

AtmoSud

Inspirer un air meilleur



Qualité de l'air intérieur du métro de Marseille

Campagne 2021

Décembre 2021

RÉSUMÉ :

QUALITE DE L'AIR INTERIEUR DU METRO DE MARSEILLE

Campagne 2021

Les enceintes ferroviaires souterraines sont des environnements clos dans lesquels sont présents les polluants issus du déplacement du matériel roulant, des occupants et de l'air extérieur. Les trois précédentes campagnes de mesure de 2010, 2016 et 2019 dans le métro Marseillais ont permis de caractériser, sur plusieurs stations et sur une longue période, divers polluants parmi lesquels les particules fines PM_{10} et $PM_{2,5}$, les métaux traces et certains polluants gazeux organiques et inorganiques.

Cette nouvelle étude a pour but de poursuivre la surveillance de la qualité de l'air du métro de Marseille, par la mise en place d'un nouveau protocole de mesure harmonisé à l'échelle nationale. Il consiste à mesurer les particules fines et ultrafines, les métaux et le confinement dans les rames et sur les quais de trois stations, sélectionnées en fonction de leur fréquentation et de leurs niveaux ponctuels de pollution en PM_{10} : Castellane et Périer sur la Ligne 2, et Les Réformés sur la Ligne 1.

► Des concentrations en PM_{10} plus élevées à Castellane et Périer mais qui respectent la valeur guide dans les EFS

Aux trois stations échantillonnées, les concentrations horaires en PM_{10} ont toujours respecté la valeur guide 2020 dans les enceintes ferroviaires pour une heure d'exposition de $602 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les concentrations moyennes sur les heures d'ouverture s'échelonnent de $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station Réformés (ligne 1) à 144 et $145 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aux stations Castellane et Périer (ligne 2). Ces deux dernières présentent des concentrations en PM_{10} supérieures à ce qui a été observé à la station St-Charles lors des précédentes campagnes de mesure.

Le profil d'évolution des concentrations au cours d'une journée est différent entre la station Réformés, qui présente un profil cohérent avec les trajets domicile travail et des niveaux comparables à ceux obtenus sur les précédentes campagnes (mesures à Saint Charles) ; et Castellane et Périer, dont les niveaux sont plus importants et sur des créneaux horaires décalés. L'une des explications possibles de cette disparité pourrait être la différence de configuration spatiale des quais qui desservent les voies et l'emplacement de la station (2 quais à chaque extrémité ou 1 quai central).

► Une proportion de $PM_{2,5}$ dans les PM_{10} d'environ 30 à 40 % sur les quais

Avec des concentrations moyennes en $PM_{2,5}$ sur les quais lors des heures d'ouverture de $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station Réformés (ligne 1), $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Périer et $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Castellane (ligne 2), les $PM_{2,5}$ représentent entre 28 % et 40 % des PM_{10} . L'évolution des concentrations au cours du temps suit celle des PM_{10} .

► Un comportement similaire des particules les plus fines entre les stations.

La mesure granulométrique des particules supérieures à 250 nm montre que les plus nombreuses sont celles situées entre 250 et 300 nm. Le nombre des particules de diamètres entre 250 nm et $1 \mu\text{m}$ ne semble pas en lien avec la fréquence de passage des métros mais il est impacté par les heures d'ouverture du réseau : augmentation des concentrations à l'ouverture, baisse des concentrations à la fermeture. Il semble également influencé par les concentrations extérieures avec un pic de concentration entre 23h et 1h. Ces tendances sont similaires entre les stations échantillonnées de cette campagne et ce qui a été observé aux stations St-Charles et Blancarde lors de la campagne de 2019.

► Des métaux dans les PM_{10} en proportion similaire sur les quais

La proportion des métaux les uns par rapport aux autres reste similaire quelle que soit la station et la campagne de mesure, avec le Fer (Fe) comme élément le plus présent (30 à 40 %) suivi du cuivre (3 %). Les concentrations aux stations Castellane et Périer (ligne 2) présentent des concentrations plus importantes qu'à la station Réformés (ligne 1). Les métaux réglementés dans l'air ambiant montrent des concentrations du même ordre de grandeur que celles des campagnes de 2016 et 2019 à la station St-Charles.

► Un confinement faible sur les quais ou dans les rames

L'évolution des concentrations en CO₂ sur les quais suit les périodes de pointe de fréquentation du métro mais les niveaux observés sont faibles et ne font pas état de problématique de confinement. Il est en de même dans les rames, avec des concentrations toutefois plus élevées qui peuvent dépasser ponctuellement la valeur recommandée par le Haut Conseil de Santé Publique de 800 ppm, dans le contexte de pandémie à la Covid 19, dans les environnements intérieurs en présence d'occupants masqués.

► Dans les rames, des concentrations en PM₁₀ inférieures à celles des quais mais supérieures en PM_{2.5}

Sur les deux lignes de métro de Marseille, les concentrations en PM₁₀ dans les rames sont significativement inférieures à celles sur les quais alors que les concentrations en PM_{2.5} sont légèrement supérieures. La proportion de PM_{2.5} dans les PM₁₀ est donc plus importante dans les rames.

► Les métaux quantifiés dans les rames correspondent aux plus présents sur les quais, mais en moindre quantité

Les deux seules substances ayant pu être quantifiées dans les rames sont le fer et le cuivre, soit les éléments les plus présents dans les stations. Les niveaux moyens obtenus pour ces deux substances dans les rames sont légèrement inférieurs à ceux des stations concernées.

REMERCIEMENTS

AtmoSud remercie la Régie des Transports Métropolitains d'avoir pu rendre possible la mise en place de la campagne de mesure dans l'enceinte ferroviaire souterraine du métro de Marseille.

PARTENAIRES

Régie des Transports Métropolitains

AUTEURS DU DOCUMENT

Mathieu Izard – AtmoSud

Romain Boissat – AtmoSud

Edwige Révélat - AtmoSud

SOMMAIRE

1. Contexte de l'étude.....	6
2. Le Métro de Marseille	7
2.1 Le réseau	7
2.2 Matériel roulant actuel.....	8
2.3 Fréquentation et horaires des métros	8
2.4 Futur matériel roulant	9
3. Qualification de la qualité de l'air sur la zone d'étude	10
4. Réalisation de la campagne de mesures.....	11
4.1 Méthodologie	11
4.2 Moyens mis en œuvre	11
4.3 Echantillonnage géographique et temporel	14
5. Valeurs de référence	17
6. Résultats de la campagne 2021	18
6.1 Campagne de mesure sur les quais	18
6.2 Campagne de mesure dans les rames	30
7. Comparaison aux campagnes précédentes	34
7.1 Particules fines sur les quais.....	34
7.2 Métaux sur les quais.....	37
7.3 Particules ultrafines sur les quais	39
8. Conclusions	40
GLOSSAIRE.....	42

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1	Hiérarchisation des quais (données de la RTM).....	45
ANNEXE 2	Base de données des mesures de particules fines et CO ₂ sur les quais des 3 stations de l'étude	48
ANNEXE 3	Base de données des mesures de métaux sur les quais des 3 stations de l'étude	54
ANNEXE 4	Granulométrie des stations St-Charles et Blancarde de la campagne de mesure 2019	56
ANNEXE 5	Représentation statistique des paramètres de confort sur les quais à l'aide de « boxplot »	58
ANNEXE 6	Base de données des mesures de particules fines sur dans les rames des 2 lignes de métro	60
ANNEXE 7	Base de données des mesures de métaux dans les rames de métro des lignes 1 et 2	61
ANNEXE 8	Sources de pollution, effets sur la santé, réglementation et recommandations OMS	62

1. Contexte de l'étude

Les enceintes ferroviaires souterraines sont des environnements clos fréquentés par un grand nombre de personnes, de manière régulière et pour une durée d'exposition par jour relativement courte. Aux émissions des passagers et à la contribution de la pollution extérieure, s'ajoutent les polluants issus du passage du matériel roulant. Il est désormais reconnu que ces derniers concernent principalement les particules fines et les métaux.

L'objet de cette étude, menée par AtmoSud en partenariat avec la Régie des Transports Métropolitains (RTM), est de **poursuivre la surveillance de la qualité de l'air du métro de la ville de Marseille**. Trois précédentes campagnes de mesure ont eu lieu en 2010, 2016 et 2019. Ces dernières ont permis de caractériser, entre autres, les particules, les métaux, le benzène et le dioxyde d'azote sur les quais des stations de St-Charles et Castellane (croisement des lignes 1 et 2), le benzène à la station de La Fourragère (station terminus de la ligne 1, ouverte en 2010) et les particules et les métaux à la station de La Blancarde (ligne 1).

L'objectif de cette nouvelle étude est de mettre en place le nouveau protocole de mesure harmonisé à l'échelle nationale dans les enceintes ferroviaires¹. Son principe est de réaliser des mesures, de particules fines, métaux et de CO₂, dans les rames de métro et sur les quais de 3 stations choisies en fonction de leur fréquentation et de concentrations ponctuelles en PM₁₀.

En complément, AtmoSud réalise des mesures de particules ultrafines afin de conforter les résultats obtenus lors de la précédente campagne de mesures aux stations St-Charles et Blancarde menée en 2019.

¹ Guide de recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines – INERIS 2020

2. Le Métro de Marseille

La RTM est l'établissement public à caractère industriel et commercial chargé de l'exploitation du réseau de transports en commun de Marseille, Septèmes-les-Vallons, Plan-de-Cuques et Allauch. En 2018, le réseau marseillais a été emprunté par 200 millions d'usagers, pour 800 000 voyages par jour. Près de la moitié du trafic concerne le métro.

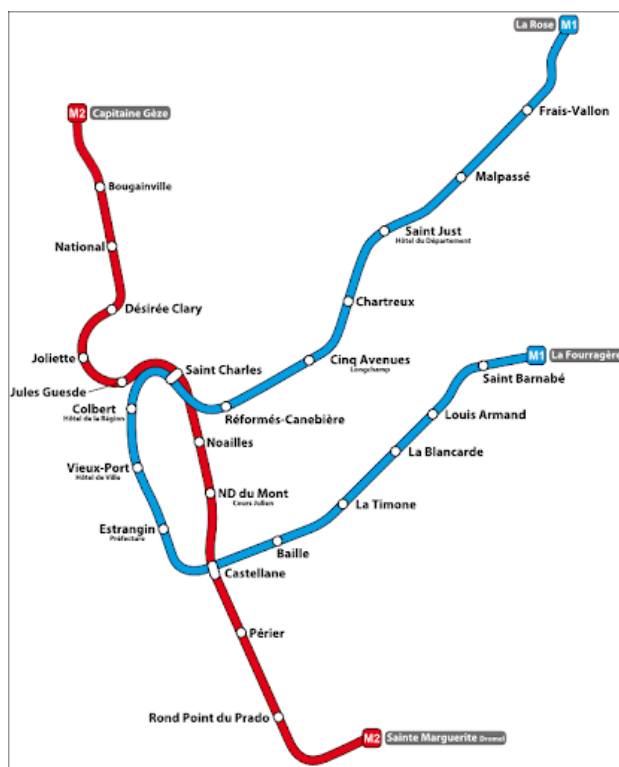
2.1 Le réseau

Le métro de Marseille compte deux lignes totalisant une longueur de 21,5 km et 28 stations :

- Ligne 1 de La Rose à La Fourragère : cette ligne compte 18 stations dont 4 aériennes,
- Ligne 2 de Gèze à Sainte-Marguerite Dromel : elle compte 13 stations dont 3 aériennes.

Les stations Castellane et Saint-Charles sont communes aux deux lignes.

Figure 1 : Plan du Réseau de Métro de la ville de Marseille lors de la campagne 2021 (source RTM)



2.2 Matériel roulant actuel

Le type de matériel roulant est le même depuis l'inauguration du métro Marseillais en 1977. Il s'agit de trains de type MPM 76 avec 4 voitures (2 motrices avec poste de conduite, une voiture motorisée sans cabine et une remorque non motorisée) dont les roues sont équipées de pneus qui roulent sur une piste métallique. Les roues pneumatiques sont doublées de roues fer de sécurité, pour d'éventuelles situations de pneus dégonflés, et qui servent également de guidage aux aiguillages.

Chaque motrice comporte deux bogies moteur, équipés chacun de deux moteurs électriques, qui sont alimentés par des frotteurs positifs qui captent le courant sur les barres de guidage. Un deuxième type de frotteur (négatif) assure le retour de courant via le rail et sert également à la détection des rames sur la voie. Le freinage est assuré par des freins électroniques par récupération et des freins mécaniques équipés de sabots en bois qui viennent en appui sur les roues de sécurité.



Photographie 1 : Roue pneumatique doublée d'une roue de sécurité fer avec frein mécanique à sabot en bois (source RTM)

La vitesse moyenne entre deux stations est de 50 à 80 km/h. En dessous de 25 km/h, le frein mécanique prend le relais du frein électronique.

Chaque rame présente une capacité de 472 voyageurs dont 182 places assises.

2.3 Fréquentation et horaires des métros

A la station de métro St-Charles, il a été observé une augmentation de la fréquentation de 61% entre 2010 et 2016. Cette augmentation significative est due en partie à l'augmentation de la plage d'ouverture du réseau (5h-22h30 en 2010 contre 5h-1h en 2016). Entre 2016 et 2019, les plages d'ouverture n'ont pas changé mais la fréquentation a augmenté de 4%.

En 2021, en raison de la pandémie liée à la covid 19, les mois de janvier, février et mars ont vu leur fréquentation baisser de plus de 30 % sur l'ensemble du réseau par rapport à la même période de 2019.

La fréquentation de la station Castellane est significativement plus fréquentée que celles des Réformés et de Périer qui présentent une fréquentation similaire entre elles.

Tableau 1 : Evolution de la fréquentation du métro par station

Fréquentation	Années	Janvier	Février	Mars
Ensemble du réseau	2019	6 680 339	5 865 382	7 160 230
	2021	4 117 639	3 889 992	4 498 468
Station Réformés	2019	162 430	142 888	174 736
	2021	102 166	96 600	110 464
Station Castellane	2019	539 354	476 931	576 371
	2021	324 505	308 475	360 554
Station Périer	2019	178 085	152 040	184 317
	2021	102 051	96 187	110 795

Sur la période de la campagne de mesure, les horaires des métros des jours de semaine étaient identiques à ceux de 2019 jusqu'à 21h. A partir de 21 heures, en raison du couvre-feu, on compte un train de moins sur la ligne 1 et 2 trains sur la ligne 2.

2.4 Futur matériel roulant

De nouveaux trains de métro, entièrement automatiques, devrait être mis en service entre 2022 et 2026. Il s'agit de trains sur roues pneumatiques avec un freinage exclusivement électronique. L'ensemble des quais sera équipé de portes palières qui permettent un effet barrière au déplacement des particules vers le quai.

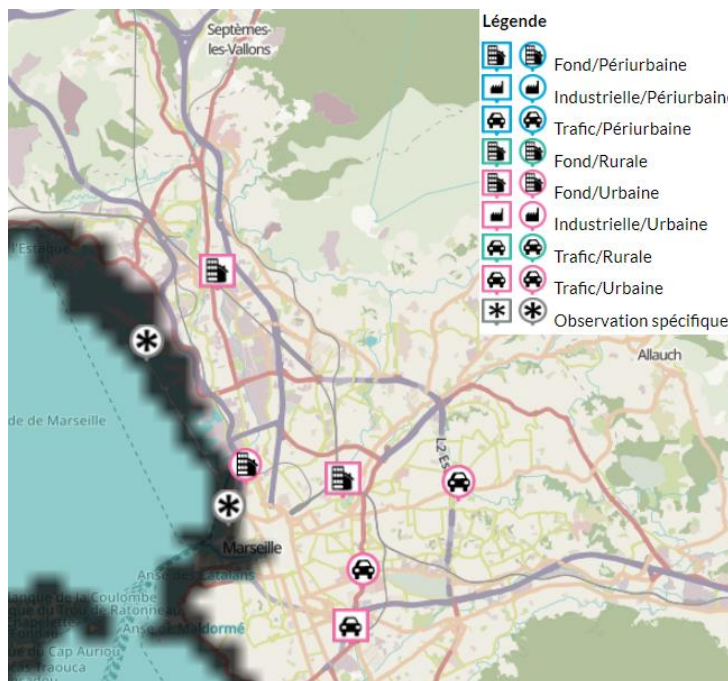
Figure 2 : Futures rames de métro (source : Métropole Aix-Marseille-Provence)



3. Qualification de la qualité de l'air sur la zone d'étude

AtmoSud dispose d'un réseau de surveillance permanent sur l'ensemble de la région afin de mesurer en continu des polluants réglementés. Sur Marseille, six stations surveillent la qualité de l'air².

Figure 3 : Réseau de surveillance de la qualité de l'air sur Marseille



Deux d'entre-elles sont utilisées dans le cadre de cette étude pour fournir des informations comparatives aux concentrations mesurées à l'intérieur de l'enceinte ferroviaire souterraines du métro de Marseille. Leurs caractéristiques et les substances mesurées sont indiquées ci-dessous :

Tableau 2 : Caractéristiques stations de mesures AtmoSud fixes dans la zone d'étude

Paramètre		Station Longchamp	Station Rabatau
Station	Type	Fixe	Mobile
	Typologie	Urbaine	Trafic
	Influence	Fond	Fond
Polluants particuliers	PM ₁₀	X	X
	PM _{2,5}	X	X
	PM ₁	X	
	Granulométrie	X	
Métaux	Arsenic (As)	X	
	Cadmium (Cd)	X	
	Nickel (Ni)	X	
	Plomb (Pb)	X	
Autres	CO ₂	X	

Les données de ces deux stations de mesure servent également à calculer la valeur guide C_{sout} à ne pas dépasser dans les enceintes ferroviaires souterraines pour les PM₁₀ (cf. chapitre « valeurs de référence »).

² <https://www.atmosud.org/donnees/acces-par-station>

4. Réalisation de la campagne de mesures

4.1 Méthodologie

Au vu de l'objectif de l'étude, les polluants suivants ont été mesurés :

- PM₁₀
- PM_{2.5}
- Métaux lourds
- Particules ultrafines
- CO₂

Les caractéristiques techniques générales des prélèvements et des analyses sont rappelées ci-dessous :

Tableau 3 : Caractéristiques des prélèvements réalisés

Substance/Paramètre		Type de prélèvement	Points fixes : Nombre de stations de métro	Mesures en mobilité : Nombre de lignes de métro
Substances gazeuses	CO ₂	Analyseur infrarouge	3	2
	PM ₁₀ + PM _{2.5}	Analyseur automatique	3	-
Substances particulaires dans l'air ambiant	PM ₁₀ + PM _{2.5}	Prélèvement actif	-	2
	Métaux lourds ³	Préleveur actif	3	2
	Particules ultrafines	Granulomètre	3	-
Confort	Température/humidité	Analyseur infrarouge	3	2

4.2 Moyens mis en œuvre

Pour chacune des deux stations de métro échantillonnées, les appareils de mesure sont entreposés sur les quais, dans une cage métallique permettant de limiter les dégradations de matériel. Les dispositifs de mesure utilisés à chaque emplacement sont les suivants :

Tableau 4 : Répartition des moyens de mesure aux deux stations de métro échantillonnées

Dispositif de mesure	Réformés	Castellane	Périer	Rames
Analyseur automatique (Particules PM ₁₀ puis PM _{2.5})	X	X	X	-
Préleveur séquentiel (Particules PM ₁₀ + 14 métaux)	X	X	X	-
Prélèvement actif (Particules PM ₁₀ , PM _{2.5} et 14 métaux dans les PM ₁₀)	-	-	-	X
Granulomètre MINI-LAS (Particules fines de diamètre compris entre 250 et 32 000 nm, Particules PM ₁₀ et PM _{2.5})	-	X	X	-
Analyseur infrarouge (CO ₂ , température, humidité relative)	X	X	X	X

³ Fe, Ba, Cu, Zn, Sb, Mn, Ni, Pb, As, Cd, Cr, Al, Ca, K

4.2.1 Analyseur automatique de particules fines

Afin de suivre l'évolution précise des concentrations au cours du temps, un analyseur de référence de type jauges radiométriques, par atténuation de rayonnement Bêta, est mis en place à la station St-Charles : le BAM 1020 (appareil équivalent à la norme NF EN 12341). Il permet d'obtenir une concentration moyenne horaire en PM₁₀ sur l'ensemble de la période de mesure.

Photographie 2 : Analyseur automatique des particules fines BAM 1020 (source AtmoSud)



4.2.2 Préleveur séquentiel de particules fines et de métaux

Pour les deux stations de métro échantillonnées, un appareil de type Leckel prélève sur filtres les métaux dans la fraction de particules fines PM₁₀. Les prélèvements sont réalisés de manière hebdomadaire tout au long de la période de mesure à un débit de 2,3 m³/h. Les analyses des filtres permettent d'obtenir **la concentration de 14 métaux** pour chaque semaine de mesure (norme NF EN 14902).

Photographie 3 : Préleveur séquentiel de métaux Leckel (source AtmoSud)



4.2.3 Granulomètres

Les granulomètres mis en œuvre sont des analyseurs optiques permettant l'étude de la distribution statistique des tailles de particules et l'estimation des concentrations en masse des particules fines. Le **MINI-LAS** permet d'obtenir la **distribution statistique des tailles de particules dans 31 fractions de 250 nm à 32 µm**. Il est mis en place pendant toute la période de mesure.

