont un effet sanitaire plus ou moins prononcé sur la santé respiratoire et cardiovasculaire ainsi que sur le taux d'hospitalisation et de mortalité. De plus, ils ont également des effets à long terme sur la santé neurologique (développement des performances cognitives de l'enfant) et sur la santé périnatale (faible poids de naissance) [5].

**En air extérieur, les niveaux de preuves les plus forts d'effets néfastes pour la santé concernent les particules organiques associées au carbone suie dans les processus de combustion. Les dernières campagnes de mesures en EFS ont montré des niveaux soutenus en métaux [1, 2, 4 et 6], ces derniers feront l'objet d'une analyse spécifique dans la partie suivante.**

L'analyse des données de composition chimique est basée sur de nombreuses hypothèses de calcul pour réaliser le bouclage sur la concentration massique en  $PM_{10}$ . Ces hypothèses sont tantôt basées sur les postulats de l'air extérieur tantôt sur les publications scientifiques d'études réalisées en EFS.

La méthodologie utilisée pour le traitement et l'analyse des données de composition chimique des particules  $PM_{10}$  est basée sur une étude réalisée sur le métro de la ville de Barcelone en 2018 [6]. Pour réaliser le bouclage en masse, les métaux majoritaires identifiés sont considérés exclusivement sous forme d'oxyde. Pour le fer, Fe est donc considéré exclusivement présent sous la forme  $Fe_2O_3$  dans les particules mesurées dans les enceintes ferroviaires souterraines. Cette hypothèse engendre des incertitudes puisque cet élément peut aussi être sous Fe et  $Fe_3O_4$ . Cette hypothèse peut aussi impliquer une sous-estimation de EC par rapport à OC car des fortes concentrations de  $Fe_2O_3$  favorisent l'oxydation de EC à faible température.

**Les aérosols carbonés sont souvent désignés par le terme de « suies ».** En air ambiant, ils sont formés lors des combustions et sont composés de 50 à 70 % de carbone élémentaire, entouré d'une enveloppe de carbone organique composée d'un mélange complexe de composés. Cette matière organique peut comporter une grande variété de familles organiques (hydrocarbures aliphatiques, esters, alcools, cétones, aldéhydes, acides, HAP, PCB...), dont certaines sont très toxiques. L'hypothèse concernant la matière organique est l'utilisation du facteur de conversion utilisé en air ambiant défini à 1,8 sur la région francilienne pour le passage de l'élément carbone organique mesuré à la matière organique, faute de données en EFS. L'utilisation de ce facteur pour le calcul de la MO au niveau du quai du RER A peut engendrer des biais, du fait d'une composition de la matière organique différente de l'air ambiant.

Pour finir, la silice, mesurée sous forme ionique, est considérée sous forme de  $SiO_2$ , dioxyde de silicium plus communément appelée « la silice ».

Avec ces hypothèses de calculs, la densité moyenne théorique des particules obtenues sur le quai RER A de la gare Chatelet-Les Halles est de 3,51 ; cette densité théorique est obtenue en moyennant chaque densité élémentaire reprise dans le tableau 2. Cette densité théorique est légèrement supérieure à celle rencontrée sur l'étude de Barcelone définie entre 2,2 et 3,2.

La densité en air extérieur est généralement comprise en région francilienne entre 1 et 2. Le facteur proche de 3 observé entre l'air ambiant et le quai du RER A vient essentiellement des oxydes métalliques présents dans les EFS.

Le détail du calcul de densité théorique est repris dans le Tableau 2 :

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

Tableau 2 : Densité individuelle des composants des particules mesurés sur le quai du RER A de la gare de Châtelet-Les Halles sur les heures de service.

En considérant une densité moyenne de 3,51 à partir des densités individuelles repris du tableau 2, la régression linéaire entre les mesures de référence PM<sub>10</sub> TEOM, présentées dans la partie 2, et les données calculées à partir de ces densités permet d'estimer la robustesse de ce traitement.

La Figure 10 illustre cette régression linéaire entre les concentrations massiques mesurées durant les heures de service et le bouclage en masse obtenu à partir des données de composition chimique.

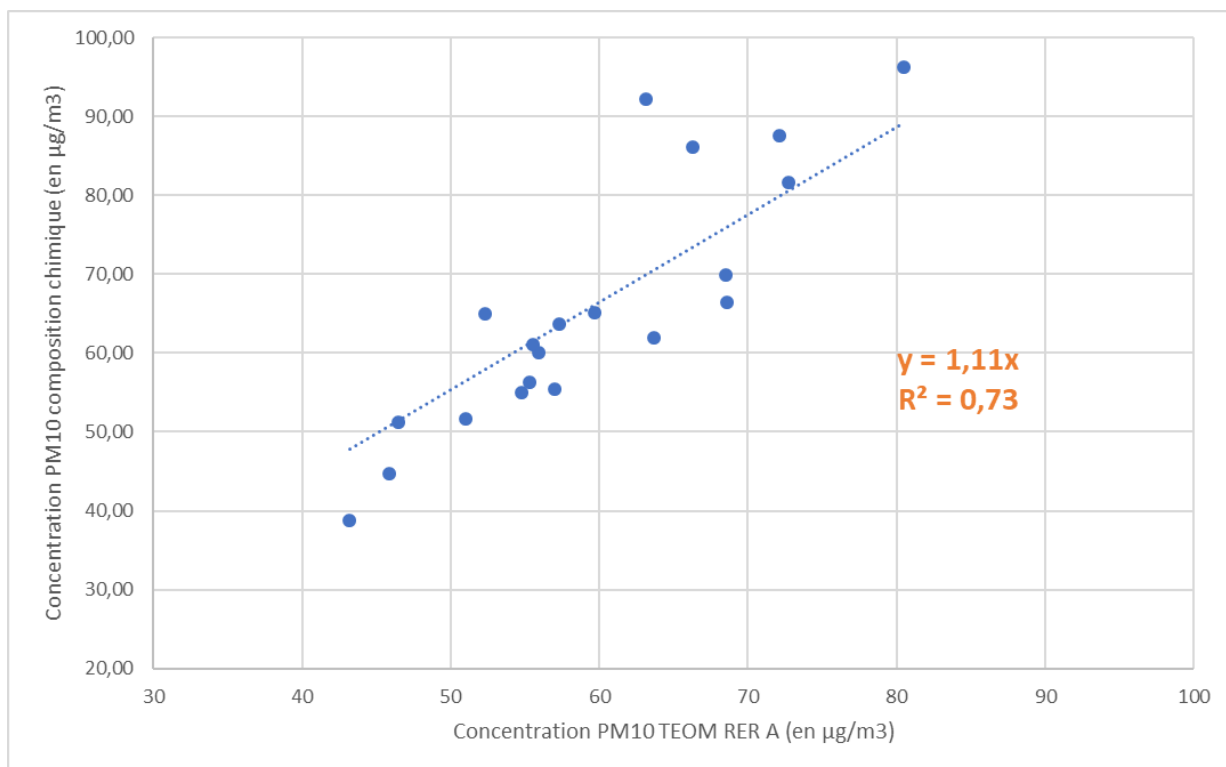


Figure 10 - Régression linéaire entre les concentrations PM<sub>10</sub> du TEOM et les concentrations PM10 théoriques basées sur le bouclage en masse de la composition chimique.

La Figure 10 illustre une légère surestimation de l'ordre de 10 % (pente à 1,11) de cette méthode pour reconstituer la concentration de PM<sub>10</sub> avec un facteur de corrélation correct de 0,73. L'incertitude de mesure sur le TEOM étant établie à 15 %, cette méthode est jugée conforme aux attentes.

À partir de ces hypothèses de calcul, il est donc possible de réaliser un graphique représentant les contributions de chacune des natures des particules identifiées, cette répartition est illustrée Figure 11.

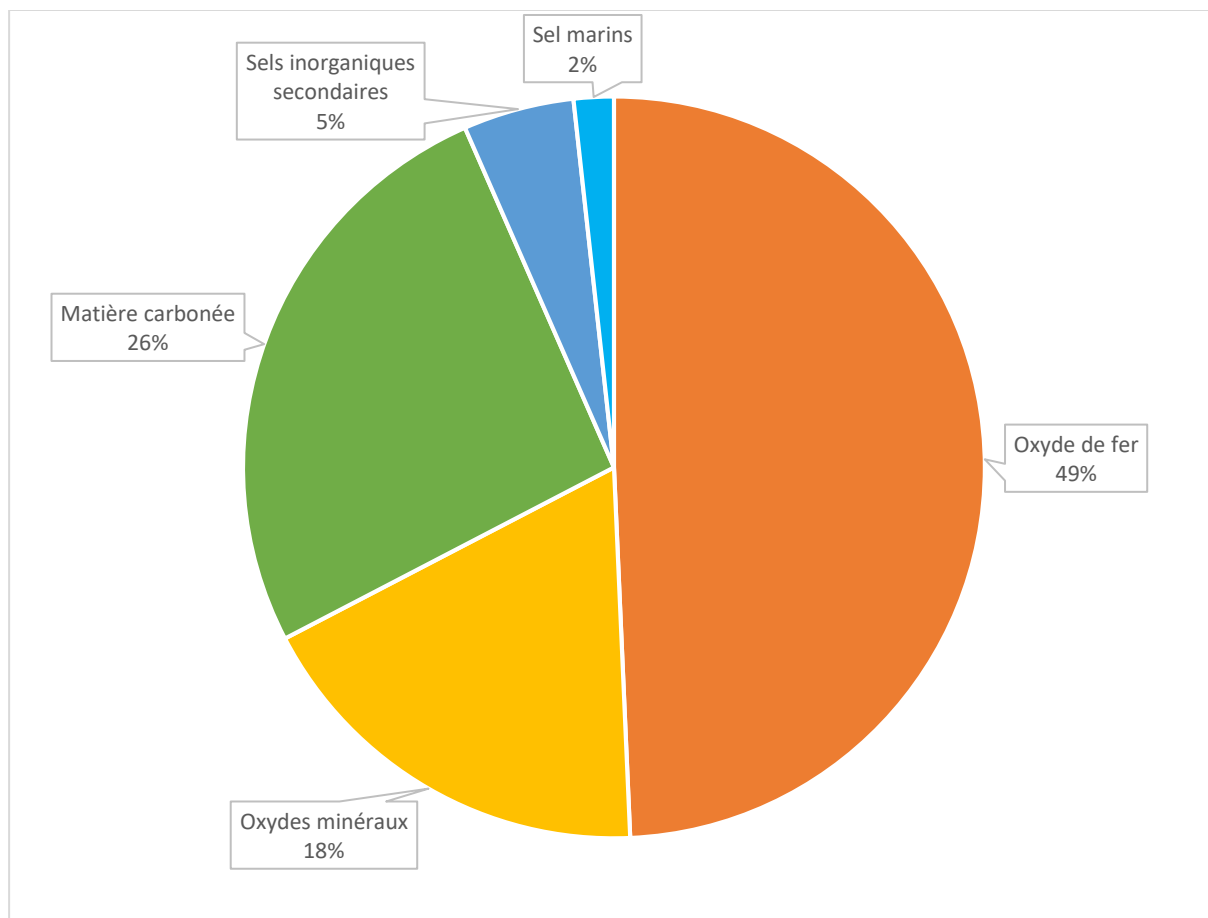


Figure 11 – Contributions moyennes de chaque nature de particule dans les PM<sub>10</sub> sur le quai du RER A de Chatelet-Les Halles sur les heures de services.

Sur les heures de services de la RATP, il apparaît clairement que le fer, considéré à l'état d'oxyde de fer, est le contributeur majoritaire à la masse des particules PM<sub>10</sub>. La contribution de l'oxyde de fer est estimée à 49 % de la masse moyenne des particules PM<sub>10</sub> sur cette plage horaire fréquenté par des voyageurs.

La deuxième contribution la plus importante est la matière carbonée constituée du carbone élémentaire et de la matière organique (26 % de la masse des PM<sub>10</sub>).

Les oxydes minéraux, les sels inorganiques secondaires et les sels marins représentent respectivement 18 %, 5 % et 2 % de la composition des particules PM<sub>10</sub> au niveau du quai du RER A.

Cette composition moyenne est très différente de celle mesurée par Airparif en air extérieur. La composition des particules est relativement stable dans le temps avec peu de variabilité enregistrée au cours de ces 10 dernières années, notamment sur la composition des PM<sub>2.5</sub>. Ainsi, la Figure 12 présente la composition chimique des particules PM<sub>10</sub> mesurée en 2010.

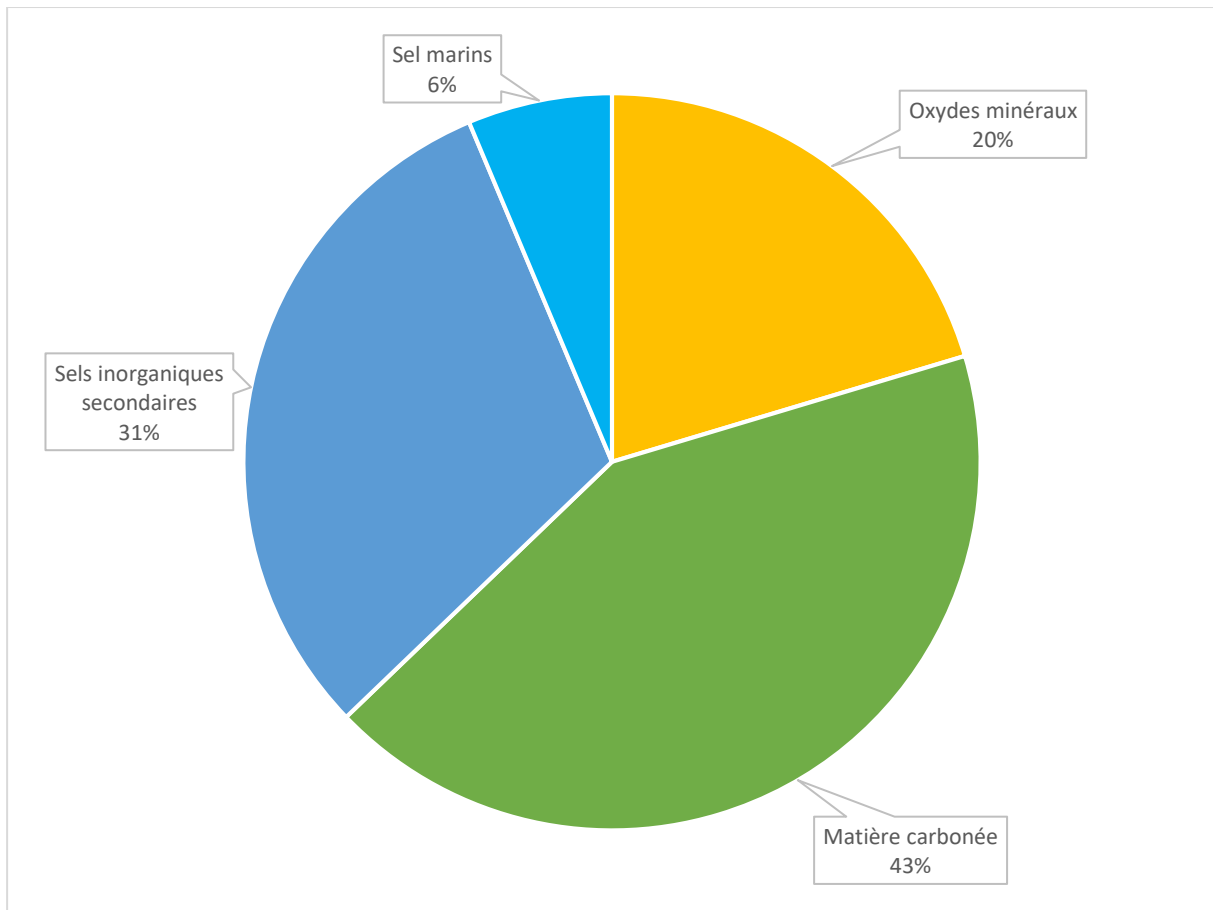


Figure 12 – Contributions moyennes de chaque nature de particule des PM<sub>10</sub> en situation de fond urbain parisien.

La très forte proportion **d'oxydes de Fer au niveau du quai du RER A de Châtelet-Les Halles, représentant près de 50 % de la masse des PM<sub>10</sub> qui ne sont pas retrouvés dans l'air extérieur, illustre une source spécifique dans cet environnement.**

Les niveaux moyens des 15 espèces identifiées sur le quai du RER A sont illustrés dans la Figure 13.

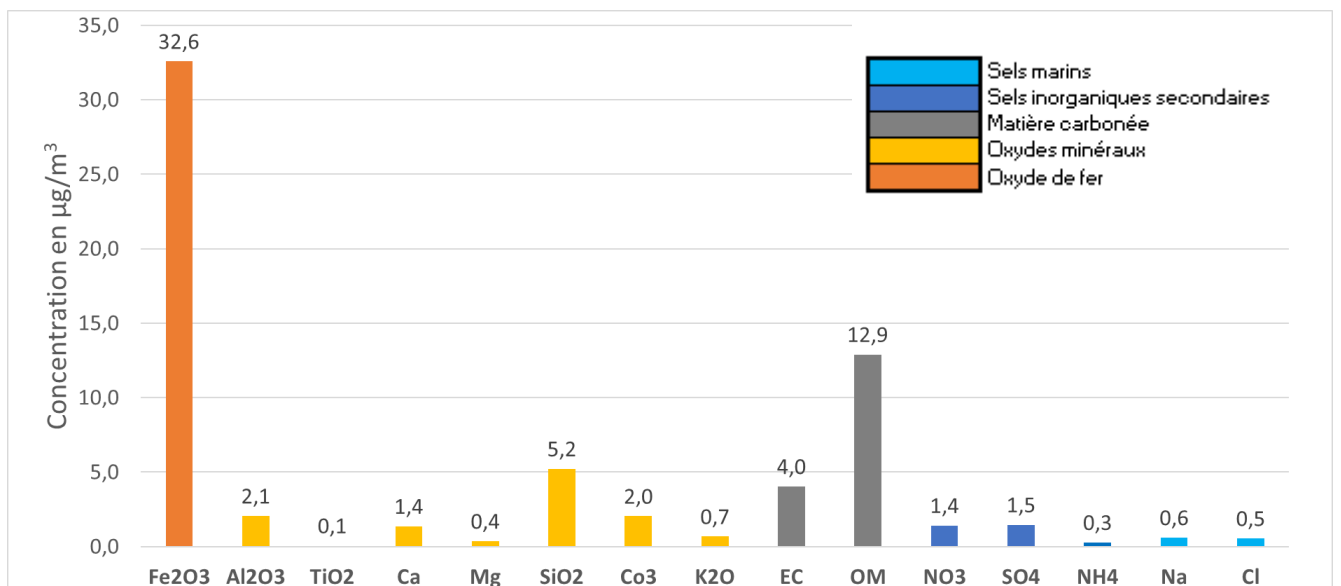


Figure 13 – Concentrations moyennes de chaque nature de particule des PM<sub>10</sub> sur le quai du RER A de Chatelet-Les Halles sur les heures de services.

Au niveau du quai du RER A de la gare de Châtelet-Les Halles, la Figure 13 explicite la contribution prédominante du fer oxydé (33 µg/m<sup>3</sup>) à la concentration totale de particules PM<sub>10</sub>. Le freinage en est la source principale.



La matière carbonée composée du carbone élémentaire et de la matière organique représente  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La concentration massique de ces composés comme celle des sels inorganiques semble du même ordre de grandeur qu'en air extérieur, l'origine potentielle de ces natures de particules. En air extérieur, leurs sources sont notamment liées aux sources de combustion (trafic routier et chauffage résidentiel).

La source de silice, élément très oxydant et irritant pour les voies respiratoires, représentant  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , n'a pas été identifiée.

### 3.1.2. Variabilité journalière des composés chimiques

Les éléments présentés dans la partie 3.1.1 peuvent être illustrés sur une résolution temporelle plus fine, à l'échelle de la journée sur les heures de service commercial. La Figure 14 illustre cette évolution journalière des 15 éléments considérés en comparaison à la concentration totale mesurée par la mesure automatique par un TEOM. Une incertitude de 15 % est affectée à cette dernière et matérialisée par des barres d'erreur sur la courbe jaune de la figure 9.

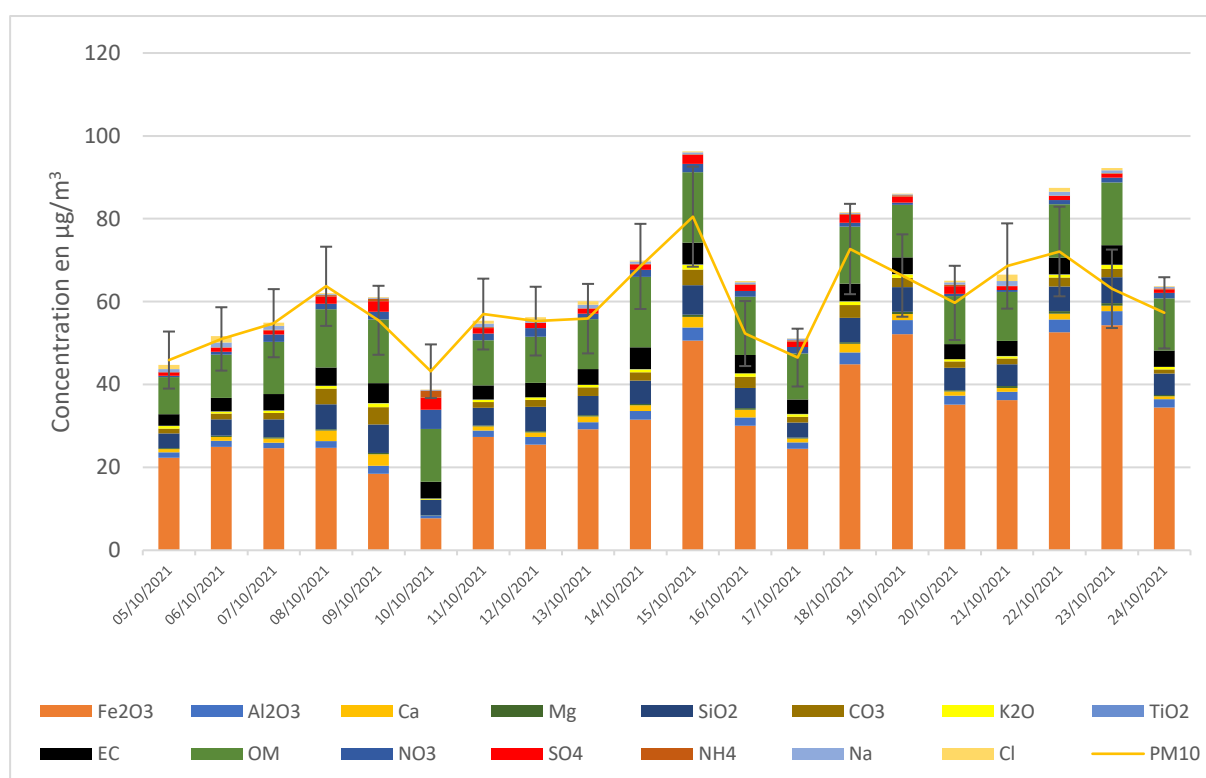


Figure 14 – Évolution des concentrations moyennes journalières de chaque nature de particule des  $\text{PM}_{10}$  sur le quai du RER A de Châtelet-Les Halles sur les heures de service comparée à la mesure TEOM sur le quai du RER A.

