

GUIDE



Ineris-213878-2783593-v1.0

© Nicolas Robin

Recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines

Ce guide méthodologique a été élaboré à la demande de la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) au sein du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires.

Il a été établi sur la base des retours d'expériences d'un groupe de travail piloté par la DGPR et rassemblant plusieurs opérateurs ferroviaires, autorités organisatrices, ministères ainsi que l'Ineris. Des expérimentations ont également été conduites avec quatre opérateurs ferroviaires français afin d'en tester plusieurs parties et préciser sa mise en œuvre. Ce guide a fait l'objet d'une relecture au sein de ce groupe de travail.

Rédacteur : Jessica Queron (Ineris)

avec l'appui de Brice Berthelot et de Michèle Bisson (Ineris)

Membres du groupe de travail :

- Philippe Bodenez (Direction générale de la prévention des risques - DGPR) ;
- Émilie Hillion (Direction générale de la prévention des risques - DGPR) ;
- Valérian GRATPAIN (Direction générale de la prévention des risques - DGPR) ;
- Nathalie Joux (KEOLIS Lyon) ;
- Jean-Christophe Renard (Syndicat mixte des transports pour le Rhône et l'agglomération lyonnaise - SYTRAL) ;
- Anne Strugeon (KEOLIS Rennes) ;
- Sophie Mazoue (Régie autonome des transports parisiens - RATP) ;
- Claire Kaiser (Régie autonome des transports parisiens - RATP) ;
- Jean-Yves Meurisse (Régie des transports métropolitains à Marseille - RTM) ;
- Anaïs Watbled (Société nationale des chemins de fer français à Paris - SNCF) ;
- Cora Cremezi-Charlet (Société nationale des chemins de fer français à Paris - SNCF) ;
- Heidi Carrilho (Société nationale des chemins de fer français à Paris - SNCF) ;
- Anne-Marie VIMARD (Société nationale des chemins de fer français à Paris - SNCF) ;
- Antoine GAVALAND (TISSEO Toulouse) ;
- Didier Rolland (TISSEO Toulouse) ;
- Philippe Moreau (TISSEO Toulouse) ;
- Charles BROCARD (Métropole Lille - ilévia) ;
- Matthieu Falempin (KEOLIS Lille) ;
- Yasmina Baaba (Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer - DGITM) ;
- Stéphanie Jegu (Union des transports publics et ferroviaires - UTP) ;
- Muriel Cohen (Direction générale de la santé - DGS) ;
- Anne Giguelay (Direction générale de la santé - DGS) ;
- Pierre LECOQ (Direction générale du travail - DGT) ;
- Virginie CHRESTIA-CABANNE (Direction générale du travail - DGT).

Sommaire

1.	RÉSUMÉ	7
2.	CONTEXTE ET OBJECTIFS	9
3.	CRITÈRES DE CHOIX DES POLLUANTS À MESURER	13
4.	RECOMMANDATIONS POUR LA RÉALISATION DES MESURES	15
	4.1 Informations à collecter	15
	4.2 Mesures sur les quais	16
	4.3 Mesures dans les rames	22
5.	ANNEXES	27
6.	ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	53

1

RÉSUMÉ

Ce guide fournit des recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines (EFS). Son objectif est de permettre d'acquérir des données sur les niveaux de pollution pouvant être observés dans les EFS, selon une approche commune faisant l'objet d'un consensus au sein d'un groupe de travail présidé par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires rassemblant plusieurs opérateurs ferroviaires, autorités organisatrices, ministères ainsi que l'Ineris.

Les mesures concernent l'atmosphère des quais situés en souterrain et des habitacles des rames y circulant. Elles visent à y caractériser les niveaux des concentrations de certains polluants auxquels les voyageurs sont exposés, principalement les particules PM_{10} et $PM_{2,5}$ et les métaux présents dans les particules PM_{10} . La mesure du CO_2 comme indicateur de confinement en lien avec le renouvellement de l'air, de la température et de l'humidité relative (pour identifier des situations atypiques en termes de confort des voyageurs) sont également intégrés au plan d'échantillonnage. Une synthèse de ces mesures est donnée dans le tableau 1.

Les recommandations concernent différents volets :

- les informations à collecter préalablement et pendant les campagnes de mesures ;
- la sélection des quais à instrumenter, la stratégie de mesure associée et le format de restitution des données ;
- la sélection des rames à instrumenter et la stratégie de mesure associée et le format de restitution des données.

Cette méthodologie ne répond pas à un objectif de surveillance de la qualité de l'air en continu, ni à la recherche des sources de pollution.

	Périmètre des mesures	Paramètres mesurés	Localisation des mesures	Période, durée et fréquence des mesures	Résultats obtenus
<p>Mesure sur les quais en souterrain</p>	<p>Après la phase de sélection des quais à instrumenter, réalisation au minimum des mesures sur les quais présentant les concentrations les plus importantes en PM_{10} et de celui le plus fréquenté.</p>	<p>Particules PM_{10} et $PM_{2,5}$ Métaux sur PM_{10} Confinement (CO_2) Paramètres de confort ($T^\circ C$ et HR)</p>	<p>Au milieu du quai Entre 0,8 et 2,0 m du sol</p>	<p>Mesures des PM_{10} en continu sur une semaine (S1). Mesures des $PM_{2,5}$ en continu sur une semaine (S2). Mesures intégratives sur filtre des PM_{10} et des métaux sur PM_{10} sur 14 jours. 1 prélèvement par jour, à partir de la première rame jusqu'à la dernière rame (pendant l'ouverture commerciale journalière).</p>	<p>Par quai étudié : Mesures en continu des concentrations en particules PM_{10} et $PM_{2,5}$ et de CO_2 sur 14 jours. 14 mesures intégrées sur 24 h des concentrations en particules PM_{10} et des métaux sur PM_{10}.</p> <p>Mise à jour au moins une fois par an.</p>
<p>Mesure dans les habitacles des rames</p>	<p>Mesures dans chaque type de rames roulant sur chaque ligne ayant un temps de parcours en souterrain supérieur à 25 % du temps de parcours sur la totalité de la ligne.</p>	<p>Particules PM_{10} et $PM_{2,5}$ Métaux sur PM_{10} Confinement (CO_2) Paramètres de confort ($T^\circ C$ et HR)</p>	<p>Au milieu de la rame centrale Entre 0,8 et 2,0 m du sol</p>	<p>En fonction de la taille du réseau, l'ensemble des lignes disposant de quais souterrains sera couvert en 1 à 3 ans.</p>	<p>Par rame étudiée : 3 mesures en continu des particules PM_{10} et $PM_{2,5}$ et de CO_2 du début jusqu'à la fin de la ligne. 3 mesures intégrées de PM_{10} et $PM_{2,5}$ et de métaux sur PM_{10} au minimum lors d'un aller/retour du début jusqu'à la fin de la ligne.</p>

Tableau 1 : Synthèse des mesures à réaliser

2

CONTEXTE ET OBJECTIFS

Les enceintes ferroviaires souterraines (EFS) peuvent être définies comme « l'ensemble des espaces couverts situés en dessous du niveau du sol, connectés à une voie de transport ferroviaire souterraine »¹. En France, sept agglomérations disposent d'EFS: Lille, Lyon, Marseille, Paris, Rennes, Rouen et Toulouse.

Les configurations de ces réseaux sont différentes, allant de petits réseaux disposant d'une seule ligne de métro avec une trentaine de stations aériennes et souterraines à de plus importants pouvant atteindre plus d'une dizaine de lignes avec plus de trois cents stations. Le nombre de stations souterraines est également variable.

	Nombre de stations*	Nombre de lignes avec au moins une station en souterrain	Part des stations en souterrain par ligne (en %)
RATP Paris	309 stations de métro et 66 gares RER	16 lignes (14 lignes de métro et 2 de RER)	54 à 100 % pour les lignes de métro avec 12 lignes > 80 % 20 à 50 % pour les lignes RER
SNCF Paris	392 gares en Île-de-France dont 33 à Paris (gares et haltes confondues)	6 lignes	11 à 32 % pour les lignes RER
KEOLIS Lyon	42 stations de métro	5 lignes	> 90 %
RTM Marseille	30 stations de métro	2 lignes de métro et 1 ligne de tramway	> 85 %
KEOLIS Rennes	15 stations de métro	2 lignes	87 %
TCAR Rouen	31 stations de métro	1 ligne	16 %
TISSEO Toulouse	37 (dont une commune aux lignes A et B) 21 pour la troisième ligne	2 lignes (1 ligne en 2028)	Ligne A : 18 stations dont 2 aériennes soit 89 % en souterrain Ligne B : 20 stations soit 100 % en souterrain Ligne C : 21 stations dont 4 aériennes soit 81 % en souterrain

* Plusieurs points d'arrêt par station peuvent exister en fonction du nombre de correspondances.

Tableau 2: Exemple de configurations de certains réseaux ferroviaires en France

1. Rapport Anses « Pollution chimique de l'air des enceintes de transports ferroviaires souterrains et risques sanitaires associés chez les travailleurs », 2015.

La qualité de l'air des enceintes ferroviaires souterraines (EFS) où circulent les trains de voyageurs n'est pas réglementée à l'instar de certains établissements recevant du public (ERP)². Cependant, la qualité de l'air dans les EFS et son impact potentiel sur la santé des personnes exposées constituent une préoccupation depuis plusieurs années. Ainsi dès 2000, le Conseil supérieur d'hygiène public de France (CSHPF) a rendu plusieurs avis^{3, 4, 5, 6, 7, 8, 9} à ce sujet, et en particulier en 2001, il définissait des valeurs de référence de qualité de l'air dans les EFS pour les PM₁₀ destinées aux usagers des transports. Ces dernières avaient été établies sur quatre scénarii correspondant à quatre durées quotidiennes types de séjour dans les enceintes ferroviaires souterraines (durées variant de 1 h 30 à 2 h 15). Il recommandait également aux exploitants ferroviaires d'intensifier les actions d'identification des sources et de réduction des niveaux d'aérocontamination particulaire et leur demandait d'établir un plan pluriannuel de réduction de la pollution particulaire dans les EFS. En complément, il recommandait à la SNCF et à la RATP de mettre en place une surveillance pérenne des concentrations de PM₁₀ dans les enceintes ferroviaires souterraines d'Île-de-France.

Le ministère en charge de la santé a publié la circulaire DGS/SD7B n° 2003-314 du 30 juin 2003 relative à la qualité de l'air dans les EFS. Dans cette circulaire, le directeur général de la santé indique souhaiter que les exploitants de transports collectifs souterrains appliquent les recommandations du CSHPF en définissant un plan de surveillance de qualité de l'air et en identifiant les sources de polluants afin de définir une stratégie de réduction des émissions.

Une analyse des recommandations du CSHPF a été réalisée dans le cadre des travaux d'expertise de l'Anses portant sur la pertinence et faisabilité d'élaborer des valeurs guides de qualité de l'air intérieur (VGAI) spécifique(s) à l'exposition des usagers dans les EFS publiée en 2022 (saisine 2019-SA-0148). Elle souligne que la pollution la mieux caractérisée et entraînant

la plus importante surexposition journalière est celle mesurée par la concentration massique de particules en suspension (PM₁₀ et PM_{2,5}). Elle met en évidence l'absence de données suffisantes pour élaborer une valeur guide pour l'air intérieur (VGAI) spécifique à la pollution de l'air des EFS conformément à la méthodologie de l'Anses (Anses, 2016) en l'absence de valeur guide proposée par l'OMS et de Valeur Toxicologique de Référence (VTR), et compte tenu du corpus d'études épidémiologiques et toxicologiques qui ne permet pas d'identifier un point de départ (PoD) toxicologique ou épidémiologique en lien avec des effets néfastes sur la santé. Par ailleurs, elle précise que « le corpus d'études suggère la possibilité d'effets sur la fonction cardiaque autonome, d'inflammation et de stress oxydant systémiques, et d'inflammation des voies respiratoires, en particulier dans les populations sensibles comme les asthmatiques ». Dans ce contexte, l'Anses « considère que la méthode proposée par le CSHPF en 2001 pour la construction de valeurs de gestion spécifiques aux EFS en lien avec la fréquentation des usagers reste pertinente. Elle permet en effet de s'assurer que la fréquentation des EFS n'entraîne pas de dépassement des valeurs réglementaires journalières établies pour l'air ambiant extérieur ». Toutefois, dans cette nouvelle analyse des données, l'Anses apporte des évolutions par rapport aux valeurs recommandées par le CSHPF qui intègrent les valeurs guides pour les PM de l'OMS (2021¹⁰) en complément des valeurs réglementaires de qualité de l'air ambiant, les données de mesures récentes et une évolution quant aux scénarios d'exposition retenus. Au final, l'Anses recommande a minima de ne pas dépasser les concentrations en PM₁₀ et PM_{2,5} dans l'air des EFS calculées à partir des valeurs guides de l'OMS (2021) pour la qualité de l'air ambiant (C_{sout_OMS}) et à plus forte raison de ne pas dépasser les concentrations en PM₁₀ dans l'air des EFS calculées à partir de la valeur limite journalière de la directive européenne 2008/50/CE pour les PM₁₀ de l'air ambiant (C_{sout_Lim}) (tableau 3).

Ces valeurs doivent être utilisées en tenant compte des conditions d'application spécifiées par l'Anses (Anses, 2022¹¹).

