



QUALITE DE L'AIR INTERIEUR DU METRO DE MARSEILLE (13)

Campagne 2025

Juin 2026

Date de parution

Juin 2026

Contact

Chargé d'action territoriale : Sébastien Mathiot sebastien.mathiot@atmosud.org

Pilote de projet : Mathieu Izard mathieu.izard@atmosud.org

Références

AFE-000209 / 01 / MID-ASN-ERT

Résumé

Les Enceintes Ferroviaires Souterraines (EFS) sont des environnements où sont présents les polluants issus du déplacement du matériel roulant, des occupants et de l'air extérieur. Les cinq précédentes campagnes de mesure dans le métro Marseillais (2010, 2016, 2019, 2021 et 2023) ont permis de caractériser, sur plusieurs stations, divers polluants parmi lesquels les particules fines PM10 et PM2.5, les métaux traces et certains polluants gazeux organiques et inorganiques. Cette nouvelle étude en 2025 poursuit la surveillance de la qualité de l'air du métro de Marseille, avec la mise en place du protocole de mesure harmonisé à l'échelle nationale.

► En quoi consiste le protocole harmonisé à l'échelle nationale ?

Il consiste à mesurer les particules fines (PM10 et PM2.5), les métaux et le confinement (CO₂) sur les quais de trois stations sélectionnées en fonction de leur fréquentation et de leurs niveaux ponctuels de pollution en PM10 et dans les rames des différentes lignes. Ce protocole appliqué au réseau de métro marseillais a concerné les quais des stations :

- Saint-Barnabé sur la ligne 1,
- Notre-Dame-du-Mont sur la ligne 2,
- Saint-Charles, au croisement des lignes 1 et 2.

Il n'existe pas de valeurs contraignantes dans les EFS mais des indicateurs de gestion de l'ANSES qui recommande *a minima* :

- de ne pas dépasser les concentrations en PM10 et PM2,5 dans l'air des EFS calculées à partir des valeurs guides OMS de qualité de l'air ambiant (C_{sout_OMS}),
- et, à plus forte raison, de ne pas dépasser les concentrations en PM10 dans l'air des EFS calculées à partir de la valeur limite journalière de la directive européenne 2008/50/CE pour les PM10 de l'air ambiant (C_{sout_Lim}).

Les valeurs C_{sout_OMS} pour une heure d'exposition pour les PM10 et PM2.5 sont respectivement de 140 et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La valeur C_{sout_Lim} pour une heure d'exposition pour les PM10 est de 480 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (non existante pour les PM2.5).

► Des concentrations en PM10 plus élevées sur les quais des stations Notre-Dame-du-Mont et St-Charles mais qui respectent la valeur de gestion limite dans les EFS

L'ensemble des concentrations horaires maximales en PM10 aux trois stations de métro échantillonnées dépassent la valeur de gestion C_{sout_OMS} de 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mais sont significativement inférieures au C_{sout_Lim} de 480 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à ne pas dépasser pour une exposition d'une heure.

Les concentrations moyennes sur les heures d'ouverture (5h à 1h) s'échelonnent de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station St-Barnabé (ligne 1) à 145 et 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aux stations Notre-Dame-du-Mont et St-Charles (ligne 2), cette dernière ayant montré une augmentation de concentration de 43 % depuis la campagne de 2019.

► L'expérimentation la mise en marche de la ventilation (quai + tunnels adjacents) permet une réduction significative des concentrations en PM10

La mise en marche aux heures de pointes du système de ventilation uniquement de la station St-Charles n'a pas occasionné de différence significative sur les concentrations en particules fines et métaux. En revanche, la mise en marche simultanée des systèmes de ventilation des tunnels adjacents, en complément de celui du quai de la station St-Charles, s'avère efficace. Cela permet la diminution des concentrations en PM10 de 20 % sur ces périodes d'heures de pointe.

Ces baisses de concentrations sur les heures de pointe ne permettent pas pour autant de passer en dessous de la valeur de gestion C_{sout_OMS} .

- ▶ **Des concentrations en PM2.5 sur les quais légèrement supérieures à la valeur de gestion**

Pour les PM2.5, les concentrations horaires maximales des stations Notre-Dame-du-Mont et St-Charles sont légèrement supérieures à la valeur de gestion C_{Sout_OMS} de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ alors que celles de St-Barnabé la respectent. Les concentrations moyennes sur la période d'ouverture à la station Notre-Dame-du-Mont ($48 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont légèrement plus importantes qu'à St-Charles ($45 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et St-Barnabé ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et sont stables par rapport à celles des campagnes 2023 et 2021. Les PM2.5 représentent entre 31 % et 33 % des PM10, en concentrations. L'évolution des concentrations des PM2.5 suit celle des PM10.

- ▶ **Des concentrations en métaux plus élevées sur le quai de la station St-Barnabé**

La proportion des métaux les uns par rapport aux autres reste similaire quelle que soit la station, avec le fer (Fe) comme élément le plus présent (89 %) suivi du cuivre (6 à 8 %).

Les concentrations à St-Barnabé sont plus importantes qu'aux stations St-Charles et Notre-Dame du Mont. Une augmentation progressive des concentrations en métaux est globalement observée au cours des années, à l'exception de la station Notre-Dame-du-Mont pour laquelle une baisse est mesurée entre 2023 et 2025. La vétusté du matériel roulant et l'accumulation progressive des dépôts de particules dans le réseau de tunnels peuvent expliquer ce phénomène.