L'évolution temporelle est principalement liée à la variation des concentrations d'oxydes de fer d'un jour à l'autre au niveau du point de mesure du quai du RER A. La contribution des autres éléments est moindre et relativement stable d'une journée à l'autre.

Les différences entre la somme des composés chimiques des particules et la mesure TEOM n'est pas significative du 08 au 14 octobre et sur les journées du 20 et 21 octobre. Les autres journées peuvent présenter des écarts plus notables avec la mesure TEOM. La surestimation observée sur certaines de ces journées est corrélée avec l'évolution des oxydes de fer, potentiellement surestimée sur ces quelques journées, l'oxyde de fer, pouvant ne pas être la seule forme chimique du fer dans les enceintes ferroviaires souterraines.

La journée du 10 octobre présente un caractère atypique avec une sous-estimation du bouclage en masse. Ce point a été relevé lors de l'analyse en masse. Cette journée présente les niveaux d'oxyde de fer les plus faibles de la campagne sans événement particulier à noter au niveau du service commercial de la RATP. Aucune explication n'a été trouvée sur cette journée.

## 3.2. Répartition des métaux sur le quai du RER A

La figure suivante (Figure 15) représente la répartition moyenne des composés mesurés entre le 5 et le 24 octobre 2021 (20 journées disponibles). Il est à noter que le fer, le métal majoritaire mesuré, est explicité sur les figures précédentes de composition chimique des particules. Les autres métaux présentés ici sont rassemblés dans les oxydes minéraux dans la composition chimique de la figure 11.

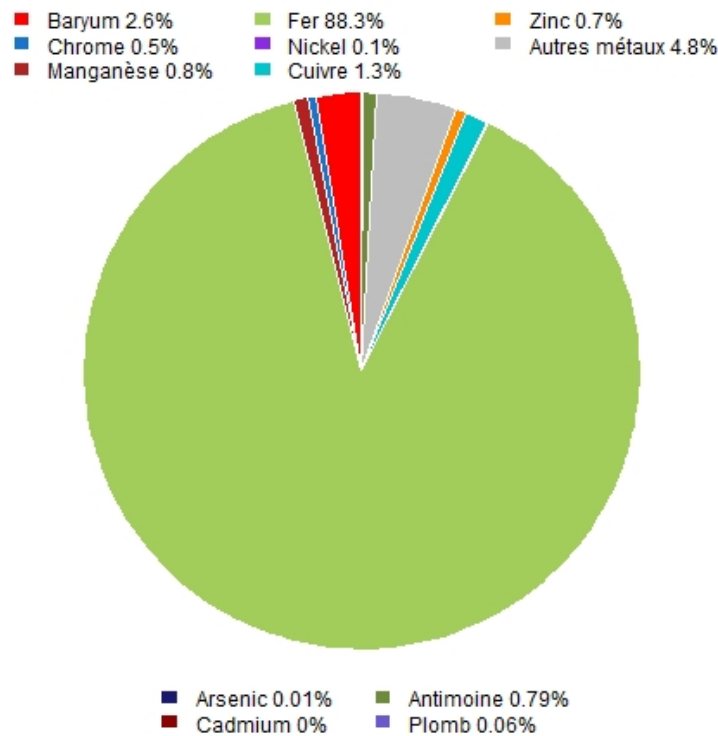


Figure 15 – Part de chaque métal dans les relevés en particules, en moyenne des mesures entre le 4 et le 25 octobre 2021, au niveau du quai du RER A de la station Châtelet-Les Halles.

Parmi les 31 métaux étudiés, le **Fer** est l'élément majoritaire : il représente 88 % des métaux mesurés au niveau du quai du RER A de la station Châtelet-Les Halles.

Le métal le plus abondant ensuite est le **Baryum**, mais dans des proportions bien plus faibles que le fer : 2,6 % en moyenne.

Vient ensuite le **Cuivre**, qui représente en moyenne 1,3 % des métaux mesurés dans les particules PM<sub>10</sub>.

Le **Manganèse** est présent dans de plus faibles proportions que le baryum et le cuivre : 0,8 % en moyenne.

Suivent ensuite le **Zinc** (0,7 % en moyenne), le **Chrome** (0,5 %) et le **Nickel** (0,1%).

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

La part « autres métaux » représente 4,8 % des métaux avec 19 composés, dont la contribution de chacun est négligeable par rapport aux autres métaux. Ils regroupent les éléments ci-contre : Ag, Be, Bi, Ce, Co, Cs, La, Li, Mo, Pd, Rb, Se, Sr, Th, Ti, U, Sc, V et Al. Leur contribution collective est cependant à considérer.

**Tous les résultats d'analyses sont disponibles en Annexe 3.**

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 caténaires (système d'alimentation). Il est également présent dans les semelles de frein et par conséquent il peut être émis lors du freinage.

Les concentrations des composés métalliques observées sont cohérentes avec les sources identifiées et les résultats de la littérature. D'après les résultats dans les autres réseaux ferroviaires français (hors réseau francilien), le fer est systématiquement le métal dominant en termes de concentrations, suivi du cuivre, du zinc, de l'antimoine et du manganèse.

Les résultats à l'échelle des grandes villes mondiales mettent également en avant le baryum, le nickel et le chrome. Ainsi les observations au niveau du quai du RER A de la station Châtelet-Les Halles sont cohérentes avec les résultats dans des environnements similaires.

## 4. Nombre de particules et particules ultrafines

### 4.1. Mesures par comptages optiques (FIDAS)

#### 4.1.1. Niveaux moyens par comptage optique (FIDAS)

Les principaux résultats statistiques sur la période, soit du 4 au 25 octobre 2021 (minimum et maximum horaire, moyenne, médiane et percentiles 25 et 75 des données horaires) sont présentés dans les tableaux suivants, pour le quai RER A de la gare de Châtelet-Les Halles et pour la station de mesure de l'air ambiant d'Airparif de Paris 1<sup>er</sup>, pour les comptages optiques de particules qui permettent de mesurer le nombre des particules avec un diamètre compris entre 180 nm et 18 µm.

<i>Statistiques (Part/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Comptage optique des particules (de 180 nm à 18 µm)</i>	
	<i>RER A - Châtelet- Les Halles</i>	<i>Paris 1er</i>
<i>Minimum horaire</i>	12	7
<i>Percentile 25 (P25)</i>	168	120
<i>Médiane ou Percentile 50</i>	248	226
<i>Moyenne</i>	<b>268</b>	<b>269</b>
<i>Percentile 75 (P75)</i>	340	381
<i>Maximum horaire</i>	813	1039
<i>% de données horaires valides</i>	94	100

Tableau 3 : Statistiques des relevés horaires des comptages optiques du nombre de particules entre 180 nm et 18 µm) au niveau du quai du RER A de la gare de Châtelet-Les Halles et à la station de mesure en air ambiant d'Airparif - Paris 1<sup>er</sup>, période du 04/10 au 25/10/2021.

L'ensemble des paramètres statistiques est similaire entre le quai du RER A en gare de Châtelet-Les Halles et la station Airparif Paris 1<sup>er</sup>.

En moyenne sur la période de mesure, environ 270 particules par centimètre cube ont été relevées au niveau du quai du RER A Châtelet-Les Halles et sur la station Paris 1<sup>er</sup>. Le maximum horaire relevé au niveau de la station Paris 1<sup>er</sup> est supérieur à celui relevé sur le quai du RER A Châtelet-Les Halles.

Sur cette gamme granulométrique de comptage des particules présentant un diamètre compris entre 180 nm et 18 µm (ne faisant pas état du nombre de particules ultrafines), **le nombre de particules est similaire entre le quai du RER et les relevés sur la station Paris 1<sup>er</sup>.**

**Sur cette gamme de taille, les particules les plus grosses, supérieures à 2.5 µm, sont très peu représentées en nombre, mais contribuent fortement aux concentrations massiques du fait de leur taille, leur nature et de leurs densités associées, principalement minérale pour le site de Paris 1<sup>er</sup> et métallique pour le point de mesure situé sur le quai du RER A (identifiée dans la partie 3.2.1).**

La boîte à moustaches des relevés horaires de comptage optique au niveau du quai RER A Châtelet-Les Halles est présentée Figure 16, ainsi que celui des relevés de la station Airparif Paris 1<sup>er</sup>, sur l'ensemble de la période de mesure (4 - 25 octobre 2021).

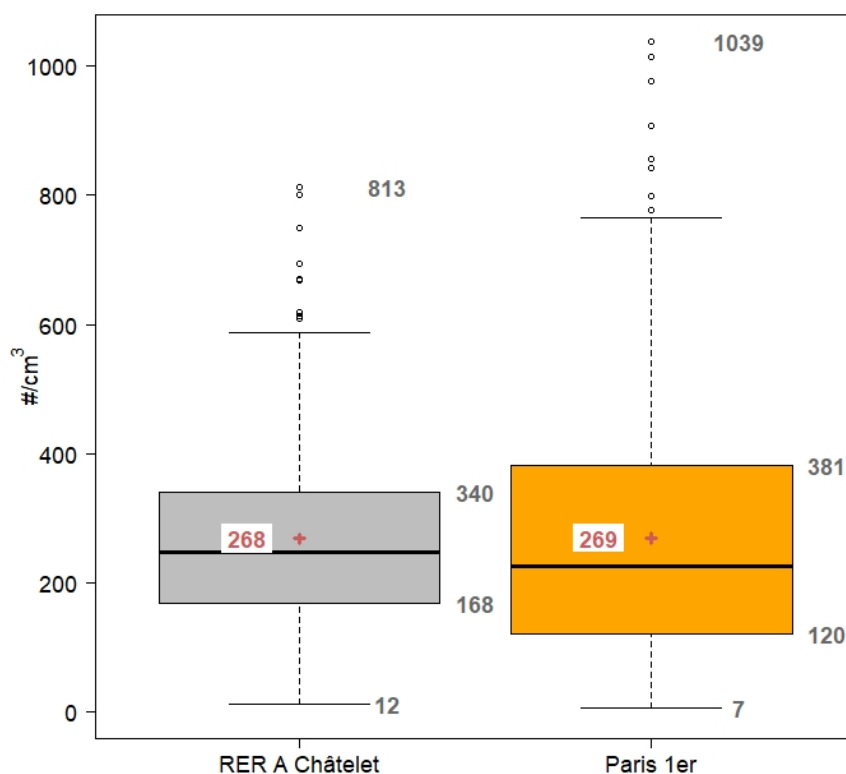


Figure 16 – Boîtes à moustaches des relevés horaires du comptage optique (en particules/cm<sup>3</sup>) à la gare RER A Châtelet-Les Halles et à la station Paris 1<sup>er</sup>, du 4 au 25 octobre 2021.

Les deux boîtes à moustaches des relevés horaires en particules comprises entre 180 nm et 18 µm montrent des répartitions équilibrées malgré quelques valeurs atypiques. Sur l'ensemble de la période de mesures, le nombre de particules moyen a été de 268 particules/cm<sup>3</sup> au niveau du quai du RER A de la station Châtelet-Les Halles et de 269 à la station de référence Paris 1<sup>er</sup>.

50 % des données sont comprises entre 168 et 340 particules/cm<sup>3</sup> au niveau du quai du RER A à la station Châtelet-Les Halles, et entre 102 et 381 particules/cm<sup>3</sup> à la station Paris 1<sup>er</sup>. Les maximas, 813 particules/cm<sup>3</sup> au niveau du quai du RER A à la station Châtelet-Les Halles et 1039 particules/cm<sup>3</sup> à la station Paris 1<sup>er</sup>, ont été atteints le dimanche 10 octobre entre 22 et 23h. Ces résultats seraient en lien avec l'augmentation des concentrations en particules PM<sub>10</sub> au cours de la journée du 10 octobre, journée au cours de laquelle l'indice de la qualité de l'air des particules PM<sub>10</sub> était qualifié de mauvais sur l'ensemble de Paris et sur une bonne partie de l'Île-de-France.

**L'homogénéité du nombre de particules entre 180 nm et 18 µm (comptage optique) entre Paris 1<sup>er</sup> et le quai du RER A observée en moyenne se retrouve sur la dispersion des valeurs horaires.**

## 4.1.2. Variabilité temporelle des comptages optiques

Les relevés horaires des nombres de particules entre 180 nm et 18 µm (comptage optique) au niveau du quai du RER A à la station Châtelet-Les Halles et à la station de mesure d'air ambiant Airparif - Paris 1<sup>er</sup> sont présentés à la Figure 17.

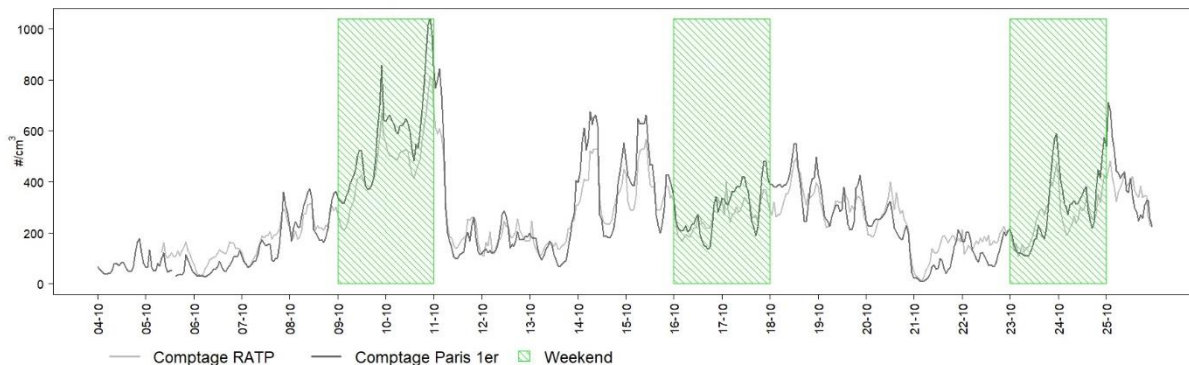


Figure 17 – Évolution des relevés horaires des nombres de particules entre 180 nm et 18 µm (comptage optique), en part/cm<sup>3</sup> sur le quai du RER A de la station Châtelet-Les Halles et la station en air ambiant Airparif - Paris 1<sup>er</sup>, du 4 au 25 octobre 2021.

Contrairement aux concentrations massiques en particules PM<sub>10</sub>, relativement stables d'un jour à l'autre sur le quai du RER A, le nombre de particules obtenu par comptage optique est plus variable d'une journée à l'autre. Les évolutions du nombre de particules relevées sont très proches de celles observées en air extérieur à la station d'Airparif de Paris 1<sup>er</sup>.

Les maxima ont été relevés le dimanche 10 octobre pour les deux stations, ce qui s'explique d'une part par une dégradation globale de la qualité de l'air au cours de cette journée (formation d'aérosols secondaires et import de composés précurseurs de particules depuis l'extérieur de l'Île-de-France), entraînant une augmentation du nombre de particules supérieures à 200 nm sur l'ensemble de l'Île-de-France.

Cette cohérence au niveau de la dynamique et de la justesse du comptage optique sur les deux sites étudiés conforte l'analyse réalisée dans la partie précédente et illustre une **forte influence de l'air extérieur sur le nombre de particules présentant des diamètres compris entre 180 nm et 18 µm retrouvées au niveau du quai du RER avec un import continu des polluants de l'air extérieur vers les EFS.**

**La fraction grossière** (particules comprises entre 2.5 et 10 µm) est essentiellement composée d'espèces issues de **processus mécaniques** tels que l'abrasion des freins ou l'usure des caténaires pouvant être observée sur la composition chimique des PM<sub>10</sub> sur le quai du RER. **Les composés issus des processus de combustion et les composés secondaires formés par réactions chimiques identifiées en air extérieur se répartissent plutôt dans la fraction fine inférieure à PM<sub>2.5</sub>.** Ces composés secondaires formés en extérieur semblent être retrouvés sur les données de comptage optique la journée du 10 octobre sur le quai du RER A dans la gamme 180 nm à 2.5 µm.

Les autres sources de particules identifiées au niveau du quai du RER A de la gare de Châtelet-Les Halles telles que les sources métalliques caractérisées dans la partie 3, présentent une forte densité volumique et se retrouvent dans les particules de diamètres importants. Elles ne sont pas significatives en termes de nombre de particules sur cette gamme granulométrique.

## 4.2. Comportement des PUF sur le quai du RER

### 4.2.1. Nombre moyen de PUF

Les principaux résultats statistiques (minimum et maximum horaire, moyenne, médiane et percentiles 25 et 75 des données horaires) sont présentés dans les tableaux suivants, pour le quai RER A de la gare de Châtelet-Les Halles et pour la station Paris 1<sup>er</sup>, du 4 au 25 octobre 2021 pour les PUF. Ces données résultent de la somme des comptages des 83 classes enregistrées par l'analyseur SMPS comprises sur la gamme granulométrique représentative des PUF soit de 5 nm à 100 nm.

	PUF (de 5 nm à 100 nm)	
<b>Statistiques (en part/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>RER A - Châtelet- Les Halles</b>	<b>Paris 1er</b>
<b>Minimum horaire</b>	939	526
<b>Percentile 25 (P25)</b>	8216	7170
<b>Médiane ou Percentile 50</b>	111848	9929
<b>Moyenne</b>	<b>11961</b>	<b>10793</b>
<b>Percentile 75 (P75)</b>	15220	13539
<b>Maximum horaire</b>	26425	31855
<b>% de données horaires valides</b>	94	100

Tableau 4 – Statistiques des relevés horaires des comptages des PUF au niveau du quai du RER A de la gare de Châtelet-Les Halles et à la station de référence Paris 1<sup>er</sup>, période du 04/10 au 25/10/2021.

À l'exception du maximum horaire, l'ensemble des paramètres statistiques au niveau du quai du RER A en gare de Châtelet-Les Halles sont supérieurs à ceux de la station Airparif Paris 1<sup>er</sup>-Les Halles. Les taux de fonctionnement des analyseurs de 94 % et de 100 % respectivement pour le RER A et Paris 1<sup>er</sup> sont conformes<sup>4</sup> et valident l'analyse statistique réalisée.

**Sur cette plage granulométrique, 5 nm à 100 nm, le nombre moyen de particules ultrafines est plus de 40 fois supérieur au nombre de particules relevé sur la plage 180 nm à 18 µm présenté dans la partie précédente.**

La concentration moyenne en comptage de PUF relevée au niveau du quai du RER A en gare de Châtelet-Les Halles entre le 4 et le 25 octobre 2021 est de l'ordre de 12 000 particules/cm<sup>3</sup>. Elle est supérieure au niveau moyen relevé en air extérieur (de l'ordre de 10 800 particules/cm<sup>3</sup> en moyenne sur la même période). **En moyenne sur la période, le nombre de PUF est plus élevé de 10 % en EFS sur le quai du RER A en comparaison au point de référence en air extérieur.**

Le maximum horaire relevé au niveau du quai du RER A de Châtelet-Les Halles est néanmoins plus faible que celui relevé par la station Paris 1<sup>er</sup>, avec 26 400 particules/cm<sup>3</sup> contre 31 900 particules/cm<sup>3</sup> au niveau de la station Paris 1<sup>er</sup>.

Ce constat n'est pas vérifié **à une échelle temporelle plus fine avec un maximum sur les données de base, 5 minutes, enregistré au niveau du quai du RER durant les heures de service à près de 60000 particules/cm<sup>3</sup> illustrant de fortes sources locales de PUF très ponctuelles dans le temps pouvant être rencontrées dans les EFS.** A ce pas de temps fin, sur les horaires de service, 1 496 données dépassent le Percentile 75 horaire établie à 15 220 particules/cm<sup>3</sup> avec 2 données dépassant les 50 000 particules/cm<sup>3</sup> :

- Le 04/10/2021 à 15:40 : 59 700 particules/cm<sup>3</sup>
- Le 23/10/2021 à 20:35 : 50 400 particules/cm<sup>3</sup>

<sup>4</sup> Conforme : Le taux des données valides est considéré comme satisfaisant s'il est supérieur ou égal à 85%

Ces deux données présentent des ratios élevés en comparaison avec l'air extérieur, respectivement fois 9 et 3 fois **caractérisant une source ponctuelle de PUF pouvant largement impacter la qualité de l'air au niveau du quai du RER A de la gare de Châtelet-Les Halles durant le service commercial de ces journées.**

La variabilité du nombre horaire des PUF au niveau du quai RER A de la gare de Châtelet-Les Halles ainsi qu'à la station de référence Paris 1<sup>er</sup>, est présentée à la Figure 18 par des boîtes à moustaches sur toute la période de mesure, du 4 au 25 octobre 2021.

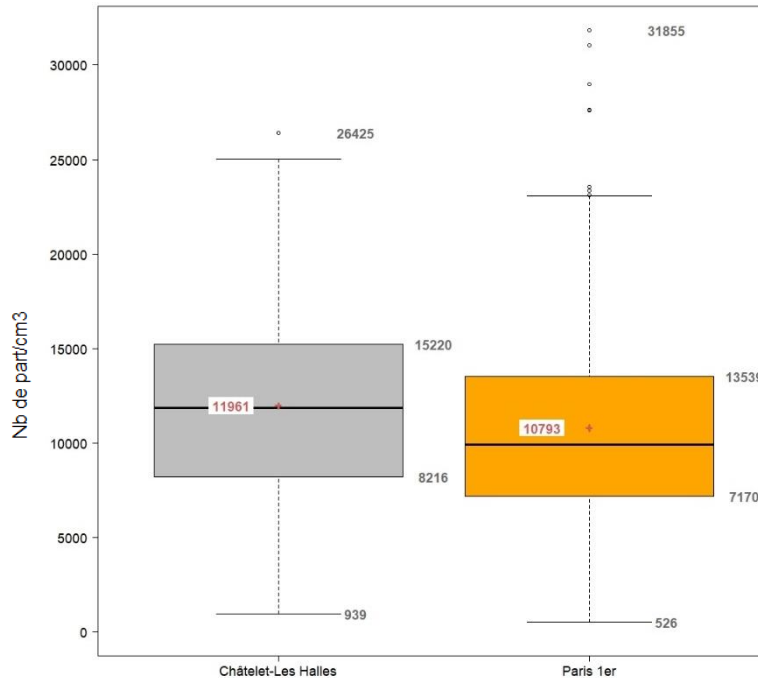


Figure 18 – Boîtes à moustaches des relevés horaires en PUF (en particules/cm<sup>3</sup>) à la gare RER A Châtelet-Les Halles et à la station Paris 1<sup>er</sup>, du 4 au 25 octobre 2021.