2. Article R. 221-30 et suivants du Code de l'environnement, et textes réglementaires associés.
3. CSHPF – Avis du 10 octobre 2000 relatif à la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines.
4. CSHPF – Avis du 5 avril 2001 relatif à la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines.
5. CSHPF - Avis du 3 mai 2001 relatif à l'élaboration de valeurs guides de qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines.
6. CSHPF – Avis du 8 juillet 2003 relatif à de nouvelles recommandations aux exploitants de réseaux ferroviaires souterrains s'agissant plus particulièrement de la RATP.
7. CSHPF – Avis du 12 mai 2005 relatif à de nouvelles recommandations aux exploitants de réseaux ferroviaires souterrains concernant la pollution de la RATP.
8. CSHPF – Avis du 12 mai 2005 relatif à de nouvelles recommandations aux exploitants de réseaux ferroviaires souterrains s'agissant plus particulièrement de la SNCF.
9. CSHPF – Avis du 27 septembre 2006 relatif à la qualité de l'air dans les transports.

10. OMS. 2021. «WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2,5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.» Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO: Organisation Mondiale de la Santé (OMS). 1-267.

11. Anses, 2022 Avis de l'Anses relatif à l'état des connaissances sur la toxicité des particules et sur les effets sanitaires associés à la pollution de l'air des enceintes ferroviaires souterraines (EFS) et à la proposition de concentrations en particules dans l'air des EFS à ne pas dépasser (Saisine 2019—SA-0148).

L'Ineris a assisté le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires pour élaborer, en concertation avec différents opérateurs ferroviaires, un guide de recommandations des mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les EFS. Il correspond à un socle minimal permettant d'acquérir des données de mesures selon une approche commune afin de :

- consolider la caractérisation de la qualité de l'air déjà en place dans les différents EFS en précisant notamment les polluants à suivre, les stratégies de mesures associées et des formats de restitution des données ;
- suivre les évolutions des niveaux de concentrations à l'aide de campagnes ponctuelles périodiques et associées à des conditions d'exploitation données ;
- construire et partager un retour d'expérience à l'échelle nationale à partir de données de mesures collectées selon une même méthodologie.

Les mesures concernent l'air des quais situés en souterrain et dans les habitacles des rames circulant en souterrain. Elles visent à y caractériser les niveaux des concentrations de certains polluants auxquels les voyageurs sont exposés. Des expérimentations ont été conduites avec quatre opérateurs ferroviaires français afin d'en tester plusieurs parties et préciser sa mise en œuvre (annexe 9).

Ce guide ne répond pas à un objectif de surveillance de la qualité de l'air en continu, ni à la recherche des sources de pollution.

Dans la suite du document, la désignation « quai » concernera spécifiquement les quais situés en enceinte ferroviaire souterraine (EFS). Elle englobe indistinctement les deux quais associés aux deux directions de la ligne desservant une station.

Polluant	Durée cumulée de fréquentation de l'EFS sur une journée	Concentration calculée à partir de la valeur limite journalière de la directive européenne 2008/50/CE* ($\mu\text{g.m}^{-3}$) (Csout_Lim)	Concentration calculée à partir de la valeur guide journalière de l'OMS (2021)* ($\mu\text{g.m}^{-3}$) (Csout_OMS)
PM10	2h	260	80
	1h30	330	100
	1h	480	140
	30 min	940	250
PM2,5	2h	s.o.	50
	1h30	s.o.	60
	1h	s.o.	80
	30 min	s.o.	140

Tableau 3 : Concentration dans l'air en EFS recommandées a minima (Anses, 2022)

3

CRITÈRES DE CHOIX DES POLLUANTS À MESURER

L'étude de deux rapports¹² a permis d'identifier les principaux polluants rencontrés dans l'air des EFS. Ces rapports présentent des données basées sur une recherche bibliographique importante regroupant des données d'études françaises et internationales. La synthèse des données issues de ces deux études est disponible en annexe 1.

Pour les principaux polluants étudiés dans les EFS, l'annexe 2 présente les avis du CSHPF sur la qualité de l'air dans les EFS et les valeurs de gestion existantes associées pour l'air intérieur. Pour l'air ambiant (ou air extérieur), un objectif environnemental définit l'état de la qualité de l'air qui doit être respecté à une date donnée ou, dans la mesure du possible, au cours d'une période donnée ou à long terme, conformément à l'article R. 221-1 du Code de l'environnement.

Les objectifs environnementaux par polluant actuellement en vigueur sont remis à jour annuellement et disponibles au lien suivant: <https://www.lcsqa.org/fr/objectifs-environnementaux>.

Compte tenu de ces données (annexe 1 et annexe 2), une liste de polluants d'intérêt à mesurer a été identifiée. Le logigramme présenté à la figure 1 en détaille les critères de sélection.

Les références normatives et guides associés à la mesure de l'ensemble des polluants d'intérêt (listes P1 et P2) sont présentés en annexes 3 et 4.

12. Dorothee Grange et Sabine Host « Pollution de l'air dans les enceintes souterraines de transport ferroviaire et santé », Observatoire régional de santé Île-de-France, juin 2012.

Rapport Anses « Pollution chimique de l'air des enceintes de transports ferroviaires souterrains et risques sanitaires associés chez les travailleurs », 2015.

Polluants mesurés dans les EFS (données de la littérature)

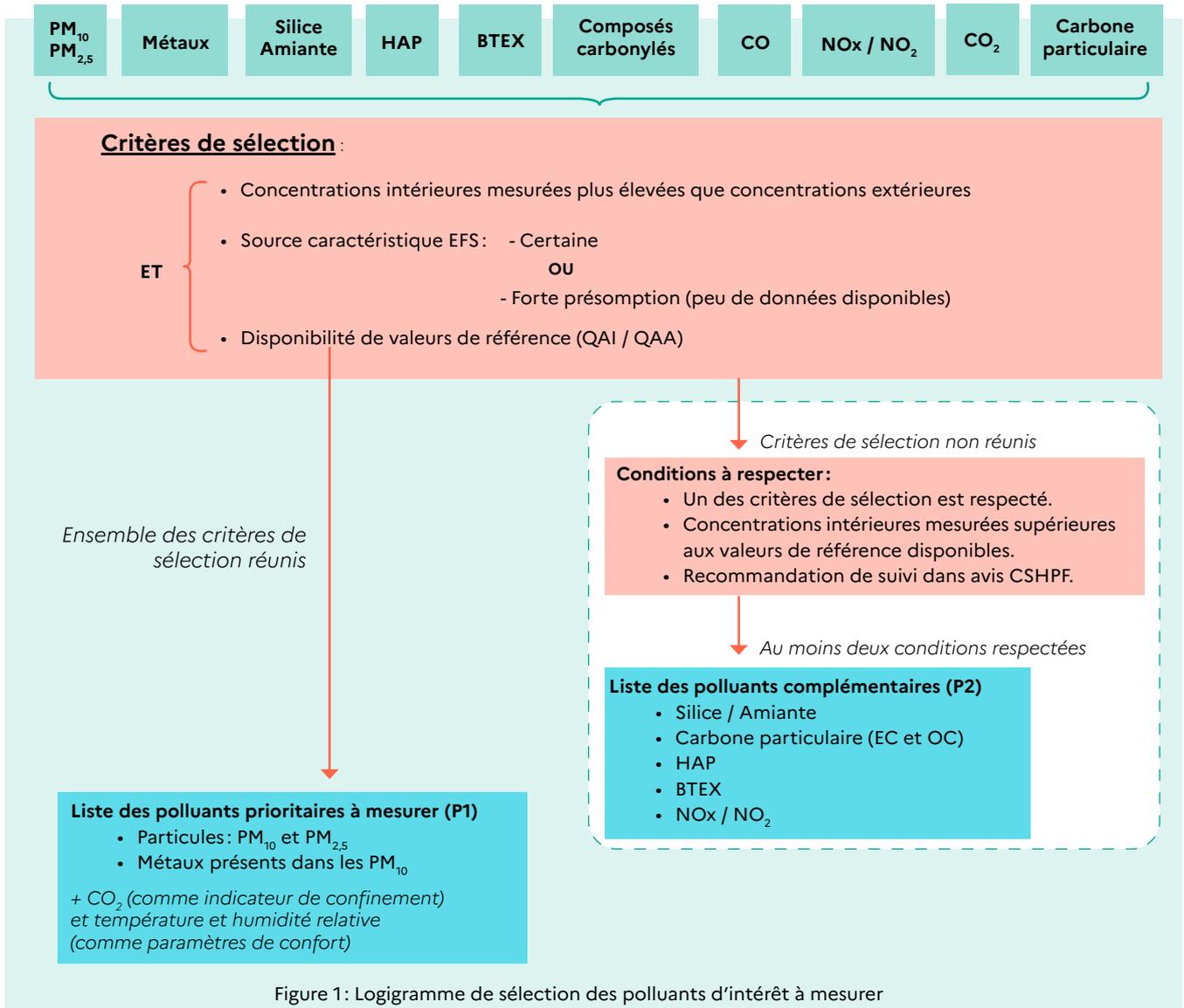


Figure 1: Logigramme de sélection des polluants d'intérêt à mesurer

4

RECOMMANDATIONS POUR LA RÉALISATION DES MESURES

Ce guide ne décrit la stratégie de mesures que pour les polluants prioritaires (P1):

- particules : PM₁₀ et PM_{2,5}
- métaux présents dans les particules PM₁₀ : fer (Fe), baryum (Ba), cuivre (Cu), zinc (Zn), antimoine (Sb), manganèse (Mn), nickel (Ni), plomb (Pb), arsenic (As), cadmium (Cd) et chrome (Cr).

Lors de ces campagnes, les mesures du CO₂, de la température et de l'humidité relative devront également être réalisées afin d'identifier des situations atypiques en termes de ventilation ou de confort pour les voyageurs.

Les rapports étudiés indiquent que les niveaux de concentrations particulières sont les plus importants au niveau des quais compte tenu de leur proximité des rames et des sources d'émissions associées: friction et arrachement via système de freinage, système d'alimentation électrique, contact rail-roue, remise en suspension des poussières déposées... D'après certains opérateurs ferroviaires français, les niveaux relevés dans les couloirs et des salles d'échange seraient plus liés à un transfert de pollution venant de ces sources.

Il faut néanmoins noter que cette hiérarchisation ne tient pas compte du temps passé par les voyageurs dans ces différents espaces.

Les recommandations concernent différents volets:

- les informations à collecter préalablement et pendant les campagnes de mesures;
- la sélection des quais situés en souterrain à instrumenter, la stratégie de mesure associée et le format de restitution des données;
- la sélection des rames à instrumenter et la stratégie de mesure associée et le format de restitution des données.

4.1 Informations à collecter

Préalablement aux campagnes de mesures, différents paramètres d'exploitation, de fréquentation et d'ambiance sont à relever. Le recueil de ces informations est important pour construire le plan d'échantillonnage et interpréter au mieux les résultats des mesures réalisées. Certains paramètres, sont également à relever spécifiquement lors des campagnes de mesures (telle que la fréquentation des voyageurs sur les quais ou la station et à bord des rames, les conditions de circulation et les matériels roulants, la fréquence ou les intervalles de passages des rames).

Caractéristiques du matériel roulant (par ligne)	Fréquentation, condition de circulation (par ligne et par station)	Caractéristiques du quai
<ul style="list-style-type: none"> • Matériel roulant utilisé: type métro/RER/tramway, modèle, véhicule compartimenté ou non, simple ou double étage, équipements, poids du matériel avec voyageurs. • Énergie motrice utilisée: via rails ou caténaires. • Type de roulement: pneumatique, fer. • Système de freinage et de guidage: électrodynamique, freinage mécanique, matériaux de freinage. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de montants dans le train par jour ou entrées dans la station sur l'année et sur la période des mesures. • Conditions de circulation: fréquence train (cadence/intervalle), cadence en heures de pointe et creuses, amplitude d'ouverture commerciale, perturbations pendant les mesures (arrêt intempestif, travaux non prévus...). 	<ul style="list-style-type: none"> • Configuration: profondeur, volume, existence d'une courbure des voies avant ou après le quai pour les deux stations qui lui sont adjacentes, présence de portes palières. • Ventilation générale de la station, du quai et des tunnels adjacents: ventilation naturelle, ventilation mécanique (entretien/débit). • Correspondances: existence de correspondance sur les mêmes quais, sur des quais différents (superposition de réseaux). • Nombre de voies à quai.

Tableau 4: Paramètres d'activité et d'exploitation à relever

4.2 Mesures sur les quais

4.2.1. Sélection des quais à instrumenter

L'identification des quais qui feront l'objet de mesures régulières est basée sur des études préalables des niveaux de concentrations particulières rencontrés au niveau des quais pour un fonctionnement habituel du réseau.

En fonction de la taille du réseau, les critères de choix des quais seront appliqués soit à un échantillon représentatif de celui-ci aux regards de différents facteurs pouvant avoir une influence sur les niveaux de concentrations particulières, soit à sa totalité. Ces ensembles constitueront les bases des quais sur lesquelles appliquer ces critères.

4.2.1.1. Détermination de la base des quais

Il est proposé de privilégier une des deux approches suivantes en fonction de la taille du réseau. Elle sera appréciée par son nombre de points d'arrêt définis chacun par un couple de station et de ligne qui la dessert.