- ▶ **Les premières mesures de potentiel oxydant (PO) montrent des niveaux significativement plus importants qu'en air ambiant.**

Les mesures de potentiel oxydant réalisées en 2025 font état d'une haute réactivité spécifique des particules dans le réseau du métro de Marseille. Cela signifie que la composition des particules fines présentes dans l'enceinte ferroviaire possède un fort potentiel oxydant. De plus, les concentrations en particules fines étant plus importantes qu'en air ambiant, le potentiel oxydant représentatif de l'exposition des usagers du métro est significativement plus important que celui auquel la population générale est exposée dans les différentes typologies de sites de mesure en air ambiant. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus dans d'autres enceintes ferroviaires souterraines françaises.

- ▶ **Un confinement qui pourrait être amélioré dans les rames**

Les concentrations moyennes de CO_2 dans les rames lors des périodes de pointe montrent des concentrations moyennes inférieures à valeur repère du HCSP dans les établissements recevant du public (800 ppm).

Néanmoins, près de 25 % des valeurs « 1 minute » ont dépassé cette valeur repère dans les rames des deux lignes de métro. Il s'avère donc que lors des périodes de forte occupation, les débits de renouvellement d'air des rames pourraient être améliorés afin de réduire le confinement.

- ▶ **Dans les rames, des concentrations en PM10 inférieures à celles des quais, mais supérieures en PM2.5**

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 PM2.5 sont légèrement supérieures. La proportion de PM2.5 dans les PM10 est donc plus importante dans les rames. Ceci peut être expliqué par les filtres des prises d'air des rames, principalement efficaces pour les particules les plus grosses (comme les PM10), réduisant ainsi l'entrée des PM10 mais moins celle des PM2.5.

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

Les deux seules substances ayant pu être quantifiées dans les rames sont le fer et le cuivre, c'est-à-dire les éléments parmi les plus présents dans l'air des 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

Alexis Stepanian – AtmoSud

Edwige Révélat - AtmoSud

SOMMAIRE

I	Contexte de l'étude	6
II	Le Métro de Marseille.....	6
II.1	Le réseau.....	6
II.2	Matériel roulant actuel.....	7
II.3	Fréquentation et horaires des métros	8
II.4	Futur matériel roulant	9
III	Qualification de la qualité de l'air sur la zone d'étude.....	9
IV	Réalisation de la campagne de mesures	10
IV.1	Méthodologie	10
IV.2	Moyens mis en œuvre	11
IV.3	Echantillonnage géographique et temporel	13
V	Valeurs de référence.....	17
VI	Résultats de la campagne 2025	18
VI.1	Campagne de mesure sur les quais	18
VI.2	Campagne de mesures dans les rames.....	33
VII	Comparaison aux campagnes précédentes	36
VII.1	Particules fines sur les quais	36
VII.2	Concentration des métaux au niveau des quais	40
VIII	Conclusion	43

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1	HIERARCHISATION DES QUAIS (DONNEES DE LA RTM)	48
ANNEXE 2	BASE DE DONNEES DES MESURES DE PARTICULES FINES ET CO2.....	51
ANNEXE 3	BASE DE DONNEES DES MESURES DE METAUX SUR LES QUAIS.....	60
ANNEXE 4	Tableau comparatif des concentrations en métaux sur les quais des différentes campagnes de mesures dans le métro de Marseille.....	62
ANNEXE 5	REPRESENTATION STATISTIQUE DES PARAMETRES DE CONFORT SUR LES QUAIS A L'AIDE DE « BOXPLOT ».....	63
ANNEXE 6	BASE DE DONNEES DES MESURES DE PARTICULES FINES DANS LES RAMES DES 2 LIGNES DE METRO	64
ANNEXE 7	BASE DE DONNEES DES MESURES DE METAUX DANS LES RAMES DE METRO DES LIGNES 1 ET 2	65
ANNEXE 8	SOURCES DE POLLUTION, EFFETS SUR LA SANTE, REGLEMENTATION ET RECOMMANDATIONS OMS	66

I CONTEXTE DE L'ETUDE

Les Enceintes Ferroviaires Souterraines (EFS) 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**. Cinq précédentes campagnes de mesure ont eu lieu en 2010, 2016, 2019, 2021 et 2023. Ces dernières ont permis de caractériser, entre autres, les particules fines PM10 et PM2.5, les particules ultrafines, les métaux, le benzène, le dioxyde d'azote, et le dioxyde de carbone.

Jusqu'en 2019, les campagnes de mesure concernaient une à deux stations de métro sur une période longue de l'ordre de six mois. A partir de 2021, pour se conformer au protocole de mesure harmonisé à l'échelle nationale dans les enceintes ferroviaires¹ (INERIS, 2020), les campagnes concernent systématiquement trois stations sur une période plus courte de deux semaines par station. Le principe est de réaliser des mesures, de particules fines, métaux et de CO₂, dans les rames de métro et sur les quais des trois stations retenues en fonction de leur fréquentation et de concentrations ponctuelles en PM10.

Les stations déjà échantillonnées, dans au moins une campagne de mesures, sont : St-Charles, Castellane, La Fourragère, Blancarde, Périer, Les Réformés et Notre-Dame-du-Mont.

L'objectif de cette nouvelle campagne de mesures est multiple :

- Poursuivre la surveillance de la qualité de l'air de l'enceinte ferroviaire souterraine du métro de Marseille en appliquant la méthodologie proposée par le [guide des recommandations de l'INERIS](#) pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines ;
- Comparer et interpréter les résultats obtenus lors de cette campagne à ceux des années précédentes et aux résultats des autres EFS françaises ayant appliqué le même protocole ;
- Expérimenter l'impact de la mise en marche du système de ventilation/désenfumage sur les concentrations en polluants intérieurs sur les quais de la station St-Charles qui possède un nouveau système de désenfumage ;
- Expérimenter la mise en place de mesures simultanées de particules fines sur un des quais extérieurs et le quai central de la station S-Charles pour évaluer les différences de concentrations ;
- Obtenir des premières mesures de potentiel oxydant sur les particules prélevées sur les quais des trois stations échantillonnées.