Les deux boîtes à moustaches des relevés à l'échelle horaire des PUF montrent des répartitions relativement équilibrées avec quelques valeurs horaires atypiques relevées en air extérieur. Sur l'ensemble de la période de mesures, le nombre de PUF sur le site de Châtelet-Les Halles présente un nombre de PUF moyen et médian similaire. 50 % des données sont comprises entre 8 200 et 15 200 particules/cm<sup>3</sup> au niveau du quai du RER A à la station Châtelet-Les Halles, et entre 7 200 et 13 500 particules/cm<sup>3</sup> à la station Paris 1<sup>er</sup>.

**L'étude menée par Airparif sur l'hiver 2020-2021 en situation de fond montre des variabilités moyennes pouvant aller jusqu'à 30 % sur des sites urbains de même typologie.** Le site de Paris 1<sup>er</sup> - Les Halles, situé dans un jardin, et plus éloigné des sources, notamment des axes routiers, relevait les niveaux les plus faibles des autres sites urbains. **À l'échelle horaire, les niveaux de PUF sur la période d'étude enregistrés sur le quai du RER A de la gare de Châtelet-Les Halles sont proches, en termes de statistiques, de ceux relevés en air extérieur en situation de fond.**



## 4.2.2. Variabilité des relevés horaires pendant la campagne de mesures

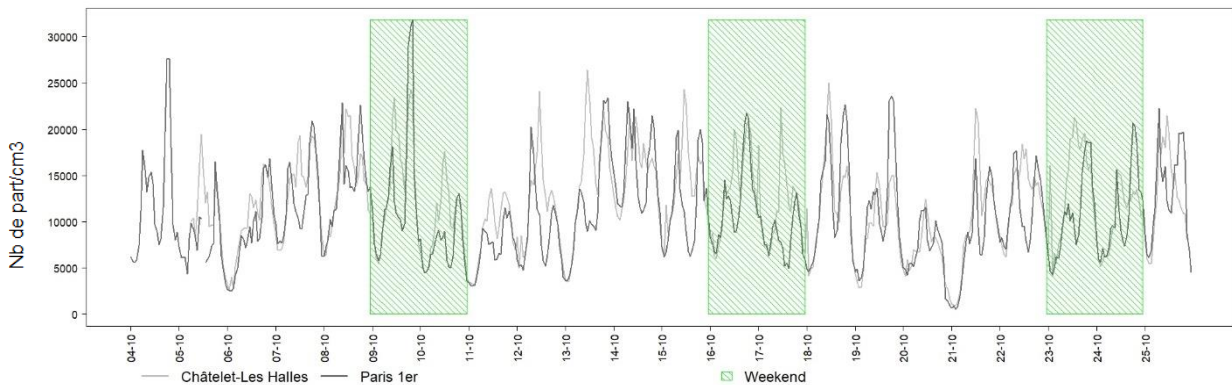


Figure 19 – Évolution des relevés horaires des comptages PUF, en part/cm<sup>3</sup> sur le quai du RER A de la station Châtelet-Les Halles et de la station Airparif Paris 1<sup>er</sup>, du 4 au 25 octobre 2021.

La Figure 19 présente une bonne dynamique commune du nombre horaire de PUF entre le quai du RER A de Châtelet-Les Halles et au niveau de la station Paris 1<sup>er</sup>. **Les PUF provenant d'une multitude de sources d'émission et de processus de transformation physico-chimiques**, de fortes variations sont enregistrées d'une journée à l'autre mais aussi au cours d'une même journée. Les deux premiers week-ends illustrent une baisse franche du samedi au dimanche alors que le 3<sup>ème</sup> week-end de l'étude montre deux journées similaires.

Contrairement au comptage optique et à la mesure en masse, les niveaux maximums sont enregistrés le samedi 09 octobre sur la montée du soir.

La Figure 20 représente l'évolution du nombre de PUF au cours de la journée, en moyenne sur la campagne, sur les sites d'étude. L'enveloppe de couleur représente l'espace interquartile, qui correspond à l'intervalle dans lequel sont comprises au moins 50 % des données de l'heure considérée, de manière à illustrer la variabilité des données moyennes horaires.

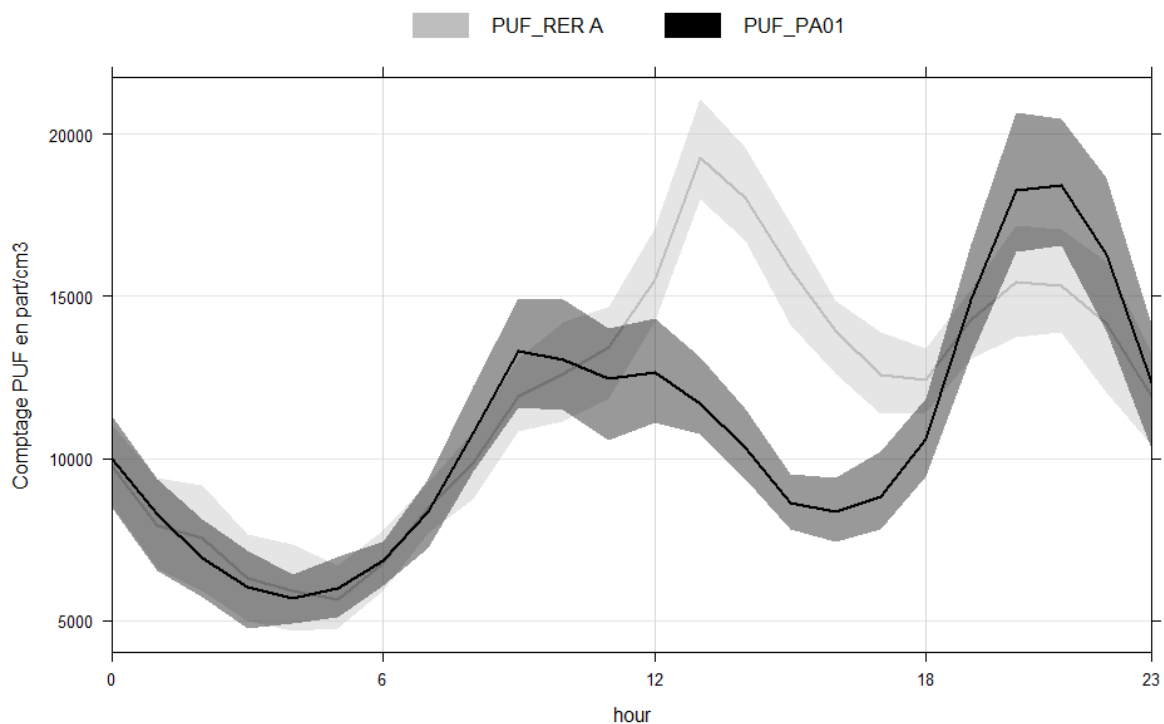


Figure 20 – Profils moyens journaliers des PUF au niveau du quai du RER A Châtelet-Les Halles et à la station Paris 1<sup>er</sup>, du 4 au 25 octobre 2021.

Les deux profils journaliers illustrés en Figure 20 sont cohérents avec l'étude Airparif sur les PUF. Ils présentent un cycle journalier bien marqué avec un profil urbain « **double bosse** » qui est caractéristique de la pollution aux particules en zone urbaine.

Au niveau du quai du RER A de Châtelet-Les Halles et au niveau de la station Paris 1<sup>er</sup>, le nombre de PUF obtenue par mesure SMPS évoluent de la même manière la nuit de 22h à 8h et présentent des différences au cours de la journée. Bien que les deux sites illustrent une montée le matin et le soir, sur le quai du RER A la montée matinale est beaucoup plus longue et plus intense et présente un nombre de PUF plus important sur cette montée matinale que le soir contrairement au site Airparif de Paris 1<sup>er</sup>.

Sur le quai du RER A, le nombre de PUF le plus important est identifié à 13h avec des niveaux moyens proches de 20 000 particules/cm<sup>3</sup> durant le service commercial.

Cette montée matinale caractérise une source de PUF différente ou plus émissive en comparaison aux sites de typologie de fond urbain présentant des sources de PUF prédominantes le soir et un pic le matin enregistré à 9h.

L'analyse du nombre total de PUF ne permet pas de caractériser l'impact de chacune de ces sources. **L'analyse des profils granulométriques moyens suivant les différentes classes permet d'affiner ces observations.**

### 4.2.3. Profils granulométriques moyens

La littérature scientifique fait état d'une distribution normale du diamètre des PUF si l'environnement est soumis à l'influence d'une source unique. Les caractéristiques de distribution sont reprises dans la Figure 21 [7] :

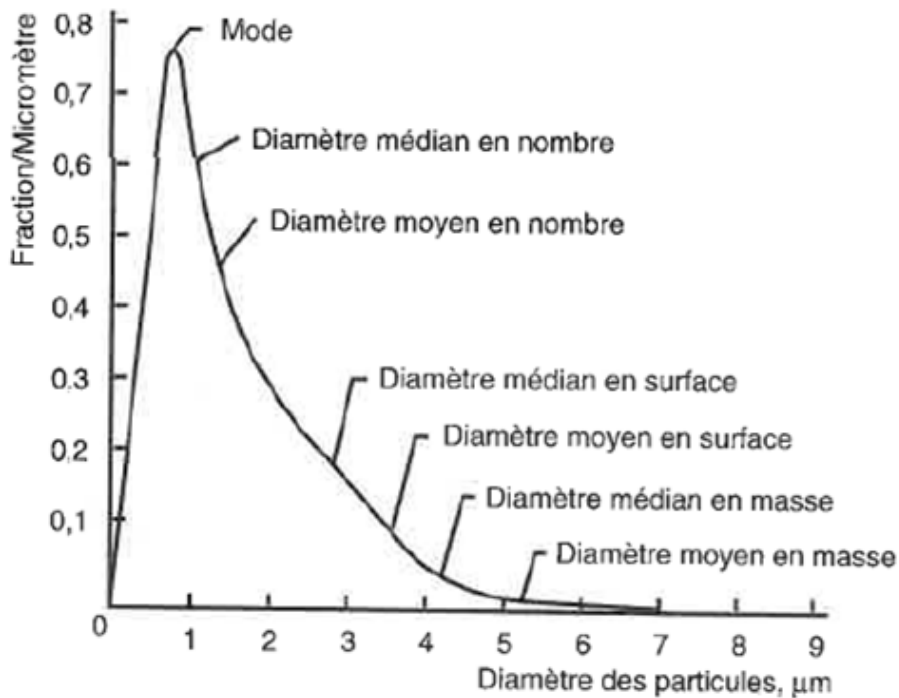


Figure 21 – Les paramètres caractéristiques des distributions granulométriques (Renoux et Boulaud, 1998)

Le profil théorique caractérisé par le paramètre statistique « mode » qui est le diamètre particulaire présentant le plus grand nombre de particules, représenté Figure 21, est bâti pour une source unique mais les aérosols peuvent présenter une multitude de sources de PUF rendant ce profil multi-modal et permettant alors d'identifier en comparaison à la distribution granulométrique en air extérieur un ou plusieurs modes caractéristiques d'une ou plusieurs sources propres à l'environnement étudié, dans ce cas le quai du RER A.

La mesure SMPS réalise un tri de ces particules les plus fines configurée sur la gamme granulométrique 5 à 400 nm, suivant 121 classes granulométriques et permet de bâtir les profils granulométriques expérimentaux à fine échelle sur chacun des sites. **Bien qu'étant centrée sur les PUF, inférieures à 100 nm, l'analyse des profils granulométriques est réalisée sur un spectre plus large, allant jusqu'à 400 nm, afin de pouvoir étudier le profil des sources dont le mode peut s'étendre au-delà des PUF.**

La construction des profils granulométriques moyens est réalisée en regroupant au sein d'un même et unique graphique les différentes données de comptage de chaque classe sous forme de courbe. Celui-ci présente en abscisse les tailles des particules (diamètre en nm, en échelle logarithmique) et en ordonnée la concentration en particules, exprimée en particules/cm<sup>3</sup>. La Figure 22 illustre les résultats obtenus pour les deux sites d'étude.

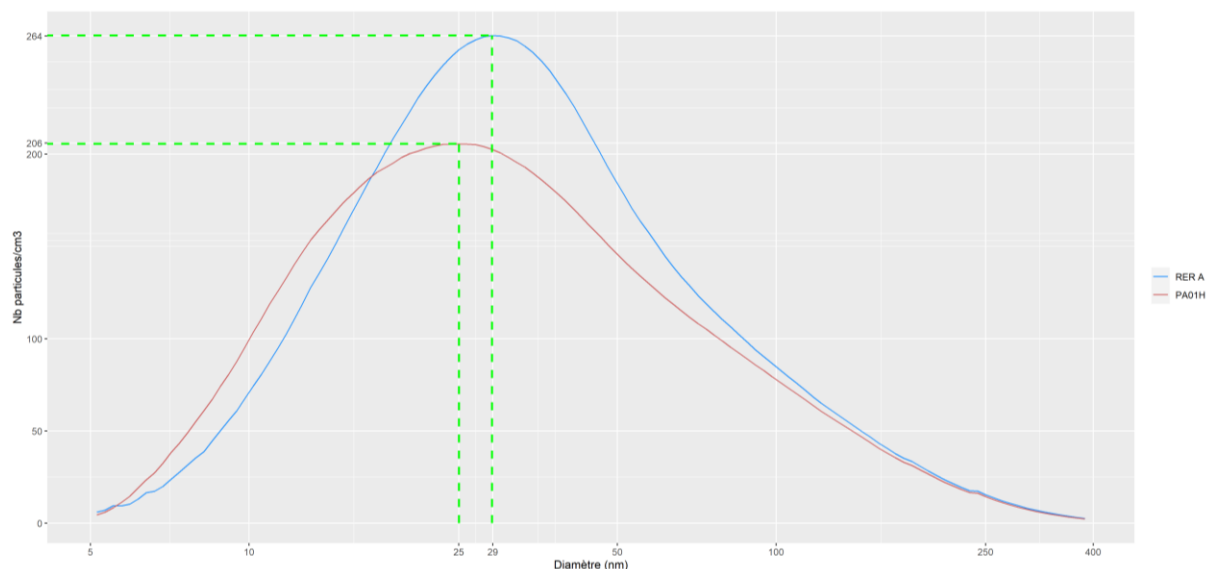


Figure 22 – Distribution granulométrique moyenne au niveau du quai du RER A Châtelet-Les Halles et à la station Paris 1<sup>er</sup>, du 4 au 25 octobre 2021.

Sur la Figure 22, les profils granulométriques moyens sur la période d'étude montrent la présence d'un unique mode commun au niveau du quai du RER A Châtelet-Les Halles et à la station Paris 1<sup>er</sup>. **L'unique « mode » se situe dans la gamme des PUF, soit de taille inférieure à 100 nm.** Ce constat peut être affiné avec des modes très proches sur les deux sites identifiés sur la gamme de diamètre allant 20-30 nm respectivement 25 et 29 nm pour la station Paris 1<sup>er</sup> et pour le RER A.

**L'étude PUF Airparif en situation de fond sur l'hiver 2020-2021 a montré qu'en saison hivernale sur le site Airparif Paris 1<sup>er</sup>- les Halles, le profil fait apparaître deux sources prédominantes de PUF : une première population majoritaire de particules ultrafines de diamètre compris dans la tranche 15 à 30 nm, caractéristique des PUF émises par le trafic routier, et une seconde population de diamètre compris entre 70 et 100 nm, en lien avec la combustion de biomasse [8].**

Il apparaît clairement que sur le site de Paris 1<sup>er</sup>- les Halles la distribution normale de la première population prédominante avec un mode observée sur la tranche 15 à 30 nm est conservée. **Sur le site Airparif des Halles, cette population caractérisée par un mode à 25 nm est spécifique au trafic routier.**

La seconde population de PUF saisonnière avec des modes compris entre 70 et 100 nm, caractérisant la source chauffage au bois, n'est alors pas représentée sur cette période de mesure automnale.

Le mode identifié sur le profil granulométrique du RER A est proche de celui de la station Airparif des Halles et compris dans la tranche 15 à 30 nm. Cette analogie entre l'air extérieur et au niveau du quai du RER A semble illustrer une source commune identifiée comme provenant du trafic routier.

Cette source est néanmoins plus présente dans l'enceinte de la gare au niveau du quai du RER A qu'en air extérieur en situation de fond. Cette analyse semble illustrer l'impact de la pollution extérieure sur l'air intérieur au niveau du quai du RER A. Cet impact étant réalisé par les entrées de la gare pouvant être situées à proximité directe du trafic routier, l'impact de la source trafic routier se retrouve plus importante dans l'enceinte de la gare qu'au niveau de la station de fond Airparif située dans un jardin, et certainement plus éloignée des sources, notamment des axes routiers.

Sur la Figure 22, au niveau du mode, le quai du RER A enregistre en moyenne 264 part/cm<sup>3</sup> contre 206 part/cm<sup>3</sup> illustrant un environnement plus influencé par la source trafic routier.

**Aucune autre source spécifique de PUF n'a été identifiée durant cette étude sur le quai du RER A, néanmoins l'impact fort du trafic routier dans l'enceinte de la gare ne permet pas de déconvoluer et d'identifier d'autres sources intervenant sur la gamme des PUF pouvant être propre à l'environnement des EFS.**

## 4.2.4. Évolutions horaires des profils granulométriques moyens

**Le cycle journalier des polluants primaires tel que le trafic routier** identifié sur la distribution granulométrique moyenne est largement gouverné par les conditions dispersives, en particulier la hauteur de couche limite, qui détermine le volume d'air dans lequel les polluants vont disperser les émissions. Cette hauteur de couche limite est généralement minimale le matin et, dans une moindre mesure, le soir et elle est maximale en milieu de journée. À l'évolution de ces conditions dispersives, se rajoute le cycle des émissions locales, avec un maximum d'émissions à l'heure de pointe du matin, au moment où les conditions de dispersion sont les plus défavorables, et un pic le soir, plus intense et moins étalé, dû à la baisse de la hauteur de couche limite associée à l'étalement des heures de retour travail-domicile en Île-de-France.

Si les PUF retrouvées sur le quai du RER A résultent d'un import de polluant issu du trafic routier extérieur, la dynamique horaire sur le quai du RER A devrait respecter cette temporalité. La Figure 23 reprend pour chaque heure la distribution granulométrique moyenne pour chaque heure de l'étude présentée de minuit (00) à 23h (23).

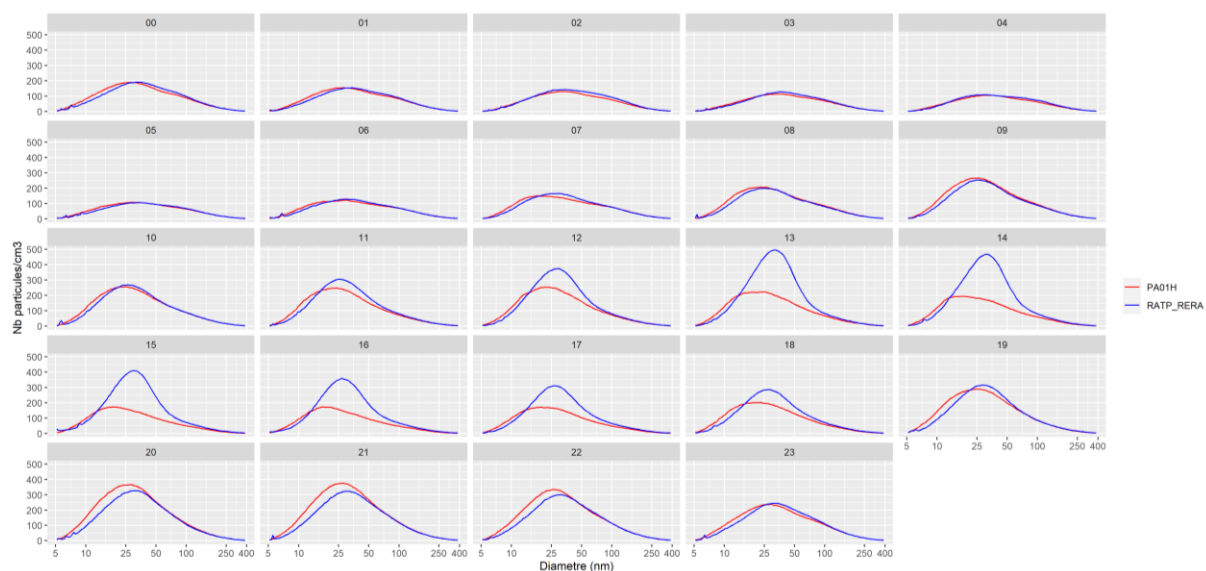


Figure 23 – Evolution horaire des distributions granulométriques moyennes au niveau du quai du RER A Châtelet-Les Halles et à la station Paris 1<sup>er</sup>, du 4 au 25 octobre 2021.

La Figure 23 illustrant l'évolution temporelle heure par heure des profils granulométriques entre les 2 sites étudiés montre des profils comparables en termes de taille et de concentrations en nombre sur la plage horaire 23h et 10h entre le quai du RER A et le site de Paris 1<sup>er</sup>-Les Halles. Cela caractérise une source similaire et commune retrouvée en air extérieur et au niveau du quai du RER A.

**Sur cette plage horaire nocturne présentant les émissions trafic les plus faibles, les niveaux de PUF au niveau du quai sont comparables à une situation de fond en air extérieur.**

L'impact de cette source trafic est alors bien visible sur le quai sur la plage horaire de 11h à 18h, cette plage présentant une activité anthropique plus importante semble valider une influence quasi totale du trafic routier sur le nombre de particules compris entre 5 et 400 nm, incluant les PUF. Cet impact est alors plus important sur le quai du RER A du fait d'un import d'air dans l'EFS issu d'une zone plus émissive en polluant résultant du trafic routier qu'en situation de fond urbain. Les pics du matin et du soir en air extérieur ne sont pas observés sur le quai du RER. Cela peut s'expliquer par une accumulation des particules en air intérieur tout au long de la journée, entraînant une inertie plus grande qu'en air extérieur.