4.2.1.1.1. Cas des grands réseaux: étude statistique

Pour les réseaux souterrains disposant de plus de 50 points d'arrêt, les critères de choix seront appliqués sur un échantillon de quai dont la représentativité aux différentes typologies de quai du réseau en termes de concentrations en PM_{10} a été démontrée par des études statistiques préalables basées sur des résultats de campagnes de mesures. Elles prendront en compte l'ensemble des facteurs pouvant avoir une influence sur les niveaux de concentrations particulières (caractéristiques des matériels roulant, des quais et des conditions d'exploitations) mais dont la résultante de leurs combinaisons est complexe à déterminer.

L'étude statistique devra être décrite et pour chacun des quais de l'échantillon retenu comme représentative d'une typologie des quais du réseau, les concentrations moyennes en PM_{10} seront présentées de la manière suivante :

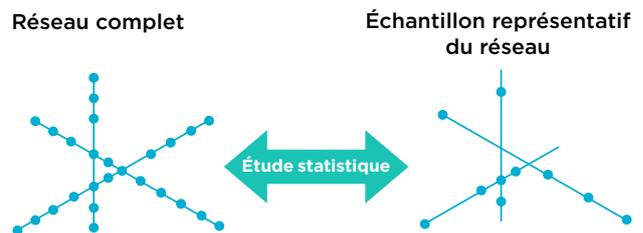


Figure 2: Exemple d'un échantillon de quais, confirmé par une étude statistique, comme étant représentatif des différentes typologies de quai de l'ensemble d'un grand réseau.

Ligne	Station	Localisation du système de prélèvement (milieu de quai, autres: préciser)	Hauteur du prélèvement (en mètre)	Date de l'étude	PM_{10} ($\mu g/m^3$)

4.2.1.2. Cas des petits réseaux: cartographie systématique

Pour les réseaux constitués d'au maximum 50 points d'arrêt, la hiérarchisation sera réalisée à partir d'une cartographie exhaustive des niveaux de concentration en particules PM₁₀ mesurées sur l'ensemble des quais.

Méthodes de mesure

La cartographie en PM₁₀ sera réalisée à l'aide d'instruments portables (méthodes optiques) permettant de réaliser une mesure indicative des concentrations de particules dans l'air¹³.

Ces méthodes ne peuvent se substituer à la méthode gravimétrique de référence, mais donnent une estimation des niveaux rencontrés et permettent de réaliser des comparaisons fiables entre des valeurs obtenues sur différents points. Elles peuvent ainsi donner une première hiérarchisation des niveaux de concentration au niveau des différents quais d'un réseau. Lors de ces campagnes, les mesures du CO₂, de la température et de l'humidité relative devront également être réalisées simultanément avec des instruments portables afin d'identifier des situations atypiques en termes de ventilation ou de confort pour les voyageurs (cf. tableau 5).

Dans le cas où plusieurs appareils de mesures seront déployés pour réaliser cette campagne de hiérarchisation, une intercomparaison du matériel de mesure devra être réalisée préalablement aux mesures, au milieu et en fin de la campagne de mesures. Pour les PM₁₀, une comparaison ponctuelle de ces appareils avec une méthode de référence et sur un quai est recommandée. Cette comparaison sera réalisée sur trois fois 24 h d'acquisition de données.

Les niveaux de concentration des PM₁₀ mesurés à l'extérieur pendant ces campagnes de mesure devront être relevés si possible afin de permettre une meilleure interprétation des résultats de mesures si une situation atypique est constatée au niveau du fond urbain représentatif des quais étudiés. On s'appuiera notamment sur les données issues du réseau des stations de mesures AASQA.

Emplacements des points de mesures

Selon la géométrie du lieu, les mesures sont réalisées de préférence au milieu d'un des quais de la ligne étudiée. Les mesures seront réalisées entre 0,8 et 2,0 m du sol du quai.

Selon l'emprise du système de mesure au sol, l'emplacement peut être modifié afin de ne pas être une entrave à la circulation et générer des problèmes de sécurité. On évitera cependant les zones situées en entrée et sortie de tunnel.

Période, durée et fréquence des mesures

Les mesures sont réalisées en période de pointe du matin (entre 7 h et 9 h) et de fin d'après-midi (entre 17 h et 19 h), hors week-ends, jours fériés et périodes de vacances scolaires. Pour un même quai, au minimum trois mesures de 15 minutes sont réalisées sur trois journées distinctes (consécutives ou non) en intégrant des mesures le matin et l'après-midi.

Systèmes de mesure mis en œuvre			Paramètres mesurés	Durée et fréquence des prélèvements	
Principe de la méthode	Exemples d'appareils				
Indicateurs optiques pour la mesure des poussières dans l'air	Grimm®	Dust Trak®	FIDAS®	PM ₁₀	Pas de temps de la mesure : qq sec à 1 min
CO ₂ : Analyseur InfraRouge	Q-TRAK®	AdvancedSense IAQ®		CO ₂	Pas de temps de la mesure : qq sec à 1 min
	Class'Air®				

Tableau 5 : Détail des systèmes de mesure mis en œuvre

13. Rapport LCSQA « Air intérieur – Indicateurs optiques pour la mesure massique des particules dans les environnements intérieurs », décembre 2008.

Exploitation des résultats

Les résultats des mesures sont présentés de la manière suivante :

Ligne	Station	Localisation du système de prélèvement (milieu de quai, autres: préciser)	Hauteur du prélèvement (en mètre)	Date	Heure début/fin	Période des mesures (matin/ après-midi)	PM ₁₀ (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)	Température (°C)	Humidité relative (% HR)

Dans le rapport de résultats, la synthèse de la description qualitative des quais ayant fait l'objet des mesures (fonctionnement habituel et lors des mesures) devra également être intégrée conformément à l'annexe 5.

4.2.1.2. Critères de choix et sélection

À partir des bases constituées par une des deux méthodes précédentes, les quais sont classés distinctement en fonction de deux critères :

- valeurs moyennes des concentrations en PM₁₀;
- fréquentation annuelle.

Au minimum trois quais feront l'objet de mesures. Les deux quais présentant les concentrations les plus importantes en PM₁₀ seront tout d'abord sélectionnés sur des stations différentes, si le réseau le permet ils seront choisis sur des lignes différentes.

Puis on sélectionnera le quai le plus fréquenté, il sera différent des deux précédents.

Trois exemples de classement des niveaux de concentration en PM₁₀ et des données relatives à la fréquentation des quais sont décrits ci-après pour illustrer ces choix (figures 3 à 5).

Exemple 1:

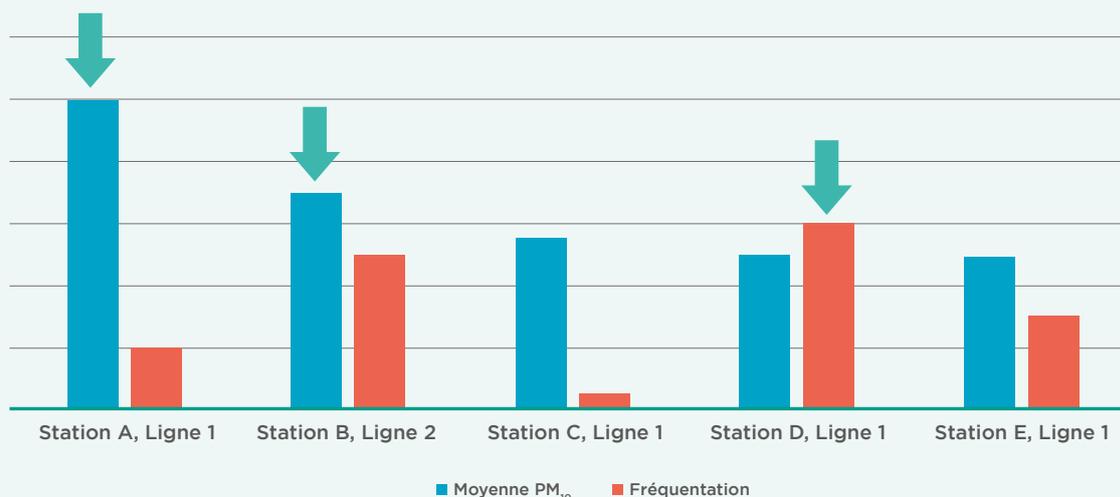


Figure 3: Exemple 1 de classification obtenue à partir des études de hiérarchisation préalables

Dans cet exemple, c'est au niveau des quais A1 et B2 que l'on mesure les plus fortes concentrations en PM₁₀ et le quai D1 a la fréquentation la plus élevée. Ainsi, les trois quais à instrumenter sont les quais A1, B2 et D1.

Exemple 2:

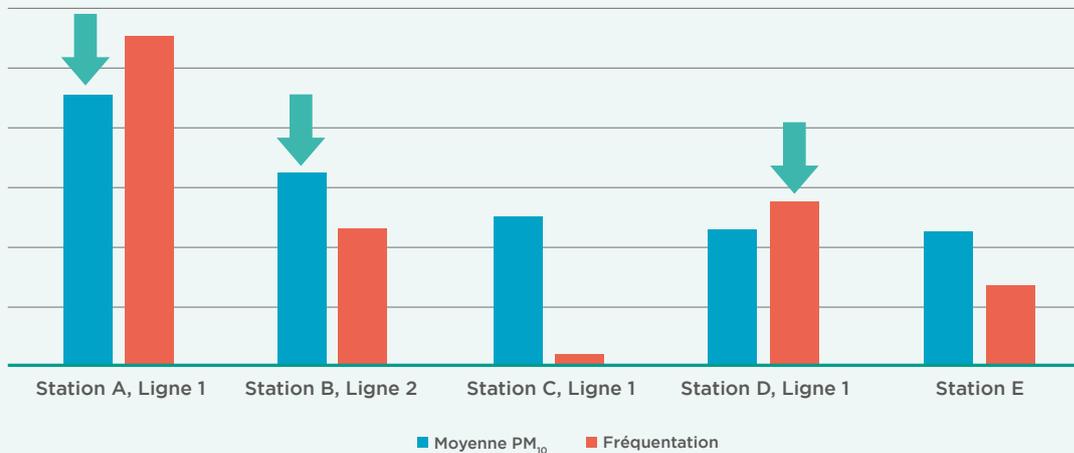


Figure 4: Exemple 2 de classification obtenue à partir des études de hiérarchisation préalables

Dans cet exemple, c'est au niveau des quais A1 et B2 que l'on mesure les plus fortes concentrations en PM₁₀ et le quai A1 a la fréquentation la plus élevée. Or, ce quai A1 est déjà identifié comme étant un quai devant faire l'objet de mesure compte tenu de son niveau de concentration en PM₁₀. Ainsi, les trois quais à instrumenter sont les quais: A1, B2 et D1.

Exemple 3:

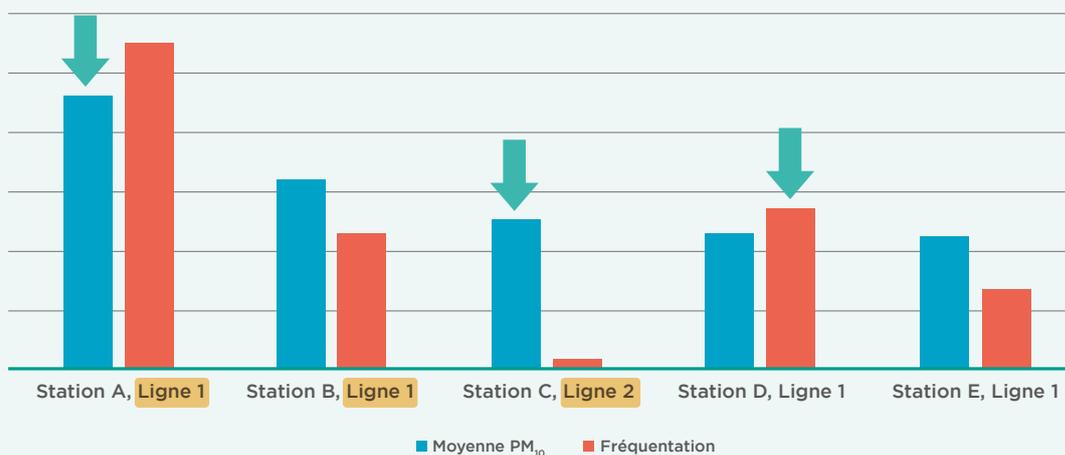


Figure 5: Exemple 3 de classification obtenue à partir des études de hiérarchisation préalables

Dans cet exemple, c'est au niveau des quais A1 et B1 que l'on mesure les plus fortes concentrations en PM₁₀ et le quai A1 a la fréquentation la plus élevée. Le quai B1 est sur la même ligne que le quai A1 (Ligne 1). Pour privilégier la réalisation de mesures sur des lignes différentes au regard des concentrations en PM₁₀, les trois quais à instrumenter sont les quais: A1, C2 et D1.

Pour les cartographies systématiques qui sont à privilégier pour les petits réseaux, cette classification sera mise à jour annuellement les trois premières années. Si ce classement est inchangé, il pourra être actualisé que tous les trois ans, ou avant s'il existe des modifications qui pourraient avoir un impact significatif sur les niveaux de concentration.

4.2.2. Mesures sur les quais sélectionnés

Les mesures régulières décrites ci-après seront réalisées sur les quais identifiés au paragraphe 4.2.1. Dans le cas de quai déjà suivi dans le cadre d'une surveillance continue ou régulière, il sera apprécié la nécessité de compléter le dispositif en place au regard de l'adéquation de la stratégie de mesure et du format de restitution des données avec les spécifications décrites ci-après.