II LE METRO 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. Le réseau marseillais a été emprunté par environ 200 millions d'usagers, pour près de 800 000 voyages par jour (données de 2018). Près de la moitié du trafic passager concerne le métro.

II.1 Le réseau

Le métro de Marseille compte deux lignes totalisant une longueur de 21,5 km et 28 stations (Figure 1) :

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

- 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.

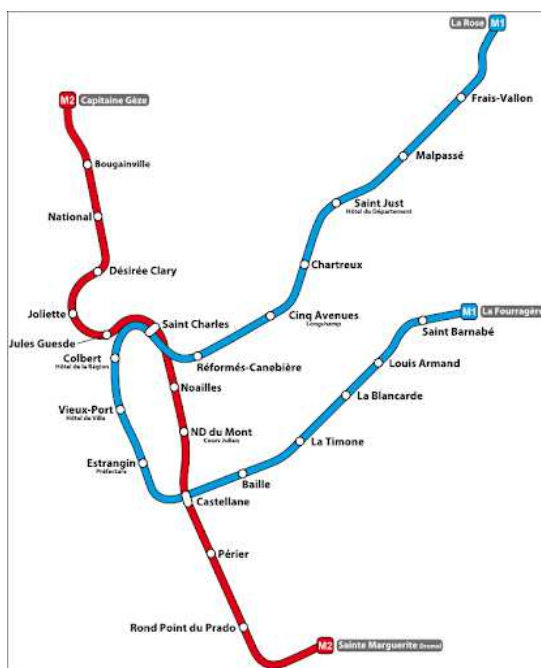


Figure 1 : Plan du Réseau de Métro de la ville de Marseille lors de la campagne 2021 (source RTM)

II.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

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.

II.3 Fréquentation et horaires des métros

La fréquentation du métro présentée dans le Tableau 1 est en progression d'année en année (+61% entre 2010 et 2016 à la station St-Charles), mais la pandémie liée à la covid 19 a occasionné une forte baisse de la fréquentation en 2021 (- 30 % par rapport à 2019), qui repart progressivement à la hausse depuis.

La fréquentation de la station St-Charles est significativement plus importante que celle des stations Notre-Dame du Mont et St-Barnabé.

Tableau 1 : Evolution de la fréquentation mensuelle du métro par station

Fréquentation en nombre de passagers mensuels	Années	Janvier	Février	Mars	Avril
Ensemble du réseau	2019	6 680 339	5 865 201	7 160 230	6 401 695
	2020	6 928 097	6 295 903	3 552 418	570 981
	2021	4 117 639	3 889 992	4 498 510	3 490 129
	2022	5 061 159	4 891 893	6 221 714	5 354 705
	2023	5 870 783	5 340 334	6 238 613	5 369 551
	2024	6 308 395	6 658 732	6 627 164	6 640 718
	2025	6 269 578	5 974 458	7 111 084	6 700 777
Station Saint-Barnabé	2019	56 534	48 194	60 388	54 111
	2020	60 857	53 674	29 917	4 557
	2021	34 443	32 613	38 249	29 713
	2022	43 313	41 710	53 421	45 852
	2023	51 430	43 454	52 572	43 787
	2024	50 194	50 367	50 379	50 606
	2025	53 812	53 812	53 812	53 812
Station Notre-Dame du Mont	2019	127 599	111 875	138 823	122 840
	2020	126 860	113 717	65 320	8 657
	2021	76 041	70 586	78 998	64 789
	2022	92 781	90 509	118 092	102 263
	2023	122 327	111 216	133 028	120 290
	2024	129 309	138 725	142 263	145 162
	2025	132 785	123 677	151 887	140 702
Station Saint-Charles	2019	564 904	498 153	598 083	551 963
	2020	546 711	524 503	286 793	25 002
	2021	304 889	294 136	334 852	237 546
	2022	401 205	411 421	523 749	456 122
	2023	448 727	402 174	439 260	393 618
	2024	526 023	552 474	564 317	567 475
	2025	571 628	531 080	613 033	576 527

Pour cette campagne de mesure 2025, les horaires des métros sont identiques à celles des campagnes de 2019, 2021 et 2023 à la différence près que le service se termine à 22h à la place de 1h du matin du lundi au jeudi inclus.

II.4 Futur matériel roulant

De nouveaux trains de métro, entièrement automatiques, devraient être mis en service dès 2026 (Figure 2). Il s'agit de trains sur roues pneumatiques avec un freinage exclusivement électronique. L'ensemble des quais sera équipé de portes palières permettant ainsi un effet barrière au déplacement des particules vers le quai.



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

III QUALIFICATION DE LA QUALITE DE L'AIR SUR LA ZONE D'ETUDE

AtmoSud dispose d'un réseau de surveillance permanent sur l'ensemble de la région afin de mesurer en continu des polluants réglementés (Figure 3). Sur Marseille, sept stations surveillent la qualité de l'air ambiant².