**L'import continu d'air neuf au niveau du quai du RER entraîne un import continu des polluants extérieurs et donc des PUF issues du trafic routier proche des entrées d'air en journée.**

De 20h à 22h, les niveaux de PUF en situation de fond sont mêmes légèrement supérieurs à ceux rencontrés sur le quai du RER. Cette temporalité de 13h à 20h est à mettre en lien avec les émissions trafic importées dans la gare. L'origine géographique précise de ces émissions est difficiles à caractériser compte-tenu du grand nombre d'ouvertures de la gare sur l'extérieur.

Un recouvrement de sources peut être envisagé notamment sur les particules de diamètres inférieurs à 10 nm présentant des signaux faibles sur le quai du RER A sur de nombreuses heures, concentrations inférieures à 50 particules/cm<sup>3</sup>, non observés en air extérieur. Les PUF trafic étant très majoritaires, ils ne permettent pas d'analyser spécifiquement ce phénomène rencontré entre 5 nm et 10 nm.

**Sur le quai du RER A de la gare de Châtelet-Les Halles, sur les 3 semaines de surveillance la pollution aux PUF paraît être liée à un import de sources trafic routier situées à l'extérieur de l'EFS.**

Une étude spécifique des émissions trafic issues de la zone ou des zones d'import d'air extérieur vers le quai du RER A reste à réaliser pour envisager des leviers d'actions pour lutter contre cette pollution en PUF semblant issue de l'air extérieur. Cette gare comporte 19 sorties sur l'extérieur et une telle étude sera complexe à mettre en œuvre. Ces sorties sont identifiées en Annexe 1.



## B. Campagne de mesures Métro

### 1. Description de la station de référence

#### 1.1. Description de la gare

La station **École Militaire** située sur la ligne 8 est une station de métro simple, caractérisée par une faible profondeur (niveau -1) et ne présentant pas de correspondance. Cette configuration est illustrée sur la Figure 24 et Figure 25. Les études de qualité de l'air menées par le laboratoire de la RATP montrent des niveaux de pollution aux particules assez élevés dans cette station, ce qui a contribué au choix de mesure à cet endroit.

La station, sans correspondance, est située 42 Avenue de La Motte-Picquet dans le 7<sup>e</sup> arrondissement de Paris. Proche des invalides et d'un quartier parisien très résidentiel, cette station de métro est fréquentée par des parisiens et de nombreux touristes en période normale.



Figure 24 – Ligne 8, station École militaire direction Créteil-préfecture



Figure 25 – Ligne 8, station École militaire direction Balard

La fréquentation annuelle a été de 4 468 169 voyageurs en 2019. Un historique sur les 5 dernières années de la fréquentation de la station École Militaire est présenté en Annexe 4 de ce rapport (Les données 2020 et 2021 sont jugées non représentatives, compte-tenu des mesures de restrictions d'activités mises en place pour lutter contre la pandémie de COVID-19 – En 2020 et 2021, respectivement 1 863 016 et 2 805 976 voyageurs sont montés à la station École Militaire, soit plus de 1,5 fois plus faible qu'habituellement pour 2021).

Cette gare présente une sortie en queue de train en direction de Créteil et deux sorties en direction de Balard : une en tête de train et une autre en queue du train, fermées par des portes (Figure 26). Ces 3 sorties correspondent aux entrées d'air neuf pour la station de métro École Militaire.



Figure 26 – Portes au niveau du quai permettant d'accéder aux escaliers menant à l'extérieur.

Un système de ventilation mécanique est en place entre les stations. Lors des visites de terrain, la station École militaire **ne présentait pas d'effet piston ressenti** lors du passage des trains.

**Sur cette station de métro, la présence de ballast sur les voies est à noter, source potentielle de particules minérales.** Cette configuration diffère de la gare RER de Châtelet-Les Halles étudiée partie A.



Figure 27 – Présence de ballast sur les rails de la station de métro

Tous les éléments techniques détaillés sur la gare (matériel roulant, etc.) sont présentés en Annexe 4.



## 1.2. Localisation du point de mesure

La station de mesures a été installée en milieu du quai en direction de Créteil comme illustré à la Figure 28. L'armoire de mesure est située contre le mur du métro face aux métros (ligne 8) offrant un dégagement de 180° à environ 3 mètres des voies.

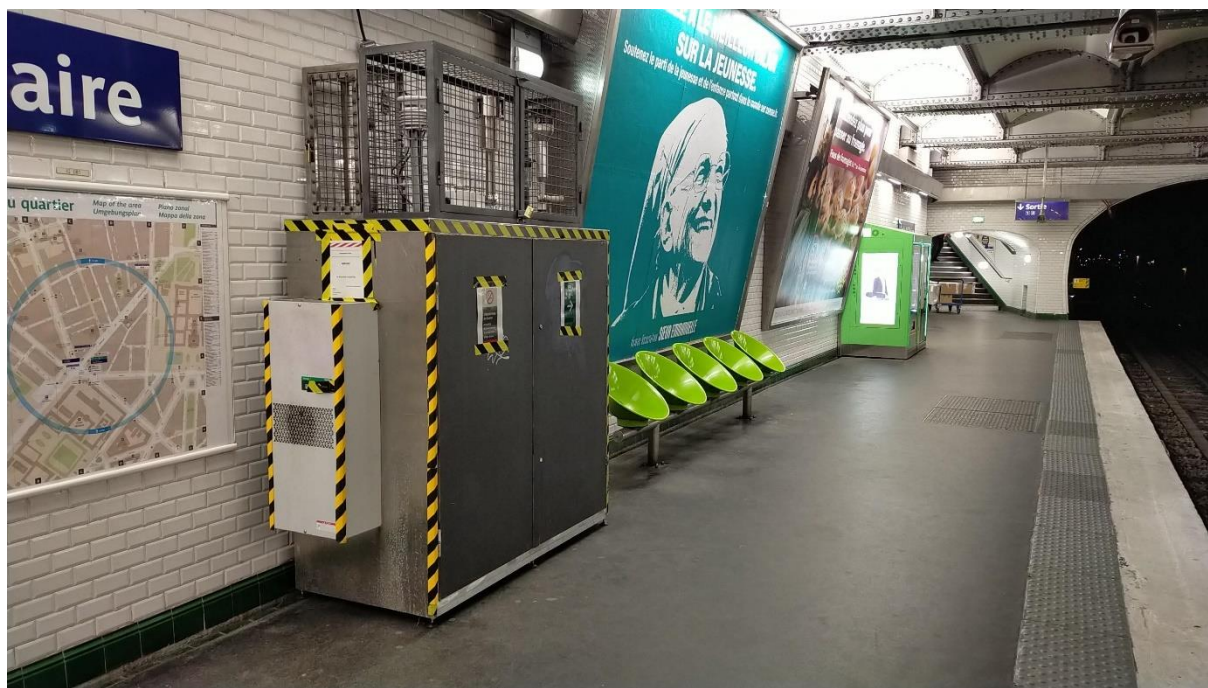


Figure 28 – Localisation du point de mesure (Station École Militaire, ligne 8, quai direction Créteil), photo de la station de mesure (quai).

## 1.3. Polluants mesurés

Dans le cadre de cette campagne de mesure sur le quai du métro École Militaire, comme pour la campagne précédente, les concentrations massiques de particules  $PM_{10}$  ont été mesurées à l'échelle horaire. Des mesures du nombre de particules avec des diamètres compris entre 5 nm et 18  $\mu m$ , incluant la gamme des PUF ont également été réalisées.

À la différence de la campagne de mesure RER, présentée partie A, cette étude ne comporte pas d'analyse spécifique de la composition chimique des particules faute de place sur le quai pour accueillir les préleveurs.

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 et Annexe 4.

## 1.4. Période de mesures

**Les années 2020 et 2021 ont été des années très particulières, du fait de la crise sanitaire liée à la Covid-19 et des mesures gouvernementales adoptées pour y faire face.** Ces différentes mesures ont entraîné une **réduction de la fréquentation annuelle de la station de métro** confirmées par l'historique de fréquentation de la station École Militaire disponible en Annexe 4. Il a été choisi une période avec une fréquence de train classique, hors congés ou situation spécifique de restriction liée à la crise sanitaire du type confinement ou couvre-feu.

Les mesures sont réalisées durant 3 semaines du **8 au 29 novembre 2021**.

Les polluants émis à l'extérieur pénètrent à l'intérieur des locaux par infiltration, aération, ventilation.

L'air extérieur pouvant influencer les niveaux rencontrés en air intérieur par transfert de polluant, les niveaux de fond urbain seront exploités dans l'analyse des résultats.

En air extérieur, les variations des niveaux de pollution d'un jour à l'autre sont liées d'une part à l'évolution des émissions de polluants par les sources locales, mais également aux conditions météorologiques, qui ont une influence sur la dispersion de ces polluants.

Sur la période de mesure selon Météo France, dès le 5 octobre des conditions anticycloniques s'installent durablement jusqu'au 25 [9]. **En termes de qualité de l'air ambiant, ces conditions anticycloniques peu dispersives ont engendré des niveaux relativement soutenus les 5 premiers jours de l'étude du métro avec 2 journées de dépassement des seuils réglementaires en PM<sub>10</sub> fixés à 50 µg/m<sup>3</sup> en moyenne journalière, le 10 et 11 novembre.**

Le reste du temps les niveaux en particules restent faibles à modérés présentant des moyennes journalières comprises entre 6 et 34 µg/m<sup>3</sup> sur la station de référence Airparif de Paris 1<sup>er</sup>-les Halles.

**Sur cette campagne de mesure aucun dysfonctionnement n'a été rencontré.**

## 2. Niveaux en particules rencontrés sur le quai de la station École Militaire

Ce paragraphe présente les résultats de l'analyse des mesures de particules PM<sub>10</sub> en masse sur le quai de la station École Militaire (ligne 8) : présentation des statistiques sur la période étudiée et de l'évolution temporelle des relevés à l'échelle horaire et journalière.

Les niveaux observés sur le quai de la station École Militaire de la ligne 8 sont comparés aux données en air extérieur de la station fixe de fond urbain du réseau de surveillance d'Airparif Paris 1<sup>er</sup> - Les Halles située dans le Jardin des Halles dans le 1<sup>er</sup> arrondissement de Paris. Il est à noter que les niveaux en ce point de référence sont probablement plus faibles que ceux de l'air extérieur de l'air entrant dans la station de métro, celui-ci étant directement influencé par le trafic routier des axes à proximité immédiate des entrées.

Ils sont également comparés aux résultats des mesures permanentes de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires de la RATP (réseau SQUALES), disponibles sur la période de mesure (station Franklin Roosevelt (Ligne 1) et sur la ligne 4 à Châtelet et aux stations trafic parisiennes.

### 2.1. Niveaux moyens observés en PM<sub>10</sub>

La concentration moyenne en PM<sub>10</sub> relevée au niveau du quai du métro entre le 8 et le 29 novembre 2021 est de 53 µg/m<sup>3</sup>. Elle est nettement supérieure au niveau moyen relevé en air extérieur (24 µg/m<sup>3</sup> en moyenne sur la même période). **En moyenne sur la période, les concentrations massiques sont plus de 2 fois plus élevées en EFS sur le quai du métro en comparaison au point de référence en situation de fond en air extérieur.**

Les principaux résultats statistiques pour la période de mesure, soit du 8 au 29 novembre 2021 (minimum et maximum horaire, moyenne, médiane et percentiles 25 et 75 des données horaires) sont présentés dans les tableaux suivants, pour le quai de la station École Militaire sur la ligne 8 et pour la station de mesure d'air ambiant de Paris 1<sup>er</sup>, pour les particules PM<sub>10</sub>.

<b>Statistiques (µg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>PM<sub>10</sub></b>	
	<b>École Militaire</b>	<b>Paris 1er</b>
<b>Minimum horaire</b>	1	3
<b>Percentile 25 (P25)</b>	33	13
<b>Médiane ou Percentile 50</b>	50	19
<b>Moyenne</b>	<b>53</b>	<b>24</b>
<b>Percentile 75 (P75)</b>	72	30
<b>Maximum horaire</b>	139	113
<b>% de données horaires valides</b>	99	98

Tableau 5 – Statistiques des relevés horaires en particules PM<sub>10</sub> au niveau du quai de la station École Militaire et à la station de référence Paris 1<sup>er</sup>, période du 08/11 au 29/11/2021.

À l'exception du minimum horaire, l'ensemble des paramètres statistiques au niveau du quai du métro École Militaire sont supérieurs à ceux de la station Airparif Paris 1<sup>er</sup>-Les Halles. Les taux de fonctionnement des analyseurs de 99 % et de 98 % respectivement pour le métro et Paris 1<sup>er</sup> sont conformes<sup>5</sup> et valident l'analyse statistique réalisée.

Le maximum horaire relevé au niveau du quai du métro École Militaire est supérieur de 26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à celui relevé par la station Paris 1<sup>er</sup>, avec 139  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  contre 113  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  au niveau de la station Paris 1<sup>er</sup>.

La variabilité des concentrations en  $\text{PM}_{10}$  au niveau du quai de la station École Militaire ainsi qu'à la station de référence Paris 1<sup>er</sup>, est présentée à la

Figure 29 par des boîtes à moustaches sur toute la période de mesure, du 8 au 29 novembre 2021. Les boîtes à moustaches permettent de comparer facilement plusieurs grandeurs statistiques. Une boîte à moustaches 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. Cette représentation graphique de la distribution des concentrations horaires 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 5.

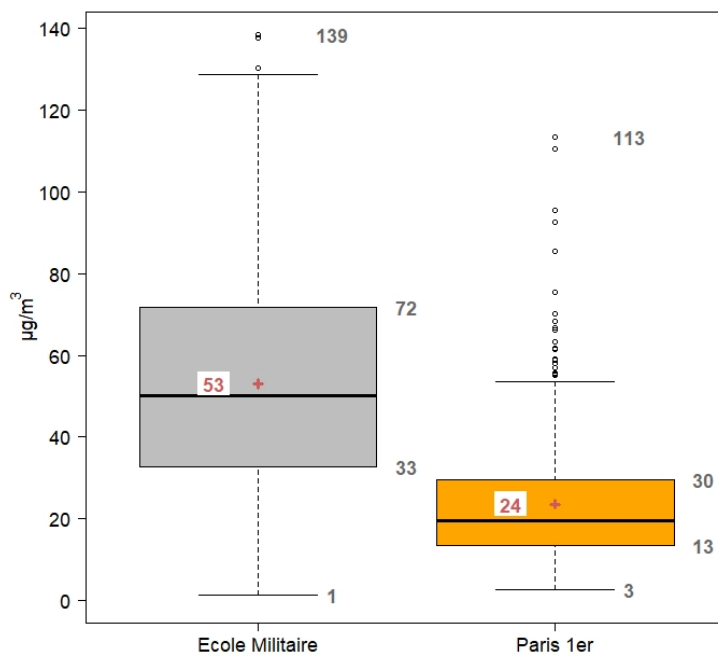


Figure 29 – Boîte à moustaches des relevés horaires en  $\text{PM}_{10}$  (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) au niveau du quai École Militaire et à la station Paris 1<sup>er</sup> du réseau Airparif, du 8 au 29 novembre 2021.

La boîte à moustaches présentant les résultats des relevés horaires en particules  $\text{PM}_{10}$  au niveau du quai de la station École Militaire montre une répartition « équilibrée<sup>6</sup> » des mesures, avec toutefois quelques maxima horaires isolés (« valeurs atypiques ») élevés. **En considérant toutes les données, 50 % des données horaires relevées sont comprises entre 33 et 72  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , pour une moyenne de 53  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et une médiane légèrement inférieure à 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Le maximum atteint à la station École militaire est de 139  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , enregistré le mardi 9 novembre entre 10 et 11h.**

<sup>5</sup> Conforme : Le taux des données valides est considéré comme satisfaisant s'il est supérieur ou égal à 85%

<sup>6</sup> 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.

Les concentrations observées à la station Paris 1<sup>er</sup> sont beaucoup plus faibles que celles relevées au niveau du quai de la station École Militaire, ceci pour l'ensemble des paramètres statistiques. Il est à noter que ces niveaux sont plus faibles que les niveaux dans l'air extérieur entrant dans la station du métro, qui est influencé par les émissions des axes routiers en immédiate proximité des entrées. Les relevés horaires à la station Paris 1<sup>er</sup>, sur la même période, présentent une moyenne de 24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  avec 50 % des données comprises entre 13 et 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Le maximum horaire enregistré atteint 113  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (le mercredi 10 novembre 2021, entre 15 et 16h). Cette journée fut marquée par un épisode de pollution sur la région francilienne.

Cette boîte à moustache obtenue sur le quai du métro École militaire est également comparée sur cette même période à la surveillance permanente réalisée par la RATP dans ses enceintes ferroviaires souterraines (réseau SQUALES), dont les données sont disponibles sur l'open data du site de la RATP. Sur cette période, seules les données des stations de métro Châtelet-Les Halles ligne 4 et Franklin D Roosevelt-ligne 1 sont disponibles. Celles de la station Auber sur le RER A étant renseignée non disponibles, (N/D) sur l'open data et les mesures SQUALES sur les stations RER A de la gare de Châtelet-Les Halles et Nation disponibles en ligne à partir du 03 janvier 2022.

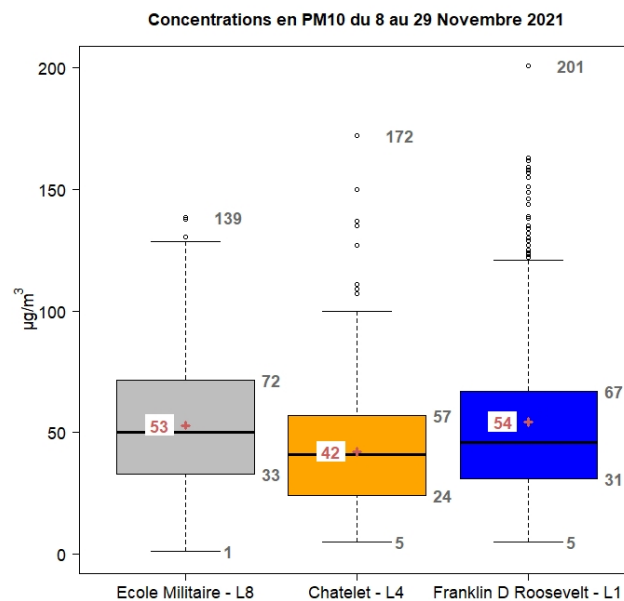


Figure 30 - Boîte à moustaches des relevés horaires en PM<sub>10</sub> (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) au niveau des quais du métro Ligne 8 École militaire de la gare de Châtelet-Les Halles, du métro Ligne 4 de Châtelet-Les Halles et du métro Ligne 1 FD Roosevelt, du 8 au 29 novembre 2021.

En concentration massique PM<sub>10</sub>, le point de mesure de l'étude situé sur le quai du métro École militaire présente une concentration moyenne sur la période de mesure de 53  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , comprise entre celle des mesures du réseau SQUALES de la station FD Roosevelt (ligne 1) et de la station Châtelet ligne 4 (respectivement 54 et 42  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Les concentrations minimales sont similaires comprises entre 1 et 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  avec des boîtes comparables entre ces 3 points de mesure en EFS au regard de l'air extérieur présenté figure 27. Des concentrations horaires extrêmes sont plus importantes sur les métros Ligne 4 et Ligne 1 avec des concentrations horaires maximales respectivement de 172 et 201  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  contre 139  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour le quai du métro École militaire, ces valeurs extrêmes pouvant dépasser les 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ne sont rencontrées que quelques heures sur la période de mesure.

Sur le quai de la station de métro École militaire, l'apport d'air étant principalement issu d'entrées situées à proximité direct du trafic routier, le niveau moyen mesuré sur le quai du métro peut être comparé sur la période de mesure à différentes stations du réseau de mesure Airparif influencées par la source trafic. La Figure 31 illustre une comparaison des concentrations massiques en PM<sub>10</sub> relevées sur 3 sites de typologie trafic caractérisant 3 environnements : Un Boulevard parisien (Boulevard Haussmann), une place parisienne (Place Victor-et-Hélène-Basch) et le Boulevard périphérique (Boulevard périphérique Est). Les niveaux moyens à la station de fond de Paris 1<sup>er</sup> – Les Halles y sont également repris.

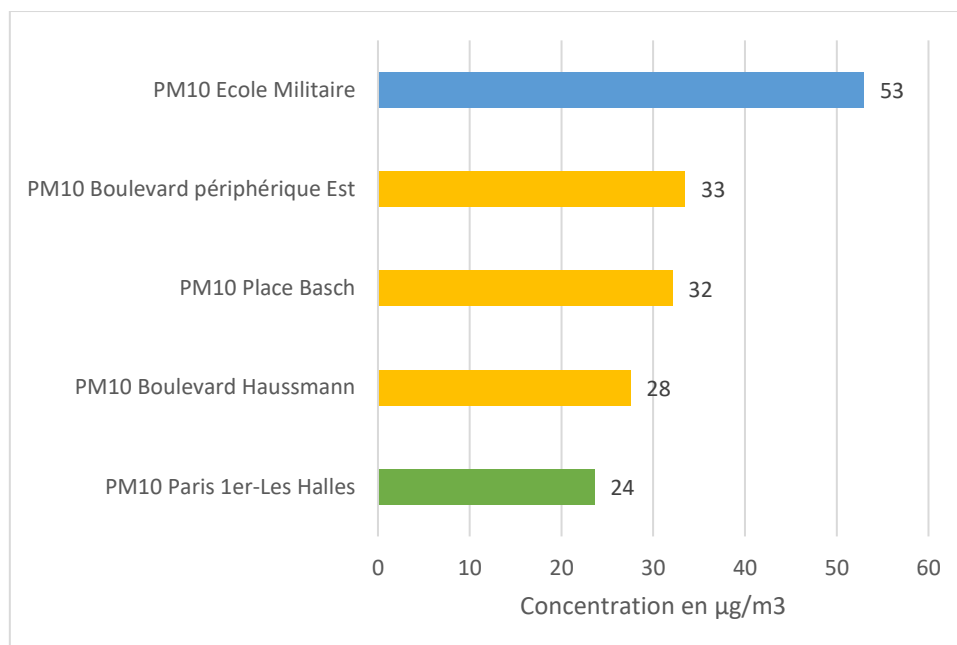


Figure 31 : Concentrations massiques moyennes en  $\text{PM}_{10}$  sur 3 typologies : fond, trafic et métro du 8 au 29 novembre 2021.