4.2.2.1. Stratégie de mesures

Emplacements des mesures

Les mesures sont réalisées de préférence au milieu des quais sélectionnés.

Période, durée et fréquence des campagnes

La période de mesure est choisie hors week-ends, jours fériés et périodes de vacances scolaires (trafic ferroviaire pouvant être modifié). La campagne de

mesure est réalisée sur 14 jours consécutifs, au moins une fois par an. Les prélèvements sont réalisés sur la période d'ouverture commerciale du quai.

Le temps passé par un voyageur dans les EFS est souvent court (temps de trajet de 30 min à 2 h et temps d'attente sur les quais de quelques minutes). Il est donc nécessaire de pouvoir mesurer des concentrations en particules y compris les métaux sur un pas de temps réduit.

Méthodes de mesure

Selon les méthodes de mesure, en fonction des techniques de mesures disponibles, différentes fréquences d'échantillonnage sont atteignables.

Basée sur la liste de substances prioritaires (P1), le tableau suivant présente les systèmes de mesure à mettre en œuvre et les fréquences et durées d'échantillonnage.

Systèmes de mesure mis en œuvre			Paramètres mesurés		Durée et fréquence des prélèvements
Principe de la méthode	Exemple d'appareils		1 ^{re} semaine	2 ^e semaine	
Prélèvement sur filtre des poussières en suspension dans l'air et analyse des filtres en différé* <i>(selon la méthode de référence NF EN 12341)</i>	Leckel®	DA80® Partisol®	PM ₁₀ Métaux sur PM ₁₀	PM ₁₀ Métaux sur PM ₁₀	Un prélèvement par jour. Durée du prélèvement : à partir de la première rame jusqu'à la dernière rame pendant l'ouverture commerciale journalière du quai.
Analyseur automatique des poussières en suspension dans l'air* <i>(équivalent à la méthode de référence NF EN 12341 selon les recommandations de la norme NF EN 16450)</i>	TEOM® (FDMS non obligatoire)		PM ₁₀	PM _{2,5}	Mesure en continu : 24 h/24, 7 j/7. Pas de temps de la mesure : 15 min.
CO₂, température et humidité : analyseur InfraRouge	Q-TRAK®	AdvancedSense IAQ® Class'Air®	CO ₂ , humidité, température	CO ₂ , humidité, température	Mesure en continu : 24 h/24, 7 j/7. Pas de temps de la mesure : 15 min.

* À titre d'information, le déploiement des systèmes de mesure dans le tableau suivant peut contraindre une emprise au sol d'environ 1 m².

Tableau 6 : Détail des systèmes de mesure mis en œuvre

Les niveaux de concentration des PM_{10} mesurés à l'extérieur pendant ces campagnes de mesure devront être relevés si possible afin de permettre une meilleure interprétation des résultats de mesures si une situation atypique est constatée au niveau du fond urbain représentatif des quais étudiés. On s'appuiera notamment sur les données issues du réseau des stations de mesures AASQA.

4.2.2.2. Exploitation des résultats

Selon les substances suivies, la méthode de mesure déployée permet d'avoir soit une mesure en continu avec une résolution de l'ordre de la minute (analyseurs, méthode automatique), soit une mesure intégrée sur une durée de quelques heures (prélèvement sur support suivi d'une analyse en laboratoire, méthode manuelle). Selon la méthode, le traitement des données recueillies et leur restitution seront différents. Une base de données devra être réalisée conformément à l'annexe 6.

Pour les méthodes automatiques, à partir de l'exploitation de la base de données, les résultats seront présentés sous forme de quatre tableaux distincts pour les périodes suivantes :

- sur la totalité de la campagne de mesures ;
- sur les jours de la semaine ;
- sur les week-ends ;
- sur les périodes de pointe en semaine.

Date de prélèvement Stations Lignes	$PM_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO_2 (ppm)	Température (°C)	Humidité relative (% HR)
Nombre de valeurs					
Taux de couverture de la période d'échantillonnage prévue*					
Moyenne					
Médiane					
P10 – P90					
(Min – Max)					

* Pourcentage de mesures quantifiées sur le nombre de mesures prévues.

En complément, des box-plot peuvent être proposés.

Pour les méthodes manuelles, à partir de l'exploitation de la base de données, les résultats seront présentés sous forme de deux tableaux pour les périodes suivantes :

- sur les jours de la semaine ;
- sur les week-ends.

Période de prélèvement Stations Lignes	PM ₁₀ (µg/m ³)	As (µg/m ³)	Ba (µg/m ³)	Fe (µg/m ³)	Cd (µg/m ³)	Cr (µg/m ³)	Cu (µg/m ³)	Mn (µg/m ³)	Ni (µg/m ³)	Pb (µg/m ³)	Sb (µg/m ³)	Zn (µg/m ³)
Nombre de valeurs												
Taux de couverture de la période d'échantillonnage prévue*												
Moyenne												
Médiane												
P10 – P90												
(Min – Max)												

*Pourcentage de mesures quantifiées sur le nombre de mesures prévues.

En complément, des box-plot peuvent être proposés.

4.3 Mesures dans les rames

4.3.1. Sélection des rames à instrumenter

Seules les lignes ayant des rames circulant sur un temps de parcours souterrain supérieur à 25 % de la totalité du temps de trajet de la ligne sont concernées. Sur ces lignes, chaque type de rames circulant sur la ligne fera l'objet de mesures.

4.3.2. Stratégie de mesures

Les lignes concernées peuvent avoir plusieurs types de parcours (figure 6).

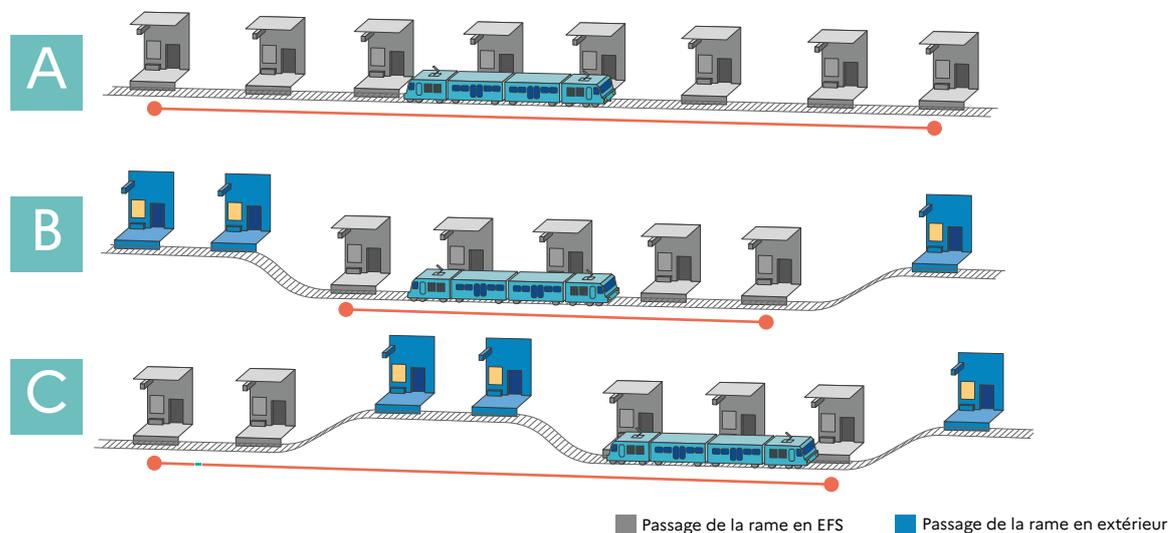


Figure 6: Exemples de parcours souterrain et aérien

Les mesures sont à réaliser du début jusqu'à la fin de la portion souterraine de la ligne investiguée, soit de la première à la dernière station souterraine de la ligne (cas A et B – figure 6). Dans le cas de parcours mixte souterrain et aérien (cas C – figure 6), une méthode de pondération est proposée (cf. § 4.3.3) afin d'estimer la concentration en particules propre au parcours souterrain (nommé C_{EFS}) et les niveaux d'expositions des voyageurs n'empruntant que ces portions.

Emplacements des mesures

Les mesures sont réalisées de préférence au milieu de la rame de la voiture centrale.

Période, durée et fréquence des campagnes

Les mesures sont réalisées hors week-ends, jours fériés et périodes de vacances scolaires (trafic ferroviaire pouvant être modifié) et en période de pointe du matin (entre 7 h et 9 h) ou de fin d'après-midi (entre 17 h et 19 h).

Les prélèvements sont réalisés sur plusieurs allers-retours de la portion de la ligne étudiée si nécessaire afin d'assurer un prélèvement cumulé de 1 à 2 heures (par exemple : 1 aller, 1 aller-retour, 2 allers-retours...). Chaque jeu de prélèvements sera réalisé sur trois journées distinctes consécutives ou non.

En fonction de la taille du réseau, l'ensemble du réseau sera couvert en une à trois années, et sera renouvelé en cas de changements de matériel.

Méthodes de mesure

Étant donné la difficulté d'obtenir une alimentation électrique dans la rame sans perturber le trafic et les voyageurs, il est nécessaire d'utiliser du matériel autonome et à faible encombrement.

Les méthodes proposées permettent la collecte des particules sur un filtre pour l'ensemble du trajet de la ligne étudiée. Son analyse en différé (gravimétrie et spéciation chimique) permet d'obtenir une concentration massique de particules (nommé C_{filtre}). Dans le cas d'une portion de ligne avec un parcours mixte souterrain et aérien (cas C), des mesures indicatives en continu des concentrations de particules devront être réalisées afin de déterminer les niveaux de concentration en particules dans l'habitacle de la rame en souterrain et en aérien.

Basée sur la liste de substances prioritaire (P1), le tableau suivant présente les systèmes de mesure à mettre en œuvre.

Systèmes de mesure mis en œuvre		Paramètres mesurés	Durée et fréquence des prélèvements
Principe de la méthode	Exemple d'appareils		
Préleveur de particules autonome portatif sur individu	HPEM®	PM ₁₀ PM _{2,5} Métaux sur PM ₁₀	Débit du prélèvement : 10 L/min. Durée du prélèvement : de 1 à 2 heures qui peut cumuler plusieurs allers-retours sur le parcours.
Indicateurs optiques pour la mesure des poussières dans l'air	Grimm® Dust Trak® FIDAS®	PM ₁₀ PM _{2,5}	Mesure tout au long du parcours. Pas de temps de la mesure : qq sec à 1 min.
CO ₂ : Analyseur InfraRouge	Q-TRAK® AdvancedSense IAQ® Class'Air®	CO ₂	Mesure tout au long du parcours. Pas de temps de la mesure : qq sec à 1 min.

Tableau 7 : Détail des systèmes de mesure mis en œuvre

Des préconisations méthodologiques pour les prélèvements des particules sont données en annexe 10 pour éviter d'altérer les filtres lors des campagnes de mesure.

Les niveaux de concentration des PM₁₀ mesurés à l'extérieur pendant ces campagnes de mesure devront être relevés si possible afin de permettre une meilleure interprétation des résultats de mesures si une situation atypique est constatée au niveau du fond urbain. Les stations de mesures AASQA devront être les plus représentatives de l'air extérieur des quais étudiés.

4.3.3. Correction de la concentration pour les parcours mixtes

Dans le cas d'une portion de ligne avec des parcours mixtes souterrain et aérien (cas C – figure 6), une pondération permet d'estimer la concentration en particules propre au parcours souterrain (nommé C_{EFS}). Cette pondération est réalisée grâce aux relevés des moments des passages en EFS pendant les prélèvements, aux résultats des mesures gravimétrique de particules C_{filtre} et aux mesures indicatives en continu des particules obtenues à l'aide de compteur optique.

Un pourcentage entre les niveaux de concentration en EFS (C_{EFS}) et en aérien (nommé C_{ext}) est calculé à partir des moyennes des niveaux de concentration obtenues à l'aide du compteur optique dans ces deux environnements.

Un exemple de représentation simplifiée d'un graphe temporel des concentrations en particules issu d'un compteur optique lors d'un parcours sur une ligne mixte est présenté ci-dessous.