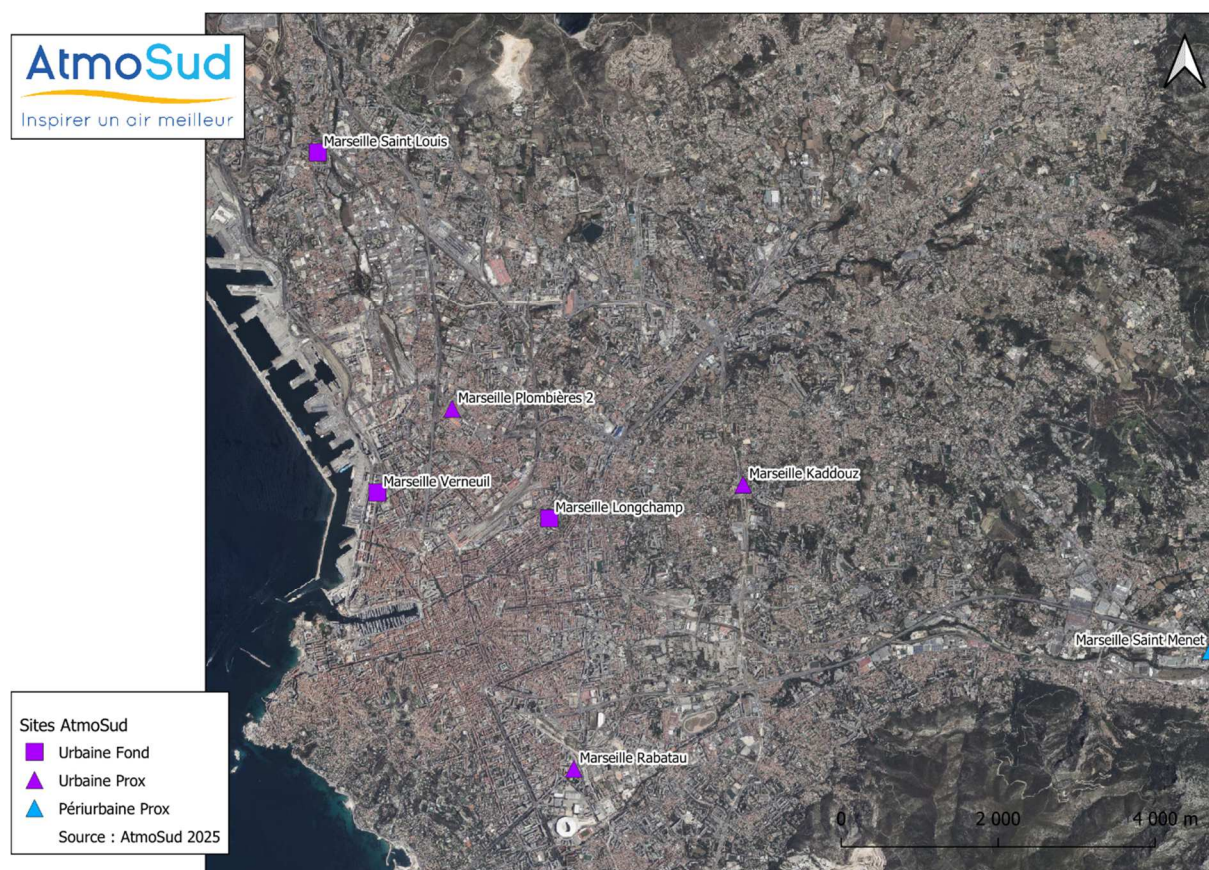


Figure 3 : Réseau de surveillance de la qualité de l'air sur Marseille

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

Deux 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 dans le Tableau 2 :

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 particulaires	PM ₁₀	X	X
	PM _{2.5}	X	X
	PM ₁	X	-
	Potentiel oxydant	X*	-
Métaux	Arsenic (As)	X	-
	Cadmium (Cd)	X	-
	Nickel (Ni)	X	-
	Plomb (Pb)	X	-
Autres	CO ₂	X	-

*Mesures ponctuelles, analyse en cours

IV REALISATION DE LA CAMPAGNE DE MESURES

IV.1 Méthodologie

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

- PM₁₀
- PM_{2.5}
- Métaux lourds
- CO₂
- Potentiel oxydant

Les caractéristiques techniques générales des prélèvements et des analyses sont rappelées dans le Tableau 3 :

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
Substances particulaires dans l'air ambiant	PM ₁₀ + PM _{2.5}	Analyseur automatique	3	-
	PM ₁₀ + PM _{2.5}	Prélèvement actif	-	2
	Métaux lourds ³	Préleveur actif	3	2
	Potentiel oxydant	Préleveur actif	3	-
Confort	Température/humidité	Analyseur infrarouge	3	2

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

IV.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. Les dispositifs de mesure utilisés à chaque emplacement sont présentés dans le Tableau 4.

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

Dispositif de mesure	Blancarde	Notre-Dame du Mont	St-Charles	Rames
Analyseur automatique (Particules PM ₁₀ puis PM _{2,5})	X	X	X	-
2 ^{ème} analyseur automatique (Particules PM ₁₀ puis PM _{2,5})	-	-	X	-
Préleveur séquentiel (Particules PM ₁₀ + 14 métaux + potentiel oxydant)	X	X	X	-
Prélèvement actif par impacteur (Particules PM ₁₀ , PM _{2,5} et 14 métaux dans les PM ₁₀)	-	-	-	X
Analyseur infrarouge (CO ₂ , température, humidité relative)	X	X	X	X

IV.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 (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)

IV.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** dans les PM₁₀ pour chaque semaine de mesure (norme NF EN 14902).

De manière complémentaire, des filtres sont prélevés pour réaliser des analyses par l'IGE du potentiel oxydant (PO). L'analyse du PO est réalisée en mettant en contact les particules atmosphériques d'un échantillon et un fluide pulmonaire reconstitué contenant des antioxydants dans des conditions physiologiques « normales » (37°C, pH = 7.4). La vitesse de consommation des antioxydants par les PM est ensuite suivie pendant 30 minutes : plus les vitesses de consommation sont élevées, plus les particules sont oxydantes pour le milieu pulmonaire. Dans le cadre de la campagne, les tests réalisés sont celui au dithiothréitol (DTT) et celui à l'acide ascorbique (AA), qui sont deux tests complémentaires les plus utilisés, représentatifs de différentes familles d'espèces chimiques antioxydante de nos poumons.