La Figure 31 montre clairement que les niveaux moyens en  $\text{PM}_{10}$  sur le quai de la station École sont plus importants qu'en air extérieur.

Les stations trafic représentées en jaune sur la Figure 31 enregistrent toutes des niveaux supérieurs au site de fond de Paris 1<sup>er</sup>-les Halles de par leur typologie trafic mais restent néanmoins nettement inférieurs au point de mesure du métro École militaire. **Ce point de mesure présente des concentrations en  $\text{PM}_{10}$  supérieures de 50 à 60% au regard des sites de typologie trafic. Ce constat caractérise une ou d'autres sources polluantes locales émises dans l'EFS que les polluants extérieurs importés sur le quai du métro.**



## 2.2. Variabilité temporelle des PM<sub>10</sub>

### 2.2.1. Variabilité des relevés horaires pendant la campagne de mesures

Les relevés horaires en particules PM<sub>10</sub> sur l'ensemble de la période de mesures, au niveau du quai de la station École Militaire ainsi qu'à la station Airparif Paris 1<sup>er</sup> sont présentés à la

Figure 32.

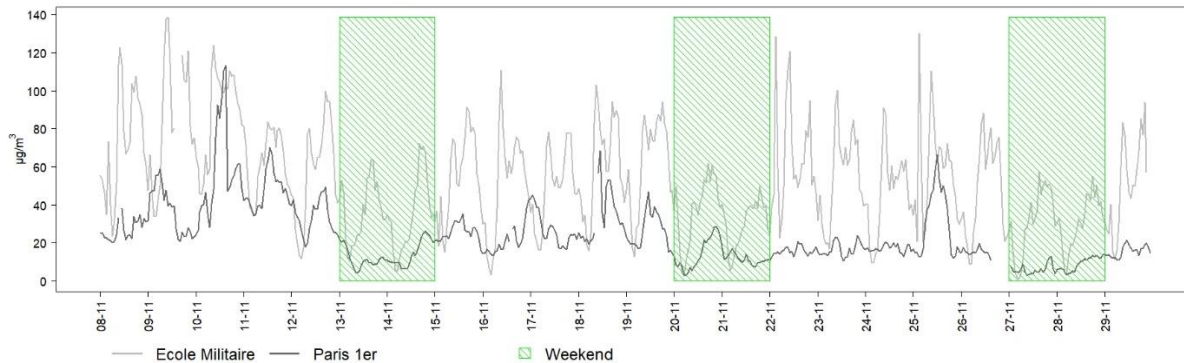


Figure 32 – Évolution des relevés horaires en PM<sub>10</sub>, en µg/m<sup>3</sup> sur le quai de la station École Militaire et la station Airparif Paris 1<sup>er</sup>, du 8 au 29 novembre 2021.

Le graphique montre, au niveau de la station Paris 1<sup>er</sup>, une évolution des concentrations variable d'une journée à l'autre, en lien avec l'évolution des conditions météorologiques et des émissions de polluants atmosphériques. Sur cette saison automnale, les concentrations en particules PM<sub>10</sub> sont globalement plus élevées au cours de la journée que la nuit en lien avec l'activité anthropique parisienne.

Au niveau du quai du métro École Militaire, des évolutions de concentrations globalement similaires sont constatées d'un jour ouvré à l'autre. **Pour chaque jour ouvré, deux pics de concentrations sont observés, correspondant aux heures de pointes du matin et du soir.** Ces heures de pointe sont conformes aux fréquences de train les plus élevées durant le service commercial de la RATP. En semaine, à ces deux pics du matin et du soir s'adjoint sur plusieurs journées de l'étude une hausse des concentrations en PM<sub>10</sub> sur la plage horaire du midi. Ce constat est particulièrement visible la journée du 26 novembre avec un pic le midi plus marqué que le soir. Ce pic du midi n'est pas corrélé à la fréquence des trains, mais pourrait être lié à la fréquentation des voyageurs.

En l'absence de mesures en air extérieur à proximité immédiate des entrées d'air dans la station, un éventuel impact extérieur ne peut être identifié.

Hors travaux, les niveaux les plus faibles ont été observés la nuit lors de la décroissance nocturne obtenue après l'arrêt du service commercial avec des concentrations au niveau du quai du métro pouvant atteindre le niveau de fond en air extérieur. Au cours de la campagne de mesures, des niveaux ponctuellement plus faibles ont été relevés au niveau du quai du métro École militaire qu'au niveau de la station Paris 1<sup>er</sup>, notamment la nuit. Au-delà des incertitudes de mesures plus importantes sur les concentrations faibles, aucune explication n'a été trouvée à ce stade.

**Sur les jours de week-end, représentés par les cadres verts hachurés sur la Figure 32, un seul pic modéré est observé autour de 60 µg/m<sup>3</sup> en milieu de journée.**

## 2.2.2. Variabilité hebdomadaire

Les profils hebdomadaires en particules PM<sub>10</sub>, au niveau du quai de la station École Militaire (ligne 8) ainsi qu'à la station Paris 1<sup>er</sup> du réseau Airparif sont présentés à la Figure 33.

Une comparaison entre les résultats en période commerciale et en période nocturne est présentée au paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Figure 33 – Évolution des profils hebdomadaires en PM<sub>10</sub> au niveau de la station École Militaire et à la station Paris 1<sup>er</sup>, du 8 au 29 novembre 2021.

**Les niveaux moyens en particules PM<sub>10</sub> relevés sur le quai de la station École Militaire sont très stables d'un jour ouvré à l'autre** compris entre 61 et 62 µg/m<sup>3</sup> du lundi au jeudi, le vendredi enregistrant une légère baisse en comparaison aux autres journées ouvrées avec 56 µg/m<sup>3</sup>. **Une franche baisse est constatée durant les journées du week-end** de l'ordre de -45 % avec des concentrations moyennes le samedi de 35 µg/m<sup>3</sup> et le dimanche de 32 µg/m<sup>3</sup>.

Sur la station de Paris 1<sup>er</sup>, la variabilité des concentrations journalières sur les journées ouvrées est bien plus marquée que sur le quai du métro, ces concentrations sont comprises entre 21 µg/m<sup>3</sup> à 38 µg/m<sup>3</sup> respectivement pour les journées du lundi et du jeudi. Ces variations extérieures enregistrées ne semblent pas impacter l'air intérieur au niveau du quai du métro École militaire. Le week-end, comme pour le quai du métro, les niveaux chutent sur la station de de Paris 1<sup>er</sup> avec des moyennes similaires entre ces 2 journées de 11 et 12 µg/m<sup>3</sup>.



## 2.2.3. Variabilité journalière

La Figure 34 présente les niveaux moyens observés chaque heure de la journée pour les **jours ouvrés** en particules PM<sub>10</sub>, au niveau du quai de la station École Militaire et à la station Paris 1<sup>er</sup>. Pour la station École militaire, les journées du 22 et 25 novembre ne sont pas utilisées pour réaliser les moyennes horaires car elles présentent des niveaux nocturnes très soutenus en lien probablement avec des travaux impactant fortement le profil moyen nocturne. Les niveaux de ces journées ne sont pas représentatifs des niveaux habituellement rencontrés.

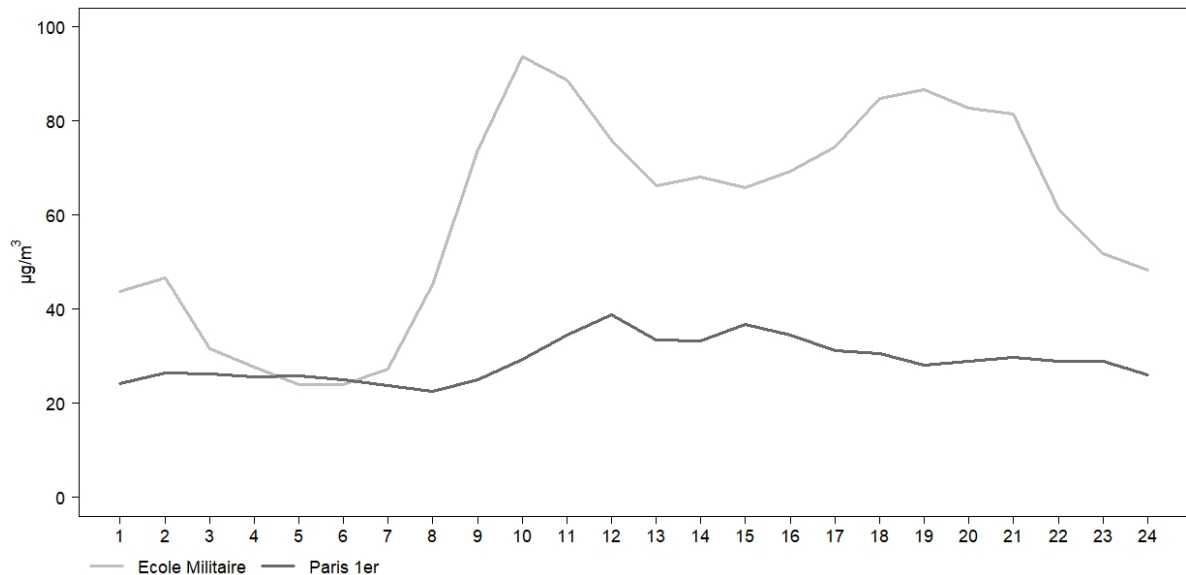


Figure 34 – Évolution des profils journaliers en PM<sub>10</sub> au niveau du quai de la station École Militaire et à la station Paris 1<sup>er</sup>, du 8 au 29 novembre 2021 sans les journées du 22 et 25 novembre.

Les profils journaliers en concentrations massiques de PM<sub>10</sub> sur la station Paris 1<sup>er</sup> et au niveau du quai de la station École Militaire sont très différents.

**Au niveau du quai de la station École Militaire, deux pics de particules sont observés aux heures de pointes du matin (9-11h) et du soir (17-21h). Contrairement au RER A, le pic du matin présente des concentrations plus élevées que le pic du soir, moins intense mais durant plus longtemps.**

Durant les heures de pointes du matin, la concentration horaire maximale est de 94 µg/m<sup>3</sup> à 10h ; le soir, la concentration horaire maximale est légèrement plus faible, mesurée à 87 µg/m<sup>3</sup> à 18h. Les niveaux les plus faibles sont enregistrés la nuit (entre 00h et 7h), lors de la baisse de la fréquentation et la fermeture de la gare et son minimum entre 4 et 5h avec 24 µg/m<sup>3</sup>. Entre 3h et 6h du matin, les niveaux enregistrés sur le quai du métro École militaire sont comparables aux concentrations relevées en situation de fond sur le site de Paris 1<sup>er</sup>-Les Halles. Sur cette période sans activité commerciale, une décroissance rapide des niveaux est constatée pour rejoindre le niveau de fond en air extérieur à 4h du matin. En moyenne horaire, une baisse des concentrations de plus de 60 µg/m<sup>3</sup> est enregistrée entre 18h et 4h du matin.

**La décroissance nocturne des niveaux de PM<sub>10</sub> dans le métro est comparable à celle sur le quai du RER. Cette décroissance semble plus rapide sur le métro que sur le RER ; elle débute 1 heure plus tôt et enregistre les concentrations les plus faibles deux heures plus tôt en comparaison au RER A.**

Contrairement au profil moyen journalier en particules PM<sub>10</sub> sur le quai du métro, le profil journalier moyen en particules PM<sub>10</sub> de la station Paris 1<sup>er</sup> située en dehors de l'influence directe des sources comme le trafic routier, présente une stabilité avec un seul pic en fin de matinée, débutant aux heures de pointes du matin. A 11 heure, le niveau moyen en particules PM<sub>10</sub> est de 39 µg/m<sup>3</sup>. Le reste de la journée, les niveaux varient relativement peu, allant de 23 à 37 µg/m<sup>3</sup>. Les niveaux les plus faibles sont enregistrés le matin à 7h avec 23 µg/m<sup>3</sup>.

## 2.2.4. Niveaux en service commercial

La Figure 35 présente les moyennes hebdomadaires des concentrations en particules PM<sub>10</sub>, 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) au niveau du quai de la station École Militaire et à la station Paris 1<sup>er</sup> du réseau Airparif. Comme pour le profil journalier, les nuits du lundi 22 novembre et du jeudi 25 novembre ne sont pas représentées pour cause de travaux dans la station de métro.

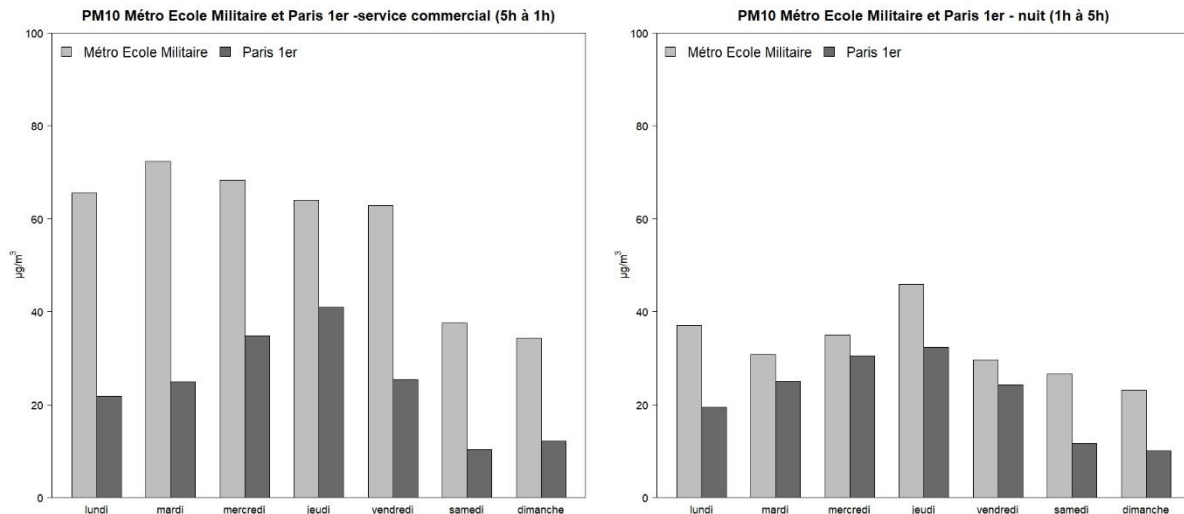


Figure 35 – Évolution des profils hebdomadaires en PM<sub>10</sub> au niveau du quai de la station École Militaire et à la station Paris 1<sup>er</sup>. Service commercial (5 à 1h) à gauche, Nuit (1 à 5h) à droite.

Au niveau du quai du métro École militaire situé sur la ligne 8 du réseau RATP parisien, les niveaux de PM<sub>10</sub> présentent sur la période mesure moins de variabilité que sur le RERA lors du **service commercial** en semaine avec des niveaux les jours ouvrés de 61 µg/m<sup>3</sup> le mercredi à 70 µg/m<sup>3</sup> le vendredi. Le week-end les niveaux de l'ordre de 35 µg/m<sup>3</sup>, soit moitié moindres que la moyenne journalière maximale soit de. **Les variations des concentrations PM<sub>10</sub> observées ne sont pas corrélées aux variations enregistrées en air extérieur, illustrant l'impact des activités dans la station.**

**Cet impact du métro est également illustré par les niveaux nocturnes** relevés durant la période de mesure sont nettement plus faibles que ceux relevés durant le service commercial et proches, pour les jours ouvrés, des relevés de la station Paris 1<sup>er</sup>. Les nuits du lundi, jeudi et du week-end enregistrent un écart plus significatif entre le métro et Paris 1<sup>er</sup>-les Halles en comparaison aux autres journées de la semaine. Cet écart plus important ne peut être expliqué par les mesures réalisées.

Au cours de la campagne de mesures, que cela soit sur les horaires du service commercial ou la nuit, les **concentrations moyennes saturnales et dominicales** restent toujours plus élevées sur le quai du métro qu'en air extérieur.

Les ratios entre air extérieur et le quai du métro sont compris entre 2 et 4 sur les heures de service commercial contre 1 et 2 sur les heures de nuit illustrant le fort impact de l'activité commerciale sur la qualité de l'air au niveau du quai du métro École militaire.

# 3. Nombre de particules et particules ultrafines

## 3.1. Mesures par comptages optiques (FIDAS)

### 3.1.1. Niveaux moyens par comptage optique (FIDAS)

Les principaux résultats statistiques (minimum et maximum horaire, moyenne, médiane et percentiles 25 et 75 des données horaires) sont présentés dans les tableaux suivants, pour le quai de la station École Militaire sur la ligne 8 et pour la station Paris 1<sup>er</sup> pour la période du 8 au 29 novembre 2021 pour les mesures de comptage optique du nombre de particules.

	<b>Comptage optique des particules (de 180 nm à 18 µm)</b>	
<b>Statistiques (particules/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>École Militaire</b>	<b>Paris 1er</b>
<b>Minimum horaire</b>	27	35
<b>Percentile 25 (P25)</b>	198	188
<b>Médiane ou Percentile 50</b>	329	304
<b>Moyenne</b>	<b>383</b>	<b>382</b>
<b>Percentile 75 (P75)</b>	466	453
<b>Maximum horaire</b>	1438	1614
<b>% de données horaires valides</b>	97	87

Tableau 6 – Statistiques des relevés horaires de comptages optiques au niveau du quai de la station École Militaire et à la station de référence Paris 1<sup>er</sup>, période du 08/11 au 29/11/2021.

Les taux de fonctionnement des analyseurs de 97 % et de 87 % respectivement pour le métro et Paris 1<sup>er</sup> sont conformes<sup>7</sup> et valident l'analyse statistique réalisée.

L'ensemble des paramètres statistiques est similaire entre le quai du métro École militaire et la station Airparif Paris 1<sup>er</sup>.

En moyenne sur la période de mesure, environ 380 particules par centimètre cube ont été relevées au niveau du quai du RER A Châtelet-Les Halles et sur la station Paris 1<sup>er</sup>. Le maximum horaire relevé au niveau de la station Paris 1<sup>er</sup> est supérieur à celui relevé sur le quai du métro École militaire.

Sur cette gamme granulométrique présentant le comptage des particules avec un diamètre compris entre 180 nm et 18 µm ne faisant pas état des particules ultrafines (PUF), **le nombre de particules est similaire entre le quai du métro et les relevés réalisés sur la station Paris 1<sup>er</sup>.**

**Sur cette gamme de taille, les particules les plus grosses, supérieures à 2.5 µm, sont très peu représentées en nombre mais contribuent fortement aux concentrations massiques du fait de leur nature et de leurs densités associées, principalement minérale pour le site de Paris 1<sup>er</sup> et supposées minérales ainsi que métalliques pour le point de mesure situé sur le quai du métro.**

<sup>7</sup> Conforme : Le taux des données valides est considéré comme satisfaisant s'il est supérieur ou égal à 85 %

Les boîtes à moustaches des relevés horaires de comptage optique au niveau du quai de la station École Militaire et de la station Airparif Paris 1<sup>er</sup>, sur l'ensemble de la période de mesures (8 – 29 novembre) sont présentées Figure 36.

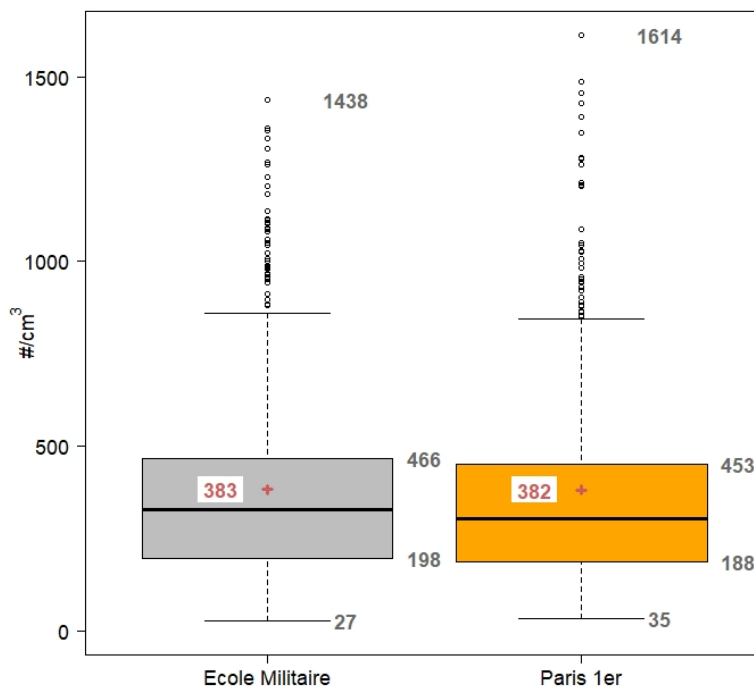


Figure 36 – Boîtes à moustaches des relevés horaires des comptages optiques (en particules/cm<sup>3</sup>) au niveau du quai de la station École Militaire et à la station Paris 1<sup>er</sup>, du 8 au 29 novembre 2021.

Les deux boîtes à moustaches des relevés horaires en particules totales montrent des répartitions équilibrées malgré quelques valeurs atypiques.

50 % des données sont comprises entre 198 et 466 particules/cm<sup>3</sup> au niveau du quai du métro, et entre 188 et 453 particules/cm<sup>3</sup> à la station Paris 1<sup>er</sup>. Les maximas, 1 438 particules/cm<sup>3</sup> au niveau du quai du métro École militaire et 1 614 particules/cm<sup>3</sup> à la station Paris 1<sup>er</sup>, ont été atteints sur la journée du mercredi 10 novembre. Ces résultats sont en lien avec l'augmentation des concentrations en particules PM<sub>10</sub> au cours de la journée du 10 novembre, journée au cours de laquelle un épisode de pollution a été relevé sur la région francilienne.

**L'homogénéité du nombre de particules de granulométrie comprise entre 180 nm et 18 µm du site de fond parisien et le quai du métro École militaire est confirmée par l'analyse de la dispersion statistique.**

### 3.1.2. Variabilité temporelle du nombre de particules

Les relevés horaires du nombre de particules de 180 nm à 18 µm au niveau du quai de la station École Militaire et à la station Paris 1<sup>er</sup> sont présentés à la Figure 37.