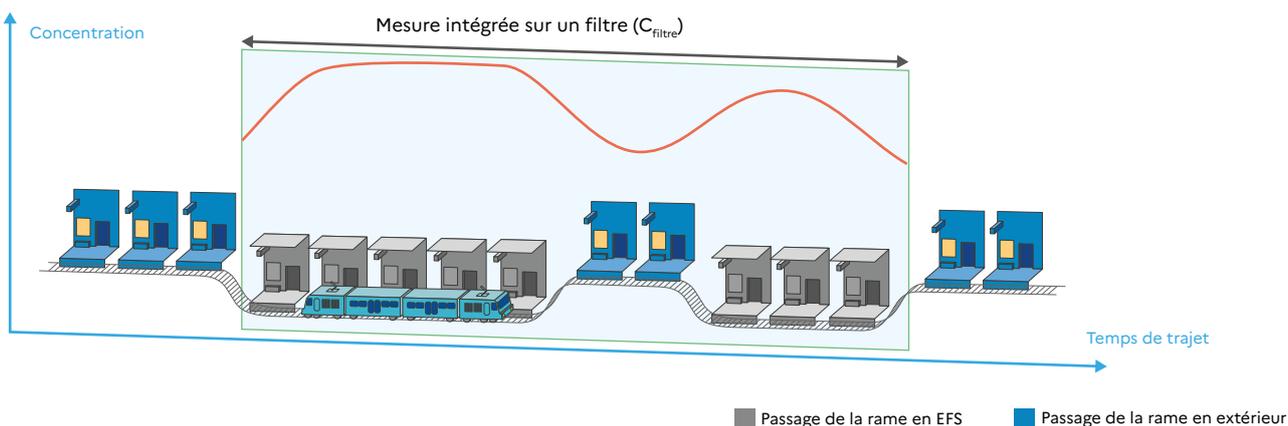


Figure 7 : Représentation simplifiée d'une évolution temporelle en particules lors d'un parcours mixte d'une ligne

Le ratio (ou pourcentage) obtenu, nommé R ci-après, est donc égal à :

$$\text{Ratio} = C_{EFS} / C_{ext}$$

$$R = C_{EFS} / C_{ext}$$

Le calcul de pondération est obtenu par l'équation suivante :

$$C_{filtre} = \frac{(C_{ext} \times \text{durée}_{ext}) + (C_{EFS} \times \text{durée}_{EFS})}{\text{durée}_{ext} + \text{durée}_{EFS}}$$

$$C_{filtre} = \frac{(C_{EFS} / R \times \text{durée}_{ext}) + (C_{EFS} \times \text{durée}_{EFS})}{\text{durée}_{ext} + \text{durée}_{EFS}}$$

Ainsi, la concentration en particules en EFS (C_{EFS}) peut être estimée par ce calcul. Deux exemples de détermination de la concentration en particules en EFS (C_{EFS}) sont proposés en annexe 8.

4.3.4. Exploitation des résultats

Une base de données devra être réalisée conformément à l'annexe 6. Pour chaque « ligne/matériel roulant », il sera calculé les valeurs min-max et moyenne des concentrations mesurées C_{filtre} et corrigée C_{EFS} . Les résultats seront présentés sous forme de deux tableaux de la manière suivante :

C_{filtre} en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\text{PM}_{2,5}$	PM_{10}	As	Ba	Fe	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn
Nombre de valeurs													
Durée cumulée des prélèvements													
Moyenne													
(Min - Max)													
C_{EFS} en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\text{PM}_{2,5}$	PM_{10}	As	Ba	Fe	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn
Nombre de valeurs													
Durée cumulée des prélèvements													
Moyenne													
(Min - Max)													

Concernant les mesures indicatives en continu des concentrations de particules, il sera présenté la distribution des concentrations mesurées sur l'ensemble des parcours d'une ligne (box-plot) : valeur min-max, percentile 10 et 90, médiane et moyenne en distinguant les parcours souterrains et aériens.

ANNEXE 1

SYNTHÈSE DES DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES DISPONIBLES SUR LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LES EFS EN FRANCE (COMPILATION DES DONNÉES DU RAPPORT ANSES ET DE L'ARTICLE ORS)



Substances	Gamme de concentrations mesurées dans les EFS (min-max) (toutes mesures confondues sur des pas de temps différents)	Origines EFS supposées	Observations générales
Particules PM ₁₀ PM _{2,5}	Au niveau des quais: PM ₁₀ : de 13 à 1 284 µg/m ³ PM _{2,5} : de 12 à 626 µg/m ³ Au niveau des zones de transfert: PM ₁₀ : de 38 à 101 µg/m ³ PM _{2,5} : 24 µg/m ³		Les concentrations intérieures sont majoritairement supérieures aux concentrations extérieures. Les concentrations en PM sont hétérogènes dans l'espace (différence entre quai, rame, couloirs...) et dans le temps (selon heures de pointe/creuses, nuit, semaine/week-end). Les PM ₁₀ sont peu étudiés.
Métaux (spéciation PM) Fer Cuivre, zinc, antimoine, manganèse Baryum, nickel, chrome, plomb (Aluminium, arsenic, calcium, cadmium)	Au niveau des quais: Fer: de 1,1 à 75 µg/m ³ dans les PM ₁₀ Cuivre: de 0,1 à 5,6 µg/m ³ dans les PM ₁₀ Zinc: de 0,01 à 3,5 µg/m ³ dans les PM ₁₀ Antimoine: de 7,6 à 413 ng/m ³ dans les PM ₁₀ Manganèse: de 19 à 521 ng/m ³ dans les PM ₁₀	La source principale des particules riches en fer est liée aux phénomènes de friction et d'arrachement (contact roue-frein, contact du matériel roulant avec le système d'alimentation électrique, contact rail-roue). Pour les autres métaux, les sources sont plus variables d'un réseau à l'autre. Néanmoins il semble que l'origine du cuivre puisse être liée au système d'alimentation électrique et le baryum au matériau du système de freinage. La présence d'éléments comme l'aluminium, le silicium, le calcium, le potassium, le magnésium ou le titane est généralement attribuée à des sources externes, mais peut dans certains cas avoir une origine interne telle que l'usure des matériaux de construction, du ballast ou l'utilisation d'abrasif ou antidérapant, ainsi que les freins. Cela est dépendant du type de matériels roulants (âge et composition).	Le fer est l'élément métallique dominant, suivi du cuivre, zinc, antimoine et manganèse.
Silice cristalline (dans PM) Fibres amiante (dans PM)	Silice (quartz): de 4 à 113 µg/m ³ * Amiante: inférieur à 20 fibres/L* * données étrangères	La source de silice est notamment le sable utilisé pour augmenter la friction et l'adhérence en freinage d'urgence ou en pente, ainsi que la silice présente dans le ballast.	Peu de données sont disponibles.

Substances	Gamme de concentrations mesurées dans les EFS (min-max) (toutes mesures confondues sur des pas de temps différents)	Origines EFS supposées	Observations générales
HAP 16 HAP (liste EPA)	<p>Au niveau des quais: Benzo(a)pyrène: de 0,05 à 0,52 ng/m³</p> <p>Au niveau des zones de transfert: Benzo(a)pyrène: de 0,17 ng/m³</p>		<p>En général, les concentrations intérieures semblent être liées à l'extérieur. Un phénomène d'accumulation et de dégradation ralentie des HAP semble être présent dans les EFS expliquant des concentrations intérieures légèrement supérieures aux concentrations extérieures.</p> <p>⚠ Les mesures faites concernent principalement la phase particulaire. Peu d'études mesurent la phase gazeuse.</p>
HAM Benzène Toluène, éthylbenzène, xylènes	<p>Au niveau des quais: Benzène: de 1,4 à 3,5 µg/m³</p> <p>Au niveau des zones de transfert: Benzène: 1,9 µg/m³</p> <p>Au niveau des rames: Benzène: de 10 à 27 µg/m³</p>		<p>Les concentrations en benzène intérieures sont légèrement supérieures qu'en extérieur. Les niveaux observés dans les EFS sont inférieurs par rapport à d'autres modes de transport (voiture, bus).</p> <p>⚠ Les concentrations les plus élevées sont sur les références bibliographiques les plus anciennes. L'origine était semblablement liée aux véhicules diesel, à l'influence de sources extérieures, et/ou aux fumées de cigarettes.</p>
Composés carbonylés Formaldéhyde Acétaldéhyde Acétone <i>Autres</i>	<p>Au niveau des quais: Formaldéhyde: de 2,6 à 6,4 µg/m³</p>		<p>Les concentrations intérieures sont légèrement plus élevées qu'à l'extérieur. Sur les quais de la station, le composé majoritaire est le formaldéhyde, suivi de l'acétaldéhyde et l'acétone. Dans les rames, les concentrations d'acétaldéhyde et acétone sont plus élevées et seraient issues du métabolisme humain.</p> <p>Les niveaux observés dans les EFS sont inférieurs par rapport à d'autres modes de transport (voiture, bus).</p>
CO	<p>Au niveau des quais: CO: de 0,2 à 0,97 mg/m³</p>	<p>Présence de travaux de maintenance dans l'EFS.</p>	<p>Les concentrations intérieures sont majoritairement inférieures aux concentrations extérieures. Des concentrations intérieures plus importantes sont observées lors de la présence de travaux de maintenance notamment en présence d'engins diesel.</p>

Substances	Gamme de concentrations mesurées dans les EFS (min-max) (toutes mesures confondues sur des pas de temps différents)	Origines EFS supposées	Observations générales
NOx/NO₂	Au niveau des quais: NO ₂ : de 13 à 65 µg/m ³	Présence de véhicule diesel dans l'EFS lors travaux de maintenance.	Les concentrations intérieures sont inférieures ou équivalentes aux concentrations extérieures. Le NOx est surtout suivi si présence de train diesel (pour la maintenance).
CO₂	Au niveau des quais: CO ₂ : de 494 à 1 200 ppm		Prise en compte comme indicateur de confinement.
Carbone particulaire EC, OC et BC	Au niveau des quais: EC: de 4,2 à 16,3 µg/m ³ OC: de 6,5 à 9,9 µg/m ³ BC: de 2 à 5 µg/m ³	Selon les auteurs, la source supposée du BC est le système de freinage.	En absence de trafic (nuit), les concentrations intérieures sont comparables à l'air extérieur. Pendant la journée, les concentrations en BC sont plus importantes, et laissent supposer la présence d'une source dans le tunnel comme le freinage selon les auteurs.

ANNEXE 2

AVIS DU CSHPF SUR LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LES EFS ET VALEURS DE RÉFÉRENCE DISPONIBLES EN AIR INTÉRIEUR

Substances (étudiées dans la biblio)	Avis CSHPF ^{14,15,16,17,18,19} Air intérieur EFS	Valeurs de référence Air intérieur (hors EFS)
Particules PM ₁₀ PM _{2,5}	Suivi horaire des PM ₁₀ Valeurs de référence: fonction de la concentration extérieure (Cext), du temps passé et de la valeur limite (V-limite) de la directive air ambient. Pour une V-limite de 50 µg/m ³ et une Cext de 23 µg/m ³ : Tsout = 1 h 30 => Csout < 455 µg/m ³ Tsout = 1 h 45 => Csout < 393 µg/m ³ Tsout = 2 h => Csout < 347 µg/m ³ Tsout = 2 h 15 => Csout < 311 µg/m ³	HCSP PM ₁₀ (lg-terme): Objectif cible: 15 µg/m ³ moyenne annuelle Valeur d'action rapide: 75 µg/m ³ HCSP PM _{2,5} (lg-terme): Objectif cible: 10 µg/m ³ moyenne annuelle Valeur d'action rapide: 50 µg/m ³
Métaux (spéciation PM) Fer (Fe) Cuivre (Cu), zinc (Zn), antimoine (Sb), manganèse (Mn) Baryum (Ba), nickel (Ni), chrome (Cr), plomb (Pb) (Aluminium (Al), arsenic (As), calcium (Ca), cadmium (Cd))	PM ₁₀ – Spéciation métaux pour mieux identifier les facteurs qui déterminent ces concentrations (Fe, Ni, Cr, Mn, Pb et Cd, As).	
Silice cristalline (dans PM) Fibres amiante (dans PM)	PM ₁₀ – Composition silice cristalline et fibres	Valeur réglementaire Amiante: 5 f/L
HAP 16 HAP (liste EPA)	Suivi de 9 HAP Mesure de la phase gazeuse. Mesure fluoranthène, anthracène, phénanthrène et pyrène: mesures sur pas de temps journalier pour sites « atypiques ».	HCSP Naphtalène (lg-terme): Valeur repère: 10 µg/m ³ Valeur d'action rapide: 50 µg/m ³ VGAI Naphtalène (lg-terme): 10 µg/m ³

14. CSHPF – Avis du 5 avril 2001 relatif à la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines.

15. CSHPF – Avis du 3 mai 2001 relatif à l'élaboration de valeurs guides de qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines.

16. CSHPF – Avis du 8 juillet 2003 relatif à de nouvelles recommandations aux exploitants de réseaux ferroviaires souterrains s'agissant plus particulièrement de la RATP.

17. CSHPF – Avis du 12 mai 2005 relatif à de nouvelles recommandations aux exploitants de réseaux ferroviaires souterrains concernant la pollution de la RATP.

18. CSHPF – Avis du 12 mai 2005 relatif à de nouvelles recommandations aux exploitants de réseaux ferroviaires souterrains s'agissant plus particulièrement de la SNCF.