Les mesures atmosphériques peuvent être exprimées soit par mètre cube d'air (noté alors PO par volume, ou POv), représentant l'exposition humaine par inhalation de l'air échantillonné, soit par la masse de particules (millionième de gramme de particule (μg), noté PO massique ou POm), représentant alors la réactivité spécifique des particules de l'échantillon d'air. On l'appelle « PO intrinsèque ».



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

IV.2.3 Analyseur infrarouge

La température, l'humidité relative et les concentrations en dioxyde de carbone CO_2 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 4 : Appareil de mesure de CO₂, température et humidité relative : Class'Air

IV.2.4 Impacteurs de particules fines et métaux

Les mesures des concentrations massiques en PM₁₀ et PM_{2.5} et de 14 métaux sont réalisées à l'aide d'impacteurs sur filtres Teflon qui prélèvent l'air des rames sur des périodes de 2 heures (trois prélèvements par ligne en période de pointe, 3 jours distincts) à un débit de à 10 l/minute.



Photographie 5 : Impacteurs sur filtre pour la mesure de particules fines et de métaux sur la fraction PM₁₀ (rouge) et PM_{2.5} (orange)

IV.3 Echantillonnage géographique et temporel

IV.3.1 Echantillonnage géographique

Afin de répondre aux exigences du guide de recommandations (INERIS, 2020), quatre points ont été positionnés sur des quais des stations dans le cadre de cette campagne de mesures s'étalant **du 9 janvier au 22 mai 2025** :

- Deux sur les quais des stations Notre-Dame du Mont (ligne 1) et St-Barnabé (ligne 2), 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),
- Deux sur les quais de la station St-Charles (croisement des lignes 1 et 2), la station la plus fréquentée du réseau. Dans cette station, des mesures de particules par analyseur de référence sont réalisées en parallèle sur le quai externe desservant la ligne 2 en direction en direction Sainte-Marguerite Dromel et sur le quai central desservant les 2 sens de la ligne 1.

De manière complémentaire, des mesures à l'intérieur des rames en mobilité sont réalisées sur les deux lignes de métro (Lignes 1 et 2) en novembre 2025.

IV.3.1.1 Station Notre-Dame du Mont (ligne 2)

La station Notre-Dame du Mont 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**.

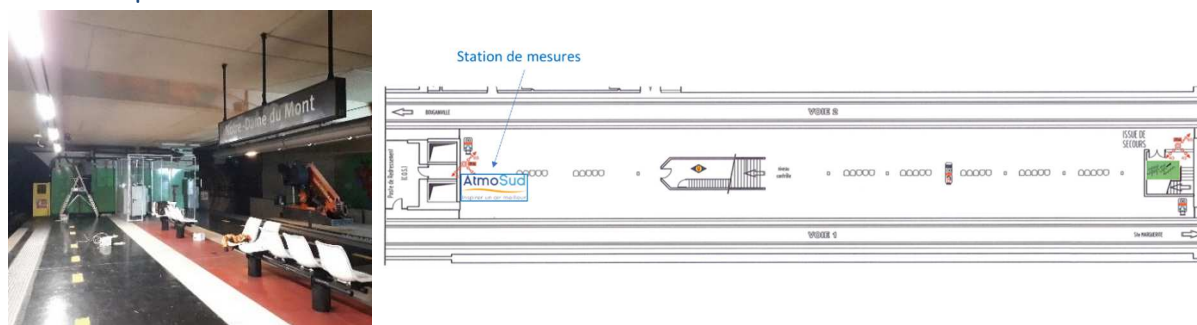


Figure 4 : Emplacement des appareils de mesure sur le quai de la station Notre-Dame du Mont

IV.3.1.2 Station St-Barnabé (ligne 1)

La station St-Barnabé est organisée autour de deux 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).

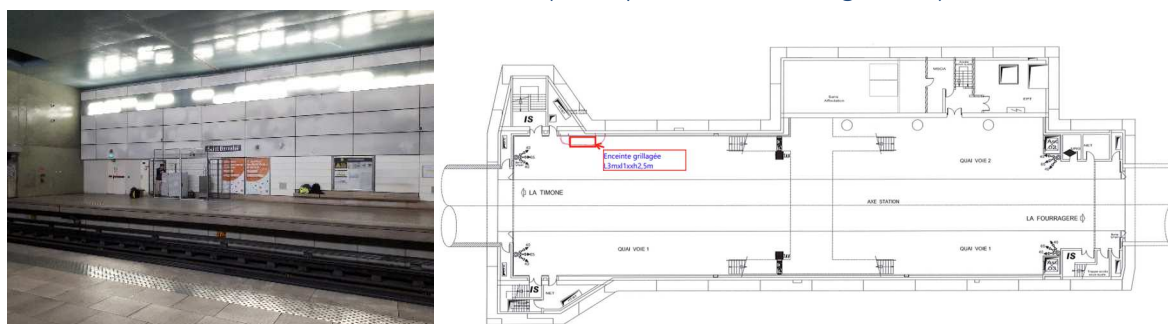


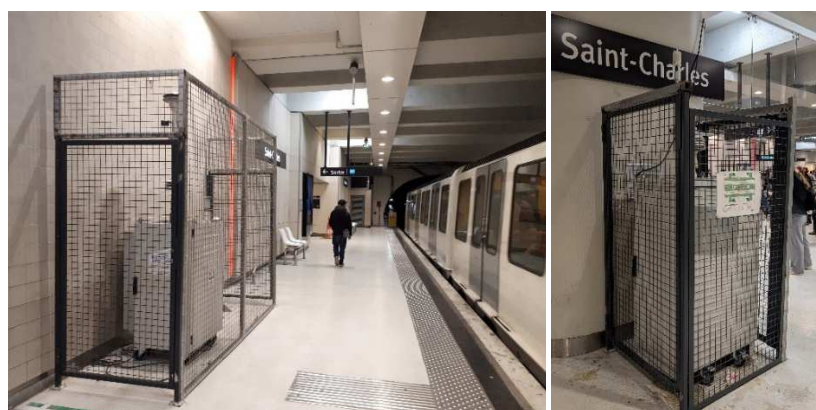
Figure 5 : Emplacement des appareils de mesure sur le quai de la station St-Barnabé

IV.3.1.3 Station St-Charles (croisement lignes 1 et 2)

La station St-Charles, est organisée autour de deux quais aux extrémités, chacun desservant un sens de circulation de la ligne 2 et d'un quai central desservant les 2 sens de la ligne 1.