Photographie 4 : Granulomètres et MINI-LAS (source AtmoSud)



4.2.4 Analyseur infrarouge

La température, l'humidité relative et les concentrations en dioxyde de carbone CO₂ sont mesurées en temps réel à l'aide d'un appareil de mesure Class'Air de chez Pyrescom.

Basé sur le principe de la spectrométrie d'absorption infrarouge, cet équipement répond aux exigences de conformité au décret n°2012-14 relatif à la mesure des polluants de l'air intérieur dans les établissements recevant du public (ERP).

Photographie 5 : Appareil de mesure de CO₂, température et humidité relative : Class'Air



4.3 Echantillonnage géographique et temporel

4.3.1 Echantillonnage géographique

Afin de répondre aux exigences du guide de recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines, 3 points de mesures fixes ont été positionnés dans le cadre de cette campagne de mesures s'étalant **du 4 janvier au 22 mars 2021** :

- 2 sur les quais des stations ayant présenté des concentrations ponctuelles en PM₁₀ les plus importantes de chaque ligne de métro (selon la hiérarchisation effectuée par la RTM, voir ANNEXE 1) : stations Réformés (ligne 1), Périer (ligne 2)
- 1 à la station la plus fréquentée du Réseau : Castellane (sur le quai de la ligne 2)

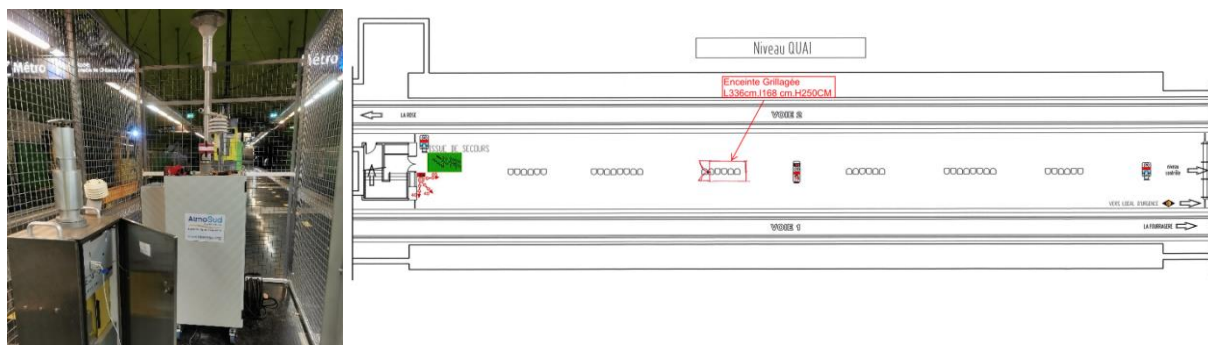
Nb : La station la plus fréquentée est celle de St-Charles mais elle est indisponible sur la période de mesure en raison de travaux importants. La deuxième station la plus fréquentée étant celle de Castellane, cette dernière a été sélectionnée pour cette campagne de mesures.

De manière complémentaire, des mesures à l'intérieur des rames en mobilité sont réalisées sur les deux lignes de métro (Lignes 1 et 2).

► Station Réformés (ligne 1)

La station Réformés est organisée autour d'un quai central qui dessert les voies des 2 sens de circulation de la ligne 1. Sur le quai de la station, les appareils de mesure ont été positionnés au **centre du quai**.

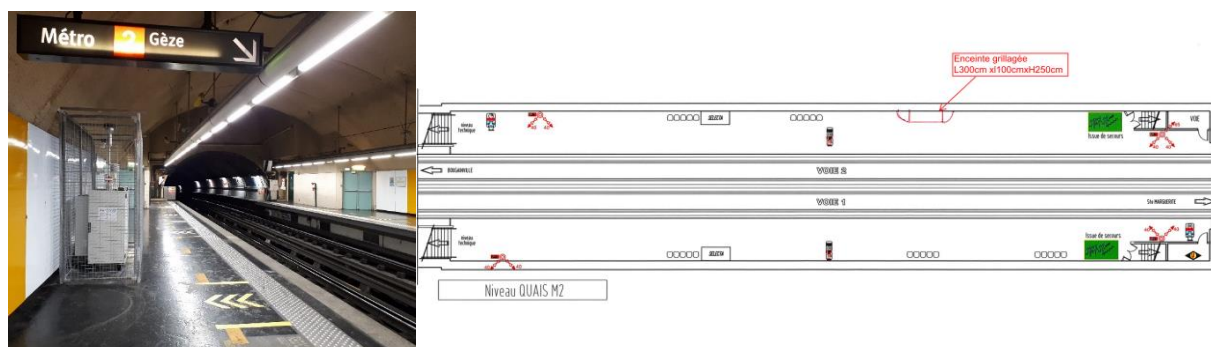
Figure 4 : Emplacement des appareils de mesure sur le quai de la station Réformés



► Station Castellane (ligne 2)

A la station Castellane, c'est la zone qui dessert la ligne 2 qui a été équipée. Celle-ci est organisée autour de 2 quais aux extrémités, chacun desservant un sens de circulation de la ligne 2. Les appareils de mesure ont été positionnés en position centrale sur le quai desservant la voie en direction de station Gèze (sur le plan direction Bougainville).

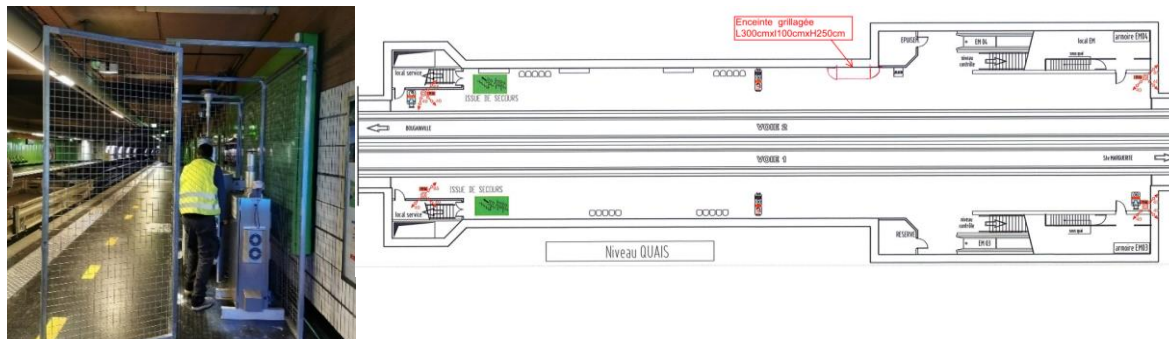
Figure 5 : Emplacement des appareils de mesure sur le quai de la station de Castellane



► Station Périer (ligne 2)

Comme à Castellane, la station Périer est organisée autour de 2 quais aux extrémités, chacun desservant un sens de circulation de la ligne 2. Les appareils de mesure ont été positionnés en position centrale sur le quai desservant la voie en direction de station Gèze (sur le plan direction Bougainville).

Figure 6 : Emplacement des appareils de mesure sur le quai de la station de Périer



4.3.2 Echantillonnage temporel

► Campagnes sur les quais

Les campagnes de mesure des points fixes sur les quais des 3 stations de métro durent 2 semaines et sont réalisées de manière successive. Les durées d'échantillonnage par type de prélèvement sont les suivantes :

Tableau 5 : Durée d'échantillonnage pour chaque point de mesure fixe par type de prélèvement

Type de prélèvement	Période d'échantillonnage	Pas de temps
Analyseur automatique PM ₁₀	1 semaine	Horaire
Analyseur automatique PM _{2,5}	1 semaine	Horaire
Préleveur actif métaux lourds	2 semaines	Journalière 20h/24h
Granulomètre	2 semaines	Horaire
Analyseur infrarouge	2 semaines	Quart-horaire

Les campagnes de mesures fixes à chaque station ont été réalisées aux périodes suivantes :

Tableau 6 : Périodes d'échantillonnage des quais de chaque station de métro

Points de mesure	Période d'échantillonnage	
	Début	Fin
Station Réformés	04/01/2021	17/01/2021
Station Castellane	04/02/2021	17/02/2021
Station Périer	08/03/2021	21/03/2021

► Campagnes dans les rames

Les campagnes de mesure à l'intérieur des rames de métro en mobilité sont réalisées sur 3 périodes de 2 heures de prélèvement en période de pointe d'affluence. Les durées d'échantillonnage par type de prélèvement sont les suivantes :

Tableau 7 : Durée d'échantillonnage pour chaque point de mesure en rame et par type de prélèvement

Type de prélèvement	Période d'échantillonnage	Pas de temps
Prélèvement actif PM ₁₀	3 x 2 heures en période de pointe	2 heures
Prélèvement actif PM _{2.5}	3 x 2 heures en période de pointe	2 heures
CO ₂	3 x 2 heures en période de pointe	1 minute

Les campagnes de mesures en mobilité dans les rames ont été réalisées aux périodes suivantes :

Tableau 8 : Périodes d'échantillonnage dans les rames

Points de mesure	Période 1	Période 2	Période 3
Ligne 1	18/03	25/03	01/03
Ligne 2	19/03	26/03	02/04

5. Valeurs de référence

Dans les enceintes ferroviaires souterraines (EFS), il n'existe pas de valeurs de concentrations de référence contraignantes pour les polluants rencontrés.

Seule une valeur guide existe dans les EFS pour les PM₁₀ (Circulaire DGS/SD n°2003-314 du 30 juin 2003)⁴.

Cette valeur, (C_{sout}) est calculée en fonction de la concentration extérieure annuelle locale (C_{ext}) et de la valeur limite de la directive air ambiant⁵ (C_{limite} = 50 µg/m³) selon la formule suivante :

$$C_{sout} < \frac{C_{limite} \times 24 - [P90_{ext} \times (24 - T_{sout})]}{T_{sout}}$$

où P90_{ext} est le percentile 90 des concentrations journalières de PM₁₀ mesurées en air extérieur sur une année C_{ext} (c'est-à-dire que 90 % des valeurs observées sont inférieures à cette valeur).

A la date de rédaction de ce rapport, l'année 2021 n'est pas achevée, le calcul de la valeur guide C_{sout} est réalisé sur l'année 2020.

Sur la base de la concentration annuelle C_{ext} de la station de fond urbain de la ville de Marseille (station Longchamp) en 2020, la valeur du percentile 90 en air extérieur est de 26 µg/m³.

Les concentrations C_{sout} à ne pas dépasser pour les différents scénarii d'exposition sont les suivantes :

Tableau 9 : Calcul de la valeur guide C_{sout} en fonction des scénarii d'exposition des usagers

Temps d'exposition des usagers dans le métro	Concentration C _{sout} à ne pas dépasser (µg/m ³) en 2020
15 min	2 330
30 min	1 178
1h	602
1h30	410
2h	314

Le temps moyen des passagers du métro Marseillais étant inférieur à une heure, la valeur de C_{sout} retenue est celle correspondant à 1h d'exposition, soit 602 µg/m³ pour les PM₁₀.

⁴ Annexe II de la Circulaire DGS/SD 7 B n° 2003-314 du 30 juin 2003 relative à la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines

⁵ Directive 2008/50/CE

6. Résultats de la campagne 2021

6.1 Campagne de mesure sur les quais

L'ensemble des statistiques demandées par le guide de recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines sont présentées en ANNEXE 2 pour les particules fines et le CO₂ et en ANNEXE 3 pour les métaux.

6.1.1 Niveaux de concentration en particules fines

6.1.1.1 Concentrations moyennes et maximales

L'ensemble des concentrations en PM₁₀ aux trois stations de métro respectent la concentration C_{sout} à ne pas dépasser en 2020 pour une exposition d'une heure de 602 µg/m³.

Les concentrations moyennes en PM₁₀ des 2 stations de la ligne 2 (Castellane et Périer) sont similaires entre elles et significativement supérieures à celles de la station échantillonnée de la ligne 1 (Réformés).

Les concentrations moyennes en PM_{2.5} montrent des niveaux plus importants à la station Castellane, intermédiaires à Périer et inférieurs à la station Réformés.

Les tableaux ci-dessous présentent, pour chacune des stations investiguées, les concentrations moyennes et maximales obtenues pour différentes périodes d'analyse selon l'activité du métro :

- Toute la période / Heures de fonctionnement
- Heures de pointe théoriques en semaine (7h à 9h et 17h à 19h)
- Tous les jours / Jours ouvrés / Week-ends

► Station Réformés (ligne 1)

Tableau 10 : Concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5} de la station Réformés – analyseur automatique

Polluant	Période	Valeur	Semaine (lundi – dimanche)	Jours ouvrés (Lundi – Vendredi)	Jours de week-end
PM ₁₀ (µg/m ³)	24h/24h	Moyenne	85	91	71
		Maximum horaire	173	173	128
	Période d'ouverture du métro (5h-1h)	Moyenne	96	103	79
		Maximum horaire	173	173	128
	Heures de pointe des jours ouvrés (7h à 9h – 17 à 19h)	Moyenne	-	141	-
		Maximum horaire	-	172	-
PM _{2.5} (µg/m ³)	24h/24h	Moyenne	24	27	18
		Maximum horaire	55	55	35
	Période d'ouverture du métro (5h-1h)	Moyenne	27	30	20
		Maximum horaire	55	55	35
	Heures de pointe des jours ouvrés (7h à 9h – 17 à 19h)	Moyenne	-	41	-
		Maximum horaire	-	52	-

A la station Réformés, les concentrations moyennes sont respectivement de 85 et 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} et les $\text{PM}_{2.5}$. Il apparaît qu'elles sont plus importantes lors du fonctionnement du métro (96 et 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), en semaine et particulièrement lors des heures de pointe.

La concentration maximale horaire de l'ensemble de la période de mesures de 173 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} respecte la valeur guide (C_{sout}) 2020 pour une exposition d'une heure.

La proportion moyenne des $\text{PM}_{2.5}$ dans les PM_{10} est de 28 %.

► Station Castellane (ligne 2)

Tableau 11 : Concentrations en PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$ de la station Castellane – analyseur automatique

Polluant	Période	Valeur	Semaine (du lundi au dimanche)	Jours ouvrés (Lundi – Vendredi)	Jours de week-end
PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24h/24h	Moyenne	125	134	101
		Maximum horaire	269	269	206
	Période d'ouverture du métro (5h-1h)	Moyenne	145	157	114
		Maximum horaire	269	269	206
	Heures de pointe des jours ouvrés (7h à 9h – 17 à 19h)	Moyenne	-	190	-
		Maximum horaire	-	258	-
$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24h/24h	Moyenne	50	55	36
		Maximum horaire	156	156	65
	Période d'ouverture du métro (5h-1h)	Moyenne	57	63	41
		Maximum horaire	156	156	65
	Heures de pointe des jours ouvrés (7h à 9h – 17 à 19h)	Moyenne	-	71	-
		Maximum horaire	-	98	-

A la station Castellane, les concentrations moyennes sont respectivement de 125 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} et les $\text{PM}_{2.5}$, soit des valeurs bien plus importantes que celles obtenues à la station Réformés. Il apparaît qu'elles sont, comme au niveau de Réformés, plus importantes lors du fonctionnement du métro (145 et 57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), en semaine, et plus particulièrement lors des heures de pointe.

Les maximums horaires sont également plus importants (156 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les $\text{PM}_{2.5}$, 269 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10}) mais la valeur guide en PM_{10} (C_{sout}) de 2020 pour une exposition d'une heure n'est pas dépassée.

La proportion moyenne des $\text{PM}_{2.5}$ dans les PM_{10} est de 40 %.

► Station Périer (ligne 2)

Tableau 12 : Concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5} de la station Périer – analyseur automatique

Polluant	Période	Valeur	Semaine (du lundi au dimanche)	Jours ouvrés (Lundi – Vendredi)	Jours de week-end
PM ₁₀ (µg/m ³)	24h/24h	Moyenne	123	137	88
		Maximum horaire	282	282	185
	Période d'ouverture du métro (5h-1h)	Moyenne	144	159	104
		Maximum horaire	282	282	185
	Heures de pointe des jours ouvrés (7h à 9h – 17 à 19h)	Moyenne	-	195	-
		Maximum horaire	-	233	-
PM _{2.5} (µg/m ³)	24h/24h	Moyenne	37	38	35
		Maximum horaire	91	91	75
	Période d'ouverture du métro (5h-1h)	Moyenne	43	44	39
		Maximum horaire	91	91	75
	Heures de pointe des jours ouvrés (7h à 9h – 17 à 19h)	Moyenne	-	56	-
		Maximum horaire	-	89	-

A la station Périer, les concentrations moyennes sont respectivement de 123 et 37 µg/m³ pour les PM₁₀ et les PM_{2.5}, soit des valeurs plus importantes que celles obtenues à la station Réformés et du même ordre de grandeur que celles de la station Castellane pour les PM₁₀. Il apparaît cependant qu'elles sont, comme au niveau de Réformés et de Castellane, plus importantes lors du fonctionnement du métro (144 et 43 µg/m³), en semaine et plus particulièrement lors des heures de pointe en semaine.

Les maximums horaires sont également plus importants (91 µg/m³ pour les PM_{2.5}, 282 µg/m³ pour les PM₁₀). La valeur guide en PM₁₀ (C_{sout}) de 2020 pour une exposition d'une heure n'est pas dépassée.

La proportion moyenne des PM_{2.5} dans les PM₁₀ est de 30 %.

Aux trois stations échantillonnées, les concentrations horaires en PM₁₀ ont toujours respecté la valeur guide 2020 dans les enceintes ferroviaires pour une heure d'exposition de 602 µg/m³ (le maximum horaire observé étant de 282 µg/m³ à la station Périer).

Les stations de la ligne 2 (Castellane et Périer) présentent des niveaux en PM₁₀ supérieurs à ceux de la station Réformés (ligne 1), avec des concentrations moyennes sur les heures d'ouverture respectivement de 144, 145 et 96 µg/m³.

Avec des concentrations moyennes en PM_{2.5} sur les quais lors des heures d'ouverture de 27 µg/m³ à la station Réformés (ligne 1), 43 µg/m³ à Périer et 57 µg/m³ à Castellane (ligne 2), les PM_{2.5} représentent environ 30 % à 40 % des PM₁₀.

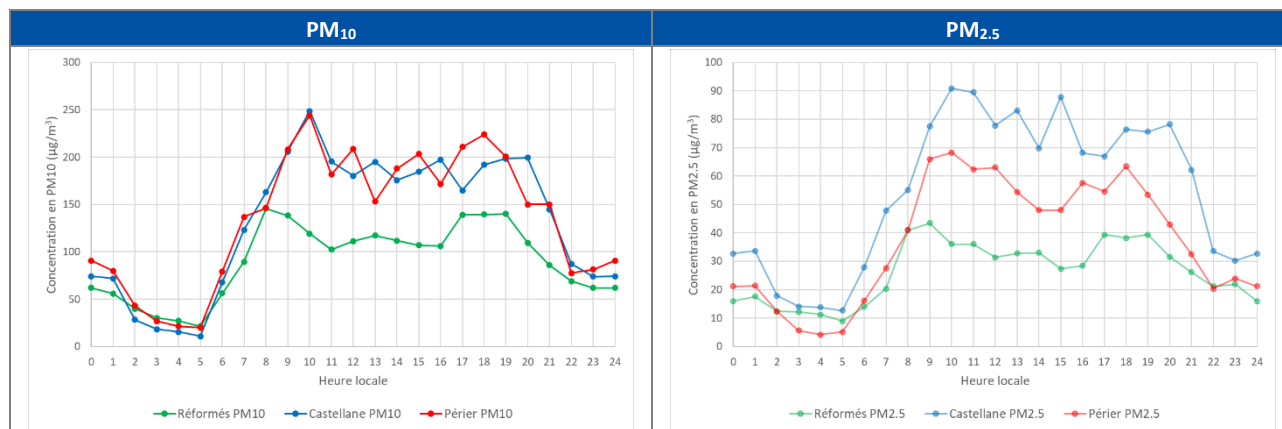
6.1.1.2 Profils horaires

Les profils horaires des PM₁₀ et PM_{2.5} aux trois stations échantillonnées lors des jours ouvrés, montrent une augmentation significative des concentrations en PM₁₀ à partir de l'heure d'ouverture du métro (5h).

Les maximums sont globalement observés en matinée et en fin d'après-midi/début de soirée, mais ne sont pas tout à fait comparables entre les stations. En effet :

- Au niveau de la station Réformés, les maximums sont observés entre 8h et 9h et entre 17h à 19h. Les niveaux mesurés sont d'environ 150 µg/m³ pour les PM₁₀ et 40 µg/m³ pour les PM_{2.5} sur ces créneaux horaires. A partir de 10 heures, la concentration en PM diminue pour atteindre un palier tout au long de la journée (de l'ordre de 100 µg/m³ pour les PM₁₀ et 35 µg/m³ pour les PM_{2.5} avant une ré-augmentation à partir de 17 heures. Cette évolution des concentrations correspond globalement aux heures de forte affluence (trajet domicile/travail ou domicile/école).
- Au niveau des stations Castellane et Réformés, l'augmentation des concentrations continue jusqu'à 10 heures, aussi bien pour les PM₁₀ que les PM_{2.5}, pour atteindre 250 µg/m³ en moyenne à cette heure pour les PM₁₀ et entre 70 et 90 µg/m³ pour les PM_{2.5}, avant de décroître modérément. Sur le reste de la journée, les niveaux obtenus selon les heures sont plus disparates que pour la station Réformés, et l'augmentation observée en fin de journée est moins visible comparativement à celle de la matinée.