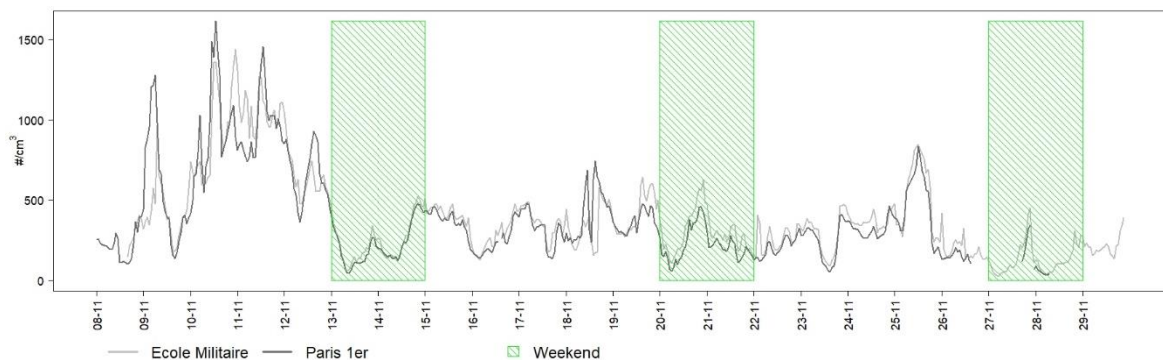


Figure 37 – Évolution des relevés horaires du nombre de particules de 180 nm à 18 µm, en particules/cm<sup>3</sup> sur le quai du métro de la station École Militaire et sur la station Airparif Paris 1<sup>er</sup>, du 8 au 29 novembre 2021.

Contrairement aux concentrations massiques en particules PM<sub>10</sub>, le nombre de particules obtenue par comptage optique n'évolue pas de la même manière d'une journée à l'autre au niveau du quai du métro École militaire et au niveau de la station Paris 1<sup>er</sup>. Les évolutions du nombre de particules relevés par les deux stations sont très proches et semblent régis par les niveaux extérieurs.

Les maxima ont été relevés le mercredi 10 novembre pour les deux stations ce qui s'explique par une dégradation globale de la qualité de l'air au cours de cette journée (épisode mixte avec des émissions de combustion de biomasse et la formation d'aérosols secondaires) entraînant une augmentation des concentrations en particules supérieures à 200 nm sur l'ensemble de l'Île-de-France.

Cette cohérence au niveau de la dynamique et de la justesse du comptage optique sur les deux sites étudiés conforte l'analyse réalisée dans la partie précédente et valide comme sur le quai du RER A une **forte influence de l'air extérieur sur le nombre de particules présentant des diamètres compris entre 180 nm et 18 µm retrouvées au niveau du quai du métro.**

**La fraction grossière** (particules comprises entre 2.5 et 10 µm) est essentiellement composée d'espèces issues de **processus mécaniques** tel que l'abrasion des freins ou l'usure des caténaires mais aussi sur cette station de métro en lien avec de la remise en suspension de poussières minérales issues du ballast présent entre les rails comme illustré Figure 27. **Les composés issus des processus de combustion et les composés secondaires formés par réactions chimiques identifiés en air extérieur se répartissent plutôt dans la fraction fine inférieure à PM<sub>2.5</sub>.** Ces composés secondaires formés en extérieur semblent être retrouvés sur les données de comptage optique les journées du 8 au 13 novembre sur le quai du métro dans la gamme 180 nm à 2.5 µm.

Bien que d'autres sources de particules grossières soient identifiées en EFS, ces éléments chimiques de par leur nature présentent une forte densité volumique impactant fortement les concentrations massiques mais peu significatifs en termes de nombre de particules sur cette gamme granulométrique.

## 3.2. Comportement des particules ultrafines sur le quai du métro

### 3.2.1. Niveaux moyens de PUF

Les principaux résultats (minimum et maximum horaire, moyenne, médiane et percentiles 25 et 75 des données horaires) sont présentés dans les tableaux suivants, pour le quai métro de la station École militaire et pour la station Paris 1<sup>er</sup>, du 8 au 29 novembre 2021 pour les PUF. Ces données résultent de la somme des comptages des 83 classes enregistrées par l'analyseur SMPS comprises sur la gamme granulométrique représentative des PUF soit de 5 nm à 100 nm.

	PUF (de 5 nm à 100 nm)	
<b>Statistiques (en part/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Métro École militaire</b>	<b>Paris 1<sup>er</sup></b>
<b>Minimum horaire</b>	1479	891
<b>Percentile 25 (P25)</b>	9431	6492
<b>Médiane ou Percentile 50</b>	13613	9674
<b>Moyenne</b>	<b>14071</b>	<b>10546</b>
<b>Percentile 75 (P75)</b>	18345	13870
<b>Maximum horaire</b>	42059	29394
<b>% de données horaires valides</b>	100	100

Tableau 7 – Statistiques des relevés horaires des comptages des PUF au niveau du quai de métro de la station École militaire et à la station de référence Paris 1<sup>er</sup>, période du 08/11 au 29/11/2021.

Les taux de fonctionnement des analyseurs de 100 % sont conformes<sup>8</sup> et valident l'analyse statistique réalisée.

**Sur cette plage granulométrique, 5 nm à 100 nm, le nombre moyen de particules ultrafines est près de 40 fois supérieur au nombre de particules relevé sur la plage 180 nm à 18 µm présenté dans la partie précédente.**

Les résultats au niveau du quai de la station de métro École militaire sont supérieurs à ceux de la station de fond Airparif Paris 1<sup>er</sup>-Les Halles pour l'ensemble des paramètres statistiques.

La concentration moyenne en comptage de PUF relevée au niveau du quai de la station de métro École militaire entre le 8 et le 29 novembre 2021 est de l'ordre de 14 000 particules/cm<sup>3</sup>. Elle est supérieure au niveau moyen relevé en air extérieur (de l'ordre de 10 500 particules/cm<sup>3</sup> en moyenne sur la même période). **En moyenne sur la période, le nombre de PUF est plus élevé de 30 % en EFS sur le quai du métro en comparaison au point de référence en situation de fond en air extérieur.**

Contrairement au RER A, le maximum horaire relevé au niveau du quai de la station de métro École militaire est plus fort que celui relevé par la station Paris 1<sup>er</sup>, avec 42 000 particules/cm<sup>3</sup> contre 29 500 particules/cm<sup>3</sup> au niveau de la station Paris 1<sup>er</sup>. Ces résultats illustrent l'impact du trafic routier sur l'air extérieur aspiré dans la station de métro.

<sup>8</sup> Conforme : Le taux des données valides est considéré comme satisfaisant s'il est supérieur ou égal à 85 %

À une échelle temporelle plus fine, les données 5 minutes enregistrent au niveau du quai du métro École militaire des concentrations en PUF à plus de 85 000 particules/cm<sup>3</sup> contre 16 800 particules/cm<sup>3</sup> sur le site de Paris 1<sup>er</sup> à la même heure illustrant de fortes sources locales de PUF, très probablement le trafic routier, au-delà de sources intérieures dans les EFS. Cette donnée est rencontrée le 23 novembre à 10h20 pendant les horaires d'exploitation du réseau. A ce pas de temps fin, sur les horaires de service, 1 476 données dépassent le Percentile 75 horaire établie à 18 345 particules/cm<sup>3</sup> avec 14 données dépassant les 50 000 particules/cm<sup>3</sup>, ces 14 données sont reprises dans le Tableau 8.

dates	heure (TU)	PUF Métro en part/cm3
08/11/21	17:35	51165
09/11/21	20:30	67304
09/11/21	21:25	58018
09/11/21	21:30	52609
10/11/21	20:55	62315
10/11/21	21:15	61281
10/11/21	22:25	50349
11/11/21	20:55	56352
11/11/21	21:00	76450
18/11/21	15:15	65289
22/11/21	22:30	57716
23/11/21	10:20	85115
25/11/21	20:20	52534
29/11/21	21:40	57581

Tableau 8 – Donnée PUF 5 min. présentant des niveaux supérieurs à 50000 particules/cm<sup>3</sup> sur le quai du métro école militaire, période du 08/11 au 29/11/2021 durant le service commercial.

Ces 14 données ont été enregistrées durant le service commercial. Ces 14 données présentent des ratios élevés en comparaison avec l'air extérieur en situation de fond, allant fois 2 à fois 5 **caractérisant une ou des sources ponctuelles de PUF pouvant largement impacter la qualité de l'air au niveau du quai** de la station de métro École militaire. **Des résultats en proximité obtenus lors de la première campagne de l'étude PUF en situation de proximité au trafic routier montrent des niveaux moyens compris entre 17 000 particules/cm<sup>3</sup> pour un boulevard parisien et 53 000 particules/cm<sup>3</sup> pour une route nationale d'Île-de-France. Sur cette dernière typologie routière, le nombre de PUF a dépassé en horaire les 300 000 particules/cm<sup>3</sup>.**

La variabilité du nombre horaire des PUF au niveau du quai de la station de métro École militaire ainsi qu'à la station de référence Paris 1<sup>er</sup>, est présentée sur la Figure 38 par des boîtes à moustaches sur toute la période de mesure, du 8 au 29 novembre 2021.



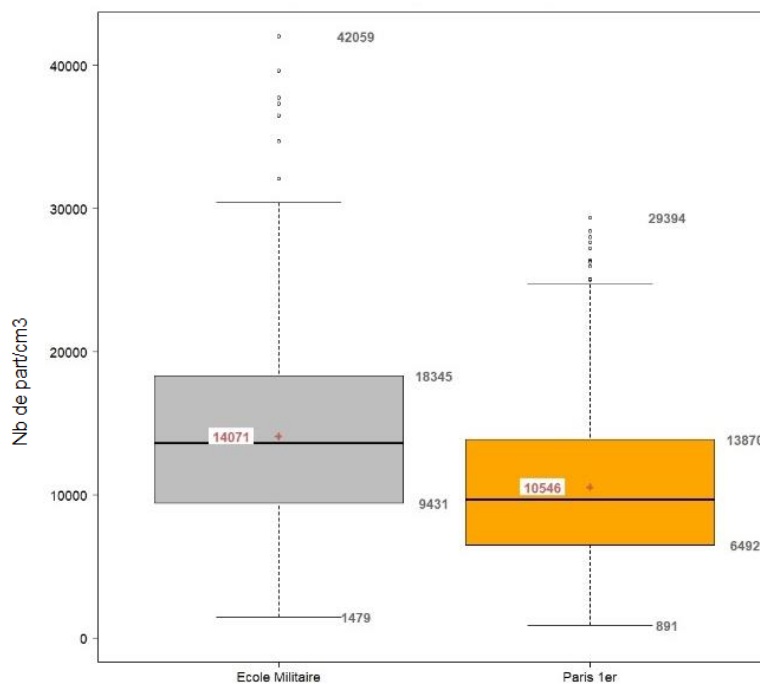


Figure 38 – Boîtes à moustaches des relevés horaires en PUF (en particules/cm<sup>3</sup>) au niveau du quai de métro de la station École militaire et à la station Paris 1<sup>er</sup>, du 8 au 29 novembre 2021.

Les deux boîtes à moustaches des relevés à l'échelle horaire des PUF montrent des répartitions relativement équilibrées avec quelques valeurs horaires atypiques relevées sur le quai de métro. Sur l'ensemble de la période de mesures, le nombre de PUF moyen est légèrement supérieur au nombre de PUF médian de l'ordre de 450 particules/cm<sup>3</sup> pour le métro et de 850 particules/cm<sup>3</sup> sur le site de Paris 1<sup>er</sup>. 50 % des données sont comprises entre 9 400 et 18 300 particules/cm<sup>3</sup> au niveau du quai de la station de métro École militaire, et entre 6 500 et 13 900 particules/cm<sup>3</sup> à la station Paris 1<sup>er</sup>.

**L'étude menée par Airparif sur l'hiver 2020-2021 en situation de fond montre des variabilités moyennes pouvant aller jusqu'à 30 % sur des sites urbains de même typologie.** Le site de Paris 1<sup>er</sup> Les Halles, situé dans un jardin, et plus éloigné des sources, notamment des axes routiers, relevait les niveaux les plus faibles que les autres sites urbains. **De plus, l'air de la station de métro École Militaire est influencé par les axes routiers à proximité et ne peut être considéré comme des niveaux de fond, expliquant, au moins en partie, le nombre plus important de PUF.**

### 3.2.2 Variabilité des relevés horaires pendant la campagne de mesures

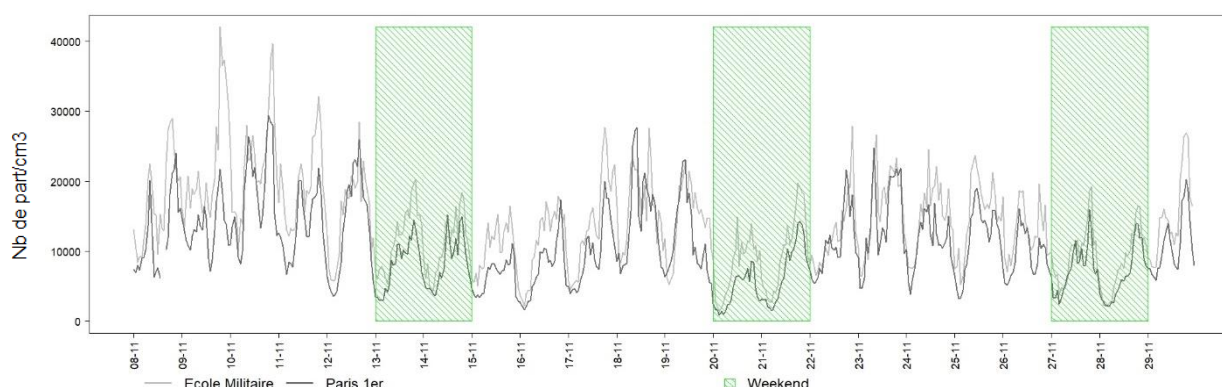


Figure 39 – Évolution des relevés horaires des comptages PUF, en particules/cm<sup>3</sup> sur le quai de la station de métro École militaire et de la station Airparif Paris 1<sup>er</sup>, du 8 au 29 novembre 2021.



La Figure 39 présente une dynamique commune du nombre horaire de PUF entre le quai du métro École militaire et au niveau de la station Paris 1<sup>er</sup>. **Les PUF provenant d'une multitude de sources d'émission et de processus de transformation physico-chimiques**, de fortes variations sont enregistrées d'une journée à l'autre mais aussi au cours d'une même journée. La première semaine de l'étude marquée par une pollution importante en air extérieur a entraîné sur cette même période des fortes hausses du nombre de PUF mesurées sur le quai du métro École militaire, ce constat est particulièrement marqué les journées du 09 au 11 novembre. Les week-ends, représentés par l'encadré vert, illustrent une baisse franche le samedi et le dimanche. Le nombre de particules et les concentrations en masse sont maximales sur la même journée marquée par un épisode de pollution.

La Figure 40 représente l'évolution du nombre de PUF au cours de la journée, en moyenne sur la campagne, sur les sites d'étude. L'enveloppe de couleur représente l'espace interquartile, qui correspond à l'intervalle dans lequel sont comprises au moins 50 % des données de l'heure considérée, de manière à illustrer la variabilité des données moyennes horaires.

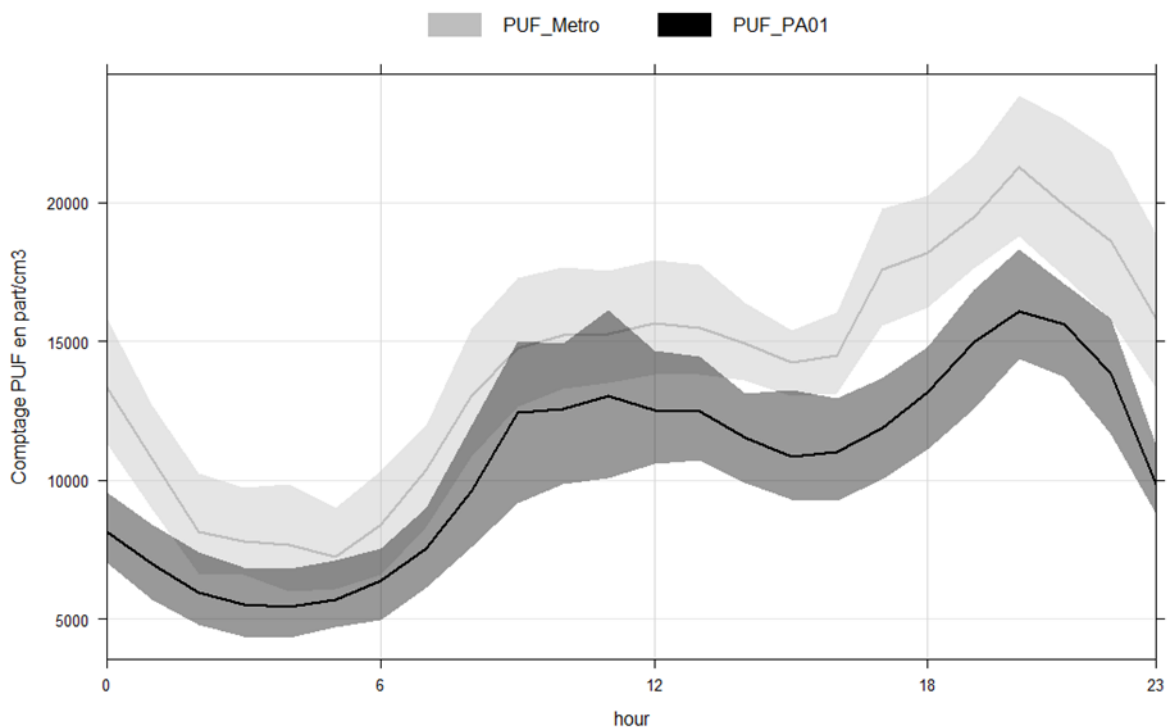


Figure 40 – Profils moyens journaliers des PUF au niveau de la station de métro École militaire et à la station Paris 1<sup>er</sup>, du 8 au 29 novembre 2021.

Les deux profils journaliers illustrés en Figure 40 sont cohérents avec l'étude Airparif sur les PUF. Ils présentent un cycle journalier bien marqué avec un profil urbain « **double bosse** » qui est caractéristique de la pollution aux particules en zone urbaine.

Au niveau du quai de la station de métro École militaire et au niveau de la station Paris 1<sup>er</sup>, le nombre de PUF obtenu par mesure SMPS évolue de la même manière au cours de la journée. Bien que les deux sites illustrent une montée le matin et le soir, sur le quai du métro, le nombre de PUF est toujours supérieur à la station Paris 1<sup>er</sup> en lien avec la proximité des axes routiers.

Comme en air extérieur, sur le quai du métro, le nombre de PUF le plus important est identifié à 20h avec des niveaux moyens dépassant les 20 000 particules/cm<sup>3</sup>.

Cette dynamique commune semble caractériser les mêmes sources de PUF entre ces deux sites avec un quai de métro plus impacté par ces sources de PUF notamment en soirée.

L'analyse du nombre total de PUF ne permet pas de caractériser l'impact de chacune de ces sources. **L'analyse des profils granulométriques moyens suivant les différentes classes permet d'affiner ces observations.**

### 3.2.3 Profils granulométriques moyens

**La littérature scientifique fait état d'une distribution normale du diamètre des PUF si l'environnement est soumis à l'influence d'une source unique.** Les caractéristiques de distribution sont reprises dans la Figure 21 [7] :

Le profil théorique caractérisé par le paramètre statistique « mode » qui est le diamètre particulaire présentant le plus grand nombre de particules, représenté Figure 21, est bâti pour une source unique mais les aérosols peuvent présenter une multitude de sources de PUF rendant ce profil multi-modal et permettant alors d'identifier en comparaison à la distribution granulométrique en air extérieur un ou plusieurs modes caractéristiques d'une ou plusieurs sources propres à l'environnement étudié, dans ce cas le quai du métro de la station École militaire.

La mesure SMPS réalise un tri de ces particules les plus fines configuré sur la gamme granulométrique 5 à 400 nm, suivant 121 classes granulométriques et permet de bâtir les profils granulométriques expérimentaux à fine échelle sur chacun des sites. **Bien qu'étant centrée sur les PUF, inférieures à 100 nm, l'analyse des profils granulométriques est réalisée sur un spectre plus large, allant jusqu'à 400 nm, afin de pouvoir étudier le profil des sources dont le mode peut s'étendre au-delà des PUF.**

La construction des profils granulométriques moyens est réalisée en regroupant les différentes données de comptage de chaque classe sous forme de courbe. Celui-ci présente en abscisse les tailles des particules (diamètre en nm, en échelle logarithmique) et en ordonnée la concentration en particules, exprimée en particules/cm<sup>3</sup>. La Figure 41 illustre les résultats obtenus pour les deux sites d'étude.

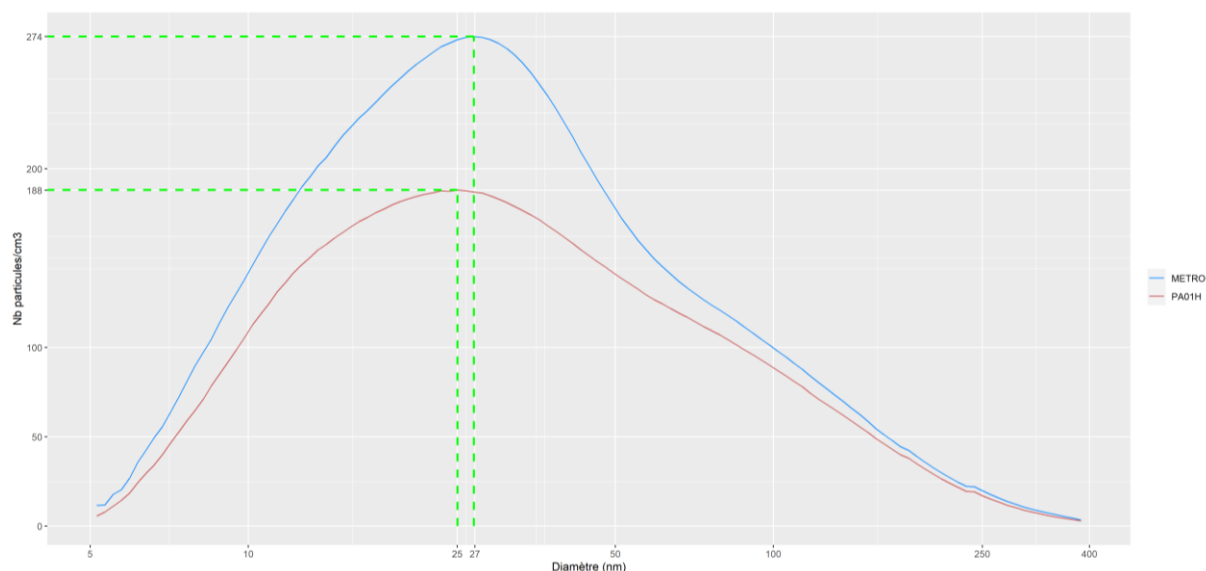


Figure 41 – Distribution granulométrique moyenne au niveau du quai de la station de métro École militaire et à la station Paris 1<sup>er</sup>, du 8 au 29 novembre 2021.