La zone principale de mesure, équipée d'un analyseur automatique et du préleveur Leckel est située sur le quai externe de la ligne 2, en direction Sainte-Marguerite Dromel.

La zone complémentaire de mesure, équipée d'un deuxième analyseur automatique de particules est située sur le quai central.



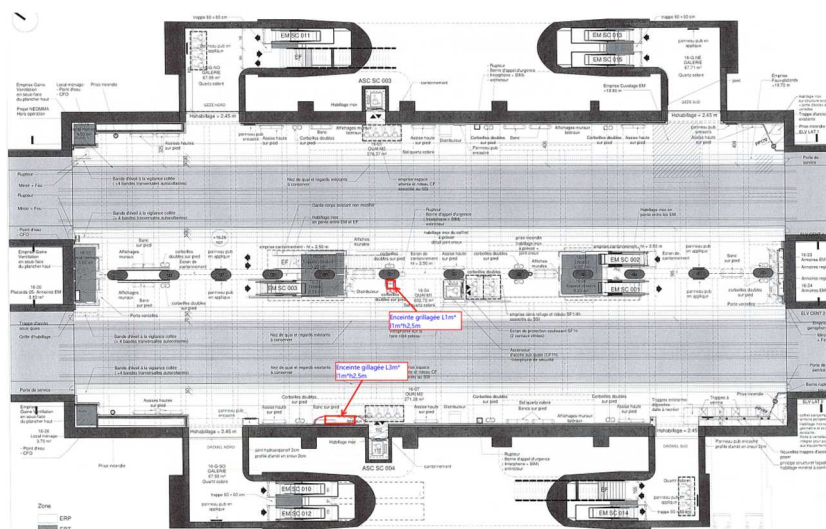


Figure 6 : Emplacements des appareils de mesure sur le quai de la station de Castellane

IV.3.2 Echantillonnage temporel

IV.3.2.1 Campagnes sur les quais

Les campagnes de mesure des points fixes sur les quais durent 2 semaines aux stations St-Barnabé et Notre-Dame du Mont (sans ventilation) :

- 1 semaine de mesure des PM2.5 ;
- 1 semaine de mesure de PM10.

A la station St-Charles, la campagne de mesure comporte 4 étapes :

- 1 semaine de mesure des PM2.5 sans ventilation ;
- 1 semaine de mesure de PM10 sans ventilation ;
- Première expérimentation de ventilation : 5 jours de mesure de PM10 ;
- Deuxième expérimentation de ventilation : 2 jours de mesure de PM10.

Lors de la première période de ventilation à la station St-Charles, seul le système de ventilation du quai est mis en marche.



Figure 7 : Représentation des systèmes de ventilation activés lors de la première expérimentation de ventilation à la station St-Charles

Lors de la deuxième période de ventilation, les systèmes de ventilation des tronçons de tunnels adjacents sont mis en marche en complément de ceux du quai de la station St-Charles.



Figure 8 : Représentation des systèmes de ventilation activés lors de la deuxième expérimentation de ventilation à la station St-Charles

Ces systèmes de ventilation sont mis en route aux heures de pointes des jours ouvrés, de 7h à 10h et de 17h à 20h.

Les durées d'échantillonnage par type de prélèvement sont présentées dans le Tableau 5 :

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

Type de prélèvement	Période d'échantillonnage Blancarde et Notre-Dame du Mont	Période d'échantillonnage St-Charles	Pas de temps
Analyseur automatique PM2.5	1 semaine	1 semaine x 2	Horaire
Analyseur automatique PM10	1 semaine	2 semaines x 2	Horaire
Préleveur actif métaux lourds	2 semaines	3 semaines	Journalière 20h/24h
Préleveur actif potentiel oxydant	5 jours*	5 jours*	Journalière 20h/24h
Analyseur infrarouge	2 semaines	3 semaines	Quart-horaire

* les jours de prélèvement sont réalisés en amont ou en aval de la période de mesure des autres paramètres de mesure.

Pour respecter les périodes hors vacances scolaires, les périodes de mesures des PM2.5 et des PM10 ont été planifiées de manière discontinue.

Les périodes de mesures à chaque station ont été réparties sur les périodes présentées dans le Tableau 6.

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

Points de mesure	Période d'échantillonnage		
	PM2.5	PM10	PM10 avec ventilation
Station Blancarde	14/01/25 au 20/01/25	21/01/25 au 27/01/25	-
Station Notre-Dame du Mont	24/02/25 au 02/03/25	03/03/25 au 09/03/25	-
Station St-Charles	24/03/25 au 30/03/23	22/04/25 au 28/04/25	29/04/25 au 06/05/25* puis 20/05/25 au 21/05/25

*Le jour férié du jeudi 1^{er} mai 2025 n'est pas pris en compte dans les mesures

IV.3.2.2 Campagne 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 présentées dans le Tableau 7 :

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 présentées dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Périodes d'échantillonnage dans les rames

Points de mesure	Période 1	Période 2	Période 3
Ligne 1	04/11/25	06/11/25	19/11/25
Ligne 2	05/11/25	18/11/25	20/11/25

V VALEURS DE REFERENCE

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

Seul un indicateur de gestion de l'ANSES existe pour les PM10 et PM2.5 dans les EFS⁴.