Figure 7 : Profils horaire des jours de semaine des concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5}



Les profils horaires en PM₁₀ des stations Castellane et Périé sont similaires entre eux en termes de niveaux et de dynamique, avec cependant un pic de fin d'après-midi qui perdure dans le temps à Castellane. Le profil en PM₁₀ de la station Réformés est différent en termes de niveaux observés (inférieurs), avec un pic du matin plus précoce et un pic de fin d'après-midi synchrone avec celui de la station Périé.

Les profils horaires en PM_{2.5} suivent la même tendance, à la différence près que les niveaux de la station Périé sont intermédiaires entre ceux des stations Castellane et Réformés.

Les profils horaires des concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5} sont influencés par les heures de forte affluence. Les profils obtenus sont néanmoins différents entre la station Réformés et ceux des stations Castellane et Périé.

6.1.1.3 Comparaison aux concentrations extérieures

Les concentrations extérieures en PM₁₀ et PM_{2.5} à la station de fond urbain (Longchamp) se sont montrées relativement stables au cours du temps sur les périodes correspondant aux mesures dans chaque station de métro (7 à 9 µg/m³ en PM_{2.5}, 20 à 27 µg/m³ en PM₁₀).

La concentration extérieure maximale observée de 27 µg/m³ en PM₁₀ correspond à la période de mesure sur le quai de la station Réformés, qui a présenté la concentration moyenne intérieure la plus faible parmi les 3 stations échantillonnées. Les niveaux de fond extérieurs en particules fines ne semblent pas avoir influencé notablement les différences de niveaux de concentrations intérieures entre les quais des stations de métro.

Les concentrations extérieures à la station trafic de Rabatau montrent des niveaux très similaires en PM_{2.5} au cours du temps (8 à 10 µg/m³), mais une concentration en PM₁₀ inférieure lors de la période de mesure à la station de métro de Périer par rapport aux autres périodes de mesures. Les concentrations intérieures entre la station Castellane et Périer étant très similaires, cette évolution des concentrations observée dans un contexte de type trafic à la station Rabatau ne semble pas avoir eu d'impact significatif sur les concentrations intérieures de la station Périer.

Tableau 13 : Comparaison des concentrations intérieures sur les quais aux concentrations des stations de référence de fond urbain et trafic de Marseille en PM₁₀ et PM_{2.5}

Stations de métro	Fraction de particules fines	Concentrations moyennes 24h/24h dans le métro sur le quai (µg/m ³)	Concentrations moyennes 24h/24h en air ambiant sur la même période d'une semaine (µg/m ³)	
			Station Longchamp (fond urbain)	Station Rabatau (Trafic)
Réformés	PM ₁₀	85	27	43
	PM _{2.5}	24	8	10
Castellane	PM ₁₀	125	20	45
	PM _{2.5}	50	9	10
Périer	PM ₁₀	123	22	36
	PM _{2.5}	37	7	8

Les évolutions des concentrations extérieures en PM₁₀ et PM_{2.5} ne semble que peu avoir influencé les différences de concentrations sur les quais des différentes stations de métro échantillonnées.

6.1.1.4 Interprétation des résultats

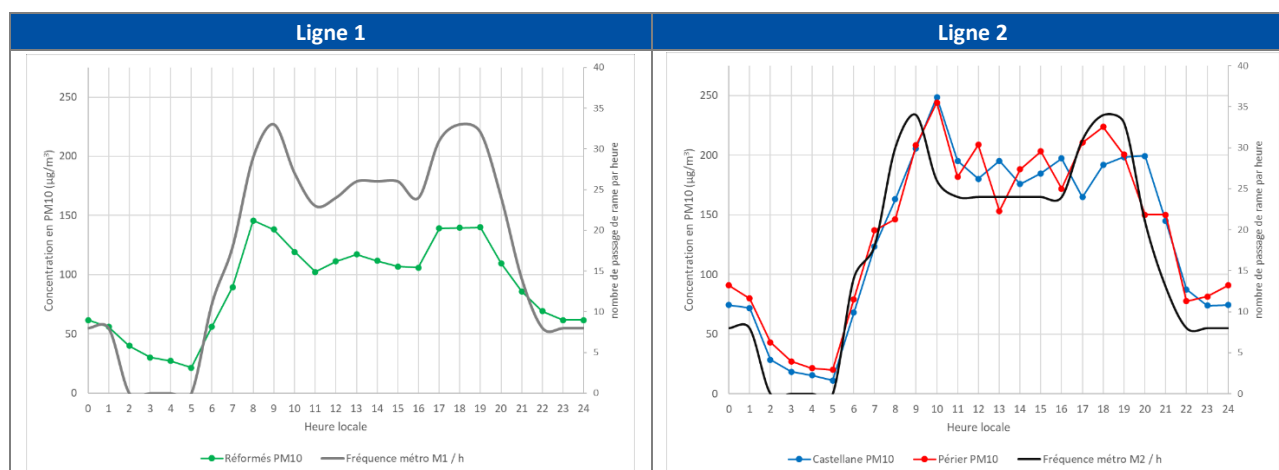
► Influence du passage des rames sur l'évolution des concentrations en PM₁₀ sur les quais

La comparaison des profils horaires avec la fréquence de passage des rames de métro des jours ouvrés semble indiquer que l'évolution des concentrations en particules fines est influencée par la fréquence de passage des rames, avec notamment une augmentation significative des niveaux de particules lors du passage des premiers métros le matin.

Cependant, alors que les pics de concentration en PM₁₀ du matin et de l'après-midi à la station Réformés sont relativement synchrones avec les pics de passage de rames de la ligne 1, il est observé un décalage d'une heure entre les pics de PM₁₀ du matin aux stations Castellane/Périer et la fréquence maximale de passage de métro de la ligne 2. En fin d'après-midi, l'évolution des concentrations en PM₁₀ est synchrone avec le nombre de rames pour la station Périer mais la station Castellane montre également un décalage, avec un pic qui perdure en début de soirée.

Le décalage des pics matinaux dans les stations de la ligne 2 ne sont pas clairement expliqués. Il pourrait s'agir d'une conséquence de la remise en suspension par le passage des rames de métro de particules situées plus en amont dans le réseau de tunnel, qui finissent par impacter les stations de Périer et Castellane. Il est à noter que les mesures pour chaque fraction (PM₁₀, PM_{2.5}) n'ont duré qu'une semaine. Ainsi, le profil horaire des jours ouvrés présenté intègre les données de 5 jours ce qui limite la représentativité statistique de ces données.

Figure 8 : Comparaison des profils horaires en PM₁₀ et de la fréquence de passage des métros sur la ligne correspondante des jours de semaine



Les profils horaires des concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5} correspondent approximativement aux pics de fréquence de passage des rames, avec un décalage d'une heure le matin pour les stations de la ligne 2.

► Les différences de niveaux entre les stations

Les niveaux en PM₁₀ montrent des concentrations différentes entre la station de ligne 1 et les stations de la ligne 2.

Les fréquences de passage des métros entre les 2 lignes étant similaires, le nombre de métro ne peut pas expliquer la différence de concentration notable entre les stations Réformés et Castellane/Périér.

La fréquentation étant bien plus importante à la station Castellane qu'à Périér alors que les niveaux en PM₁₀ sont similaires, l'influence du nombre de personnes présentes ne semble pas être un facteur influençant notablement les concentrations en particules fines sur les quais.

Deux hypothèses peuvent être avancées :

- Les caractéristiques du réseau de tunnels, des rails et du renouvellement d'air naturel de la ligne 2 peuvent être plus propices à l'émission, la remise en suspension ou l'accumulation de particules.
- Il existe des différences **notables de configuration entre la station Réformés**, qui possède un quai central qui dessert les 2 voies, **et les quais de Castellane et Périér** situés côté extérieur, chacun desservant une seule voie. Cet élément **pourrait expliquer en partie les niveaux supérieurs observés dans ces dernières, en raison des différences d'écoulement de l'air que les murs de l'enceinte provoquent sur les quais aux extrémités.**

Nb : Les mesures ponctuelles réalisées par la RTM pour hiérarchiser les stations en fonction des niveaux en PM₁₀ (cf. ANNEXE 1) ne peuvent pas être comparées aux mesures mises en place sur les quais avec des appareils de mesure de référence. En effet, les dispositifs de mesures optiques de particules sous-estiment significativement les concentrations en raison de la densité plus importante des particules dans les enceintes ferroviaires souterraines. Ils servent néanmoins de bon indicateur de comparaison entre les niveaux observés dans les différentes stations de métro.

La différence de niveaux observés en PM₁₀ entre Castellane/Périér et Réformés pourrait être expliquée par une configuration différente des quais desservant chacune des directions.

Le profil d'évolution des concentrations au cours d'une journée est différent entre la station Réformés, qui présente un profil cohérent avec les trajets domicile travail, et Castellane/Périér, dont les niveaux sont plus importants et sur des créneaux horaires. Cette disparité pourrait être expliquée en partie par la différence de configuration spatiale des quais qui desservent les voies (2 quais à chaque extrémité ou 1 quai central).

6.1.2 Concentrations en métaux

Dans le cadre de cette campagne de mesure, le préleveur de particules a été équipé pour prélever la masse et les métaux de la fraction PM₁₀. Les différents résultats des concentrations de l'ensemble des métaux sont disponibles en ANNEXE 3, seule la moyenne des résultats est présentée ci-dessous :

6.1.2.1 Résultats généraux

Tableau 14 : Concentrations en métaux aux différentes stations de mesures

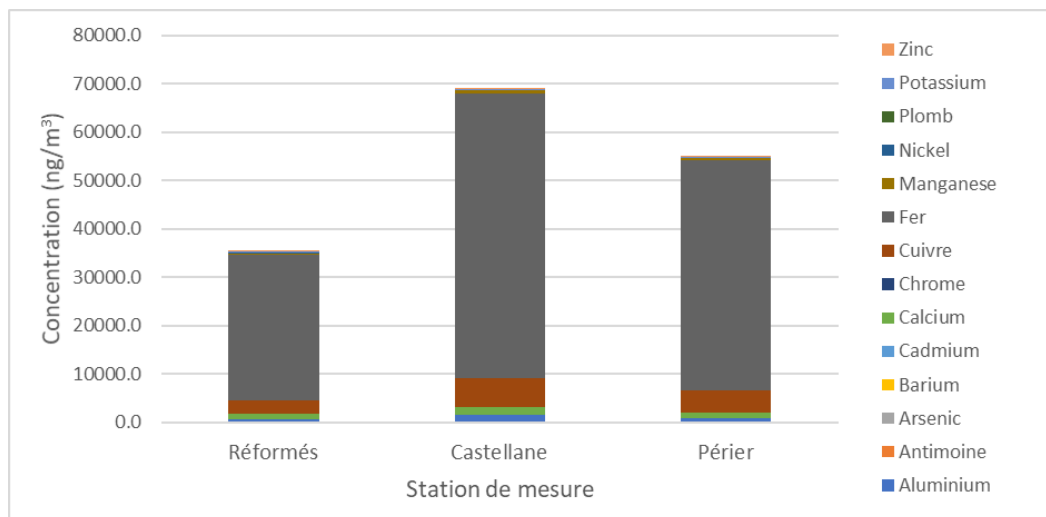
Polluant	Nombre de prélèvements	Concentration moyenne (ng/m ³)		
		Réformés	Castellane	Périer
Aluminium	14	747.0	1562.1	873.9
Antimoine	14	3.9	5.9	4.2
Arsenic	14	13.1	22.3	17.4
Baryum	14	9.6	16.7	13.2
Cadmium	14	0.4	0.2	0.3
Calcium	14	952.3	1512.8	1167.7
Chrome	14	22.9	51.4	60.6
Cuivre	14	2802.2	5889.3	4468.1
Fer	14	30124.6	58946.7	47479.3
Manganèse	14	293.4	519.3	469.0
Nickel	14	59.9	134.1	111.1
Plomb	14	7.4	5.4	5.2
Potassium	14	268.6	242.9	221.4
Zinc	14	63.1	43.5	55.7

Il est observé que les concentrations de la majorité des métaux sont plus importantes au niveau des stations Castellane et Périer qu'aux Réformés.

Parmi les métaux réglementés en air ambiant, le cadmium (Cd) et le plomb (Pb) présentent des concentrations significativement inférieures aux seuils réglementaires en air ambiant (valeur cible pour le cadmium : 5 ng/m³, valeur limite pour le plomb : 500 ng/m³). Les concentrations en arsenic (As) et nickel (Ni) sont supérieures à la valeur cible en air ambiant (respectivement 6 et 20 ng/m³). Parmi les métaux traces en quantité significative, figurent deux espèces de la liste des polluants d'intérêt prioritaires de l'ANSES⁶ : le cuivre (Cu) et le manganèse (Mn).

⁶ Polluants « émergents » dans l'air ambiant - Identification, catégorisation et hiérarchisation de polluants actuellement non réglementés pour la surveillance de la qualité de l'air – ANSES 2018

Figure 9 : Répartition des concentrations moyennes en métaux aux différentes stations



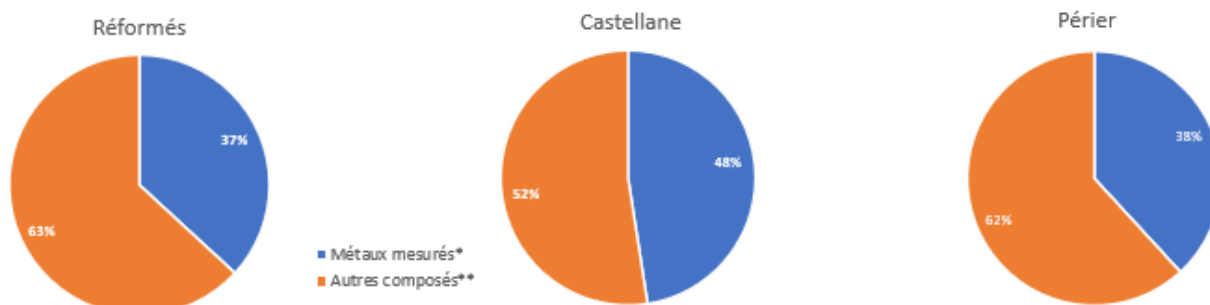
Parmi l'ensemble des métaux, le fer (Fe) est l'élément trace métallique le plus largement présent (85% de la masse des métaux mesurés), puis le cuivre (moins de 10%). Les deux stations présentant les cumuls de concentrations en métaux les plus importants sont celles présentant les concentrations en PM₁₀ les plus importantes : Castellane et Périer.

Les concentrations en métaux sont plus importantes aux stations Castellane et Périer qu'à la station Réformés. Parmi l'ensemble des métaux, le fer (Fe) est l'élément trace métallique le plus présent, suivi par le cuivre. Parmi les métaux réglementés en air ambiant, le cadmium (Cd) et le plomb (Pb) présentent des concentrations significativement inférieures aux seuils réglementaires en air ambiant. Les concentrations en arsenic (As) et nickel (Ni) sont quant à elles supérieures à la valeur cible en air ambiant.

6.1.2.2 Part des éléments traces métalliques dans les particules PM₁₀

La somme des 14 métaux mesurés représente entre 37 et 48 % de la masse des PM₁₀ selon les stations, ce qui est significativement plus important qu'en air ambiant (en général inférieur à 10 %). La part restante des PM₁₀ peut être composée de matières organiques, de carbone élémentaire ou d'ions. C'est la station Castellane qui présente la proportion de métaux dans les PM₁₀ la plus importante (48 %).

Figure 10 : Contribution relative de l'ensemble des métaux traces mesurés dans les PM₁₀



*Al, As, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Pb, Sb, Zn ** matière organique, carbone élémentaire, ions

6.1.2.3 Interprétation des résultats

► Différences entre les lignes 1 et 2

Le fait que les concentrations en métaux soient plus importantes aux stations Castellane et Périer par rapport à la station Réformés est logique puisque c'est ce qui est observé sur les PM₁₀ et que les métaux représentent une part significative des PM₁₀ dans les enceintes ferroviaires souterraines. Ainsi, les hypothèses qui peuvent expliquer la différence de concentration entre les quais des lignes 1 et 2 sont les mêmes que pour les PM₁₀ :

- Les caractéristiques du réseau de tunnels, de rails et de renouvellement d'air (naturel) de la ligne 2 sont plus propices à l'émission, la remise en suspension ou l'accumulation de métaux,
- Les différences **notables de configuration entre la station Réformés**, qui possède un quai central et **de Castellane et Périer** dont les quais sont situés côté extérieur, **pourraient expliquer en partie les niveaux supérieurs observés dans ces dernières en raison des différences d'écoulement de l'air que les murs de l'enceinte provoquent sur les quais aux extrémités.**

► Les niveaux supérieurs à la station Castellane

La concentration et la proportion des métaux dans les PM₁₀ plus importantes à Castellane qu'à Périer pourraient être expliquées par le fait que cette station, elle-même très fréquentée, est située au centre des deux autres stations les plus fréquentées de la ligne 2, St-Charles et Rond-point du Prado (cf. ANNEXE 1).

Dans les deux sens de circulation, au niveau de la station Castellane, il est systématiquement présent plus de monde dans les rames quand elles arrivent ou partent de la station dans les 2 sens. Ainsi, le matériel roulant est systématiquement plus lourd, ce qui peut augmenter les émissions de métaux liées à l'abrasion des pièces métalliques à la station Castellane et augmenter les concentrations locales de métaux (et donc la proportion de métaux dans les PM₁₀).

La station Castellane, elle-même très fréquentée, est au centre des autres stations les plus fréquentées de la ligne 2. Ceci implique que les rames sont souvent bien remplies de passagers à l'arrivée ou au départ, dans les deux sens de circulation. Le surplus de poids occasionné peut expliquer une part plus importante de métaux émis dans l'air par l'usure du matériel.

La proportion des métaux les uns par rapport aux autres reste similaire quelle que soit la station et la période de mesure, avec le Fer (Fe) comme élément principal. Les concentrations en arsenic (As) et nickel (Ni) sont supérieures à la valeur cible en air ambiant. C'est la station Castellane qui présente la concentration en métaux la plus importante, en lien potentiel avec sa fréquentation importante dans les rames.

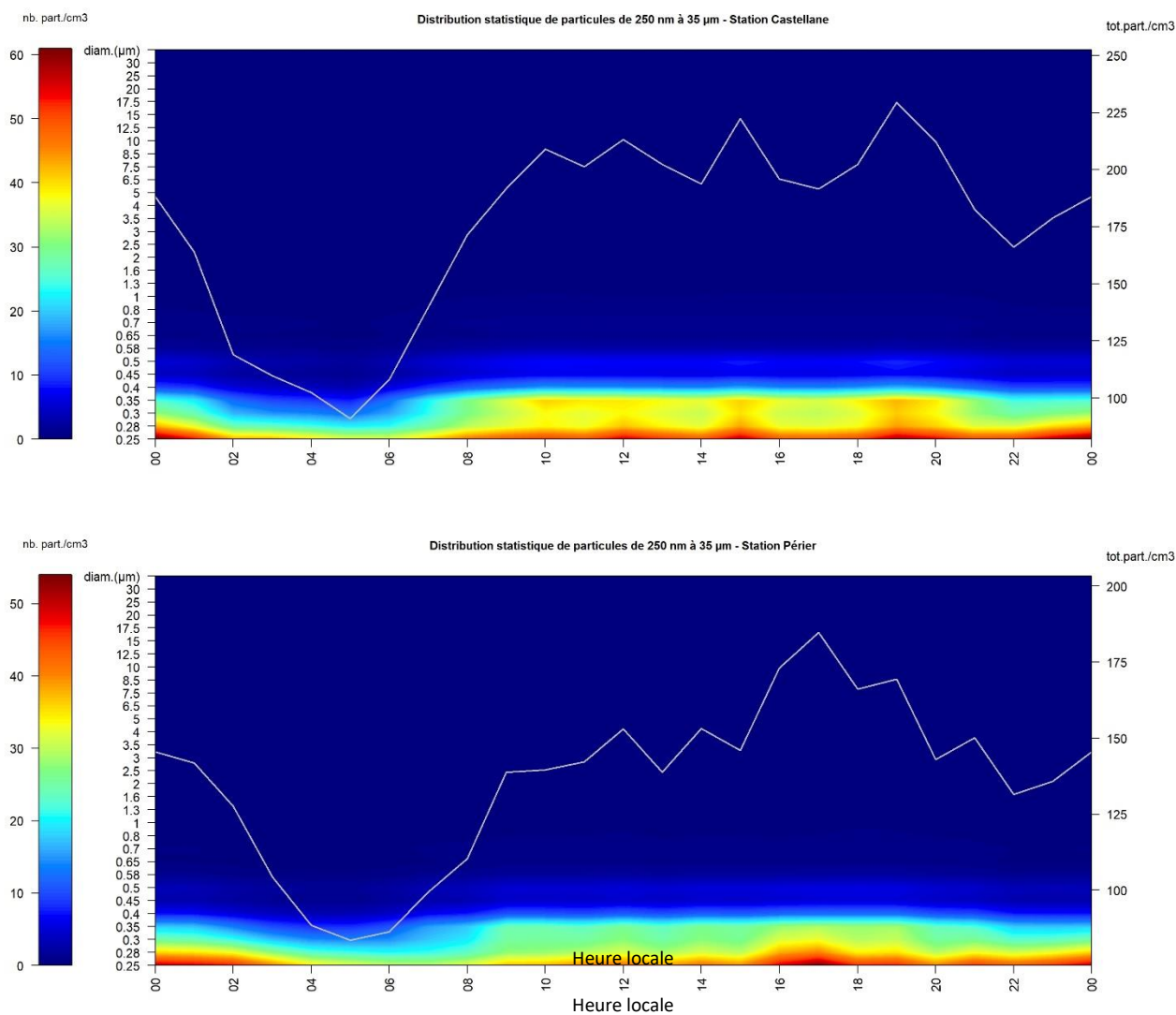
6.1.3 Granulométrie des particules

Le granulomètre installé aux stations de métro permet la mesure, en nombre, des particules de diamètre allant de 250 nm à 32 µm. En raison d'un dysfonctionnement, il n'a pas pu être installé à la station Réformés.