19. CSHPF – Avis du 27 septembre 2006 relatif à la qualité de l'air dans les transports.

Substances (étudiées dans la biblio)	Avis CSHPF ^{14,15,16,17,18,19} Air intérieur EFS	Valeurs de référence Air intérieur (hors EFS)
HAM Benzène Toluène, éthylbenzène, xylènes	Suivi HAM Mesure du toluène: mesures sur pas de temps journalier pour sites « atypiques ».	V-guide Benzène (lg-terme): 2 µg/m ³ HCSP Benzène (lg-terme): Valeur cible: 2 µg/m ³ Valeur d'action rapide: 10 µg/m ³ VGAI Benzène: Ct-terme (1 à 14 j): 30 µg/m ³ Lg-terme (14 j à 1 an): 20 µg/m ³ DGS (lg-terme): Valeur d'action rapide toluène: 300 µg/m ³ Valeur d'action rapide éthylbenzène: 1 000 µg/m ³ Valeur d'action rapide xylènes: 200 µg/m ³
Composés carbonylés Formaldéhyde Acétaldéhyde Acétone Autres		V-guide Formaldéhyde (lg-terme): 30 puis 10 µg/m ³ en 2023 HCSP Formaldéhyde: Valeur cible: 10 µg/m ³ Valeur d'action rapide: 100 µg/m ³ VGAI Formaldéhyde: Lg-terme: 10 µg/m ³ moyenne annuelle Ct-terme: 50 µg/m ³ moyenne 2 h VGAI Acétaldéhyde: Lg-term: 100 µg/m ³ moyenne annuelle Ct-terme: 3 000 µg/m ³ moyenne 1 h VGAI Acroléine: Lg-terme: 0,8 µg/m ³ moyenne annuelle Ct-terme: 6,9 µg/m ³ moyenne 1 h
CO		VGAI (ct-terme) : 10 mg/m ³ sur 8 h 100 mg/m ³ sur 15 min
NOx/NO₂	Suivi NO ₂ Suivi horaire NOx	VGAI : Lg-terme: 20 µg/m ³ moyenne annuelle Ct-term: 200 µg/m ³ moyenne 1 h
CO₂		Règlement sanitaire départemental: 1 300 ppm en CO ₂ (1 000 ppm avec une tolérance à 1 300 ppm pour les locaux non-fumeurs), valeurs fixées pour les bâtiments tertiaires.
Carbone particulaire EC, OC et BC		

ANNEXE 3

RÉFÉRENCES NORMATIVES ET GUIDES

NF EN ISO 16000-1 « Air intérieur – Partie 1 : Aspects généraux de la stratégie d'échantillonnage », juillet 2006.

XP X43-402 « Qualité de l'air – Stratégie d'échantillonnage des polluants chimiques de l'atmosphère intérieure des locaux », août 1995.

Note LCSQA « Liste des appareils pouvant être utilisés en ASSQA pour la surveillance réglementaire de la qualité de l'air », mise à jour le 29 juillet 2015.

NF EN 12341 « Air ambiant – Méthode normalisée de mesurage gravimétrique pour la détermination de la concentration massique MP_{10} ou $MP_{2,5}$ de matière particulaire en suspension », juin 2014.

XP CEN/TS 16450 « Air ambiant – Systèmes automatisés de mesurage de la concentration de matière particulaire (PM_{10} , $PM_{2,5}$) », juillet 2013.

NF EN 16450 « Air ambiant – Systèmes automatisés de mesurage de la concentration de matière particulaire (PM_{10} , $PM_{2,5}$) », avril 2017.

Guide de démonstration d'équivalence des méthodes de mesure de la qualité de l'air ambiant, janvier 2010.

Rapport LCSQA « Air intérieur – Indicateurs optiques pour la mesure massique des particules dans les environnements intérieurs », décembre 2008.

NF EN 14902 « Qualité de l'air ambiant – Méthode normalisée de mesure du plomb, du cadmium, de l'arsenic et du nickel dans la fraction MP_{10} de matière particulaire en suspension », décembre 2005.

Rapport LCSQA « Prélèvement et analyse des métaux dans les particules en suspension dans l'air ambiant – 2/2 Guide technique et méthodologique de l'analyse de l'arsenic, cadmium, nickel et plomb dans l'air ambiant », novembre 2007.

NF EN ISO 16000-7 « Air intérieur – Partie 7 : Stratégie d'échantillonnage pour la détermination des concentrations en fibres d'amiante en suspension dans l'air », septembre 2007.

GA X46-033 « Guide d'application de la norme NF EN ISO 16000-7 : Stratégie d'échantillonnage pour la détermination des concentrations en fibres d'amiante en suspension dans l'air », août 2012.

NF X43-050 « Qualité de l'air – Détermination de la concentration en fibres d'amiante par microscopie électrique à transmission », janvier 1996.

NF EN ISO 16000-12 « Air intérieur – Stratégie d'échantillonnage des polychlorobiphényles (PCB), des polychlorodibenzo-p-dioxines (PCDD), polychlorodibenzo-p-furanes (PCDF) et de hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) », avril 2009.

NF EN 15549 « Qualité de l'air – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration de benzo[a]pyrène dans l'air ambiant », juillet 2008.

XP CEN/TS 16645 « Air ambiant – Méthode pour la mesure de benzo[a]anthracène, benzo[b]fluoranthène, benzo[j]fluoranthène, benzo[k]fluoranthène, dibenz[ah]anthracène, indéno[1,2,3-cd]pyrène et benzo[ghi]perylène », mai 2014.

ISO 12884 « Ambient air – Determination of total (gas and particle-phase) polycyclic aromatic hydrocarbons – Collection on sorbent-backed filters with gas chromatographic/mass spectrometric analyses », avril 2000.

- **ISO 16362** « Air ambiant – Détermination des particules d'hydrocarbures aromatiques polycycliques par chromatographie liquide à haute performance », février 2005.
- **Rapport LCSQA** « Surveillance des HAP – Guide méthodologique pour la surveillance des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans l'air ambiant et dans les dépôts », 2011.
- **NF EN ISO 16000-5** « Air intérieur – Partie 5: Stratégie d'échantillonnage pour les composés organiques volatils (COV) », février 2007.
- **NF EN ISO 16000-6** « Air intérieur – Partie 6: Dosage des composés organiques volatils dans l'air intérieur des locaux et chambres d'essai par échantillonnage actif sur le sorbant Tenax TA(R), désorption thermique et chromatographie en phase gazeuse utilisant MS ou MS/FID », 2012.
- **NF EN ISO 16017-1** « Air intérieur, air ambiant et air des lieux de travail – Échantillonnage et analyse des composés organiques volatils par tube à adsorption/désorption thermique/ chromatographie en phase gazeuse sur capillaire, Partie 1: Échantillonnage par pompage », mars 2003.
- **NF EN 14662-1** « Air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en benzène – Partie 1: Prélèvement par pompage suivi d'une désorption thermique et d'une analyse par chromatographie en phase gazeuse », novembre 2005.
- **NF EN 14662-2** « Air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en benzène – Partie 2 : Prélèvement par pompage suivi d'une désorption au solvant et d'une analyse par chromatographie en phase gazeuse », novembre 2005.
- **NF EN 14662-3** « Qualité de l'air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en benzène – Partie 3: Prélèvement par pompage automatique avec analyse chromatographique en phase gazeuse sur site », décembre 2005.
- **Rapport LCSQA** « Guide méthodologique pour la surveillance du benzène dans l'air ambiant », 2014.
- **NF EN ISO 16000-15** « Air intérieur – Partie 15: Stratégie d'échantillonnage du dioxyde d'azote (NO₂) », avril 2009.
- **ISO 6768** « Air ambiant – Détermination de la concentration en masse de dioxyde d'azote – Méthode de Griess-Saltzman modifiée », août 1998.
- **NF EN 14211** « Air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en dioxyde d'azote et monoxyde d'azote par chimiluminescence », octobre 2012.
- **NF EN ISO 16000-26** « Air intérieur – Partie 26: Stratégie d'échantillonnage du dioxyde de carbone (CO₂) », octobre 2012.
- **NF EN 50543** « Matériels électroniques portables et transportables de détection et de mesure du dioxyde de carbone et/ou du monoxyde de carbone dans l'air ambiant intérieur des locaux. Exigences et méthodes d'essai », avril 2011.
- **FD CEN/TR 16243** « Qualité de l'air ambiant – Guide pour le mesurage du carbone élémentaire (EC) et du carbone organique (OC) déposés sur filtre », septembre 2011.

ANNEXE 4

POLLUANTS D'INTÉRÊT ET MÉTHODES DE MESURE ASSOCIÉES

Polluants mesurés	Méthode de mesure	Détails de la norme	Exemple supports d
Particules en suspension (PM) PM ₁₀ PM _{2,5}	Mesure PM ₁₀ et/ou PM _{2,5} : Méthode équivalente à la méthode de référence.		TEOM® (FDMS non obligatoire)
	Mesure PM ₁₀ : Méthode de référence – Norme NF EN 12341. -> Mesure gravimétrique	Durée de prélèvement nominal 24 h +/-1 h Débit nominal 2,3 m ³ /h (avec possibilité d'utiliser autres préleveurs-débit cité dans anciennes versions normes). Gamme d'application entre 1 µg/m ³ et 150 µg/m ³ pour PM ₁₀ et 120 µg/m ³ pour PM _{2,5} .	DA80®
Métaux (spéciation PM) Fer (Fe) Cuivre (Cu), zinc (Zn), antimoine (Sb), manganèse (Mn) Baryum (Ba), nickel (Ni), chrome (Cr), plomb (Pb) (Aluminium (Al), arsenic (As), calcium (Ca), cadmium (Cd))	Sur filtre PM ₁₀ (issu de la méthode de référence PM) : NF EN 14902	Mesure dans PM ₁₀ (prélèvement 24 h) Métaux concernés : As, Cd, Ni et Pb. Plage de concentration de la méthode : As de 0,5 à 350 ng/m ³ Cd de 0,1 à 50 ng/m ³ Ni de 2 à 100 ng/m ³ Pb de 1 à 4000 ng/m ³	Filtre DA80®
Silice cristalline (dans PM) Fibres amiante	Sur filtre PM10 (issu de la méthode de référence PM) : Amiante NF X43-050 (MET).		
HAP 16 HAP (liste EPA)	Mesure phases particulaire et gazeuse : ISO 12884 + ISO 16362 (NF EN 15549 + FprCEN/TS 16645)		Filtre + mousse PUF®
HAM Benzène Toluène, éthylbenzène, xylènes	Prélèvement actif : NF EN ISO 16000-6 + NF EN ISO 16017-1 (Air ambiant : NF EN 14662-1 et 2)	50 à 200 ml/min Pour air ambiant : Prélèvement 24 h Gamme 0,5 à 50 µg/m ³ Volume type benzène 10 L	Tube® Carbopack®/
	Analyseur : NF EN 14662-3	Gamme de 0,5 à 100 µg/m ³	GC 5000 BTX® ; VO
	Analyseur		Aerolaser® ; MA100-
NOx/NO₂	Prélèvement actif : ISO 6768	Gamme 0,003 à 2 mg/m ³ Prélèvement de 10 min à 2 h	
	Analyseur : Méthode de référence NF EN 14211	Gamme jusqu'à 500 µg/m ³	AC32M® ; A
CO₂	NF EN ISO 16000-26	Choix entre analyseur ou tube de prélèvement.	
Carbone particulaire EC, OC et BC	Sur filtre PM _{2,5} (issu de la méthode de référence PM) : CEN/TR 16243	Prélèvement 24 h	Filtre DA80®

d'appareils/ de prélèvement	Mise en place sur site	
	Avantages	Inconvénients
	Mesure en temps réel (analyseur automatique). Exposition court terme (mesure 1 h et moins).	Appareil encombrant et contraintes d'installation /utilisation. Ne permet pas d'effectuer une spéciation chimique.
Partisol®	Prélèvement sur filtre avec la possibilité de faire de la spéciation chimique.	Appareil encombrant et contraintes d'installation /utilisation. Mesure en différé. Exposition long terme Mesure d'une seule fraction (PM ₁₀ ou PM _{2,5}).
	Associer à la mesure des PM.	Mesure en différé. Exposition long terme.
	Associer à la mesure des PM (pour la phase particulaire).	Contraintes d'installation /utilisation.
Carbograph®	Compact et facile à mettre en place. Exposition court terme (mesure 1 à quelques heures).	Mesure en différé. Contraintes d'installation /utilisation.
C72M® ; AirToxic GC 866®	Mesure en temps réel (analyseur automatique). Exposition très court terme (mesure 15 min).	Appareil encombrant et contraintes d'installation /utilisation.
Méthanalyser® ; Interscan®	Mesure en temps réel (analyseur automatique). Exposition très court terme (mesure 15 min).	Appareil +/- encombrant et +/- contraintes d'installation /utilisation.
	Compact et facile à mettre en place. Exposition court terme (mesure 1 à quelques heures).	Mesure en différé. Contraintes d'installation /utilisation.
API 200E® ; TEI 42i®	Mesure en temps réel (analyseur automatique). Exposition très court terme (mesure quelques minutes).	Appareil encombrant et contraintes d'installation /utilisation.
	Associer à la mesure des PM.	Mesure en différé. Exposition long terme (mesure 24 h).