Cet indicateur de gestion est basé sur la méthode proposée par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF) en 2001 pour la construction de valeurs de gestion spécifiques aux EFS en lien avec la fréquentation des usagers⁵.

Les évolutions suivantes ont été apportées à cette méthode dans le cadre de ces travaux :

- la prise en compte des valeurs guides de l'OMS, en complément des valeurs limites réglementaires de qualité de l'air ambiant moins protectrices pour la santé ;
- l'ajout des micro-environnements « logement » et « travail » (« travail en bureau » et « travail en extérieur ») et la suppression du seul micro-environnement « extérieur » dans le calcul de l'exposition personnelle ;
- en intégrant les niveaux de pollution dans l'air ambiant de chacune des sept agglomérations urbaines possédant des EFS ;
- en retenant donc in fine 4 scénarios de : 30 minutes par jour, 1 heure par jour, 1 heure 30 par jour et 2 heures par jour, complétés par une analyse de sensibilité.

L'ANSES recommande en premier lieu de poursuivre les efforts de réduction des concentrations de particules en suspension dans l'air émises au sein des EFS, en visant des niveaux les plus bas possible. Le corpus de connaissances est trop limité pour pouvoir tirer des conclusions fermes sur d'éventuels effets sanitaires de l'exposition des usagers à la pollution de l'air des EFS, mais il suggère la possibilité d'effets sur la fonction cardiaque autonome, l'inflammation et le stress oxydant systémiques, et l'inflammation des voies respiratoires.

L'ANSES recommande *a minima* :

- de ne pas dépasser les concentrations en PM10 et PM2,5 dans l'air des EFS calculées à partir des valeurs guides OMS de qualité de l'air ambiant (C_{sout_OMS}),
- et, à plus forte raison, de ne pas dépasser les concentrations en PM10 dans l'air des EFS calculées à partir de la valeur limite journalière de la directive européenne 2008/50/CE pour les PM10 de l'air ambiant (C_{sout_Lim}).

Les valeurs C_{sout_Lim} et C_{sout_OMS} sont présentées pour une durée cumulée de fréquentation sur une journée dans le Tableau 9.

Tableau 9 : concentrations dans l'air en EFS recommandées par l'ANSES *a minima*

Polluant ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Durée cumulée de fréquentation de l'EFS sur une journée	Concentration calculée à partir de la valeur limite journalière de la directive européenne 2008/50/CE * (C_{sout_Lim})	Concentration calculée à partir de la valeur guide journalière de l'OMS * (C_{sout_OMS})
PM10	2h / j	260	80
	1h30 / j	330	100
	1h / j	480**	140**
	30 min / j	940	250

⁴ Qualité de l'air des enceintes ferroviaires souterraines - Revue de la littérature sur les effets sanitaires - Proposition de concentrations en particules dans l'air à ne pas dépasser – Mai 2022 : <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2019SA0148Ra.pdf>

⁵ 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

Polluant ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Durée cumulée de fréquentation de l'EFS sur une journée	Concentration calculée à partir de la valeur limite journalière de la directive européenne 2008/50/CE * ($C_{\text{sout_Lim}}$)	Concentration calculée à partir de la valeur guide journalière de l'OMS * ($C_{\text{sout_OMS}}$)
PM2.5	2h / j	-	50
	1h30 / j	-	60
	1h / j	-	80**
	30 min / j	-	140

*Valeurs calculées en assimilant les particules d'EFS aux particules de l'air ambiant

** Valeurs de référence retenues pour l'exposition des usagers du métro de Marseille

Le temps moyen des passagers du métro Marseillais étant inférieur à une heure, la valeur de $C_{\text{sout_Lim}}$ retenue est celle correspondant à 1h d'exposition, soit $480 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM₁₀.

Les valeurs $C_{\text{sout_OMS}}$ retenues sont de $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM₁₀ et de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{2.5}.

VI RESULTATS DE LA CAMPAGNE 2025

VI.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 (INERIS, 2020) sont présentées en Annexe 2 pour les particules fines et en Annexe 3 pour les métaux.

VI.1.1 Niveaux de concentration en particules fines

VI.1.1.1 Concentrations moyennes et maximales

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 St-Barnabé (ligne 1)

Les concentrations moyennes et maximales horaires en PM₁₀ et PM_{2.5} de la station St-Barnabé 24h/24h, en période d'ouverture du métro ou sur les périodes de pointes sont présentées dans le Tableau 10.

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

Polluant	Période	Valeur	Semaine (du lundi au dimanche)	Jours ouvrés (Lundi – Vendredi)	Jours de week-end
Semaine 1 du 14/01/25 au 20/01/25					
PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24h/24h	Moyenne	36	36	34
		Maximum horaire	65	65	61
	Heures d'ouverture (JO : 5h-22h ; WE : 5h-1h)	Moyenne	40	41	37
		Maximum horaire	65	65	61
	Heures de pointe jours ouvrés (7h-9h ; 17h-19h)	Moyenne	-	48	-
		Maximum horaire	-	58	-

Polluant	Période	Valeur	Semaine (du lundi au dimanche)	Jours ouvrés (Lundi – Vendredi)	Jours de week-end
Semaine 2 du 21/01/25 au 27/01/25					
PM10 (µg/m³)	24h/24h	Moyenne	97	104	81
		Maximum horaire	234	234	167
	Heures d'ouverture (JO : 5h-22h ; WE : 5h-1h)	Moyenne	122	132	94
		Maximum horaire	206	206	167
	Heures de pointe jours ouvrés (7h-9h ; 17h-19h)	Moyenne	-	167	-
		Maximum horaire	-	206	-

A la station St-Barnabé, les concentrations moyennes 24h/24 sont respectivement de 97 et 36 µg/m³ pour les PM10 et les PM2.5. Ces concentrations sont plus importantes lors des heures de fonctionnement du métro de 5h à 1h (122 et 40 µg/m³), lors des jours ouvrés, et plus particulièrement lors des heures de pointe.