► Les particules les plus fines sont les plus présentes

Le profil horaire de distribution granulométrique ci-après, illustre l'évolution de la répartition granulométrique des particules de diamètre compris entre 250 nm et 35 µm.

Figure 11 : Répartition du nombre de particules/cm³ des fractions de 250 nm à 35 µm - stations Castellane et Périer



Sur l'ensemble de la gamme de mesure du granulomètre de 250 nm à 35 µm, ce sont **les particules les plus petites (comprises entre 250 nm et 500 nm) qui sont les plus nombreuses** (plus de 93% des particules comptées sont dans cette gamme).

Le nombre de ces particules les plus nombreuses augmente progressivement tout au long de la journée à partir de l'heure d'ouverture du métro et diminue après l'heure de fermeture. A la station Périer, des niveaux légèrement plus importants sont observés entre 16h et 17h. Cette évolution progressive au cours de la journée est différente de ce qui est observée avec les concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5}.

► Evolution temporelle

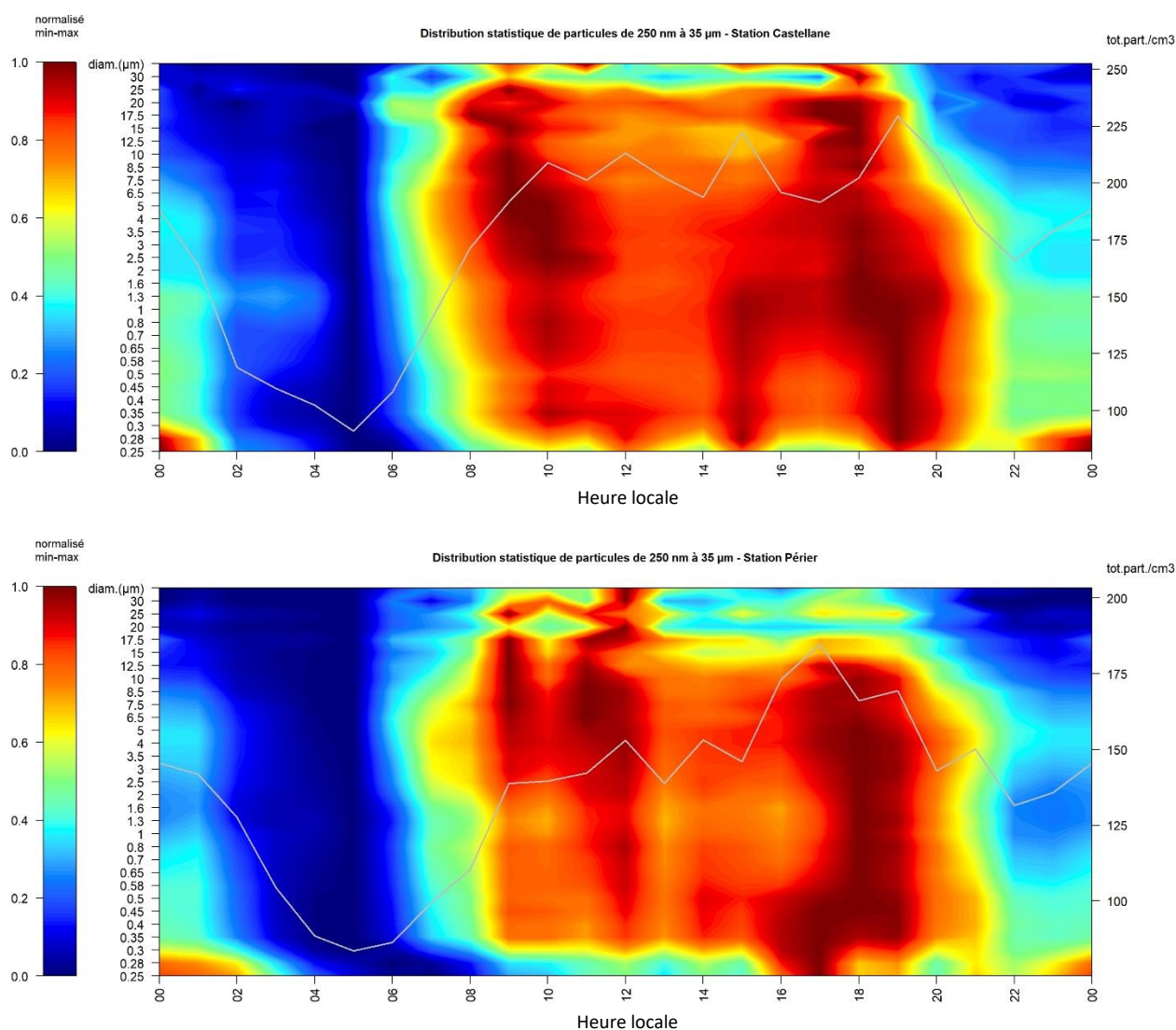
Chaque classe granulométrique de particule ne contribue pas de la même manière à l'évolution des particules comme montré précédemment : les plus fines particules sont très largement majoritaires ; cela ne permet pas de visualiser l'évolution temporelle des classes moins représentées en nombre.

Pour pallier ce biais, la normalisation par l'échelle min-max, permet de rendre compte de l'évolution horaire de la pollution particulaire par classe granulométrique. Cette méthode est appliquée ici.

Ainsi, sur les deux stations :

- L'ensemble des particules est influencé par la période d'ouverture du métro, avec une augmentation à partir de 6 heures et une diminution qui commence aux alentours de 21 heures,
- Les particules supérieures à 1 μm semblent influencées par la fréquence de passage des métros, avec des pics vers 10h et puis vers 18h puis elles montrent une diminution à partir de 20h,
- Il apparaît un comportement spécifique des particules plus fines :
 - Les particules inférieures à 1 μm semblent évoluer de manière plus progressive et être moins influencées par le passage des métros, notamment ceux du matin. A la station Castellane, une augmentation des concentrations est observée vers 15h et 19h,
 - Les particules les plus fines (entre 250 et 300 nm) présentent des concentrations également importantes en soirée entre 22h et 1 heure du matin.

Figure 12 : Profil horaire du nombre de particules/cm³ des fractions de 250 nm à 35 μm normalisé par le minimum et le maximum de chaque fraction - stations Castellane et Périer



Il apparaît un comportement différent des particules les plus grossières ($> 1\mu\text{m}$) dont le nombre est influencé par le nombre de passages de métro (ce qui est cohérent avec l'évolution des concentrations en $\text{PM}_{2.5}$ et PM_{10}), et les particules plus fines dont l'évolution est plus progressive et dont les pics ne sont pas associés à des événements clairement identifiés (contribution des occupants et/ou des concentrations extérieures).

Les particules les plus fines semblent être émises en moindre quantité par le matériel roulant et dépendre davantage des concentrations extérieures ou de la contribution des passagers eux-mêmes. Les particules inférieures à $1\mu\text{m}$ ont une évolution au cours du temps différente des particules plus grossières, elles semblent moins influencées directement par le passage des rames de métro.

6.1.4 Paramètres de confort

Les résultats de mesure des paramètres de confort sont les suivants :

Tableau 15 : Paramètres de confort sur les quais des 3 stations échantillonnées

Période	Valeur	Réformés	Castellane	Périer
CO_2 (ppm)	Moyenne	487	506	496
	Minimum (10 min.)	400	414	410
	Maximum (10 min.)	614	730	644
Humidité relative (%)	Moyenne	46	45	39
	Minimum (10 min.)	24	23	25
	Maximum (10 min.)	68	57	59
Température ($^{\circ}\text{C}$)	Moyenne	18	21	20
	Minimum (10 min.)	13	18	18
	Maximum (10 min.)	20	23	22

L'ensemble des données statistiques des mesures des paramètres de confort est présenté sous forme de tableau en ANNEXE 2, tel que demandé dans le guide de recommandation dans les EFS et sous forme de boxplot en ANNEXE 5.

► Humidité relative

Les taux d'humidité relative moyens respectent les taux recommandés en ambiance intérieure : entre 40 et 60 %

► Températures

Les températures moyennes sont globalement plus basses à la station Réformés, notamment parce la période de mesure correspondante était en plein milieu de l'hiver.

► Confinement

Les concentrations en CO_2 sont très basses dans l'ensemble des 3 stations de métro échantillonnées, avec des concentrations moyennes inférieures à 500 ppm et des concentrations maximales sur 10 minutes qui ne dépassent pas 800 ppm.

Il n'existe pas de valeur de référence de CO_2 spécifique aux enceintes ferroviaires souterraines. A titre de comparaison, le règlement sanitaire départemental⁷ préconise le seuil de 1300 ppm en CO_2 (1000 ppm avec une tolérance à 1300 ppm pour les locaux non-fumeurs).

Dans le contexte de pandémie liée à la covid 19, le Haut Conseil de Santé Publique (HCSP) a émis un avis en avril 2021 concernant les niveaux de confinement admissibles dans les établissements recevant du public⁸. Ce dernier préconise

⁷ [REGLEMENT SANITAIRE DEPARTEMENTAL Bouches-du-Rhône](#)

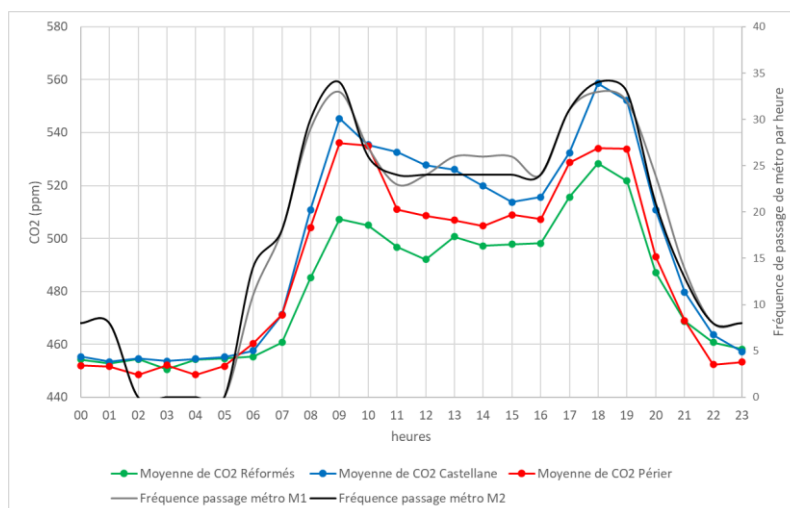
⁸ [Covid-19 : aération, ventilation et mesure du \$\text{CO}_2\$ dans les ERP](#)

de ne pas dépasser le seuil de 800 ppm dans les situations pour lesquelles les personnes présentes portent toutes un masque, ce qui est le cas dans le métro.

Cette valeur de 800 ppm n'est dépassée dans aucune des stations de mesure pendant les périodes renseignées.

Le profil horaire des concentrations dans les trois stations montre une évolution en CO₂ au cours du temps similaire d'une station à l'autre, avec un pic le matin autour de 9h et le soir autour de 18h, ce qui correspond aux heures de pointe d'affluence du métro et de fréquence de passage des métros. Ceci confirme que le décalage du pic en PM₁₀ du matin par rapport à la fréquence de passage des métros ne peut pas être attribué à une affluence décalée dans le temps.

Figure 13 : Profil horaire de mesures de CO₂ des jours ouvrés aux trois stations échantillonnées



Il n'est pas observé de problématique de confinement dans les quais du métro de Marseille, quelle que soit la ligne, pendant les périodes renseignées. L'évolution des concentrations en CO₂ sur les quais des trois stations suit la fréquence de passage des rames avec des pics à 9h et 18h. Ainsi, l'affluence correspond bien aux périodes où les métros sont les plus nombreux et ne peut pas expliquer le décalage des pics matinaux de PM₁₀ dans les stations de la ligne 2 par rapport à ceux de la ligne 1.

Les quais des trois stations de métro échantillonnées montrent des concentrations en CO₂ faibles qui ne font pas état de problématique de confinement. L'évolution des concentrations en CO₂ suit les périodes de pointe de fréquentation du métro. Les conditions hygrothermiques sont standards pour ce type d'environnement.

6.2 Campagne de mesure dans les rames

6.2.1 Niveaux de concentration en particules fines

L'ensemble des données statistiques des mesures de particules fines sont présentés en ANNEXE 6, tel que demandé dans le guide de recommandation dans les EFS.

Les concentrations moyennes en particules fines dans les rames de la ligne 1, sur une durée totale de 6 heures, correspondant à 3 périodes de 2h de mesures cumulées en périodes de pointe (uniquement en zone souterraine), sont respectivement de 63 µg/m³ en PM₁₀ et 53 µg/m³ en PM_{2.5}.

Pour les mesures dans les rames de la ligne 2, seuls les résultats de mesures de deux des trois périodes de mesures de 2 heures en période de pointe sont exploitables, en raison d'un dysfonctionnement de pompe. Les concentrations moyennes en particules fines dans les rames de la ligne 2, sur une durée totale de 4 heures, correspondant à 2 périodes

de 2h de mesures cumulées en périodes de pointe (uniquement en zone souterraine), sont respectivement de 87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{10} et 76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en $\text{PM}_{2.5}$.

Tableau 16 : Concentrations de PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$ dans les rames des lignes 1 et 2

C _{EFS}	Ligne	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$
Moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ligne 1	63	53
Moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ligne 2	87	76

► PM_{10}

Les concentrations moyennes en PM_{10} dans les rames sont moins importantes de plus de 50% que celles observées en période de pointe sur les quais des stations de métro échantillonnées :

- Station Réformés (Ligne 1) : 141 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Stations Castellane et Périer (Ligne 2) : 190 et 195 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les concentrations PM_{10} moins importantes dans les rames que sur les quais peuvent être attribuées :

- à la filtration de l'air entrant dans les rames (de type G2 qui retient essentiellement des particules grossières),
- à l'effet piston que génère le déplacement du métro dans les tunnels qui crée des mouvements d'air qui transportent les particules et impactent principalement les quais des stations de métro,
- aux zones extérieures où les rames évoluent en fin de lignes ce qui a tendance à diluer les niveaux en PM_{10} ,
- aux différentes stations de métro souterraines traversées qui présentent potentiellement des concentrations inférieures à celles retenues pour cette campagne (la station la plus fréquentée et les stations de chaque ligne avec les niveaux ponctuels en PM_{10} les plus importants).

► $\text{PM}_{2.5}$

Le constat n'est pas le même pour les $\text{PM}_{2.5}$, dont les concentrations moyennes dans les rames sont légèrement supérieures à celles observées en période de pointe sur les quais des stations de métro échantillonnées :

- Station Réformés (Ligne 1) : 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Stations Castellane et Périer (Ligne 2) : 71 et 56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ainsi, dans les rames, la proportion moyenne de $\text{PM}_{2.5}$ dans les PM_{10} est de plus de 80 % (entre 84 % et 87%), ce qui est bien plus important que sur les quais (entre 30% et 40%).

Ces niveaux plus importants de $\text{PM}_{2.5}$ dans les rames peuvent être potentiellement expliqués par :

- La moindre efficacité de la filtration de l'air entrant dans les rames sur les particules plus fines,
- Un impact des occupants eux-mêmes à l'intérieur des rames.

Sur les deux lignes de métro de Marseille, les concentrations en PM_{10} dans les rames sont significativement inférieures à celles sur les quais alors que les concentrations en $\text{PM}_{2.5}$ sont légèrement supérieures.

La proportion de $\text{PM}_{2.5}$ dans les PM_{10} est plus importante dans les rames que sur les quais des métros.

L'un des facteurs principaux pouvant expliquer cette différence entre les PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$ dans les rames de métro est l'efficacité du système de filtration de l'air entrant des rames qui retient essentiellement les particules les plus grosses, les PM_{10} .

6.2.2 Concentration en métaux

L'analyse des métaux dans les rames de métro est réalisée sur les filtres ayant servi aux mesures gravimétriques des particules fines aux périodes de pointe.

Les différents résultats des concentrations de l'ensemble des métaux sont disponibles en ANNEXE 7, seule la moyenne des résultats est présentée ci-dessous :

Tableau 17 : Concentrations moyennes en métaux dans les rames de métro

Polluant	Concentration moyenne (ng/m ³)	
	Ligne 1	Ligne 2
Aluminium	< 3310*	< 3310*
Antimoine	< 41*	< 41*
Arsenic	< 16.6*	< 16.6*
Baryum	< 414*	< 414*
Cadmium	< 16.6*	< 16.6*
Calcium	<16552*	<16552*
Chrome	< 83*	< 83*
Cuivre	1917	2411
Fer	24711	33703
Manganèse	< 414*	< 414*
Nickel	< 414*	< 414*
Plomb	< 0.04*	< 0.04*
Potassium	< 3.3*	< 3.3*
Zinc	< 3310*	< 3310*

* concentration inférieure à la limite de quantification correspondante

Parmi les 14 éléments traces métalliques (ETM) mesurés dans les rames lors des périodes de pointe, il apparaît que seuls deux présentent des concentrations supérieures aux limites de quantification disponibles pour ces prélèvements : le fer et le cuivre. Il s'agit, comme démontré précédemment, des ETM les plus présents dans les stations.

Cependant, les concentrations moyennes obtenues dans les rames sont légèrement inférieures à celles des stations :

- Ligne 1 :
 - Fer : 24 700 ng/m³, pour une concentration moyenne en station de 30 000 ng/m³,
 - Cuivre : 1 900 ng/m³, pour une concentration moyenne en station de 2 800 ng/m³,
- Ligne 2 :
 - Fer : 33 700 ng/m³, pour une concentration moyenne en station comprise entre 47 500 et 58 900 ng/m³,
 - Cuivre : 2 400 ng/m³, pour une concentration moyenne en station comprise entre 4 500 et 5 900 ng/m³,

Les tailles des particules métalliques étant plutôt grossières et les métaux représentant entre 40 et 50 % des PM₁₀, il est logique que l'abattement observé en PM₁₀ entre les quais et les rames soit retrouvé sur les métaux. Il s'agit d'un abattement légèrement moins important puisque 60 à 80 % des concentrations mesurées sur les quais des stations échantillonnées sont retrouvées à l'intérieur de la rame de métro. Ainsi, les mêmes hypothèses que pour les PM₁₀ peuvent être avancées pour expliquer les différences de concentrations en métaux entre les quais et les rames :

- la filtration de l'air entrant dans les rames (de type G2 qui retient essentiellement des particules grossières),
- l'effet piston que génère le déplacement du métro dans les tunnels qui crée des mouvements d'air qui transportent les particules et impactent principalement les quais des stations de métro,
- les zones extérieures où les rames évoluent en fin de lignes ce qui a tendance à diluer les niveaux en PM₁₀,
- les différentes stations de métro souterraines traversées qui présentent potentiellement des concentrations inférieures à celles retenues pour cette campagne.

Les deux seules substances ayant pu être quantifiées dans les rames sont le fer et le cuivre, soit les éléments les plus présents sur les quais des stations de métro. Les niveaux moyens obtenus pour ces deux substances dans les rames sont inférieurs à ceux des stations concernées

Comme pour les PM_{10} , l'un des facteurs principaux pouvant expliquer les différences de concentrations en métaux dans les rames de métro par rapport aux quais des stations échantillonnées est l'efficacité du système de filtration de l'air entrant des rames qui retient essentiellement les particules les plus grosses dont font partie majoritairement les métaux.

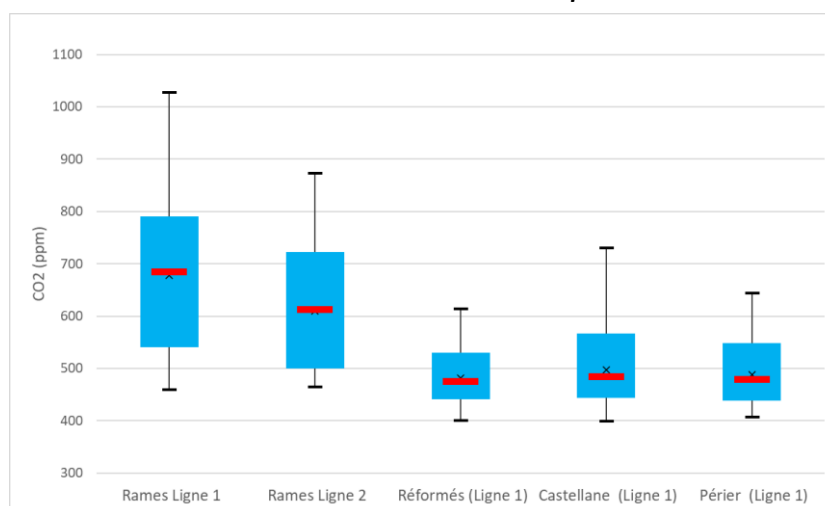
6.2.3 Paramètres de confort

Les niveaux en CO_2 dans les rames des métros lors des heures de pointe des jours ouvrés montrent des **concentrations légèrement supérieures à celles rencontrées sur les quais**, avec une concentration moyenne de 610 ppm dans les rames de la ligne 2 et de 680 ppm dans les rames de la ligne 1.