Sur la Figure 41, les profils granulométriques moyens sur la période d'étude montrent la présence d'un mode largement majoritaire **se situant dans la gamme des PUF, soit de taille inférieure à 100 nm**. Le mode prédominant est très proche sur les deux sites, identifié sur la gamme de diamètre allant 20-30 nm, avec 25 et 27 nm respectivement pour la station Paris 1<sup>er</sup> et pour le métro École militaire.

Sur les deux sites, l'étude des profils granulométriques montre sur cette période de mesure 2 autres sources bien moins marquées que la première. L'une intervient sur la gamme de diamètres allant 50-100 nm avec un mode difficile à définir du fait du recouvrement de la première source identifiée.

La troisième source potentielle de particules avec un mode supérieur à la gamme des PUF est retrouvée entre 200 et 250 nm présentant un signal très faible.

**L'étude PUF Airparif en situation de fond sur l'hiver 2020-2021 a montré qu'en saison hivernale sur le site Airparif Paris 1<sup>er</sup>- les Halles, le profil fait apparaître deux sources prédominantes de PUF : une première population majoritaire de particules ultrafines de diamètres compris dans la tranche 15 à 30 nm, caractéristique des PUF émises par le trafic routier, et une seconde population de diamètre compris entre 70 et 100 nm, en lien avec la combustion de biomasse. La dernière population retrouvée sur des diamètre 200 à 250 nm de faible intensité caractérise les aérosols secondaires [8].**

Il apparaît clairement sur le site de Paris 1<sup>er</sup>- les Halles la première population prédominante avec le mode observé à 25 nm, **spécifique au trafic routier.**

Les autres populations de PUF, saisonnières, avec des modes compris entre 70 et 100 nm et sur la gamme 200 à 250 nm caractérisant la source chauffage au bois et d'aérosols secondaires, pourraient également expliquer, au moins en partie, le profil des PUF dans la station École militaire.

Le mode majoritaire identifié sur le profil granulométrique du métro est proche de celui de la station Airparif des Halles et compris dans la tranche 15 à 30 nm. Cette analogie entre l'air extérieur et au niveau du quai du métro semble illustrer une source commune identifiée comme provenant du trafic routier. Ce constat est aussi valable pour les sources chauffages au bois et les aérosols secondaires.

Ces résultats illustrent l'impact de la pollution extérieure sur l'air intérieur au niveau du quai du métro. Cet import étant réalisé par les entrées de la station situées à proximité direct du trafic routier, l'impact de la source trafic routier se retrouve plus importante dans l'enceinte de la gare qu'au niveau de la station de fond Airparif située dans un jardin, et plus éloignée des sources, notamment des axes routiers. Les sources de combustions biomasse et d'aérosol secondaire étant plus diffuses ces dernières au niveau du quai du métro sont plus proches en nombre de ceux du site de Paris.

Sur la Figure 41, au niveau du mode majeur, le quai du métro enregistre en moyenne 274 particules/cm<sup>3</sup> contre 188 particules/cm<sup>3</sup> illustrant un environnement plus influencé par la source trafic routier. Cet écart est plus marqué sur le quai du métro que sur le quai du RER A.

**Aucune autre source spécifique de PUF, non retrouvée en air extérieur, n'a été identifiée durant cette étude sur le quai du métro École militaire, néanmoins l'impact fort du trafic routier dans l'enceinte de la station ne permet pas de déconvoluer et d'identifier d'éventuelles autres sources intervenant sur la gamme des PUF pouvant être propres à l'environnement des EFS.**

### 3.2.4 Évolutions horaires des profils granulométriques moyens

**Le cycle journalier des polluants primaires tel que le trafic routier** identifié sur la distribution granulométrique moyenne est largement gouverné par les conditions dispersives, en particulier la hauteur de couche limite, qui détermine le volume d'air dans lequel les polluants vont disperser les émissions. Cette hauteur de couche limite est généralement minimale le matin et, dans une moindre mesure, le soir et elle est maximale en milieu de journée. À l'évolution de ces conditions dispersives, se rajoute le cycle des émissions locales, avec un maximum d'émissions à l'heure de pointe du matin, au moment où les conditions de dispersion sont les plus défavorables, et un pic le soir, plus intense et moins étalé, dû à la baisse de la hauteur de couche limite associée à l'étalement des heures de retour travail-domicile en Île-de-France.

Si les PUF retrouvées sur le quai du métro École militaire résultent d'un import de polluant issu du trafic routier extérieur, la dynamique horaire sur le quai du métro devrait respecter cette temporalité. La Figure 42 reprend pour chaque heure la distribution granulométrique moyenne pour chaque heure de l'étude présentée de minuit (00) à 23h (23).

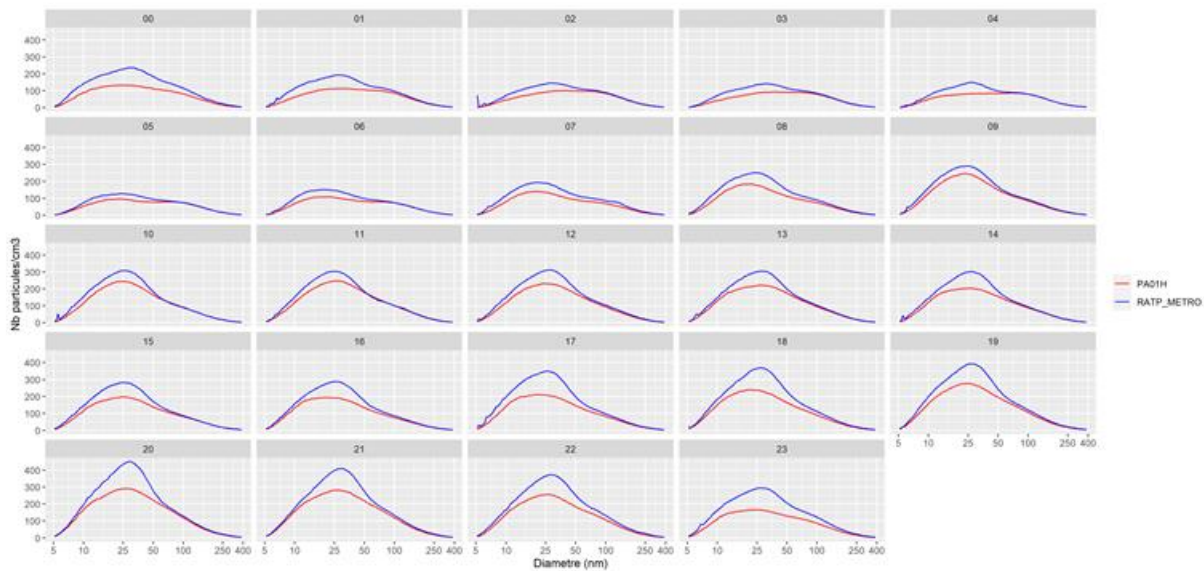


Figure 42 – Evolution horaire des distributions granulométriques moyennes au niveau du quai de la station de métro École militaire et à la station Paris 1<sup>er</sup>, du 8 au 29 novembre 2021.

La Figure 42 illustrant l'évolution temporelle heure par heure des profils granulométriques entre les 2 sites étudiés montre des profils comparables en termes de taille en nombre sur la plage horaire 02h et 09h entre le quai du métro et le site de Paris 1<sup>er</sup> -Les Halles avec un nombre plus important pour le mode compris en 20 et 30 nm sur le quai de métro. Cela caractérise une source similaire et commune retrouvée en air extérieur et au niveau du quai du métro École militaire, la source trafic routier, mais plus intense au niveau d'École Militaire.

L'impact de la source trafic est plus visible sur le site École Militaire sur la plage horaire de 10h à 01h; cette plage présentant une activité anthropique plus importante valide l'influence importante du trafic routier sur le nombre de particules compris entre 5 et 50 nm, comme supposé précédemment. Les niveaux sont similaires à ceux du site de fond sur le reste de la gamme granulométrique.

**L'import continu d'air neuf au niveau du quai du métro entraîne un import continu des polluants extérieurs et donc des PUF issues du trafic routier proche des entrées d'air en journée** (voir Figure 43).

Comme sur le quai du RER A, un recouvrement de sources peut être envisagé notamment sur les particules de diamètres inférieures à 10 nm présentant des signaux faibles sur le quai du métro École militaire sur de nombreuses heures, concentrations inférieures à 50 particules/cm<sup>3</sup>, non observés en air extérieur. Les PUF trafic étant très majoritaires, ils ne permettent pas d'analyser spécifiquement ce phénomène rencontré entre 5 nm et 10 nm.

**Sur le quai du métro École militaire de la gare de Châtelet-Les Halles, sur les 3 semaines de surveillance la pollution aux PUF semble en majorité issu de l'air extérieur.**

Sur cette station de métro, l'air extérieur rentre dans la station par les accès piéton. Les accès des stations sont représentés sur le plan ci-dessous :



Figure 43 – Illustration des sorties sur l'extérieur de la station de métro École Militaire

**Légende :**

Les points violets représentent les accès de la station École Militaire  
Les numéros correspondent aux numéros des sorties

- 1 – av. Bosquet
- 2 – av. Duquesne
- 3 – av. de La Motte-Picquet

# Conclusions

Les campagnes réalisées par Airparif dans les enceintes souterraines de la RATP ont permis d'enregistrer et d'analyser les données en particules acquises sur un quai du RER A de la gare Châtelet-Les Halles et un quai de la station École militaire sur la ligne 8 du métro.

Ces mesures ont permis de caractériser pendant trois semaines les particules présentes à la fois en masse avec la mesure des particule  $PM_{10}$  et en nombre de particules. Les mesures en nombre ont été effectuées d'une part pour les particules ayant un diamètre supérieur à 180 nm et, d'autre part pour les particules ultrafines (PUF) ayant un diamètre inférieur à 100 nm) et les plus fines (jusqu'à 400 nm) avec deux appareils différents. Le profil granulométrique des PUF a également été établi. De plus, sur le quai RER, pouvant accueillir des moyens de mesure complémentaires, des prélèvements sur filtre ont permis de caractériser la composition chimique des particules  $PM_{10}$ .

Toutes ces données ont alors été comparées à la station de référence du réseau de mesure d'Airparif de Paris centre située dans le jardin des Halles, station définissant l'air ambiant parisien dit de fond, c'est à dire, éloigné des sources spécifiques comme le trafic routier.

Les deux points de mesure observent globalement le même type de résultats avec des concentrations massiques de particules  $PM_{10}$  2 à 3 fois supérieures en moyenne aux niveaux en air extérieur. Ces concentrations en particules  $PM_{10}$  sont une problématique connue dans les enceintes ferroviaires souterraines. Des métaux et en particulier des particules ferriques caractérisant 88 % des particules métalliques sur le point de mesure du RER A représentent plus de 50 % de la masse reconstituée par les données d'analyse de composition chimique des  $PM_{10}$ .

Dès l'arrêt du passage des trains dans la nuit (arrêt du service commercial), une décroissance plus ou moins rapide des niveaux est observée pour atteindre ponctuellement en début de matinée les niveaux enregistrés en air extérieur.

En nombre de particules, la mesure optique a permis d'illustrer sur les deux points de mesure des niveaux en nombre de particules de granulométrie comprise entre 180 nm et 18  $\mu$ m similaires à ceux relevés en air extérieur en situation de fond, que ce soit sur le quai du RER A de la gare de Châtelet-Les Halles ou sur celui de la station École militaire sur la ligne 8 du métro. Ce constat est le même pour les profils temporels, qui sont comparables. La mesure par SMPS, permettant de mesurer le nombre de particules ultrafines montre des nombres de PUF 10 % à 30 % supérieurs aux niveaux rencontrés en air extérieur en situation de fond en lien avec l'influence des émissions du trafic routier.

L'analyse des profils granulométrique confirme cette influence avec une source prédominante de mode compris entre 20-30 nm caractéristique du trafic routier. Cette analyse est validée par l'évolution temporelle des profils moyens horaires montrant une hausse du nombre de ces particules ultrafines en journée certainement en lien avec le flux de trafic impactant l'air extérieur utilisé pour la ventilation de la station. Le profil horaire non directement corrélé aux pics de trafic peut venir d'une accumulation dans la station/ gare en journée ou d'une source intérieure. Cette source prédominante de particules ultrafines issues du trafic pourrait en effet masquer une source intérieure de PUF. Cette hypothèse n'a pu être vérifiée ou invalidée sur ces deux points mesure compte-tenu de la très forte influence sur cette gamme granulométrique de l'import de polluants de l'extérieur.



# Références

- [1] : Caractérisations toxicologiques in vitro, chimiques et physiques de particules prélevées dans l'air d'habitacles de transport en roulage, ADEME, Mars 2022
- [2] : Qualité de l'air intérieur - Quais gares SNCF - Rapport final 2020, Airparif, 2020
- [3] : Bulletin climatologique Météo France mensuel régional, Île-de-France Octobre 2021
- [4] : 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
- [5] : Effet sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie, ANSES, 2019
- [6] : Aérosol sources in Subway environnements, Minguillon et al, 2018
- [7] : Les aérosols : Physique et métrologie, Renoux et Boulaud, 1998
- [8] : Campagne de mesure francilienne sur les particules ultrafines (PUF) situation de fond hiver 2020-2021, Airparif, Février 2022
- [9] : Bulletin climatologique Météo France mensuel régional Île-de-France, Novembre 2021



# Annexes

## Annexe 1 - Éléments techniques de la Station Châtelet-Les Halles

### Configuration de la gare :

Correspondances avec les lignes B et D du RER et avec les lignes 1, 4, 7, 11 et 14 du métro.  
4 quais encadrés de voies.  
Pas de portes palières

**Ventilation** : Mécanique

### Fréquentation de la gare (historique sur 5 ans) :

Ces données reprennent le trafic des entrants directs sur le réseau ferré RATP. Les « entrants directs » sont exclusivement les voyageurs provenant de la voie publique ou du réseau SNCF entrant sur le réseau de transport RATP en validant un titre de transport valide. Les voyageurs en correspondance (y compris correspondances métro/RER) sur le réseau RATP ne sont pas comptabilisés

Nombre de voyageurs en 2017 : 30 156 193  
Nombre de voyageurs en 2018 : 33 424 797  
Nombre de voyageurs en 2019 : 33 581 162  
Nombre de voyageurs en 2020 : 18 301 464  
Nombre de voyageurs en 2021 : 24 100 383  
(Source : Open Data RATP / <https://data.ratp.fr/explore/?sort=modified>)

### Caractéristiques du matériel roulant :

Matériel : type RER  
Modèle : automotrices à 2 niveaux MI 09, MI 2N  
Véhicules compartimentés (5 caisses)  
Véhicules à étage (2 niveaux), 1 305 places totales par train.  
Energie motrice : électrique par caténaire  
Type de roulement : fer

### Liste des sorties sur l'extérieur :

#### **Secteur Forum**

Sortie 1 - Marguerite de Navarre / Porte du Cœur de Paris  
Vers Crèmerie de Paris, Samaritaine, Louvre, Centre Pompidou, Notre Dame  
Sortie 2 - Porte Berger vers Forum  
Sortie 3 - Porte Lescot vers Forum  
Sortie 4 - Porte Rambuteau  
Sortie 5 - Porte Sainte Eustache  
Sortie 6 - Porte du Pont Neuf  
Sortie 7 - Porte du Jour  
Sortie 8 - Porte du Louvre  
Sortie 9 - Porte Montorgueil

#### **Secteur Rivoli**

Sortie 10 - Saint Opportune  
Sortie 11 - Rue de Rivoli  
Sortie 12 - Rue Bertin Poirée  
Sortie 13 - Rue des Lavandières  
Sortie 14 - Rue Saint-Denis

#### **Secteur Seine**

Sortie 15 - Théâtre du Châtelet-Les Halles  
Sortie 16 - Place du Châtelet-Les Halles  
Sortie 17 - Théâtre de Ville  
Sortie 18 - Avenue Victoria  
Sortie 19 - Rue Saint-Martin

## Annexe 2 - Détails techniques des mesures

### Indicateurs de la pollution retenus

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. C'est pour cette raison, que les concentrations massiques en particules PM<sub>10</sub> ainsi que le nombre de particules ont été suivis.

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. En complément des analyse métaux, **des analyses de matière carbonée (carbone élémentaire et carbone organique), matières inorganiques et minérales** ont été réalisées pour permettre d'estimer la part de chaque nature des PM<sub>10</sub>.

### 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.



Dans cette étude, 3 analyseurs automatiques ont été utilisés pour réaliser ces deux campagnes de mesure le TEOM (mesure massique), le Fidas (comptage optique) et le SMPS (comptage PUF).

- MESURE DE LA CONCENTRATION MASSIQUE (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) :

Dans le cadre de cette étude, un **TEOM 1405** de chez Thermo Scientific est utilisé. Son principe de fonctionnement consiste à peser des poussières collectées sur un filtre après filtration d'un volume connu d'air. Cette méthode est la méthode de référence pour mesurer la concentration massique en poussières dans l'environnement. Partant de ce principe, le TEOM 1405 mesure en temps réel les variations de poids d'un filtre traversé par un débit régulé d'air. Son prélèvement chauffé à 50°C pour éviter de collecter de l'humidité, cet analyseur n'intègre pas la partie volatile des particules. Cette analyseur équipe le réseau de mesure SQUALES de la RATP.



- MESURE DE COMPTAGE OPTIQUE (en particules/ $\text{cm}^3$ ) :

Le **FIDAS 200** est un granulomètre optique délivrant des mesures de granulométrie en nombre de particules en suspension. La mesure est basée sur la détection de la lumière diffusée par les aérosols, pour déterminer leur taille et leur nombre par classe de taille. L'échantillon d'air ambiant est aspiré au niveau d'une tête de prélèvement sans diamètre de coupure, c'est-à-dire laissant passer les particules totales en suspension ; il passe ensuite dans une ligne de prélèvement chauffée, technique qui permet de s'affranchir des problèmes liés à l'humidité. Le FIDAS 200 mesure des concentrations en nombre pour les particules comprises entre 0.18 et 18  $\mu\text{m}$  (soit 180 - 18 000 nm) de diamètre, selon 64 classes de taille. Il fournit donc des données de granulométrie en nombre, c'est-à-dire un nombre de particule par unité de volume (nb part/ $\text{cm}^3$ ) pour chacune des 64 classes de taille. Le FIDAS convertit le diamètre optique mesuré en diamètre aérodynamique.

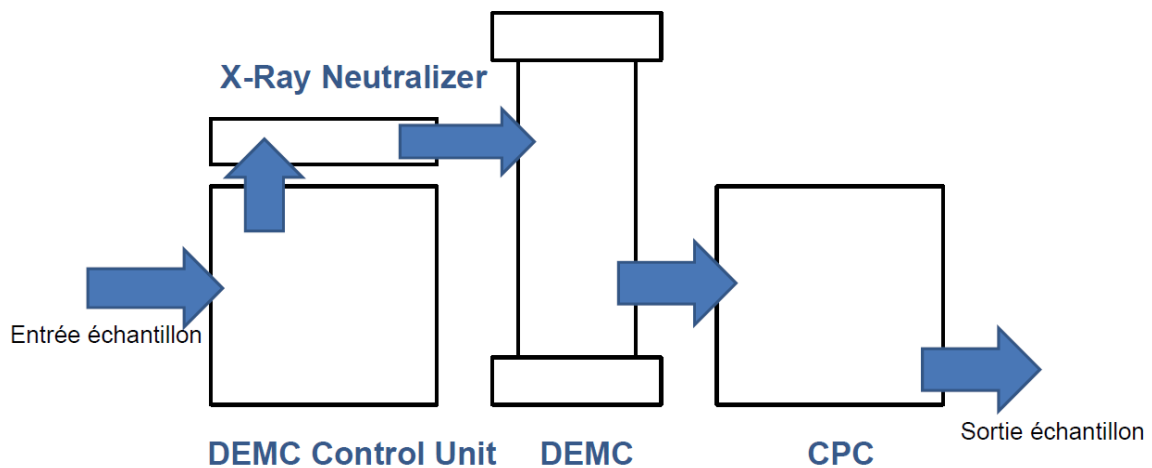


- MESURE DE COMPTAGE PUF (en particules/ $\text{cm}^3$ ) :

L'analyseur choisi pour réaliser cette surveillance PUF est un **spectromètre granulomètre à mobilité électrique** (Scanning Mobility Particle Sizer). En métrologie des aérosols, c'est une méthode de mesure fondée sur les propriétés électriques des aérosols et dont le principe comprend 4 étapes successives :

- Le marquage des particules par une source rayon X (neutraliseur)
- La séparation et la sélection des particules, avec un Classificateur Electrostatique (DEMC),
- La détection des particules, avec un Compteur de Noyaux de Condensation (CPC),
- Le traitement des données.