ANNEXE 5

PARAMÈTRES QUALITATIFS MINIMUMS À RELEVÉR

Caractéristiques du matériel roulant

Date (JJ/MM/AA)	Ligne	Type de matériel roulant (métro, RER, tramway...)	Modèle	Matériel roulant compartimenté (oui/non)	Matériel climatisé (oui/non)	Nombre de niveaux de la rame (simple/double)	Poids maximum du matériel avec voyageurs (en tonne)	Énergie motrice utilisée (rails/caténaïres)	Roulement (pneumatique/fer)	Système de freinage (électrodynamique/freinage mécanique)	Matériaux de freinage

Fréquentation/condition de circulation

Date (JJ/MM/AA)	Ligne	Station	Perturbations pendant les mesures (oui/non) Si oui: arrêt intempestif, travaux non prévus...	Cadence en heures de pointe (en nombre de voyageurs par heure)	Cadence en heure creuse (en nombre de voyageurs par heure)

Caractéristiques du quai

Date (JJ/MM/AA)	Ligne	Station	Profondeur de la station (en mètre)	Volume de la station (en mètre cube)	Portes palières (oui/non)	Type de ventilation (naturelle/mécanique) Si mécanique: entretien (oui/non) et débit (en m ³ /h)	Correspondances (oui/non) Si oui: sur les mêmes quais / sur des quais différents (superposition de lignes)	Sources extérieures identifiées (carrefour routier/parking souterrain/chantiers...)	Nombre de voies à quai

ANNEXE 6

EXPRESSION DES RÉSULTATS DE MESURES EN BASE DE DONNÉES

Mesures sur les quais – Prélèvement sur filtre des poussières en suspension dans l'air et analyse des filtres en différé (1 ligne par mesure journalière)

Station	Ligne	Localisation du système de prélèvement (milieu de quai, autres : préciser)	Hauteur du prélèvement (en mètre)	Date (JJ/MM/AA)	Heure de début du prélèvement (HH/MM)	Heure de fin du prélèvement (HH/MM)	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2,5} (µg/m ³)	As (µg/m ³)	Zn (µg/m ³)
							*	*	**	*

*Pour faciliter l'interprétation, utiliser un code résultats avec « 0 pour mesure non réalisée », « 1 pour résultat inférieur à la LQ » et « 2 pour résultat quantifiable ».

**Les résultats d'analyse des autres métaux suivants devront être également indiqués dans ce tableau dans l'ordre suivant : Ba, Fe, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb.

Mesures sur les quais – Analyseur automatique des poussières en suspension dans l'air et mesures en continu des paramètres de confort (1 ligne par mesure quart horaire)

Station	Ligne	Localisation du système de prélèvement (milieu de quai, autres : préciser)	Hauteur du prélèvement (en mètre)	Date (JJ/MM/AA)	Heure (HH/MM)	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2,5} (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)	Température (°C)	Humidité relative (% HR)
						*				

*Pour faciliter l'interprétation, utiliser un code résultats avec « 0 pour mesure non réalisée », « 1 pour résultat inférieur à la LQ » et « 2 pour résultat quantifiable ».

Mesures dans les habitacles des rames - Prélèvement sur filtre des poussières en suspension dans l'air et analyse des filtres en différé

Ligne	Localisation du système de prélèvement (milieu de rame, à l'étage en cas de rame double...)	Hauteur du prélèvement (en mètre)	Date (JJ/MM/AA)	Heure de début du prélèvement (HH/MM)	Heure de fin du prélèvement (HH/MM)	Trajet (1 aller, 1 aller/retour, 2 allers/retours...)	C _{filtre} PM ₁₀ (µg/m ³)	C _{filtre} PM _{2,5} (µg/m ³)	C _{filtre} As (µg/m ³)	C _{filtre} Zn (µg/m ³)	C _{EF5} PM ₁₀ (µg/m ³)	C _{EF5} PM _{2,5} (µg/m ³)	C _{EF5} As (µg/m ³)	C _{EF5} Zn (µg/m ³)
							*	*	*	*	*	*	**	*

*Pour faciliter l'interprétation, utiliser un code résultats avec « 0 pour mesure non réalisée », « 1 pour résultat inférieur à la LQ » et « 2 pour résultat quantifiable ».

**Les résultats d'analyse des autres métaux suivants devront être également indiqués dans ce tableau dans l'ordre suivant : Ba, Fe, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb.

ANNEXE 7

LIMITES DE QUANTIFICATION DES MÉTAUX

Mesures sur les quais –

Prélèvement sur filtre des poussières en suspension dans l'air et analyse des filtres en différé

PM ₁₀ (µg/m ³)	As (µg/m ³)	Ba (µg/m ³)	Fe (µg/m ³)	Cd (µg/m ³)	Cr (µg/m ³)	Cu (µg/m ³)	Mn (µg/m ³)	Ni (µg/m ³)	Pb (µg/m ³)	Sb (µg/m ³)	Zn (µg/m ³)
10	0,0001 – 0,001*	0,0001 – 0,001									

* La limite de quantification varie en fonction du débit du préleveur utilisé, ces LQ ont été calculées pour des débits de prélèvement entre 30 m³/h et 2,3 m³/h.

Mesures dans les habitacles des rames –

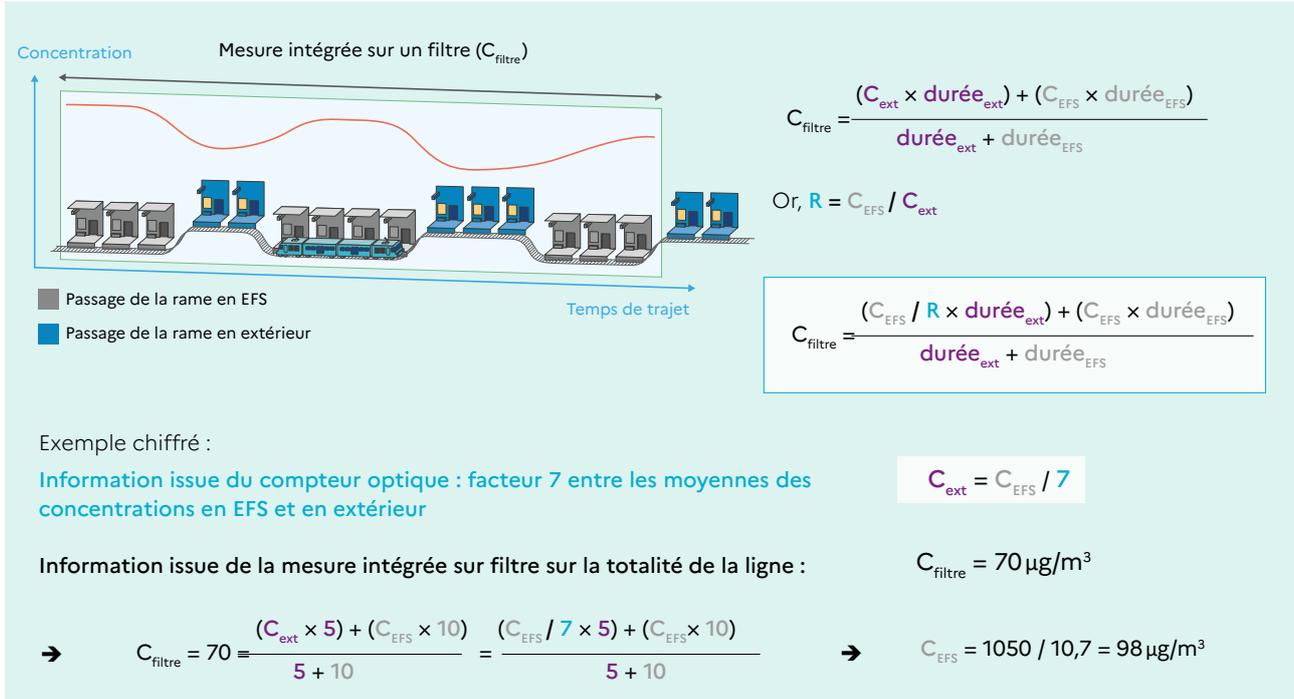
Prélèvement sur filtre des poussières en suspension dans l'air et analyse des filtres en différé

As (µg/m ³)	Ba (µg/m ³)	Fe (µg/m ³)	Cd (µg/m ³)	Cr (µg/m ³)	Cu (µg/m ³)	Mn (µg/m ³)	Ni (µg/m ³)	Pb (µg/m ³)	Sb (µg/m ³)	Zn (µg/m ³)
0,04 – 0,08**	0,04 – 0,08									

** La limite de quantification varie en fonction du temps de prélèvement, ces LQ ont été calculées pour des temps de prélèvement variant de 1 à 2 heures.

ANNEXE 8

EXEMPLE SIMPLIFIÉ ET CHIFFRÉ POUR ESTIMER LA CONCENTRATION EN PARTICULES EN EFS (C_{EFS}) EN RAME



ANNEXE 9

RÉSULTATS DE MESURES DES EXPÉRIMENTATIONS CONDUITES AVEC DIFFÉRENTS OPÉRATEURS FERROVIAIRES

Exemple n° 2 :

Un Comité de pilotage de la campagne d'expérimentations, nommé CPCE, a été formé. Il a réuni quatre opérateurs ferroviaires français, l'Ineris, le ministère chargé de la santé et le ministère chargé de l'écologie, qui en a assuré la présidence. Ce CPCE avait pour objectif de mener des expérimentations pour tester plusieurs parties du guide et préciser sa mise en œuvre.

Ainsi, trois expérimentations ont été menées en 2017. Pour chaque expérimentation, au minimum deux opérateurs ferroviaires ont participé.

L'expérimentation n° 1 avait pour but de tester la méthode pour hiérarchiser les quais les uns par rapport aux autres par le biais de mesures indicatives de concentrations en particules et en CO₂. Ces mesures ponctuelles de 15 minutes ont été réalisées au minimum deux fois par quai pour avoir un jeu de

données suffisant, sur deux journées différentes. En parallèle, des paramètres qualitatifs décrivant les espaces recevant du public, la fréquentation et les matériels roulants ont été relevés.

L'expérimentation n° 2 avait pour but de tester les recommandations concernant les mesures sur les quais en souterrain et de déterminer les limites de quantification associées.

L'expérimentation n° 3 avait pour but de tester les recommandations concernant les mesures à réaliser dans les habitacles des rames et de vérifier si les résultats de mesures en particules sont quantifiables, et si les limites de quantification de quantifications associées.

Les résultats de mesures réalisées dans les réseaux ayant participé à ces expérimentations ont été anonymisés et agrégés. Ils sont présentés ci-après.

Expérimentation n° 1: Hiérarchisation des quais

Les moyennes des mesures indicatives réalisées en particules PM₁₀ sur 92 quais sont hiérarchisées dans le graphe suivant sur la base de 159 résultats de mesures.

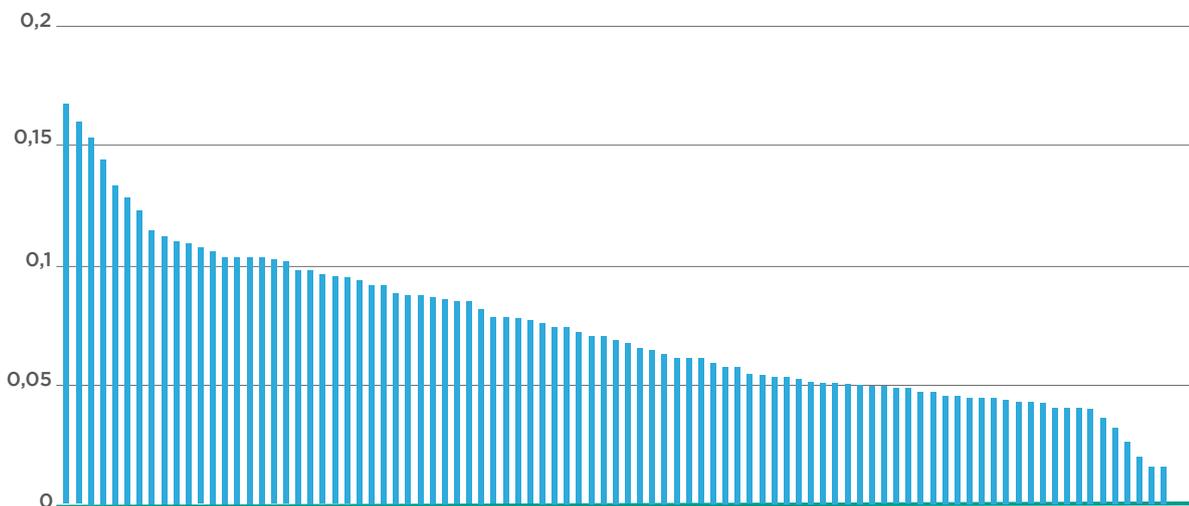
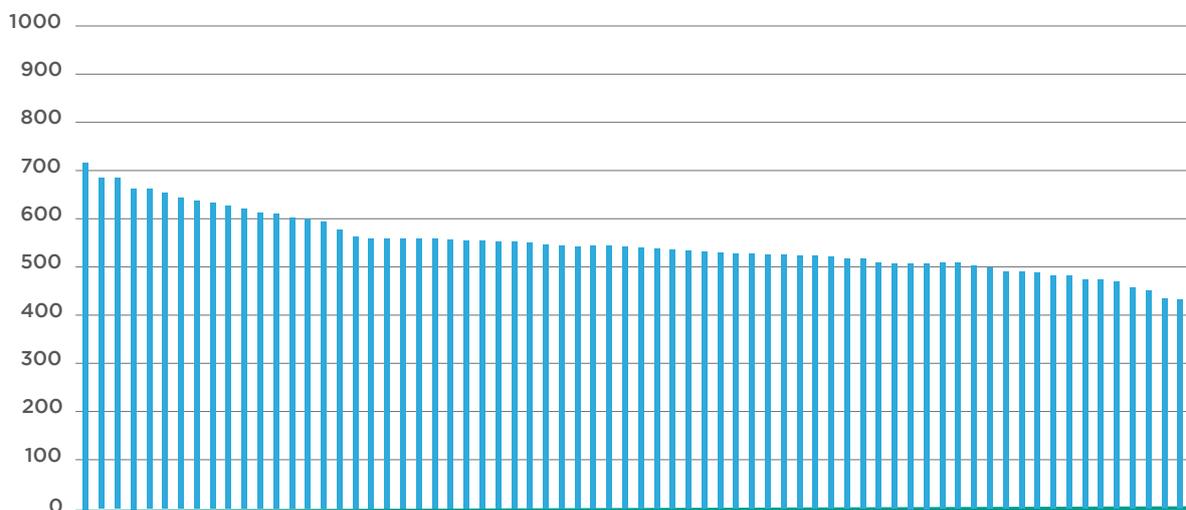


Figure 8: Hiérarchisation des 92 quais ayant fait l'objet de mesures de PM₁₀ (résultats en mg/m³)

Les moyennes des mesures indicatives réalisées en CO₂ sur 70 quais sont hiérarchisées dans le graphe

suivant sur la base de 140 résultats de mesures.