Ces concentrations moyennes sont relativement faibles, néanmoins, un peu moins de 10 % des concentrations de la ligne 1 en période de pointe (sur un pas de temps de 10 minutes) dépassent 800 ppm, la valeur recommandée par le HCSP au regard des risques en contamination à la covid 19 dans un environnement où les occupants sont masqués.

La fréquentation générale des lignes 1 et 2 étant similaire, les niveaux de confinement légèrement plus importants dans les rames de la ligne 1 peuvent être expliqués par le fait qu'elle ne comporte qu'une seule zone aérienne en extrémité de ligne, contre 2 pour la ligne 2.

Figure 14 : Box-plot des concentrations en CO_2 dans les rames en comparaison des trois stations échantillonnées



Les concentrations moyennes de CO_2 dans les rames lors des périodes de pointe ne montrent pas de problématique de confinement importante. Néanmoins, 10 % des valeurs 10 minutes de la ligne 1 ont dépassé les 800 ppm recommandés par le Haut Conseil de Santé Public dans le contexte de pandémie de Covid 19 pour les environnements intérieurs où les occupants sont masqués.

7. Comparaison aux campagnes précédentes

7.1 Particules fines sur les quais

► Rappels des études menées entre 2010 et 2019

Trois précédentes campagnes de mesures ont été mises réalisées dans le métro Marseillais en 2010, 2016 et 2019 sur des périodes de mesure beaucoup plus longues, de l'ordre de 6 mois. Elles ont permis d'évaluer la qualité de l'air de plusieurs stations de métro selon plusieurs paramètres de mesure. Le détail de chaque campagne est présenté dans le tableau ci-après :

Tableau 18 : Paramètres de mesures des campagnes de 2010 à 2019

Année	Paramètre	Stations				
		Saint-Charles	Castellane	La Fourragère	La Blancarde	Rames
2010	Métaux	X				
	PM ₁₀	X	X			X
	PM _{2.5}	X	X			
	Benzène	X	X			X
	NO ₂	X				X
	HAP	X				
	Amiante/silice cristalline	X				
	CO	X				
	CO ₂					X
2016 (durée de 6 mois)	Métaux	X				X
	PM ₁₀	X				X
	PM _{2.5}					X
	Benzène	X		X		X
	NO ₂	X		X		X
	CO ₂	X				X
2019 (durée de 6 mois)	Métaux	X			X	
	PM ₁₀	X			X*	
	PM _{2.5}	X			X*	
	Particules ultrafines	X			X	
	COV	X			X	

*mesures des PM₁₀ et PM_{2.5} par gravimétrie sur filtre (pas de mesures par analyseur automatique). Pas de comparaison possible avec les mesures issues des appareils automatiques.

► Comparaison des concentrations moyennes en PM₁₀ entre la campagne 2021 et les campagnes précédentes

Les précédentes campagnes de mesure ont été réalisées sur des périodes significativement plus longues (6 mois/station) et sont donc d'avantage représentatives statistiquement que la campagne 2021 (1 semaine/station).

Les concentrations en PM₁₀ de chaque campagne de mesure respectent la valeur guide dans les EFS correspondante.

Pour la campagne 2021, les concentrations en PM₁₀ de la station Réformés sont inférieures à celles de St-Charles alors qu'elles sont significativement supérieures pour les stations Castellane et Périer.

Pour les 3 campagnes de mesures réalisées en 2010, 2016 et 2019, les concentrations en PM₁₀ à la station St-Charles sont significativement plus importantes que celles observées sur la même période de mesure aux stations de mesure de référence d'air ambiant de Marseille :

- Près de 3 fois plus qu'à la station de type de trafic
- Près de 5 fois plus qu'à la station de fond urbain de Longchamp

Il en est de même pour la campagne de mesure de 2021 pour chacune des trois stations :

- De 2 à 3 fois plus importantes qu'à la station de type de trafic
- De 3 à 6 fois plus importantes qu'à la station de fond urbain de Longchamp

Les concentrations en PM₁₀ de la station Castellane ont augmenté de 40 % entre 2010 et 2021. Comme cela a été observé avec la station St-Charles, cette augmentation peut être en partie expliquée par l'augmentation de la plage horaire de fonctionnement du métro après 2010, résultant en une augmentation significative du nombre de passage de métro par jour.

Tableau 19 : Concentrations en PM₁₀ par analyseur automatique des différentes campagnes de mesure dans le métro de Marseille

Concentrations moyennes (µg/m ³)		Années	Dans le métro				En air ambiant	
			Réformés	Castellane	Périer	St-Charles	Rabatau (Trafic)	Longchamp (fond urbain)
PM ₁₀	Période 24h/24h	2021	85	125	123	-	43/45/36 *	27/20/22 *
		2019	-	-	-	94	35	19
		2016	-	-	-	89	38	28
		2010	-	90	-	78	-	26
	Période d'ouverture du métro	2021	96	145	144	-	-	-
		2019	-	-	-	105	-	-
		2016	-	-	-	96	-	-
		2010	-	104	-	93	-	-

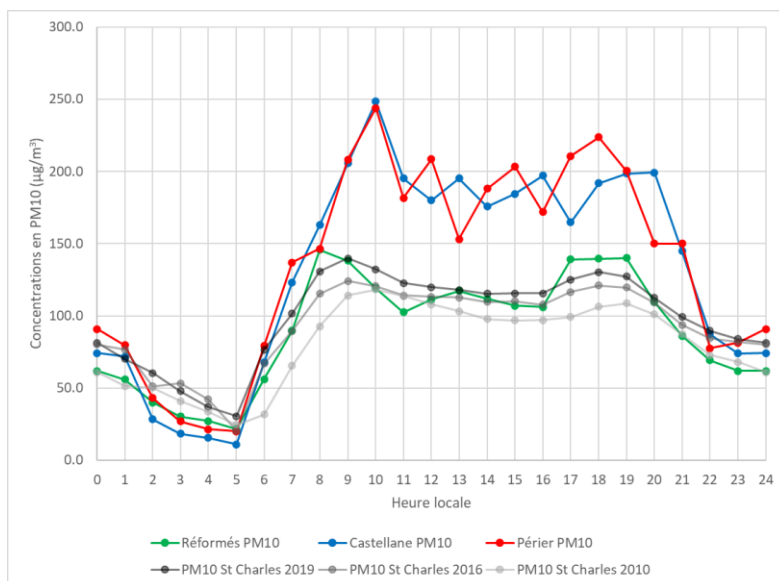
*périodes correspondant dans l'ordre de gauche à droite aux campagnes de mesure aux station Réformés, Castellane et Périer

Quelle que soit la station et l'année, les concentrations intérieures en PM₁₀ sont significativement supérieures à celles des stations d'air ambiant de Marseille sur les mêmes périodes. Les stations Castellane et Périer présentent des concentrations moyennes significativement plus importantes qu'à la station Réformés et qu'à la station St-Charles.

► Comparaison des profils horaires

Les profils horaires en PM₁₀ présentés ci-dessus ont été comparés à ceux obtenus sur les années précédentes sur la station de Saint Charles :

Figure 15 : Comparaison des profils moyens journaliers des campagnes 2010 à 2021 - périodes de jours ouvrés



A la lecture de ce graphique, il apparaît que le profil horaire des jours ouvrés de la station Réformés sur une semaine de mesures est comparable à ceux obtenus sur la station St-Charles (dont celui de 2019, année sur laquelle 6 mois de mesures ont été réalisés), aussi bien en termes d'évolution au cours du temps que de niveaux observés. Il s'avère que les appareils de mesure des campagnes précédentes à la station St-Charles ont toujours été entreposés sur **le quai central** desservant les deux directions de la ligne 1, soit une configuration qui se rapproche de celle de la station Réformés pour cette année.

Les profils d'évolution horaire des concentrations en PM₁₀ sur les stations Castellane et Périer montent ainsi leur spécificité par rapport aux données précédentes de la station St-Charles.

Nb : Le profil horaire de Castellane de 2021 ne peut pas être comparé à celui de 2010 puisque la plage d'ouverture et la fréquence de passage des métros sont complètement différentes.

Les stations Castellane et Périer présentent des concentrations en PM₁₀ supérieures à ce qui a été observé à la station St-Charles lors des précédentes campagnes de mesure avec un profil différent alors que la station Réformés présente un profil similaire en termes de dynamique et de niveaux. La configuration spatiale du quai où sont réalisées les mesures semblent être un facteur influençant les niveaux de particules fines.

► Comparaison aux concentrations dans les enceintes ferroviaires françaises

Le guide de recommandations pour les enceintes ferroviaires souterraines de l'INERIS⁹ fait état de concentrations en PM₁₀ comprises entre 13 à 1 284 µg/m³ au niveau des quais à l'échelle internationale (toutes mesures confondues sur des pas de temps différents). Les études de mesures dans les enceintes ferroviaires souterraines françaises¹⁰ présentent des concentrations moyennes 24/24h en PM₁₀ par analyseur de référence de 23 à 208 µg/m³.

Les concentrations moyennes des 3 stations de mesures de la campagne 2021 sont du même ordre de grandeur que les concentrations moyennes dans les EFS françaises.

Le profil d'évolution des concentrations au cours d'une journée est différent entre la station Réformés, qui présente un profil cohérent avec les trajets domicile travail et des niveaux comparables à ceux obtenus sur les précédentes campagnes (mesures à Saint Charles) et Castellane et Périer, dont les niveaux sont plus importants et sur des créneaux horaires décalés. Cette disparité pourrait être expliquée en partie par la différence de configuration spatiale des quais qui desservent les voies (2 quais à chaque extrémité ou 1 quai central).

7.2 Métaux sur les quais

Pour suivre les recommandations du guide de recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines », les prélèvements de la campagne 2021 ont été réalisés sur une durée et un pas de temps plus courts lors des précédentes campagnes de mesure menées par AtmoSud :

- 2021 : prélèvements journaliers : 14 filtres de 20 heures de prélèvement (du premier au dernier métro), pendant une période de deux semaines,
- 2019 : prélèvements hebdomadaires, toutes les semaines : 27 filtres de 7 jours de prélèvement pour l'ensemble des 27 semaines de la période de 6 mois,
- 2016 : prélèvements hebdomadaires : 12 filtres de 7 jours de prélèvement, répartis sur 6 mois.

Le tableau ci-après présente à titre informatif les résultats obtenus sur ces différentes campagnes pour permettre une comparaison :

Tableau 20 : Concentrations moyennes en métaux des campagnes 2016, 2019 et 2021

Concentrations moyennes (ng/m ³)	Réformés 2021	Castellane 2021	Périer 2021	St-Charles 2019	La Blanche 2019	St Charles 2016	Autres EFS françaises ¹¹ (min - max)
Prélèvement	Journalier	Journalier	Journalier	Hebdo.	Hebdo.	Hebdo.	
As	13,1	22	17	14,3	10,8	16,7	0,4 - 16,7
Cd	0,4	0,24	0,26	0,4	0,3	1,7	0,3 - 3,9
Ni	60	134	111	78	86	91,6	5 - 91,6
Pb	7,4	5,4	5,2	8,4	6,8	7,5	6 - 120
Al	747	1 562	874	763	535	-	235 - 1332
Ca	952	1 513	1 168	1 234	953	1 196	1 196 - 2 854
K	269	243	221	189	144	-	-

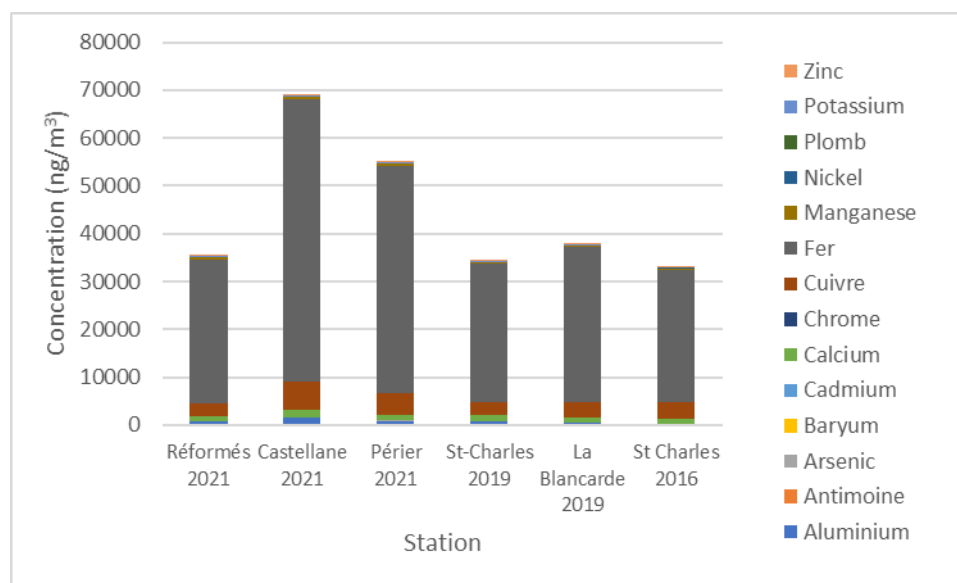
⁹ Guide de recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines – INERIS 2020

¹⁰ Qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines (EFS) en France – AtmoSud 2021

¹¹ Qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines (EFS) en France – AtmoSud 2020

Concentrations moyennes (ng/m ³)	Réformés 2021	Castellane 2021	Périer 2021	St-Charles 2019	La Blancarde 2019	St Charles 2016	Autres EFS françaises ¹¹ (min - max)
Prélèvement	Journalier	Journalier	Journalier	Hebdo.	Hebdo.	Hebdo.	
Ba	9,6	17	13	11,1	9,7	10,1	10,1 - 336
Cr	23	51	61	22,6	25,7	27,5	27,5 - 204
Cu	2 802	5 889	4 468	2 702	3 153	3 475	165 - 5443
Fe	30 125	58 947	47 479	28 891	32 416	27 753	2 296 - 70 678
Mn	293	519	469	262	301	288	25 - 442
Sb	3,9	5,9	4,2	4,7	5,1	-	1 - 336
Zn	63	43,5	56	76	71	116	47,5 - 2 028

Figure 16 : Répartition des concentrations moyennes en métaux des campagnes 2016, 2019 et 2021



Les concentrations en métaux de la station Réformés sur 2 semaines de mesures sont comparables à celles des campagnes précédentes sur St-Charles et la Blancarde sur 6 mois. En revanche, celles obtenues aux stations Castellane et Périer sont globalement supérieures. Au même titre que pour les PM₁₀, l'une des explications possibles des niveaux en métaux plus importants aux stations Castellane et Périer est la configuration spatiale des quais différente de celle des stations Réformés et St-Charles.

La proportion des différents métaux est similaire à celle des années précédentes, avec le Fer (Fe) comme élément trace métallique le plus présent, suivi du cuivre (Cu) et du calcium (Ca).

Lors des précédentes campagnes, la proportion des métaux dans les PM₁₀ est de l'ordre de 35 à 40 %, contre 37 à 48 % pour la campagne de 2021. Parmi les différentes stations échantillonnées lors des différentes campagnes de mesure menées par AtmoSud, c'est la station Castellane qui présente la proportion maximale de métaux dans les PM₁₀ (48 %).

La proportion des métaux les uns par rapport aux autres reste similaire quelle que soit la station et la campagne de mesure, avec le Fer (Fe) comme élément principal. C'est la station Castellane présente la concentration en métaux la plus importante, suivie dans l'ordre par les stations Périer, Blancarde, Réformés et St-Charles.

Les concentrations en métaux de la station Réformés sont comparables à celles des campagnes précédentes sur St-Charles et la Blancarde. Les différences observées avec les stations Castellane et Périer pourraient être expliquées en partie par la configuration spatiale des quais d'accès aux rames différente (centrale ou aux extrémités).

Les concentrations en métaux sont du même ordre de grandeur de celles observées dans les autres enceintes ferroviaires souterraines, sauf pour l'arsenic (As), le nickel (Ni), l'aluminium (Al), le cuivre (Cu) et le manganèse (Mn) où les concentrations sont parmi les plus importantes, notamment à la station Castellane.

7.3 Particules ultrafines sur les quais

► Comparaison aux campagnes précédentes

Les données de granulométrie de la précédente campagne de mesure (2019), présentées en ANNEXE 4 et issues de périodes de mesure beaucoup plus longues aux stations St-Charles et Blancarde, confirment les tendances suivantes :

- Augmentation plus progressive du nombre de particules inférieures à 1 μm au cours de la journée, moins influencée par le passage des rames de métro que les particules plus grossières,
- Les particules les plus nombreuses de la gamme de mesure sont les plus fines (250 à 300 nm),
- Le nombre de particules les plus fines augmente en fin de soirée jusqu'à la fermeture du réseau. Cette augmentation semble être liée à l'impact de l'air extérieur, qui présente également sur la longue période de mesure, une augmentation du nombre de ces particules en soirée.

Nd : Lors de la campagne 2019, des mesures de granulométrie complémentaires, prenant également en compte des particules inférieures à 250 nm (10 nm à 35 μm) ont indiqué que les tailles des particules les plus nombreuses étaient situées autour de 70 nm. Les particules de 10 nm à 250 nm ne semblent pas plus influencées par le passage des rames que les particules de 250 nm à 1 μm .

Les données de granulométrie de la campagne 2021 aux stations Castellane et Périer montrent des résultats similaires à la campagne 2019 aux stations St-Charles et Blancarde : les particules inférieures à 1 μm ont une évolution au cours du temps différente des particules plus grossières, elles sont moins influencées par le passage des rames de métro. Les émissions de particules liées au déplacement du matériel roulant ne semblent pas être prépondérantes pour les tailles de particules inférieures à 1 μm qui semblent essentiellement influencées par la présence des occupants et les concentrations extérieures.

8. Conclusions

Les enceintes ferroviaires souterraines sont des environnements clos dans lesquels sont présents les polluants issus du déplacement du matériel roulant, des occupants et de l'air extérieur. Les trois précédentes campagnes de mesure de 2010, 2016 et 2019 dans le métro Marseillais ont permis de caractériser, sur plusieurs stations et sur une longue période, divers polluants parmi lesquels les particules fines PM_{10} et $PM_{2,5}$, les métaux traces et certains polluants gazeux organiques et inorganiques.

Cette nouvelle étude a pour but de poursuivre la surveillance de la qualité de l'air du métro de Marseille, par la mise en place d'un nouveau protocole de mesure harmonisé à l'échelle nationale. Il consiste à mesurer les particules fines et ultrafines, les métaux et le confinement dans les rames et sur les quais de trois stations, sélectionnées en fonction de leur fréquentation et de leurs niveaux ponctuels de pollution en PM_{10} : Castellane et Périer sur la Ligne 2, et Les Réformés sur la Ligne 1.

► Des concentrations en PM_{10} plus élevées à Castellane et Périer mais qui respectent la valeur guide dans les EFS

Aux trois stations échantillonnées, les concentrations horaires en PM_{10} ont toujours respecté la valeur guide 2020 dans les enceintes ferroviaires pour une heure d'exposition de $602 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les concentrations moyennes sur les heures d'ouverture s'échelonnent de $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station Réformés (ligne 1) à 144 et $145 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aux stations Castellane et Périer (ligne 2). Ces deux dernières présentent des concentrations en PM_{10} supérieures à ce qui a été observé à la station St-Charles lors des précédentes campagnes de mesure.

Le profil d'évolution des concentrations au cours d'une journée est différent entre la station Réformés, qui présente un profil cohérent avec les trajets domicile travail et des niveaux comparables à ceux obtenus sur les précédentes campagnes (mesures à Saint Charles) ; et Castellane et Périer, dont les niveaux sont plus importants et sur des créneaux horaires décalés. L'une des explications possibles de cette disparité pourrait être la différence de configuration spatiale des quais qui desservent les voies et l'emplacement de la station (2 quais à chaque extrémité ou 1 quai central).

► Une proportion de $PM_{2,5}$ dans les PM_{10} d'environ 30 à 40 % sur les quais

Avec des concentrations moyennes en $PM_{2,5}$ sur les quais lors des heures d'ouverture de $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station Réformés (ligne 1), $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Périer et $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Castellane (ligne 2), les $PM_{2,5}$ représentent entre 28 % et 40 % des PM_{10} . L'évolution des concentrations au cours du temps suit celle des PM_{10} .

► Un comportement similaire des particules les plus fines entre les stations.

La mesure granulométrique des particules supérieures à 250 nm montre que les plus nombreuses sont celles situées entre 250 et 300 nm. Le nombre des particules de diamètres entre 250 nm et $1 \mu\text{m}$ ne semble pas en lien avec la fréquence de passage des métros mais il est impacté par les heures d'ouverture du réseau : augmentation des concentrations à l'ouverture, baisse des concentrations à la fermeture. Il semble également influencé par les concentrations extérieures avec un pic de concentration entre 23h et 1h. Ces tendances sont similaires entre les stations échantillonnées de cette campagne et ce qui a été observé aux stations St-Charles et Blancarde lors de la campagne de 2019.