Ces étapes sont illustrées dans le schéma technique ci-dessous :

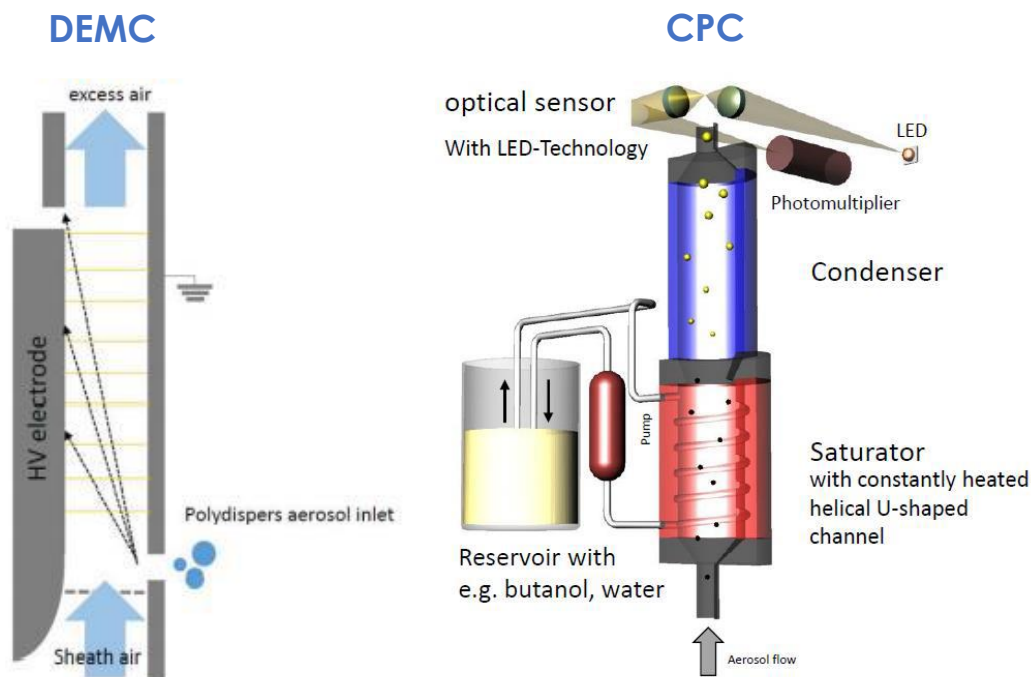


**Le SMPS ainsi composé d'un DEMC (Differential Electrical Mobility Classifier) qui sélectionne les particules suivant leurs tailles granulométriques via leurs mobilités électriques, et d'un CPC (Condensation Particle Counter) permettant de les faire grossir afin de les compter.**



Il est nécessaire de charger électriquement les particules dans un neutraliseur pour réaliser le tri des particules. Pour ce faire, un rayonnement ionisant est envoyé sur les molécules d'air, générant des ions positifs et négatifs venant se coaguler avec les particules ultrafines.

À l'issue du neutraliseur, un équilibre stationnaire se crée entre les différentes fractions de charges, dont la distribution est connue. Les particules, une fois passées dans le neutraliseur, et donc chargées électriquement, sont envoyées dans la colonne du DEMC. Un champ électrique variable va sélectionner les particules selon leur mobilité électrique, et donc leur taille. Une fois sélectionnées, les particules monodispersées sont envoyées au CPC pour comptage. Les schémas constructeurs du DEMC et du CPC sont illustrés ci-page suivante :



Le CPC permet de compter optiquement les particules préalablement sélectionnées dans le DEMC. Afin que le détecteur puisse les détecter, il faut grossir la taille des particules.

Pour faire grossir ces nanoparticules, la méthode consiste à faire passer le flux de particules ultrafines dans une chambre sursaturée en vapeurs d'alcool. L'alcool, après refroidissement, va venir se condenser sur les particules ultrafines, ce qui aura pour conséquence de les faire grossir.

Ainsi, la mesure brute est en particules par secondes et la concentration en nombre, en particules/cm<sup>3</sup>, est déduite par inversion, en tenant compte des pertes par diffusion et de la dilution des PUF par leur passage dans la colonne du DEMC. Ces pertes de charges ont été estimées pour l'un des SMPS d'Airparif lors d'un exercice national d'intercomparaison réalisé par Atmo Hauts-de-France en 2019 portant sur le comptage (Atmo HdF, 2019). Les résultats obtenus sont conformes aux attentes métrologiques.

L'U-SMPS de chez Palas existe avec deux modèles de colonne DEMC, une grande permettant d'obtenir la distribution granulométrique sur la gamme 10 à 1000 nm et une petite affichant une gamme plus fine allant de 5 à 400 nm. **Pour cette étude, il a été choisi de configurer cet analyseur sur la gamme la plus fine allant de 5 nm à 400 nm avec une mesure toutes les 5 minutes validée techniquement sur 121 classes.**

**D'un point de vue normatif**, il n'existe pas de norme qui régit cette mesure SMPS. Actuellement, la seule norme existante est basée sur le comptage total par CPC. Cette norme XP CEN/TS 16976 Air ambient – « Détermination de la concentration en nombre de particules de l'aérosol atmosphérique. » datant de 2016 est une spécification technique traitant de travaux qui sont encore en phase de développement technique ou dont on estime qu'ils sont susceptibles d'un accord futur sur une norme internationale. Une norme propre à la mesure SMPS est en cours de discussion.

## PRELEVEMENTS MANUELS

Toutes les mesures ne peuvent pas être réalisées par analyseur automatique : c'est le cas des mesures de composition chimique. Ces mesures se réalisent en deux temps : prélèvement sur filtre, puis analyse en différé dans un laboratoire spécifique.

Pour la réalisation de ces mesures, deux préleveurs LECKEL a été mis en place. **Les prélèvements de métaux sont réalisés sur des filtres téflon et les prélèvement EC/OC et Anions/Cations sur des filtres quartz.** L'analyse est réalisée selon une méthode normalisée par le laboratoire de l'IMT de Douai pour les métaux et les autres analyses sont confiées au LSCE.

Dans les pratiques existantes dans les enceintes souterraines, les prélèvements sont réalisés pendant 5 jours ouvrés, pour plus de représentativité, pour les métaux comme pour EC/OC et les anions/cations, **les prélèvements ont été effectués sur tous les jours de la campagne y compris le week-end, entre le passage du 1<sup>er</sup> train (environ 5h) et celui du dernier train (environ 1h).**

- **Les analyses EC/OC, Anions et Cations ainsi que les poussières minérales** ont été réalisées sur un prélèvements quartz et analysées par le LSCE. La matière carbonée (EC/OC) est analysée suivant une méthode thermo-optique (Instrument : Laboratory OCEC Carbon Aerosol Analyser, SUNSET) selon la norme EN16909EN16909 et la matière inorganique est analysée par Chromatographie ionique (Instrument : ICS-2000, DIONEX) selon la norme EN 16913.

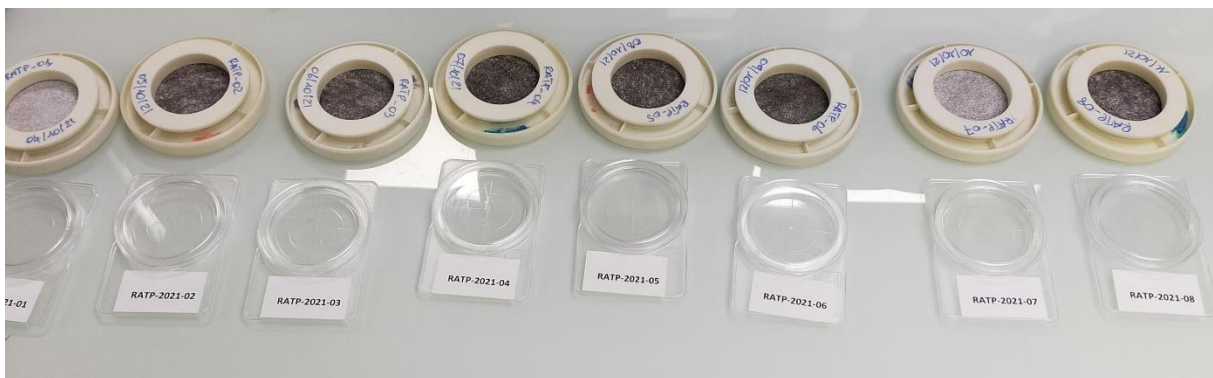
- **Les analyses métaux et silice** ont été réalisées sur un prélèvement téflon et analysées par le laboratoire d'analyse de l'IMT de Douai ICP-MS (Instrument : NeXion 300 XX, Perkin Elmer) selon la norme EN 14902.

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

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

En plus de la liste classiquement analysée, il a été choisi pour cette étude de réaliser l'analyse de 19 autres métaux pouvant illustrer une source encore méconnue, ces métaux sont Argent (Ag), Béryllium (Be), Bismuth (Bi), Cérium (Ce), Cobalt (Co), Césium (Cs), Lanthane (La), Lithium (Li), Molybdène (Mo), Palladium (Pd), Rubidium (Rb), Sélénium (Se), Strontium (Sr), Thorium (Th), Titane (Ti), Uranium (U), Scandium (Sc) et Vanadium (V).

**L'ensemble des mesures réalisées à partir des prélèvements filtres est disponible en** Erreur ! Source d u renvoi introuvable..



## 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 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 % ( $\geq$ ) de données 15 ou 5 minutes sont valides, consécutives ou non sur l'heure.



## Annexe 3 - Analyses de composition chimique

### • Résultats des analyses EC/OC

Le tableau ci-dessous présente les concentrations en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  des analyses filtres quartz collectées sur le quai du RER A de la gare Chatelet-Les Halles.

Les prélèvements sont réalisés à un débit de  $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$  du 05/10/2021 au 24/10/2021 sur les heures de service de 5h à 1h du matin. Les méthodes et laboratoires d'analyse sont présentés en Annexe 2.

Concentration $\mu\text{g}/\text{m}^3$	OC	EC
05/10/2021	5,64	2,74
06/10/2021	6,74	3,03
07/10/2021	8,23	3,62
08/10/2021	9,61	3,61
09/10/2021	11,51	2,89
10/10/2021	9,72	2,27
11/10/2021	7,10	3,10
12/10/2021	7,48	2,96
13/10/2021	7,70	3,61
14/10/2021	9,62	6,29
15/10/2021	10,28	5,61
16/10/2021	9,68	3,52
17/10/2021	8,25	2,19
18/10/2021	8,50	4,41
19/10/2021	7,72	4,20
20/10/2021	7,35	3,51
21/10/2021	6,69	4,36
22/10/2021	7,35	4,74
23/10/2021	9,34	4,83
24/10/2021	8,39	3,40

## • Résultats des analyses Anions/Cations

Le tableau ci-dessous présente les concentrations en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  des analyses filtres quartz collectées sur le quai du RER A de la gare Chatelet-Les Halles. Les 4 derniers composés K, Mg, Ca et Si sont collectés et analysés avec les métaux.

Les prélèvements sont réalisés à un débit de  $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$  du 05/10/2021 au 24/10/2021 sur les heures de service de 5h à 1h du matin. Les méthodes et laboratoires d'analyse sont présentés en Annexe 2.

Concentration $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Cl	NO3	SO4	Na	NH4	K	Mg	Ca	Si
05/10/2021	1,03	0,38	0,78	0,77	0,05	0,25	0,14	0,62	1,64
06/10/2021	1,53	0,72	0,98	1,17	0,10	0,17	0,19	0,76	1,84
07/10/2021	0,79	1,73	1,05	0,91	0,14	0,20	0,17	0,98	2,05
08/10/2021	0,17	1,28	1,81	0,28	0,27	0,24	0,13	2,26	2,82
09/10/2021	0,17	1,82	2,61	0,22	0,57	0,31	0,12	2,46	3,22
10/10/2021	0,10	4,62	2,99	0,16	1,66	0,24	0,11	0,81	1,72
11/10/2021	0,66	1,63	1,37	0,83	0,23	0,19	0,20	0,96	1,98
12/10/2021	0,51	2,04	1,23	0,77	0,13	0,20	0,19	1,24	2,72
13/10/2021	0,85	1,29	1,22	0,86	0,09	0,20	0,18	1,22	2,18
14/10/2021	0,30	1,74	1,31	0,51	0,13	0,28	0,17	1,39	2,62
15/10/2021	0,25	2,03	2,13	0,45	0,18	0,31	0,20	2,11	3,32
16/10/2021	0,31	1,37	1,47	0,50	0,13	0,24	0,15	1,28	2,26
17/10/2021	0,13	1,58	1,28	0,34	0,33	0,22	0,14	0,79	1,71
18/10/2021	0,13	0,92	1,92	0,23	0,24	0,23	0,16	1,65	2,76
19/10/2021	0,17	0,53	1,49	0,28	0,25	0,20	0,15	1,10	2,78
20/10/2021	0,43	0,54	1,88	0,51	0,37	0,18	0,17	1,03	2,52
21/10/2021	1,53	0,51	0,91	1,14	0,06	0,19	0,21	0,78	2,46
22/10/2021	0,98	0,98	0,96	0,92	0,10	0,20	0,19	0,95	2,79
23/10/2021	0,57	1,18	0,94	0,65	0,17	0,24	0,18	0,89	2,93
24/10/2021	0,17	1,32	0,83	0,39	0,24	0,24	0,16	0,62	2,44

## • Résultats des analyses Métaux

Le tableau ci-dessous présente les concentrations en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  des analyses filtres téflon collectées sur le quai du RER A de la gare Chatelet-Les Halles.

Les prélèvements sont réalisés à un débit de  $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$  du 05/10/2021 au 24/10/2021 sur les heures de service de 5h à 1h du matin. Les méthodes et laboratoires d'analyse sont présentés en Annexe 2.

Concentration $\text{ng}/\text{m}^3$	Ag	As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cs	Cu	La	Li	Mn	Mo	Ni	Pb
05/10/2021	0,1	0,6	207,4	0,01	0,26	0,16	0,78	0,83	0,01	127,9	0,42	0,25	80,1	1,6	10,2	3,3
06/10/2021	0,13	0,68	253,2	0,01	0,25	0,14	0,97	0,89	0,01	142,9	0,51	0,28	91,1	2	10,3	4
07/10/2021	0,17	0,95	246,6	0,01	0,41	0,26	1,01	0,84	0,02	136,6	0,55	0,3	82,8	2,2	9,8	7,6
08/10/2021	0,13	1	219,1	0,01	0,51	0,21	1,09	1,21	0,04	147,4	0,58	0,69	93,2	3,2	10,6	7,4
09/10/2021	0,15	0,97	195,3	0,01	0,59	0,28	1,3	0,71	0,06	104,8	0,71	0,57	65,3	2	7,5	8,5
10/10/2021	<LQ	0,56	70,8	0,01	0,18	0,11	0,39	0,29	0,02	50,6	0,25	0,17	27,2	1	3,8	3,3
11/10/2021	0,11	0,9	269,7	0,01	0,24	0,2	1,3	0,89	0,03	152,6	0,67	0,32	93,8	2,3	9,8	4,9
12/10/2021	0,11	1,1	259,9	0,01	0,3	0,18	0,9	0,94	0,04	148,9	0,56	0,44	90,2	2,2	10,1	8,3
13/10/2021	0,16	1,02	285,6	0,01	0,33	0,21	0,99	0,9	0,03	150,2	0,53	0,37	87,9	2,7	11,7	5,8
14/10/2021	0,14	1,24	315,5	0,01	0,46	0,22	1,22	1	0,03	180,6	0,57	1,32	105,7	3,1	11,6	9,9
15/10/2021	0,19	1,92	533,1	0,03	0,66	0,41	3,12	1,72	0,06	266,2	1,24	0,75	171,8	4,5	18,4	14,8
16/10/2021	0,19	0,85	330,3	0,03	0,32	0,24	1,65	1,07	0,04	177	0,87	0,52	98,6	2,8	11	6,1
17/10/2021	0,12	0,82	248,2	0,01	0,3	0,24	0,88	0,76	0,02	127	0,5	0,33	76	2,4	8,4	5,3
18/10/2021	0,19	1,38	444,4	0,03	0,38	0,47	1,38	1,29	0,04	203,8	0,78	1,4	136,3	3,7	13,8	10,9
19/10/2021	0,18	1,62	565,9	0,03	0,43	0,37	1,3	1,57	0,03	248,6	0,75	0,62	160	4,2	16,9	9
20/10/2021	0,11	0,98	367,6	0,01	0,25	0,15	0,84	1,03	0,02	145,6	0,5	0,34	104,6	2,8	10,7	4,2
21/10/2021	0,13	1,34	422,6	0,01	0,23	0,23	0,94	1,25	0,02	187,9	0,56	0,41	130,7	2,8	13,9	4,3
22/10/2021	0,13	1,5	540,9	0,01	0,36	0,28	1,4	1,51	0,03	252,8	0,84	0,55	156,4	3,9	15	6
23/10/2021	0,15	1,58	610,8	0,01	0,35	0,33	1,8	1,58	0,03	261,3	1,02	0,6	164,1	4,3	16,6	8,5
24/10/2021	0,09	1,22	372,7	0,01	0,25	0,2	0,72	1,01	0,02	158,8	0,45	0,37	105,3	2,8	11,1	4,2

<LQ : inférieur à la limite de quantification de la mesure analytique

Le tableau ci-dessous présente les concentrations en µg/m<sup>3</sup> des analyses filtres téflon collectées sur le quai du RER A de la gare Chatelet-Les Halles.

Les prélèvements sont réalisés à un débit de 2,3 m<sup>3</sup>/h du 05/10/2021 au 24/10/2021 sur les heures de service de 5h à 1h du matin. Les méthodes et laboratoires d'analyse sont présentés en Annexe 2.

Concentration ng/m <sup>3</sup>	Pd	Rb	Sb	Se	Sr	Th	Ti	U	Zn	Cr	Sc	V	Al	Ca	Fe
05/10/2021	<LQ	0,35	70	0,14	7,3	0,03	15,3	0,03	74,2	50,1	<LQ	1	347,7	789,3	7803,5
06/10/2021	<LQ	0,4	77,3	0,14	9,1	0,03	23,7	0,02	64,2	51,2	<LQ	1,6	382,9	909,4	8737,1
07/10/2021	<LQ	0,39	78,3	0,44	9,1	0,04	22,4	0,02	73,5	49,4	<LQ	1,6	346,4	1028,9	8609,7
08/10/2021	<LQ	0,62	81,8	0,54	11	0,06	27,3	0,04	78,3	49	0,2	1,6	433	2545,8	8642,7
09/10/2021	<LQ	0,97	57,2	0,79	12,2	0,06	35,9	0,05	71,1	36,8	<LQ	1,7	519,1	2781,4	6447,4
10/10/2021	<LQ	0,31	20,9	0,42	3,1	0,02	17,9	0,01	32,4	15,4	<LQ	0,8	182,8	<LQ	2702,3
11/10/2021	<LQ	0,49	76,7	0,42	9,3	0,04	31,4	0,02	65,5	55,6	<LQ	1,6	407	943,3	9574,1
12/10/2021	<LQ	0,71	80,2	0,43	10,1	0,06	23,4	0,02	76,3	50,2	0,2	1,6	481	1140,8	8916,6
13/10/2021	<LQ	0,57	80,3	0,14	10,7	0,04	27,6	0,02	72	55,5	<LQ	1,6	455,8	1364,5	10200,9
14/10/2021	<LQ	0,75	87,9	0,42	10,8	0,04	35,3	0,03	89,4	65,9	<LQ	1,9	548,6	1346,5	11034,1
15/10/2021	<LQ	1,17	160,4	0,59	19,4	0,94	52,7	0,05	134	110,9	<LQ	3,1	833,6	2562,4	17695,6
16/10/2021	<LQ	0,75	104,9	0,14	12,5	0,04	40,3	0,03	76,4	65,8	<LQ	1,6	533,6	1837,2	10509,8
17/10/2021	<LQ	0,59	75,5	1,17	7,9	0,02	22,9	0,02	59,5	47,9	0,1	1,1	402,9	912,4	8564,8
18/10/2021	<LQ	0,86	132,5	0,7	14,2	0,05	36,5	0,03	114,2	80,2	0,2	1,9	755,9	2028	15702,3
19/10/2021	<LQ	0,84	146,1	0,58	14,9	0,06	42	0,03	131,6	102,6	<LQ	2,2	886,3	1526,1	18239,5
20/10/2021	<LQ	0,49	100,4	0,14	10	0,05	32,1	0,02	62,7	66,5	<LQ	1,6	581,5	1005,5	12279,6
21/10/2021	<LQ	0,49	145,7	0,14	12,3	0,04	28,1	0,02	75,8	88,1	<LQ	1,7	529,9	964,4	12665
22/10/2021	<LQ	0,72	182,4	0,14	16,6	0,06	36,2	0,02	92,8	97,2	0,3	2,1	810,6	1433,1	18400,9
23/10/2021	<LQ	0,9	188,2	0,38	16,7	0,07	51,8	0,04	98,4	113,1	<LQ	2,6	895,7	1322,7	18994,6
24/10/2021	<LQ	0,57	121,9	0,81	10	0,05	27	0,02	62,6	74,3	<LQ	1,6	521,5	674,1	12058,3

<LQ : inférieur à la limite de quantification de la mesure analytique

## Annexe 4 - Éléments techniques de la Station École Militaire

### Configuration de la gare :

Pas de correspondance  
2 voies encadrées de quais.  
Pas de portes palières

Ventilation : Mécanique

### Fréquentation de la gare :

Nombre de voyageurs en 2017 : 4 285 851  
Nombre de voyageurs en 2018 : 4 638 136  
Nombre de voyageurs en 2019 : 4 468 169  
Nombre de voyageurs en 2020 : 1 863 016  
Nombre de voyageurs en 2021 : 2 805 976

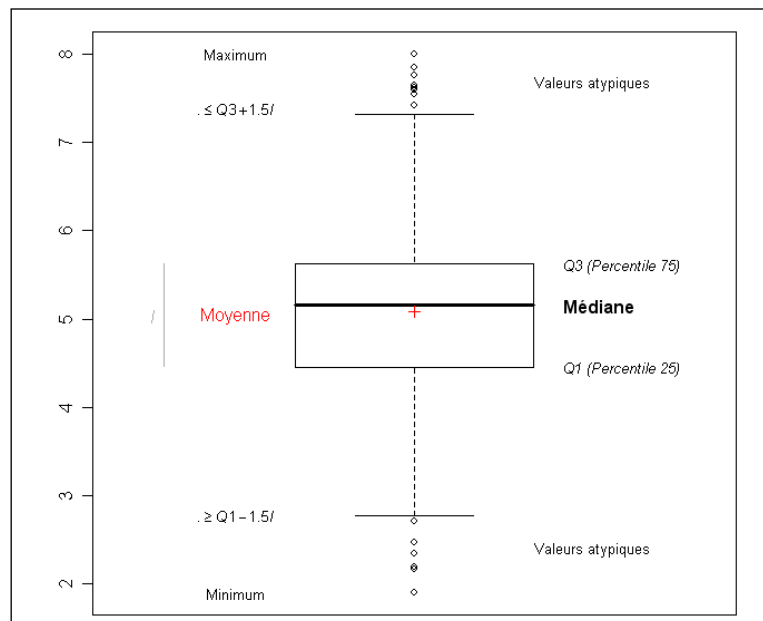
(Source : Open Data RATP / <https://data.ratp.fr/explore/?sort=modified>)

### Caractéristiques du matériel roulant :

Matériel : type métro  
Modèle : automotrices MF 77  
Véhicules compartimentés (5 voitures par rame)  
Véhicules sans étage, 574 places totales par train.  
Energie motrice : électrique par caténaire  
Type de roulement : fer

## Annexe 5 - Boîte à moustaches – Définition

Une boîte à moustaches (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<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> 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 termes 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<sup>ème</sup> 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).