Figure 9: Hiérarchisation des 70 quais ayant fait l'objet de mesures de CO₂ (résultats en ppm)



Une variabilité des résultats a été constatée d'une mesure à l'autre sur un même quai. C'est pourquoi le guide recommande la réalisation de mesures sur plusieurs journées. La moyenne d'au minimum 3 mesures des particules PM₁₀ sur des journées différentes doit être réalisée pour chaque quai investigué.

Expérimentation n° 2 : Emplacements « quai »

Les concentrations moyennes mesurées en PM, CO₂ et en métaux sont présentées de manière anonymisée et agrégée sur l'ensemble des réseaux ayant participé à cette expérimentation dans les tableaux ci-dessous.

	PM _{2,5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)
Moyenne	44	89	464
(Min - Max)	(0 - 448)	(5,2 - 309)	(152 - 847)

Tableau 7: Résultats de mesures obtenus par analyseur automatique des poussières en suspension dans l'air et par analyseur infrarouge pour le CO₂ sur deux semaines consécutives

	PM ₁₀	As	Ba	Fe	Cd	Cr
Nombre d'échantillons	39	39	14	39	25	39
Moyenne	113	0,010	1,37	36,6	0,001	0,16
(Min - Max)	(28 - 285)	(0,003 - 0,185)	(1,09 - 1,87)	(5,2 - 105,0)	(0,0003 - 0,0010)	(0,03 - 0,30)
	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn
Nombre d'échantillons	39	39	39	39	25	39
Moyenne	1,13	0,57	0,04	0,08	0,004	1,03
(Min - Max)	(0,19 - 2,86)	(0,05 - 4,33)	(0,006 - 0,093)	(0,01 - 0,68)	(0,003 - 0,006)	(0,21 - 5,17)

Tableau 8: Résultats de mesures obtenus par prélèvement sur filtre des poussières et des métaux en suspension dans l'air et analyse des filtres en différé (résultats en µg/m³)

Les prélèvements et analyses ont été réalisés par différents laboratoires. Les limites de quantification des métaux peuvent varier de 0,7 ng/m³ (pour des métaux tels que l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu) et le plomb (Pb)) à 8 ng/m³ (tel que pour le fer (Fe)).

La répartition moyenne des éléments métalliques mesurés sur quai est présentée dans la figure suivante.

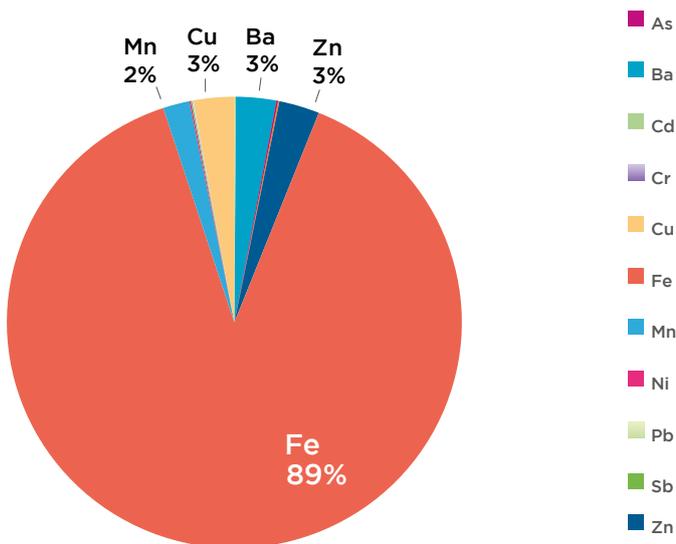


Figure 10: Répartition des métaux présents dans l'air en EFS sur quai

Expérimentation n° 3: Emplacements « rames »

Pour des mesures en rame réalisées entre 1 et 2 h de prélèvement (aller-retour/2 allers-retours) à l'aide d'un impacteur personnel à 10 L/min, les concentrations mesurées sont les suivantes :

	PM _{2,5}	PM ₁₀
Nombre d'échantillons	7	7
Moyenne	102,8	145,4
(Min – Max)	(36,0 – 164,5)	(58,0 – 251,0)

Tableau 9: Résultats de concentrations mesurées en particules dans les rames (résultats en µg/m³)

Ces mesures ont permis de quantifier les particules dans l'air des rames en mouvement sur une ligne complète.

Les concentrations moyennes mesurées en métaux sont présentées dans les tableaux ci-dessous.

As	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn
Concentration mesurée en rame en $\mu\text{g}/\text{m}^3$										
<LQ	0,8	<LQ	0,3	<LQ	3,8	<LQ	<LQ	0,9	<LQ	0,5
<LQ	5,1	<LQ	0,4	4,5	48,0	0,5	0,4	<LQ	<LQ	2,4
<LQ	3,9	<LQ	0,3	2,7	33,6	0,4	0,4	0,8	<LQ	1,9
<LQ	6,4	<LQ	0,5	9,3	61,4	0,8	0,4	1,1	<LQ	7,2
<LQ	4,1	<LQ	0,3	4,0	36,1	0,4	<LQ	0,5	<LQ	2,1
<LQ	5,8	<LQ	0,9	4,3	50,6	0,7	0,7	<LQ	<LQ	3,0
<LQ	5,0	<LQ	0,8	2,8	40,3	0,6	<LQ	<LQ	<LQ	2,3

Tableau 10: Résultats en métaux mesurés dans l'air des rames sur une ligne complète

	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn
Concentration moyenne en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	<LQ	5,07	<LQ	0,52	4,58	44,99	0,58	0,49	0,80	<LQ	3,15

LQ = $80 \text{ ng}/\text{m}^3$ (pour 1 heure de prélèvement) ou $40 \text{ ng}/\text{m}^3$ (pour 2 heures de prélèvement).

La plupart des métaux sont quantifiables à l'aide de cette méthode de prélèvement.

La répartition moyenne des éléments métalliques mesurés dans les rames d'un opérateur ferroviaire est présentée dans la figure suivante.

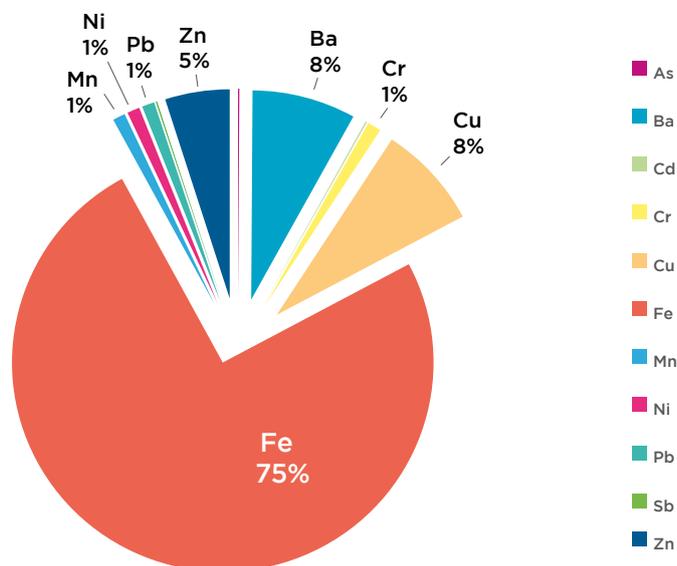


Figure 11: Répartition moyenne des métaux mesurés en rame

ANNEXE 10

PRÉCONISATION MÉTHODOLOGIQUE SUR L'UTILISATION DES PRÉLEVEURS AUTONOMES PERSONNELS POUR LES MESURES EN RAME

Lors des comités de pilotage (COPIL), les opérateurs ferroviaires font part de leur retour d'expérience sur la mise en oeuvre des mesures harmonisées de la qualité de l'air (QAI) dans les EFS conformément au guide. Certains opérateurs ont mis en exergue une difficulté liée à l'utilisation de préleveurs de particules autonomes portatifs sur filtre lors des mesures en rame. Un Groupe de Travail dédié à cette problématique a donc été constitué en 2022.

En effet, une détérioration des filtres par « déchirement » ou « écaillage » a été constatée par certains opérateurs lors du serrage du dispositif. Des essais ont donc été menés à l'Ineris pour récuser le protocole de prélèvement afin de limiter ce phénomène de déchirements de filtres.

Rappel de la problématique :

Les préleveurs autonomes portatifs recommandés pour les mesures en rame maintiennent les filtres grâce au serrage de pièces métalliques directement sur le filtre. Ce type de serrage a pour but d'assurer à la fois un maintien mécanique du filtre mais également l'étanchéité du système.

Compte-tenu de la nature différente des matériaux mis en contact, un serrage excessif ou inégal entre les différents points de fixation peut mener à un déchirement ou un écaillage des filtres, illustrés en Figure 12. Cette détérioration entraîne des pertes de masses des filtres qui invalident donc le prélèvement.

Solution proposée :

L'usage combiné des joints proposés par les fabricants des systèmes de prélèvement et d'un serrage par clef dynamométrique a été retenu par le Groupe de Travail.

Une clef dynamométrique est un outil qui permet de contrôler le couple de serrage des écrous et des vis afin que ceux-ci soient montés de manière optimale. Contrôler le couple de serrage permet de : (i) limiter l'effort mécanique appliqué au filtre et la subséquente fragilisation du filtre et, (ii) appliquer de manière répétable les paramètres exacts de couple limitant ainsi les serrages inégaux des différents points de fixation. Le fonctionnement des clés dynamométriques repose sur la présence d'un mécanisme de déclenchement (mécanique ou électronique). Lors de l'utilisation de la clef, un signal de déclenchement (e.g. « clic » mécanique, vibrations, signal visuel etc.) se manifeste lorsque la valeur prédéfinie du couple de serrage est atteinte. La clef se réarme alors automatiquement et est de nouveau prête à l'emploi. Le couple de serrage est sélectionné soit par un vernier, soit via l'écran d'affichage digital selon la technologie choisie.

Dans le cadre des travaux menés, les plages valeurs de couple de serrage retenues pour tout type de filtre adapté aux prélèvements des métaux dans les enceintes ferroviaires souterraines sont :

- 22 - 23 cN.m^{*} sans joint ;
- 21 - 22 cN.m avec joint.

* cN.m : centinewton-mètres



Détérioration des filtres par déchirement.



Détérioration des filtres par écaillage.

Figure 12 : Illustration de filtres endommagés lors de l'usage de préleveurs portatifs.

6

ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

- AASQA**: Association agréée de surveillance de la qualité de l'air
- ANSES**: Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
- BC**: Black carbon
- BTEX**: Benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes
- CO**: Monoxyde de carbone
- CO₂**: Dioxyde de carbone
- Ct-terme**: Court terme
- CSHPF**: Conseil supérieur d'hygiène publique de France
- DGS**: Direction générale de la santé
- EC**: Elemental carbon
- EFS**: Enceintes ferroviaires souterraines
- EPA**: Environmental Protection Agency
- ERP**: Établissements recevant du public
- HAP**: Hydrocarbures aromatiques polycycliques
- HCSP**: Haut conseil de la santé publique
- HR**: Humidité relative
- Ineris**: Institut national de l'environnement industriel et des risques
- Lg-terme**: Long terme
- NO**: Monoxyde d'azote
- NO₂**: Dioxyde d'azote
- NOx**: Oxydes d'azote
- OC**: Organic carbon
- ORS**: Observatoire régional de santé
- PM₁₀**: Matière particulaire dont le diamètre aérodynamique médian est inférieur à 10 µm
- PM_{2,5}**: Matière particulaire dont le diamètre aérodynamique médian est inférieur à 2,5 µm
- QAA**: Qualité de l'air ambiant
- QAI**: Qualité de l'air intérieur
- RATP**: Régie autonome des transports parisiens
- RER**: Réseau express régional
- SNCF**: Société nationale des chemins de fer français
- T°C**: Température
- VAR**: Valeur d'action rapide
- V-cible**: Valeur cible
- VGAI**: Valeur guide de qualité d'air intérieur
- V-limite**: Valeur limite
- VR**: Valeur repère
- Vréf**: Valeur de référence

Ce guide donne des recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines (EFS). Son objectif est de permettre d'acquérir des données selon une approche commune faisant l'objet d'un consensus au sein d'un groupe de travail présidé par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires et rassemblant plusieurs opérateurs ferroviaires ainsi que l'Ineris.

Les mesures concernent l'atmosphère des quais situés en souterrain et les habitacles des rames y circulant. Elles visent à y caractériser les niveaux des concentrations de certains polluants auxquels les voyageurs sont exposés, principalement les particules PM_{10} et $PM_{2,5}$, et les métaux présents dans les particules PM_{10} . La mesure du CO_2 (comme indicateur de confinement), de la température et de l'humidité relative (pour identifier des situations atypiques en termes de confort des voyageurs) sont également intégrés au plan d'échantillonnage.