► Des métaux dans les PM_{10} en proportion similaire sur les quais

La proportion des métaux les uns par rapport aux autres reste similaire quelle que soit la station et la campagne de mesure, avec le Fer (Fe) comme élément le plus présent (30 à 40 %) suivi du cuivre (3 %). Les concentrations aux stations Castellane et Périer (ligne 2) présentent des concentrations plus importantes qu'à la station Réformés (ligne 1). Les métaux réglementés dans l'air ambiant montrent des concentrations du même ordre de grandeur que celles des campagnes de 2016 et 2019 à la station St-Charles.

► Un confinement faible sur les quais ou dans les rames

L'évolution des concentrations en CO_2 sur les quais suit les périodes de pointe de fréquentation du métro mais les niveaux observés sont faibles et ne font pas état de problématique de confinement. Il est en de même dans les rames,

avec des concentrations toutefois plus élevées qui peuvent dépasser ponctuellement la valeur recommandée par le Haut Conseil de Santé Publique de 800 ppm, dans le contexte de pandémie à la Covid 19, dans les environnements intérieurs en présence d'occupants masqués.

► **Dans les rames, des concentrations en PM_{10} inférieures à celles des quais mais supérieures en $PM_{2.5}$**

Sur les deux lignes de métro de Marseille, les concentrations en PM_{10} dans les rames sont significativement inférieures à celles sur les quais alors que les concentrations en $PM_{2.5}$ sont légèrement supérieures. La proportion de $PM_{2.5}$ dans les PM_{10} est donc plus importante dans les rames.

► **Les métaux quantifiés dans les rames correspondent aux plus présents sur les quais, mais en moindre quantité**

Les deux seules substances ayant pu être quantifiées dans les rames sont le fer et le cuivre, soit les éléments les plus présents dans les stations. Les niveaux moyens obtenus pour ces deux substances dans les rames sont légèrement inférieurs à ceux des stations concernées.

GLOSSAIRE

Définitions

Lignes directrices OMS : Seuils de concentration définis par l'OMS et basés sur un examen des données scientifiques accumulées. Elles visent à offrir des indications sur la façon de réduire les effets de la pollution de l'air sur la santé. Elles constituent des cibles à atteindre qui confère une protection suffisante en termes de santé publique.

Maximum journalier de la moyenne sur huit heures : Il est sélectionné après examen des moyennes glissantes sur huit heures, calculées à partir des données horaires et actualisées toutes les heures. Chaque moyenne ainsi calculée sur huit heures est attribuée au jour où elle s'achève ; autrement dit, la première période considérée pour le calcul sur un jour donné sera la période comprise entre 17 h la veille et 1 h le jour même ; la dernière période considérée pour un jour donné sera la période comprise entre 16 h et minuit le même jour.

Pollution de fond et niveaux moyens : La pollution de fond correspond à des niveaux de polluants dans l'air durant des périodes de temps relativement longues. Elle s'exprime généralement par des concentrations moyennées sur une année (pour l'ozone, on parle de niveaux moyens exprimés généralement par des moyennes calculées sur huit heures). Il s'agit de niveaux de pollution auxquels la population est exposée le plus longtemps et auxquels il est attribué l'impact sanitaire le plus important.

Pollution de pointe : La pollution de pointe correspond à des niveaux de polluants dans l'air durant des périodes de temps courtes. Elle s'exprime généralement par des concentrations moyennées sur la journée ou l'heure.

Procédures préfectorales : Mesures et actions de recommandations et de réduction des émissions par niveau réglementaire et par grand secteur d'activité.

Seuil d'alerte à la population : Niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine ou la dégradation de l'environnement, justifiant l'intervention de mesures d'urgence.

Seuil d'information-recommandations à la population : Niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine des groupes particulièrement sensibles de la population, rendant nécessaires des informations immédiates et adéquates.

Objectif de qualité : Un niveau de concentration à atteindre à long terme, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement.

Valeur cible : Un niveau de concentration fixé dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine et/ou l'environnement dans son ensemble, à atteindre dans la mesure du possible sur une période donnée.

Valeur limite : Un niveau de concentration fixé sur la base des connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine et/ou l'environnement dans son ensemble, à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser une fois atteint.

Couche limite : Couche atmosphérique en contact direct avec la surface terrestre, dans laquelle se produisent des modifications d'un point de vue dynamique et thermique. Son épaisseur varie d'une centaine de mètres à quelques kilomètres selon les caractéristiques du sol (rugosité, relief...), la saison (humidité, flux de chaleur, température).

Particules d'origine secondaires : Les particules secondaires résultent de la conversion en particules, des gaz présents dans l'atmosphère. Cette conversion, soit directement gaz-solide, soit par l'intermédiaire des gouttes d'eau, est appelée nucléation. La nucléation est le mécanisme de base de la formation des nouvelles particules dans l'atmosphère. Les principaux précurseurs impliqués dans la formation des particules secondaires sont le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO_x et nitrates), les composés organiques volatils (COV) et l'ammoniac (NH₃). Les particules secondaires sont essentiellement des particules fines (<2.5 µm).

AOT 40 : Égal à la somme des différences entre les concentrations horaires d'ozone supérieures à 80 µg/m³ (mesurés quotidiennement entre 8 h et 20 h, heure d'Europe Centrale) et la valeur 80 µg/m³ pour la période du 1^{er} mai au 31 juillet de l'année N. La valeur cible de protection de la végétation est calculée à partir de la moyenne sur 5 ans de l'AOT40. Elle s'applique en dehors des zones urbanisées, sur les Parcs Nationaux, sur les Parcs Naturels Régionaux, sur les réserves Naturelles Nationales et sur les zones arrêtées de Protection de Biotopie.

Percentile 99,8 (P 99,8) : Valeur respectée par 99,8 % des données de la série statistique considérée (ou dépassée par 0,2 % des données). Durant l'année, le percentile 99,8 représente dix-huit heures.

Sigles

AASQA : Association Agréées de Surveillance de la Qualité de l’Air

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

ANTS : Association Nationale des Techniques Sanitaires

ARS : Agence Régionale de Santé

CSA : Carte Stratégique Air

CERC : Cellule Économique Régionale du BTP PACA

DRAAF : Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de la région PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

EPCI : Etablissement Public de Coopération Intercommunale

EQAIR : Réseau Expert Qualité de l’Air intérieur en région PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR

IARC : International Agency for Research on Cancer

ISA : Indice Synthétique Air

LCSQA : Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l’Air

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ORP PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR : Observatoire des résidus de Pesticides en région PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR

PCAET : Plan climat air énergie territorial

PDU : Plan de Déplacements Urbains

PLU : Plan local d’Urbanisme

PPA : Plan de Protection de l’Atmosphère

PRSA : Plan Régional de Surveillance de la qualité de l’Air

SCoT : Schéma de Cohérence Territoriale

ZAS : Zone Administrative de Surveillance

Unité de mesures

mg/m³ : milligramme par mètre cube d’air
(1 mg = 10⁻³ g = 0,001 g)

µg/m³ : microgramme par mètre cube d’air
(1 µg = 10⁻⁶ g = 0,000001 g)

ng/m³ : nanogramme par mètre cube d’air
(1 ng = 10⁻⁹ g = 0,000000001 g)

TU : Temps Universel

Polluants

As : Arsenic

B(a)P : Benzo(a)Pyrène

BTEX : Benzène - Toluène - Éthylbenzène - Xylènes

C₆H₆ : Benzène

Cd : Cadmium

CO : Monoxyde de carbone

CO₂ : Dioxyde de carbone

COV : Composés Organiques Volatils

COVNM : Composés Organiques Volatils Non Méthaniques

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

ML : Métaux lourds (Ni, Cd, Pb, As)

Ni : Nickel

NO / NO₂ : Monoxyde d’azote / Dioxyde d’azote

NO_x : Oxydes d’azote

O₃ : Ozone

Pb : Plomb

PM non volatile : Fraction des particules en suspension présente dans l’air ambiant qui ne s’évapore pas à 50°C.

PM volatile : Fraction des particules en suspension qui s’évaporent entre 30°C et 50°C. Cette fraction des particules est mesurée depuis 2007.

PM 10 : Particules d’un diamètre < 10 µm

PM 2.5 : Particules d’un diamètre < 2,5 µm

SO₂ : Dioxyde de soufre

Classification des sites de mesure

Cette classification a fait l'objet d'une mise à jour au niveau national en 2015. Les stations de mesures sont désormais classées selon 2 paramètres : leur environnement d'implantation et l'influence des sources d'émission.

Environnement d'implantation

- **Implantation urbaine** : Elle correspond à un emplacement dans une zone urbaine bâtie en continu, c'est-à-dire une zone urbaine dans laquelle les fronts de rue sont complètement (ou très majoritairement) constitués de constructions d'au minimum deux étages
- **Implantation périurbaine** : Elle correspond à un emplacement dans une zone urbaine majoritairement bâtie, constituée d'un tissu continu de constructions isolées de toutes tailles, avec une densité de construction moindre
- **Implantation rurale** : Elle est principalement destinée aux stations participant à la surveillance de l'exposition de la population et des écosystèmes à la pollution atmosphérique de fond, notamment photochimique.

Influence des sources

- **Influence industrielle** : Le point de prélèvement est situé à proximité d'une source (ou d'une zone) industrielle. Les émissions de cette source ont une influence significative sur les concentrations.
- **Influence trafic** : Le point de prélèvement est situé à proximité d'un axe routier majeur. Les émissions du trafic ont une influence significative sur les concentrations.
- **Influence de fond** : Le point de prélèvement n'est soumis à aucun des deux types d'influence décrits ci-après. L'implantation est telle que les niveaux de pollution sont représentatifs de l'exposition moyenne de la population (ou de la végétation et des écosystèmes) en général au sein de la zone surveillée. Généralement, la station est représentative d'une vaste zone d'au moins plusieurs km².

ANNEXE 1 Hiérarchisation des quais (données de la RTM)

Matériel de mesure utilisé :

Le matériel de mesure utilisé par la RTM pour la hiérarchisation des quais selon les concentrations en polluants est le suivant :

- Pour les PM10 : Dust Track DRX
- Pour le CO₂ : QTrack avec sonde 982

Du fait du COVID la fréquence de passage des rames a été modifiée à partir de Mars 2020, une seule série de mesure ayant pu être réalisée auparavant la hiérarchisation est faite en utilisant des mesures effectuées dans les années précédentes.

Caractéristiques des quais

Ligne	Station	Année	Profondeur	Volume	Portes Palières	Type de ventilation	Correspondance	sources extérieures identifiées	nombre de voies à quai	Fréq. Moy . Journalière
M1	Chartreux	1977	19	4250	Non	Naturelle			2	7378
M1	Cinq Avenues	1977	25	7860	Non	Naturelle			2	6552
M1	Réformés	1977	15	5500	Non	Naturelle			2	8966
M1	Saint Charles	1977	27	6600	Non	Naturelle	Ligne M2 dans le même volume	Gare SNCF, parking	4	32171
M1	Colbert	1978	20	5400	Non	Naturelle			2	4118
M1	Vieux port	1978	17	4800	Non	Naturelle			2	23787
M1	Estrangin	1978	21	3200	Non	Naturelle			2	10353
M1	Castellane M1	1978	12	4300	Non	Naturelle	Ligne M2 à un niveau différent	Carrefour routier, parking	2	30275
M1	Baille	1986	12	3400	Non	Naturelle			2	6730
M1	Timone	1986	18	2900	Non	Naturelle			2	14132
M1	Blancarde	2010	21	9900	Non	Naturelle			2	6595
M1	Louis Armand	2010	10	8568	Non	Naturelle			2	2163
M1	Saint Barnabé	2010	18	6750	Non	Naturelle			2	3148
M1	Fourragère	2010	16	9700	Non	Naturelle			2	6205

Ligne	Station	Année	Profondeur	Volume	Portes Palières	Type de ventilation	Correspondance	sources extérieures identifiées	nombre de voies à quai	Fréq. Moy . Journalière
M2	National	1987	13	2700	Non	Naturelle			2	7182
M2	Désirée Clary	1987	18	2950	Non	Naturelle			2	6400
M2	Joliette	1984	14	4424	Non	Naturelle			2	14355
M2	Jules Guesde	1984	13	4241	Non	Naturelle			2	4638
M2	Saint Charles M2	1984	27	6600	Non	Naturelle	Ligne M1 dans le même volume	Gare SNCF	4	32171
M2	Noailles	1984	15	4080	Non	Naturelle	Ligne T1 à un niveau différent		2	20846
M2	Notre Dame du Mont	1984	25	5880	Non	Naturelle			2	8151
M2	Castellane M2	1984	17	5810	Non	Naturelle	Ligne M1 à un niveau différent	Parking souterrain carrefour routier	2	30275
M2	Périer	1986	13	3600	Non	Naturelle			2	9773
M2	Rond Point Prado	1986	10	4060	Non	Naturelle		Carrefour routier	2	29360

Ligne	Station	Année	Profondeur	Volume	Portes Palières	Type de ventilation	Correspondance	sources extérieures identifiées	nombre de voies à quai	Fréq. Moy . Journalière
T1	Noailles	1984	5	2566	Non	Naturelle	Ligne M2 à un niveau différent		2	3 300

Matériel roulant

Ligne	Type de matériel roulant	Modèle	Matériel roulant compartimenté	Matériel climatisé	Nombre de niveau de la rame	Poids maximum du matériel avec voyageurs	Energie motrice utilisée	Roulement	Système de freinage	matériau de freinage
T1	Tramway	Flexity outlook	non	oui	1	81,2	Caténaire	fer	électrique + disque	
M1	Métro	MPM76	oui	non	1	155,96	Rail	pneu	électrique+friction	bois
M2	Métro	MPM76	oui	non	1	155,96	Rail	pneu	électrique+friction	bois

Mesures sur les quais de la ligne M1

Ligne	Station	Localisation du système de prélèvement	Hauteur du prélèvement	Date	Heure	PM10 (µg/m3)	CO2 (ppm)	Température (°C)	HR (%)	Moyenne PM10
M1	Chartreux	Milieu du quai	1m 50	20-mars	15h46-16h01	40	443	(-)	(-)	
M1	Chartreux	Milieu du quai	1m 50	27-mars	16h25-16h40	42	464	(-)	(-)	
M1	Chartreux	Milieu du quai	1m 50	3-avr.	8h44-8h59	60	568	(-)	(-)	
M1	Chartreux	Milieu du quai	1m 50	3-févr.	17h00-17h15	36	(-)	(-)	(-)	44,5
M1	Cinq Avenues	Milieu du quai	1m 50	20-mars	16h04-16h19	51	459	(-)	(-)	
M1	Cinq Avenues	Milieu du quai	1m 50	27-mars	16h42-16h57	50	491	(-)	(-)	
M1	Cinq Avenues	Milieu du quai	1m 50	06-avr	8h41-8h56	57	526	(-)	(-)	
M1	Cinq Avenues	Milieu du quai	1m 50	3-févr.	17h17-17h32	51	(-)	(-)	(-)	52,25
M1	Réformés	Milieu du quai	1m 50	20-mars	16h24-16h39	57	484	(-)	(-)	
M1	Réformés	Milieu du quai	1m 50	27-mars	17h01-17h16	44	524	(-)	(-)	
M1	Réformés	Milieu du quai	1m 50	6-avr.	8h22-8h37	57	528	(-)	(-)	
M1	Réformés	Milieu du quai	1m 50	3-févr.	17h35-17h50	53	(-)	(-)	(-)	52,75
M1	Saint Charles	Milieu du quai	1m 50	20-mars	16h44-16h59	48	489	(-)	(-)	
M1	Saint Charles	Milieu du quai	1m 50	27-mars	17h18-17h35	44	548	(-)	(-)	
M1	Saint Charles	Milieu du quai	1m 50	05-avr	8h45-9h00	49	526	(-)	(-)	
M1	Saint Charles	Milieu du quai	1m 50	3-févr.	17h51-18h06	52	(-)	(-)	(-)	48,25
M1	Colbert	Milieu du quai	1m 50	20-mars	17h04-17h19	42	486	(-)	(-)	
M1	Colbert	Milieu du quai	1m 50	27-mars	17h18-17h35	44	548	(-)	(-)	
M1	Colbert	Milieu du quai	1m 50	05-avr	8h28-8h43	39	481	(-)	(-)	
M1	Colbert	Milieu du quai	1m 50	03-févr	18h08-18h23	41	(-)	(-)	(-)	41,5
M1	Vieux-Port	Milieu du quai	1m 50	20-mars	17h22-17h37	47	516	(-)	(-)	
M1	Vieux-Port	Milieu du quai	1m 50	27-mars	17h58-18h13	40	532	(-)	(-)	
M1	Vieux-Port	Milieu du quai	1m 50	05-avr	8h07-8h22	40	475	(-)	(-)	
M1	Vieux-Port	Milieu du quai	1m 50	3-févr.	18h26-18h41	45	(-)	(-)	(-)	43
M1	Estrangin	Milieu du quai	1m 50	20-mars	17h40-17h55	51	543	(-)	(-)	
M1	Estrangin	Milieu du quai	1m 50	28-mars	16h21-16h36	44	473	(-)	(-)	
M1	Estrangin	Milieu du quai	1m 50	5-avr.	7h48-8h03	55	491	(-)	(-)	
M1	Estrangin	Milieu du quai	1m 50	3-févr.	18h45-19h00	50	(-)	(-)	(-)	50
M1	Castellane	Milieu du quai	1m 50	20-mars	17h58-18h13	43	573	(-)	(-)	
M1	Castellane	Milieu du quai	1m 50	28-mars	16h40-16h55	41	537	(-)	(-)	
M1	Castellane	Milieu du quai	1m 50	05-avr	7h31-7h46	44	553	(-)	(-)	
M1	Castellane	Milieu du quai	1m 50	5-févr.	17h22-17h39	35	609	21,4	36,9	40,75
M1	Baille	Milieu du quai	1m 50	20-mars	18h15-18h30	54	623	(-)	(-)	
M1	Baille	Milieu du quai	1m 50	28-mars	17h00-17h15	47	564	(-)	(-)	
M1	Baille	Milieu du quai	1m 50	4-avr.	8h51-9h06	70	648	(-)	(-)	
M1	Baille	Milieu du quai	1m 50	5-févr.	17h42-17h57	39	581	23,1	36,6	52,5
M1	Timone	Milieu du quai	1m 50	21-mars	16h35-16h50	24	458	(-)	(-)	
M1	Timone	Milieu du quai	1m 50	28-mars	17h17-17h34	51	538	(-)	(-)	
M1	Timone	Milieu du quai	1m 50	04-avr	8h32-8h47	55	573	(-)	(-)	
M1	Timone	Milieu du quai	1m 50	5-févr.	18h02-18h09	29	497	20,5	34,4	39,75
M1	Blancarde	Milieu du quai	1m 50	21-mars	16h55-17h10	26	482	(-)	(-)	
M1	Blancarde	Milieu du quai	1m 50	28-mars	17h37-17h52	49	540	(-)	(-)	
M1	Blancarde	Milieu du quai	1m 50	04-avr	8h15-8h30	51	559	(-)	(-)	
M1	Blancarde	Milieu du quai	1m 50	4-févr.	17h57-17h12	21	449	20,1	26,4	36,75
M1	Louis Armand	Milieu du quai	1m 50	21-mars	17h14-17h29	33	472	(-)	(-)	
M1	Louis Armand	Milieu du quai	1m 50	28-mars	17h55-18h10	63	520	(-)	(-)	
M1	Louis Armand	Milieu du quai	1m 50	04-avr	7h54-8h09	57	530	(-)	(-)	
M1	Louis Armand	Milieu du quai	1m 50	4-févr.	17h38-17h53	33	469	23	25	46,5
M1	Saint Barnabé	Milieu du quai	1m 50	21-mars	17h32-17h47	40	484	(-)	(-)	
M1	Saint Barnabé	Milieu du quai	1m 50	31-mars	17h09-17h24	61	494	(-)	(-)	
M1	Saint Barnabé	Milieu du quai	1m 50	04-avr	7h37-7h52	61	523	(-)	(-)	
M1	Saint Barnabé	Milieu du quai	1m 50	4-févr.	17h18-17h33	38	462	24,1	24	50
M1	Fourragère	Milieu du quai	1m 50	21-mars	17h51-18h06	17	489	(-)	(-)	
M1	Fourragère	Milieu du quai	1m 50	31-mars	17h28-17h43	19	462	(-)	(-)	
M1	Fourragère	Milieu du quai	1m 50	04-avr	7h15-7h30	45	542	(-)	(-)	
M1	Fourragère	Milieu du quai	1m 50	4-févr.	17h01-17h16	29	482	24,5	24,9	27,5

Mesures sur les quais de la ligne M2

Ligne	Station	Localisation du système de prélèvement	Hauteur du prélèvement	Date	Heure	PM10 (µg/m3)	CO2 (ppm)	Température (°C)	HR (%)	Moyenne PM10
M2	National	Milieu du quai	1m 50	22-mars	16h40-16h55	32	452	(-)	(-)	
M2	National	Milieu du quai	1m 50	29-mars	16h41-16h46	49	429	(-)	(-)	
M2	National	Milieu du quai	1m 50	27-avr.	8h04-8h18	40	469	(-)	(-)	
M2	National	Milieu du quai	1m 50	6-févr.	17h02-17h17	38	496	19,8	35,6	39,75
M2	Désirée Clary	Milieu du quai	1m 50	22-mars	17h-17h15	31	494	(-)	(-)	
M2	Désirée Clary	Milieu du quai	1m 50	29-mars	16h58-17h13	55	507	(-)	(-)	
M2	Désirée Clary	Milieu du quai	1m 50	27-avr.	7h43-7h58	32	473	(-)	(-)	
M2	Désirée Clary	Milieu du quai	1m 50	6-févr.	17h19-17h34	39	509	20,5	34,7	39,25
M2	Joliette	Milieu du quai	1m 50	22-mars	17h21-17h36	50	621	(-)	(-)	
M2	Joliette	Milieu du quai	1m 50	29-mars	16h17-17h32	62	542	(-)	(-)	
M2	Joliette	Milieu du quai	1m 50	27-avr.	8h26-8h41	39	564	(-)	(-)	
M2	Joliette	Milieu du quai	1m 50	6-févr.	17h36-17h51	73	653	21,7	39,6	56
M2	Jules Guesde	Milieu du quai	1m 50	22-mars	17h40-17h55	36	531	(-)	(-)	
M2	Jules Guesde	Milieu du quai	1m 50	29-mars	17h36-17h51	55	523	(-)	(-)	
M2	Jules Guesde	Milieu du quai	1m 50	26-avr.	8h09-8h24	44	472	(-)	(-)	
M2	Jules Guesde	Pas de mesure effectuée la station étant fermée pendant la campagne								45
M2	Saint Charles	Milieu du quai	1m 50	23-mars	8h25-8h40	46	531	(-)	(-)	
M2	Saint Charles	Milieu du quai	1m 50	29-mars	17h58-18h13	51	540	(-)	(-)	
M2	Saint Charles	Milieu du quai	1m 50	26-avr.	7h50-8h05	45	496	(-)	(-)	
M2	Saint Charles	Milieu du quai	1m 50	06-févr.	17h55-18h10	51	536	21,5	39,3	48,25
M2	Noailles	Milieu du quai	1m 50	22-mars	8h21-8h36	51	549	(-)	(-)	
M2	Noailles	Milieu du quai	1m 50	30-mars	16h32-16h47	39	535	(-)	(-)	
M2	Noailles	Milieu du quai	1m 50	26-avr.	7h30-7h45	51	466	(-)	(-)	
M2	Noailles	Milieu du quai	1m 50	12-févr.	17h00-17h15	47	493	19,7	35,4	47
M2	ND du Mont	Milieu du quai	1m 50	21-mars	8h33-8h48	58	601	(-)	(-)	
M2	ND du Mont	Milieu du quai	1m 50	30-mars	16h51-17h06	45	531	(-)	(-)	
M2	ND du Mont	Milieu du quai	1m 50	25-avr.	8h25-8h44	56	558	(-)	(-)	
M2	ND du Mont	Milieu du quai	1m 50	12-févr.	17h19-17h34	44	509	20,5	34,7	50,75
M2	Castellane	Milieu du quai	1m 50	21-mars	8h15-8h30	68	722	(-)	(-)	
M2	Castellane	Milieu du quai	1m 50	30-mars	17h14-17h31	42	702	(-)	(-)	
M2	Castellane	Milieu du quai	1m 50	25-avr.	8h03-8h18	55	584	(-)	(-)	
M2	Castellane	Milieu du quai	1m 50	5-févr.	17h04-17h19	49	620	22	34,4	53,5
M2	Périer	Milieu du quai	1m 50	23-mars	16h48-17h03	54	494	(-)	(-)	
M2	Périer	Milieu du quai	1m 50	30-mars	17h37-17h52	60	634	(-)	(-)	
M2	Périer	Milieu du quai	1m 50	25-avr.	7h44-7h59	54	489	(-)	(-)	
M2	Périer	Milieu du quai	1m 50	12-févr.	17h39-17h54	61	689	21,7	38,9	57,25
M2	RP du Prado	Milieu du quai	1m 50	23-mars	16h30-16h46	31	459	(-)	(-)	
M2	RP du Prado	Milieu du quai	1m 50	30-mars	18h00-18h15	35	563	(-)	(-)	
M2	RP du Prado	Milieu du quai	1m 50	25-avr.	7h26-7h41	44	519	(-)	(-)	
M2	RP du Prado	Milieu du quai	1m 50	12-févr.	18h01-18h16	25	538	19,7	(-)	33,75

Mesure sur le quai de la ligne de tram T1

Ligne	Station	Année	Profondeur	Volume	Portes Palières	Type de ventilation	Correspondance	sources extérieures identifiées	nombre de voies à quai	Fréq. Moy. Journalière
T1	Noailles	1984	5		Non	Naturelle	Ligne M2 à un niveau différent		2	3 300

Sélection des stations à investiguer

La station la plus fréquentée est la station Saint Charles. Toutefois, en raison de travaux de mise en accessibilité, il n'est pas possible d'instrumenter les quais. Elle est remplacée par la station **Castellane** qui est la deuxième station la plus fréquentée.

Les deux autres stations sélectionnées sont les stations où les moyennes de PM10 sont les plus élevées de la ligne M1 et de la ligne M2, respectivement **Réformés** et **Périer**.

ANNEXE 2 Base de données des mesures de particules fines et CO₂ sur les quais des 3 stations de l'étude

Station Réformés

Tableau 21 : Statistiques de mesure sur la totalité de la campagne de mesure à la station Réformés

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)	Température (°C)	Humidité relative (%)
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	168	168	2016	2016	2016
	Taux de couverture	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	24	85	482	18	46
	Médiane	23	86	475	18	44
	Percentile 10	7	33	441	16	37
	Percentile 90	43	135	530	20	58
	Minimum	1	13	400	13	24
	Maximum	55	173	614	20	68
Période d'ouverture du métro (5h – 1h)	Nombre de valeurs	140	140	1680	1680	1680
	Taux de couverture	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	27	96	487	18	46
	Médiane	27	97	485	18	44
	Percentile 10	13	49	445	16	36
	Percentile 90	46	145	534	20	59
	Minimum	5	39	400	13	24
	Maximum	55	173	614	20	68

Tableau 22 : Statistiques de mesure sur les jours de semaine à la station Réformés

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)	Température (°C)	Humidité relative (%)
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	120	120	1440	1440	1440
	Taux de couverture	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	27	91	486	18	48
	Médiane	28	97	483	18	47
	Percentile 10	6	33	442	16	37
	Percentile 90	47	145	536	20	59
	Minimum	1	13	400	13	32
	Maximum	55	173	614	20	68
Période d'ouverture du métro (5h – 1h)	Nombre de valeurs	100	100	1200	1200	1200
	Taux de couverture	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	30	103	493	18	48
	Médiane	29	107	493	18	46
	Percentile 10	13	48	448	16	37
	Percentile 90	47	150	538	20	60
	Minimum	5	39	13	32	400
	Maximum	55	173	20	68	614

Tableau 23 : Statistiques de mesure sur les jours de week-end à la station Réformés

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)	Température (°C)	Humidité relative (%)
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	48	48	576	576	576
	Taux de couverture	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	18	71	471	17	41
	Médiane	16	64	465	17	40
	Percentile 10	9	37	440	16	35
	Percentile 90	31	120	515	19	49
	Minimum	3	13	414	15	24
	Maximum	35	128	552	20	53
Période d'ouverture du métro (5h – 1h)	Nombre de valeurs	40	40	480	480	480
	Taux de couverture	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	20	79	474	17	41
	Médiane	17	72	468	17	40
	Percentile 10	12	49	441	16	34
	Percentile 90	31	121	519	19	48
	Minimum	8	43	418	15	24
	Maximum	35	128	552	20	53

Tableau 24 : Statistiques de mesure sur les heures de pointes à la station Réformés

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)	Température (°C)	Humidité relative (%)
Heures de pointes (7h à 9h – 18 à 19h)	Nombre de valeurs	20	20	240	240	240
	Taux de couverture	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	41	141	521	19	49
	Médiane	41	145	520	19	48
	Percentile 10	32	122	482	17	38
	Percentile 90	49	162	557	20	61
	Minimum	23	117	443	16	33
	Maximum	52	172	614	20	65

Station Castellane

Tableau 25 : Statistiques de mesure sur la totalité de la campagne de mesure à la station Castellane

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)	Température (°C)	Humidité relative (%)
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	168	168	2016	2016	2016
	Taux de couverture de la période prévue	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	50	125	497	21	45
	Médiane	50	123	484	21	47
	Percentile 10	14	24	444	19	32
	Percentile 90	85	212	567	22	53
	Minimum	4	5	399	18	23
	Maximum	156	269	730	23	57
Période d'ouverture du métro (5h – 1h)	Nombre de valeurs	140	140	1680	1680	1680
	Taux de couverture de la période prévue	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	57	145	506	21	45
	Médiane	58	145	500	21	47
	Percentile 10	27	69	450	19	32
	Percentile 90	89	217	572	22	53
	Minimum	12	46	414	18	23
	Maximum	156	269	730	23	57

Tableau 26 : Statistiques de mesure sur les jours de semaine à la station Castellane

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)	Température (°C)	Humidité relative (%)
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	120	120	1440	1440	1440
	Taux de couverture de la période prévue	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	55	134	507	21	46
	Médiane	59	148	501	21	48
	Percentile 10	15	18	447	19	34
	Percentile 90	89	225	575	22	53
	Minimum	4	5	399	18	27
	Maximum	156	269	730	23	57
Période d'ouverture du métro (5h – 1h)	Nombre de valeurs	100	100	1200	1200	1200
	Taux de couverture de la période prévue	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	63	157	517	21	46
	Médiane	64	166	517	21	49
	Percentile 10	31	73	453	20	35
	Percentile 90	91	230	579	22	53
	Minimum	12	46	418	18	27
	Maximum	156	269	730	23	57

Tableau 27 : Statistiques de mesure sur les jours de week-end à la station Castellane

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)	Température (°C)	Humidité relative (%)
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	48	48	576	576	576
	Taux de couverture de la période prévue	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	36	101	474	20	42
	Médiane	32	104	467	21	45
	Percentile 10	10	42	438	19	27
	Percentile 90	59	168	525	22	51
	Minimum	4	22	414	18	23
	Maximum	65	206	583	23	56
Période d'ouverture du métro (5h – 1h)	Nombre de valeurs	40	40	480	480	480
	Taux de couverture de la période prévue	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	41	114	479	20	42
	Médiane	40	113	471	21	45
	Percentile 10	22	67	444	19	26
	Percentile 90	60	173	530	22	51
	Minimum	13	49	414	18	23
	Maximum	65	206	583	23	56

Tableau 28 : Statistiques de mesure les heures de pointes à la station Castellane

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)	Température (°C)	Humidité relative (%)
Heures de pointes (7h à 9h – 18 à 19h)	Nombre de valeurs	20	20	240	240	240
	Taux de couverture de la période prévue	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	71	190	564	20	47
	Médiane	75	192	563	21	49
	Percentile 10	54	141	517	19	35
	Percentile 90	86	236	608	22	54
	Minimum	44	136	467	18	29
	Maximum	98	258	726	23	57

Station Périer

Tableau 29 : Statistiques de mesure sur la totalité de la campagne de mesure à la station Périer

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)	Température (°C)	Humidité relative (%)
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	167	168	2016	2016	2016
	Taux de couverture de la période prévue	99.40%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	37	123	488	20	39
	Médiane	36	127	479	20	38
	Percentile 10	9	24	439	19	31
	Percentile 90	70	218	549	21	49
	Minimum	2	6	407	18	25
	Maximum	91	282	644	22	59
Période d'ouverture du métro (5h – 1h)	Nombre de valeurs	139	140	1680	1680	1680
	Taux de couverture de la période prévue	99.29%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	43	144	496	20	39
	Médiane	42	148	491	21	39
	Percentile 10	19	67	446	19	31
	Percentile 90	71	221	554	21	49
	Minimum	7	47	410	18	25
	Maximum	91	282	644	22	59

Tableau 30 : Statistiques de mesure sur les jours de semaine à la station Périer

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)	Température (°C)	Humidité relative (%)
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	119	120	1440	1440	1440
	Taux de couverture de la période prévue	99.17%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	38	137	494	20	40
	Médiane	40	150	488	20	39
	Percentile 10	6	27	439	19	32
	Percentile 90	70	227	556	21	50
	Minimum	2	12	407	18	25
	Maximum	91	282	644	22	59
Période d'ouverture du métro (5h – 1h)	Nombre de valeurs	100	100	1200	1200	1200
	Taux de couverture de la période prévue	99.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	44	159	502	20	40
	Médiane	44	169	502	21	39
	Percentile 10	17	76	447	19	33
	Percentile 90	71	227	563	21	50
	Minimum	7	51	410	18	25
	Maximum	91	282	644	22	59

Tableau 31 : Statistiques de mesure sur les jours de week-end à la station Périer

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)	Température (°C)	Humidité relative (%)
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	48	48	576	576	576
	Taux de couverture de la période prévue	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	35	88	476	20	37
	Médiane	30	82	469	20	37
	Percentile 10	17	9	438	19	30
	Percentile 90	54	158	525	21	46
	Minimum	10	6	413	19	26
	Maximum	75	185	620	22	52
Période d'ouverture du métro (5h – 1h)	Nombre de valeurs	40	40	480	480	480
	Taux de couverture de la période prévue	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	39	104	480	20	37
	Médiane	36	92	473	20	35
	Percentile 10	24	58	443	19	30
	Percentile 90	57	162	530	21	46
	Minimum	17	47	413	19	26
	Maximum	75	185	620	22	52

Tableau 32 : Statistiques de mesure les heures de pointes à la station Périer

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)	Température (°C)	Humidité relative (%)
Heures de pointes (7h à 9h – 18 à 19h)	Nombre de valeurs	20	20	240	240	240
	Taux de couverture de la période prévue	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	Moyenne	56	195	542	20	42
	Médiane	52	204	542	20	41
	Percentile 10	39	140	497	19	34
	Percentile 90	80	227	586	21	50
	Minimum	21	132	453	18	32
	Maximum	89	233	644	22	57

ANNEXE 3 Base de données des mesures de métaux sur les quais des 3 stations de l'étude

Tableau 33 : Concentrations de PM₁₀ (par prélèvement) et de métaux à la station

Paramètre	Métaux réglementés en air ambiant				Usure des quais/contribution extérieure		
	As (ng/m ³)	Cd (ng/m ³)	Ni (ng/m ³)	Pb (ng/m ³)	Al (ng/m ³)	Ca (ng/m ³)	K (ng/m ³)
Nombre de valeurs	14	14	14	14	14	14	14
Moyenne	13.1	0.4	60	7.4	747	952	269
Médiane	14.1	0.2	65	6.7	810	863	250
P10 - P90	6.9 - 16.2	0.2 - 0.5	34 - 73	3.6 - 11.3	423 - 961	515 - 1706	143 - 423
(Min - Max)	4.4 - 17.3	0.2 - 1.7	23 - 77	2.7 - 14.7	290 - 987	218 - 1722	120 - 570
Paramètre	Abrasion des pièces métalliques du matériel roulant						
	Ba (ng/m ³)	Cr (ng/m ³)	Cu (ng/m ³)	Fe (ng/m ³)	Mn (ng/m ³)	Sb (ng/m ³)	Zn (ng/m ³)
Nombre de valeurs	14	14	14	14	14	14	14
Moyenne	9.6	23	2 802	30 125	293	3.9	63
Médiane	5.4	24	3 040	32 222	319	3.8	44
P10 - P90	5.4 - 17.6	15 - 28	1 555 - 3 424	16 865 - 36 478	163 - 358	2.9 - 5.4	44 - 135
(Min - Max)	5.4 - 23.2	9 - 29	1 047 - 3 578	10 869 - 38 189	103 - 378	1.4 - 7.3	44 - 140

Tableau 34 : Concentrations de PM₁₀ (par prélèvement) et de métaux à la station Castellane

Paramètre	Métaux réglementés en air ambiant				Usure des quais/contribution extérieure		
	As (ng/m ³)	Cd (ng/m ³)	Ni (ng/m ³)	Pb (ng/m ³)	Al (ng/m ³)	Ca (ng/m ³)	K (ng/m ³)
Nombre de valeurs	14	14	14	14	14	14	14
Moyenne	22	0.24	134	5.4	1562	1 513	243
Médiane	24	0.22	140	5.5	1541	1 396	220
P10 - P90	16 - 26	0.22 - 0.22	101 - 158	3.6 - 6.6	999 - 1 927	756 - 2 110	143 - 271
(Min - Max)	14 - 28	0.22 - 0.52	92 - 175	2.9 - 7.2	771 - 3 017	640 - 3 127	130 - 710
Paramètre	Abrasion des pièces métalliques du matériel roulant						
	Ba (ng/m ³)	Cr (ng/m ³)	Cu (ng/m ³)	Fe (ng/m ³)	Mn (ng/m ³)	Sb (ng/m ³)	Zn (ng/m ³)
Nombre de valeurs	14	14	14	14	14	14	14
Moyenne	17	51	5 889	58 947	519	5.9	43.5
Médiane	17	52	6 103	63 317	554	6	43.5
P10 - P90	5 - 28	39 - 62	4 376 - 6 980	41 876 - 68 923	380 - 603	3.9 - 7.7	43.5 - 43.5
(Min - Max)	5 - 36	31 - 67	4 116 - 7 621	38 248 - 70 709	329 - 626	3.5 - 7.9	43.5 - 43.5

Tableau 35 : Concentrations de PM₁₀ (par prélèvement) et de métaux à la station Périer

Paramètre	Métaux réglementés en air ambiant				Usure des quais/contribution extérieure		
	As (ng/m ³)	Cd (ng/m ³)	Ni (ng/m ³)	Pb (ng/m ³)	Al (ng/m ³)	Ca (ng/m ³)	K (ng/m ³)
Nombre de valeurs	14	14	14	14	14	14	14
Moyenne	17	0.26	111	5.2	874	1 168	221
Médiane	18	0.22	116	4.9	867	1 179	190
P10 - P90	11-23	0.22-0.37	67 - 142	3.2 - 7.2	562 - 1 147	686 - 1 754	160 - 337
(Min - Max)	9-24	0.22-0.57	57 - 151	3 - 10.7	485 - 1 210	615 - 1 785	160 - 370
Paramètre	Abrasion des pièces métalliques du matériel roulant						
	Ba (ng/m ³)	Cr (ng/m ³)	Cu (ng/m ³)	Fe (ng/m ³)	Mn (ng/m ³)	Sb (ng/m ³)	Zn (ng/m ³)
Nombre de valeurs	14	14	14	14	14	14	14
Moyenne	13	61	4 468	47 479	469	4.2	56
Médiane	13	65	4 614	48 917	488	4.1	44
P10 - P90	5-24	36-79	2 937 - 5 591	31 182 - 59 108	310 - 581	2.7 - 5.8	44 - 97
(Min - Max)	5-32	32-80	2 447 - 5 862	25 383 - 61 460	253 - 619	2.1 - 8.3	44 - 138

ANNEXE 4 Granulométrie des stations St-Charles et Blancarde de la campagne de mesure 2019

Figure 17 : Répartition du nombre de particules/cm³ des fractions de 250 nm à 1 µm - station St-Charles – campagne 2019

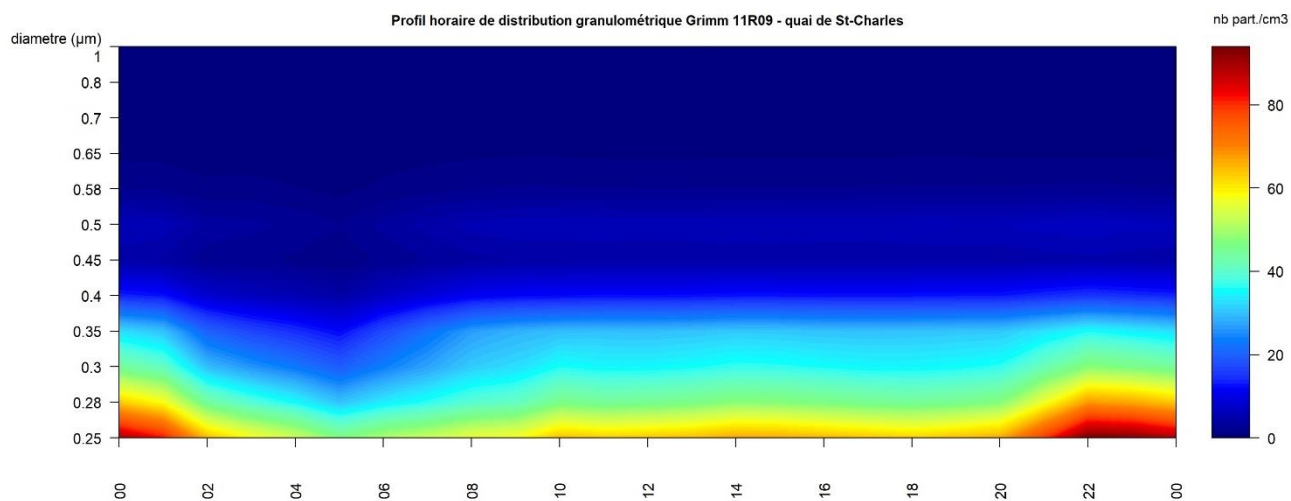


Figure 18 : Profil moyen journalier du nombre de particules/litre des fractions de 250 nm à 1 µm - station Blancarde - campagne 2019

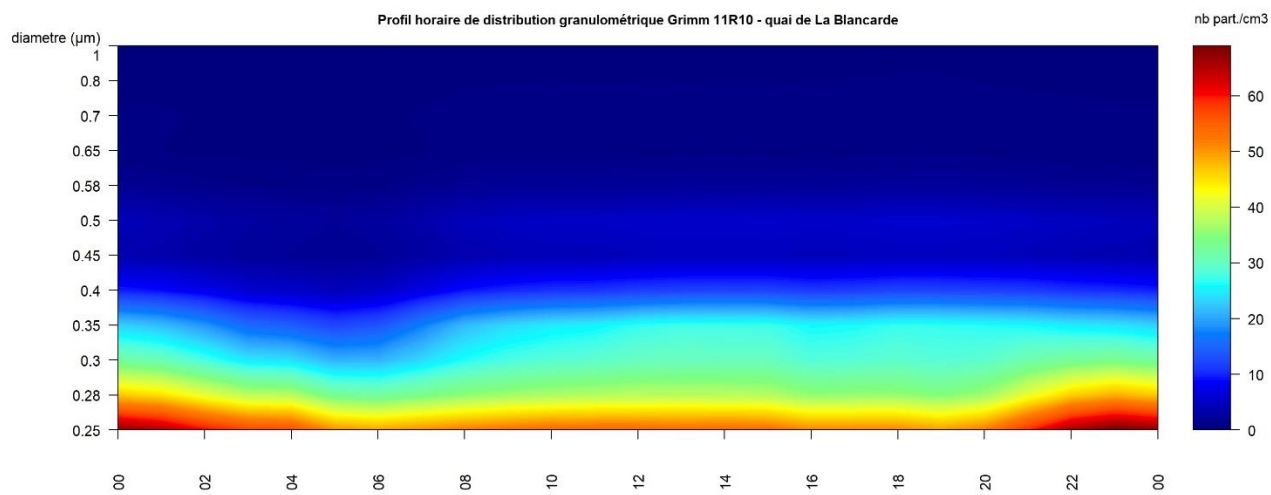


Figure 19 : Profil moyen journalier du nombre de particules/cm³ des fractions de 250 nm à 32 µm normalisé par le maximum de chaque fraction - station St-Charles - campagne 2019

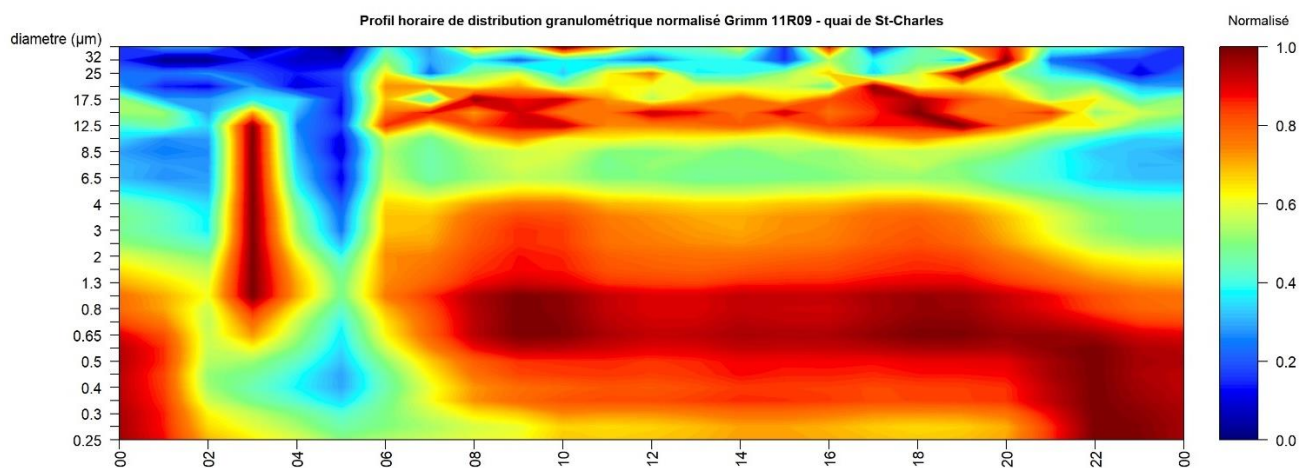
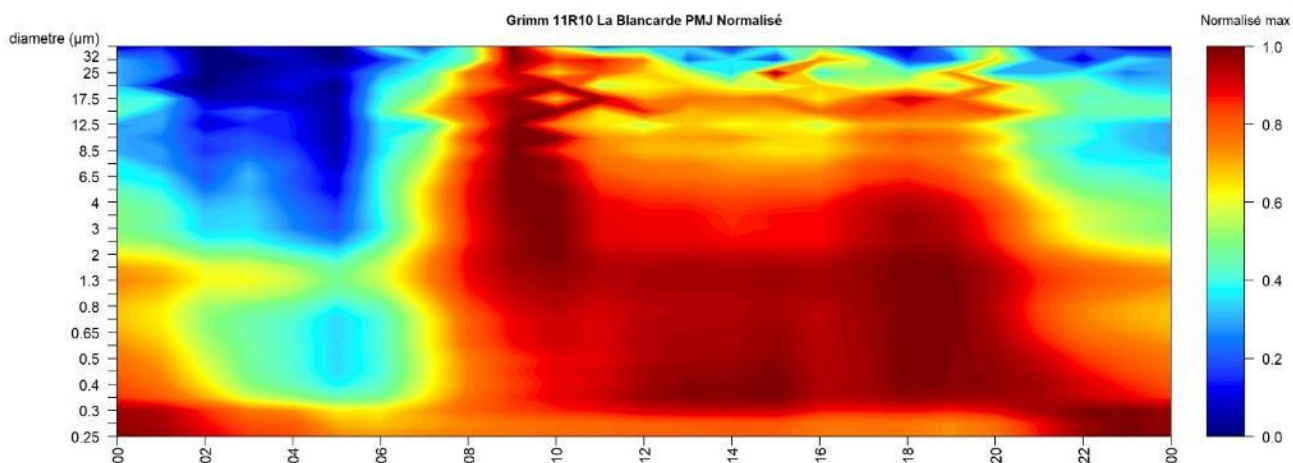


Figure 20 : Profil moyen journalier du nombre de particules/litre des fractions de 250 nm à 32 µm normalisé par le maximum de chaque fraction - station Blancarde – campagne 2019



ANNEXE 5 Représentation statistique des paramètres de confort sur les quais à l'aide de « boxplot »

Le diagramme en boîte, ou « boxplot » en anglais, est la représentation statistique d'une série de données d'observation. Cet outil graphique permet la représentation des informations de dispersion de la série de données étudiée : moyenne, médiane, valeurs extrêmes, premier et troisième quartile.

Figure 21 : Schéma explicatif du diagramme en boîte

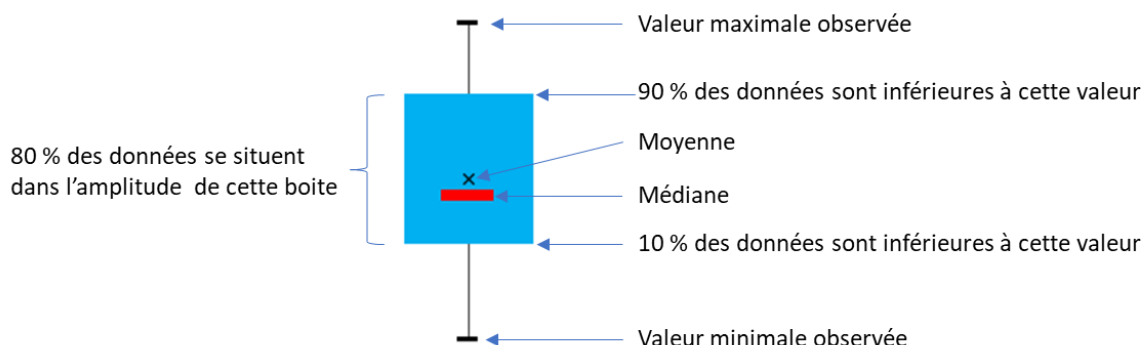


Figure 22 : Box-plot des concentrations en CO₂ sur les quais des trois stations échantillonnées

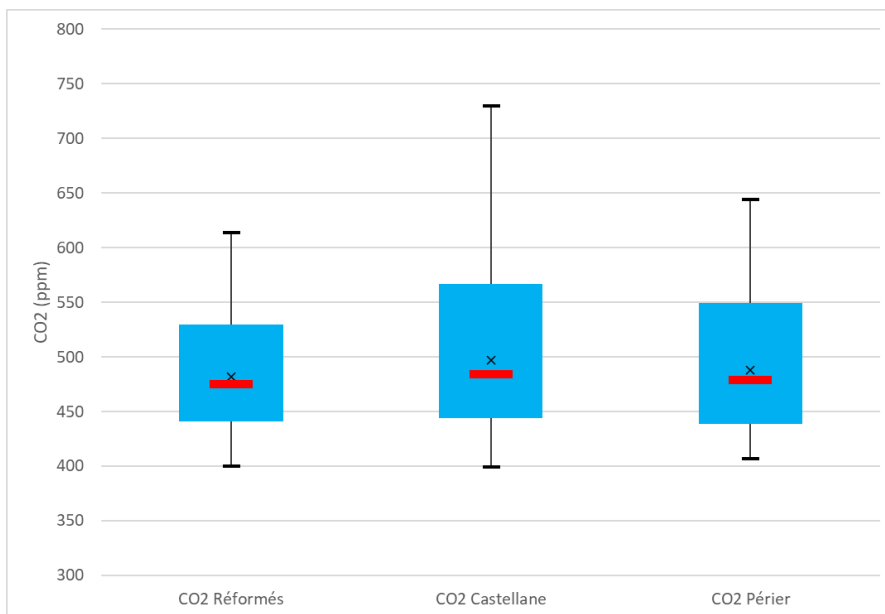


Figure 23 : Box-plot des taux d'humidité relative sur les quais des trois stations échantillonnées

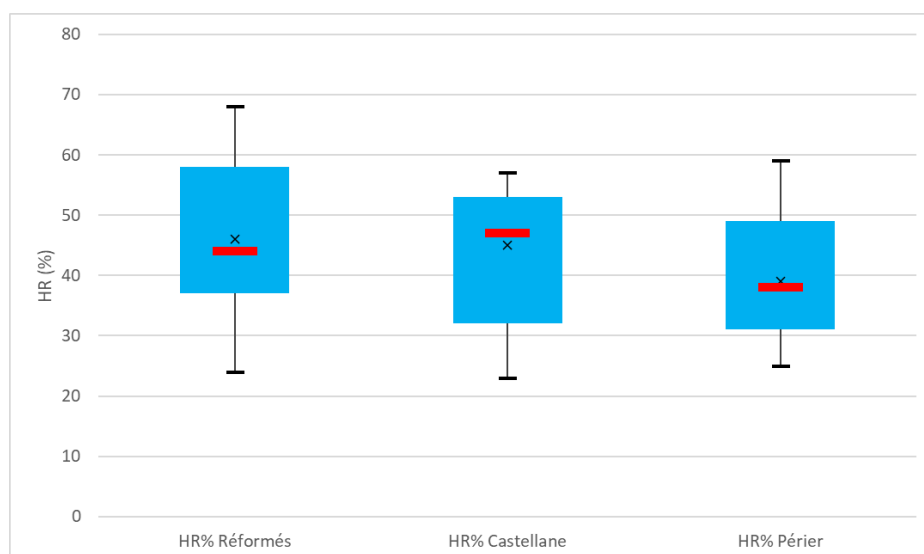
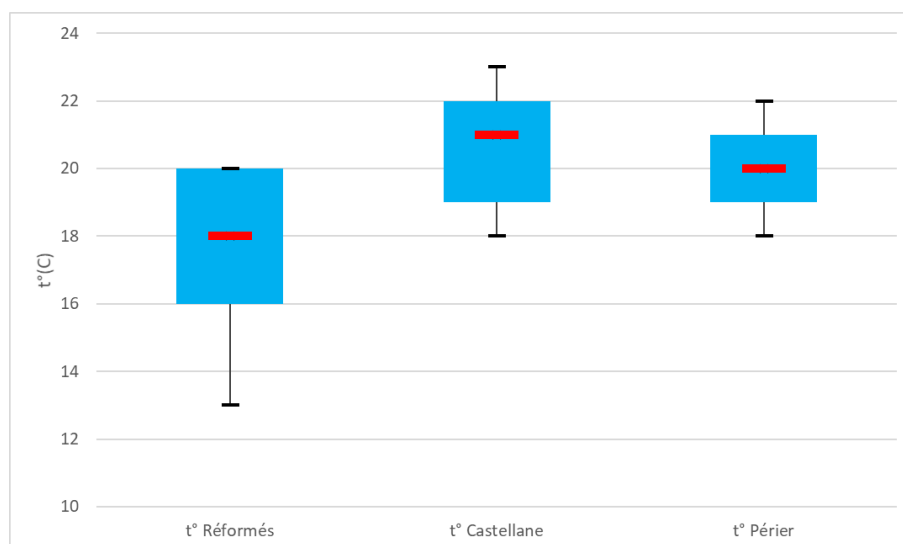


Figure 24 : Box-plot des températures sur les quais des trois stations échantillonnées



ANNEXE 6 Base de données des mesures de particules fines sur dans les rames des 2 lignes de métro

Tableau 36 : Concentrations de PM_{10} et $PM_{2.5}$ dans les rames de la ligne 1

C_{EFS}	PM₁₀	PM_{2.5}
Nombre de valeurs	3	3
Durée cumulée des Prélèvements (minutes)	360	360
Moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	63	53
Min – Max ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	55 - 70	45 - 58

Tableau 37 : Concentrations de PM_{10} et $PM_{2.5}$ dans les rames de la ligne 2

C_{EFS}	PM₁₀	PM_{2.5}
Nombre de valeurs	2	2
Durée cumulée des Prélèvements (minutes)	240	240
Moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	87	76
Min – Max ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	83 - 91	70 - 81

ANNEXE 7 Base de données des mesures de métaux dans les rames de métro des lignes 1 et 2

Tableau 38 : Concentrations de métaux dans la fraction PM₁₀ dans les rames de la ligne 1

C _{EFS}	Métaux réglementés en air ambiant				Usure des quais/contribution extérieure		
	As (ng/m ³)	Cd (ng/m ³)	Ni (ng/m ³)	Pb (ng/m ³)	Al (ng/m ³)	Ca (ng/m ³)	K (ng/m ³)
Nombre de valeurs	3	3	3	3	3	3	3
Durée cumulée des prélèvements (minutes)	360	360	360	360	360	360	360
Moyenne (ng/m³)	< 16.6*	< 16.6*	< 414*	< 0.04*	< 3310*	<16552*	< 3.3*
Min – Max (ng/m ³)	< 16.6*	< 16.6*	< 414*	< 0.04*	< 3310*	<16552*	< 3.3*
C _{EFS}	Abrasion des pièces métalliques du matériel roulant						
	Ba (ng/m ³)	Cr (ng/m ³)	Cu (ng/m ³)	Fe (ng/m ³)	Mn (ng/m ³)	Sb (ng/m ³)	Zn (ng/m ³)
Nombre de valeurs	3	3	3	3	3	3	3
Durée cumulée des prélèvements (minutes)	360	360	360	360	360	360	360
Moyenne (ng/m³)	< 414*	< 83*	1917	24711	< 414*	< 41*	< 3310*
Min – Max (ng/m ³)	< 414*	< 83*	1482 - 2533	18576 - 33755	< 414*	< 41*	< 3310*

* concentration inférieure à la limite de quantification correspondante

Tableau 39 : Concentrations de métaux dans la fraction PM₁₀ dans les rames de la ligne 2

C _{EFS}	Métaux réglementés en air ambiant				Usure des quais/contribution extérieure		
	As (ng/m ³)	Cd (ng/m ³)	Ni (ng/m ³)	Pb (ng/m ³)	Al (ng/m ³)	Ca (ng/m ³)	K (ng/m ³)
Nombre de valeurs	2	2	2	2	2	2	2
Durée cumulée des prélèvements (minutes)	240	240	240	240	240	240	240
Moyenne (ng/m³)	< 16.6*	< 16.6*	< 414*	< 0.04*	< 3310*	<16552*	< 3.3*
Min – Max (ng/m ³)	< 16.6*	< 16.6*	< 414*	< 0.04*	< 3310*	<16552*	< 3.3*
C _{EFS}	Abrasion des pièces métalliques du matériel roulant						
	Ba (ng/m ³)	Cr (ng/m ³)	Cu (ng/m ³)	Fe (ng/m ³)	Mn (ng/m ³)	Sb (ng/m ³)	Zn (ng/m ³)
Nombre de valeurs	2	2	2	2	2	2	2
Durée cumulée des prélèvements (minutes)	240	240	240	240	240	240	240
Moyenne (ng/m³)	< 414*	< 83*	2411	33703	< 414*	< 41*	< 3310*
Min – Max (ng/m ³)	< 414*	< 83*	2174 - 2649	33052 - 34354	< 414*	< 41*	< 3310*

* concentration inférieure à la limite de quantification correspondante

ANNEXE 8 Sources de pollution, effets sur la santé, réglementation et recommandations OMS

Sources de pollution

Les polluants atmosphériques ont diverses origines.

Polluants	Sources principales
NO_x Oxydes d'azote	Les sources principales sont les véhicules et les installations de combustion.

Effets sur la santé

Les polluants atmosphériques ont un impact sur la santé variable en fonction de leur concentration dans l'air, de la dose inhalée et de la sensibilité des individus. Ils peuvent aussi avoir des incidences sur l'environnement.

Polluants	Effets sur la santé	Effets sur l'environnement
NO_x Oxydes d'azote	- irritation des voies respiratoires - dans certains cas, altération des fonctions pulmonaires	- pluies acides - précurseur de la formation d'ozone - effet de serre - déséquilibre les sols sur le plan nutritif

Réglementation

En matière de surveillance de la qualité de l'air, la réglementation se base essentiellement sur :

- La directive 2008/50/CE concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe,
- La directive 2004/107/CE concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant,
- L'article R221-1 du Code de l'Environnement.

Les valeurs réglementaires sont exprimées en µg/m³. L'expression du volume doit être ramenée aux conditions de température et de pression suivantes : 293 K et 1013 hPa. La période annuelle de référence est l'année civile. Un seuil est considéré dépassé lorsque la concentration observée est strictement supérieure à la valeur du seuil.

Polluants	Type de réglementation	Valeurs réglementaires (µg/m ³)	Durée d'exposition
NO₂ Dioxyde d'azote	Seuil d'information- recommandations	200	Heure
	Seuil d'alerte	400	Heure
	Valeurs limites	200	Heure (maximum 18h / an)
		40	Année

Recommandations de l'Organisation Mondiale pour la Santé (OMS)

Les valeurs recommandées par l'OMS (2005) sont fondées sur des études épidémiologiques et toxicologiques publiées en Europe et en Amérique du Nord. Elles ont pour principal objectif d'être des références pour l'élaboration des réglementations internationales.

Il s'agit de niveaux d'exposition (concentration d'un polluant dans l'air ambiant pendant une durée déterminée) auxquels ou en dessous desquels il n'y a pas d'effet sur la santé. Ceci ne signifie pas qu'il y ait un effet dès que les niveaux sont dépassés mais que la probabilité qu'un effet apparaisse est augmentée.

Polluants	Effets considérés sur la santé	Valeur ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) recommandée par l'OMS	Durée moyenne d'exposition
NO₂ Dioxyde d'azote	- faible altération de la fonction pulmonaire (asthmatiques)	200	1 heure
		40	1 an

AtmoSud, votre expert de l'air en région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur



Un large champ d'intervention : air/climat/énergie/santé

La loi sur l'air reconnaît le droit à chaque citoyen de respirer un air qui ne nuise pas à sa santé. Dans ce cadre, AtmoSud évalue l'exposition des populations à la pollution atmosphérique et identifie les zones où il faut agir. Pour s'adapter aux nouveaux enjeux et à la demande des acteurs, son champ d'intervention s'étend à l'ensemble des thématiques de l'atmosphère : polluants, gaz à effet de serre, nuisances, pesticides, pollens... Par ses moyens techniques et d'expertise, AtmoSud est au service des décideurs et des citoyens.

Des missions d'intérêt général

La loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie du 30/12/1996 confie la surveillance de la qualité de l'air à des associations agréées :

- Connaître l'exposition de la population aux polluants atmosphériques et contribuer aux connaissances sur le changement climatique
- Sensibiliser la population à la qualité de l'air et aux comportements qui permettent de la préserver
- Accompagner les acteurs des territoires pour améliorer la qualité de l'air dans une approche intégrée air/climat/énergie/santé
- Prévoir la qualité de l'air au quotidien et sur le long terme
- Prévenir la population des épisodes de pollution
- Contribuer à l'amélioration des connaissances

Recevez nos bulletins

Abonnez-vous à l'actualité de la qualité de l'air : <https://www.atmosud.org/abonnements>

Conditions de diffusion

AtmoSud met à disposition les informations issues de ses différentes études et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ces travaux. A ce titre, les rapports d'études sont librement accessibles sur notre site Internet.

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'AtmoSud. Toute utilisation de données ou de documents (texte, tableau, graphe, carte...) doit obligatoirement faire référence à AtmoSud. Ce dernier n'est en aucun cas responsable des interprétations et publications diverses issues de ces travaux et pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.



Siège social : 146, rue Paradis « Le Noilly Paradis » - 13294 Marseille cedex 06
Établissement de Martigues : route de la Vierge 13500 Martigues
Établissement de Nice : 37 bis, avenue Henri Matisse - 06200 Nice
Tél. 04 91 32 38 00 - Télécopie 04 91 32 38 29 - contact.air@atmosud.org



Suivez-nous sur