Le maximum horaire en PM10 sur la période d'ouverture du métro (206 µg/m³) est inférieur à la valeur de gestion limite de l'ANSES ($C_{\text{sout-Lim}}$) pour une heure d'exposition de 480 µg/m³, mais supérieur à la valeur de gestion OMS ($C_{\text{sout-OMS}}$) de 140 µg/m³. Le maximum horaire en PM2.5 sur la période d'ouverture du métro de 65 µg/m³ est inférieur à la valeur de gestion OMS de l'ANSES ($C_{\text{sout-OMS}}$) de 80 µg/m³.

La proportion moyenne des PM2,5 dans les PM10 est de 31 % pour les jours ouvrés sur les heures d'ouverture du réseau.

► Station Notre-Dame-du-Mont (ligne 2)

Les concentrations moyennes et maximales horaires en PM10 et PM2.5 de la station Notre-Dame du Mont 24h/24h, en période d'ouverture du métro ou sur les périodes de pointes sont présentées dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5} de la station Notre-Dame-du-Mont – analyseur automatique

Polluant	Période	Valeur	Semaine (lundi – dimanche)	Jours ouvrés (Lundi – Vendredi)	Jours de week- end
Semaine 1 du 24/02/25 au 02/03/25					
PM2.5 (µg/m³)	24h/24h	Moyenne	40	41	37
		Maximum horaire	86	86	68
	Heures d’ouverture (JO : 5h-22h ; WE : 5h-1h)	Moyenne	48	50	42
		Maximum horaire	86	86	68
	Heures de pointe jours ouvrés (7h-9h ; 17h-19h)	Moyenne	-	54	-
		Maximum horaire	-	82	-
Semaine 2 du 03/03/25 au 09/03/25					
PM10 (µg/m³)	24h/24h	Moyenne	132	145	98
		Maximum horaire	656	656	148
	Période d’ouverture du métro (5h-1h)	Moyenne	143	157	108
		Maximum horaire	232	232	148
	Heures de pointe jours ouvrés (7h-9h ; 17h-19h)	Moyenne	-	178	-
		Maximum horaire	-	232	-

A la station Notre-Dame du Mont, les concentrations moyennes 24/24h sont respectivement de 132 et 40 µg/m³ pour les PM10 et les PM2.5. Comme à la station St-Barnabé, elles sont plus importantes lors des heures de fonctionnement du métro de 5h à 1h (143 et 48 µg/m³), lors des jours ouvrés, et plus particulièrement lors des heures de pointe.

Mais, lors de la semaine 2, il a été observé plusieurs périodes d'augmentation significatives de concentrations en PM10 pour les jours ouvrés à partir de 23h, pendant les périodes nocturnes réservées aux essais des futures nouvelles rames et aux travaux d'adaptation du réseau souterrain. Ainsi, la concentration horaire maximale importante observée de 686 µg/m³ en PM10 est attribuée aux périodes d'essai. Elle est significativement supérieure à celle de la période d'ouverture de 232 µg/m³, qui respecte la valeur de gestion limite de l'ANSES (C_{sout-Lim}) pour une heure d'exposition de 480 µg/m³, mais reste supérieure à la valeur de gestion OMS (C_{sout_OMS}) de 140 µg/m³.

Le maximum horaire en PM2.5 sur la période d'ouverture du métro de 86 µg/m³ est légèrement supérieur à la valeur de gestion OMS de l'ANSES (C_{sout-OMS}) de 80 µg/m³.

La proportion moyenne des PM2,5 dans les PM10 est de 32 %, soit une proportion équivalente à celle observée à la station St-Barnabé.

► Station St-Charles (croisement des lignes 1 et 2)

Les concentrations moyennes et maximales horaires en PM10 et PM2.5 de la station St-Charles 24h/24h, en période d'ouverture du métro ou sur les périodes de pointes sont présentées dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Concentrations en PM10 et PM2.5 de la station St-Charles – analyseur automatique

Polluant	Période	Valeur	Semaine (du lundi au dimanche)	Jours ouvrés (Lundi – Vendredi)	Jours de week-end
Semaine 1 sans ventilation quai extérieur (24/03/25 au 30/03/25)					
PM2.5 (µg/m³)	24h/24h	Moyenne	39	42	32
		Maximum horaire	94	94	64
	Heures d’ouverture (JO : 5h-22h ; WE : 5h-1h)	Moyenne	45	49	34
		Maximum horaire	81	81	58
	Heures de pointe jours ouvrés (7h-9h ; 17h-19h)	Moyenne	-	55	-
		Maximum horaire	-	64	-
Semaine 2 sans ventilation quai extérieur / quai central (22/04/25 au 28/04/25)					
PM10 (µg/m³)	24h/24h	Moyenne	107 / 112	115 / 119	90 / 95
		Maximum horaire	232 / 231	232 / 231	140 / 151
	Heures d’ouverture (JO : 5h-22h ; WE : 5h-1h)	Moyenne	133 / 140	145 / 153	102 / 108
		Maximum horaire	232 / 231	232 / 231	140 / 151
	Heures de pointe jours ouvrés (7h-9h ; 17h-19h)	Moyenne	-	163 / 173	-
		Maximum horaire	-	215 / 230	-
Semaine 3 avec ventilation quai extérieur / quai central (29/04/25 au 06/05/25)					
PM10 (µg/m³)	24h/24h	Moyenne	111 / 119	115 / 122	98 / 110
		Maximum horaire	258 / 225	258 / 225	151 / 167
	Heures d’ouverture (JO : 5h-22h ; WE : 5h-1h)	Moyenne	137 / 147	147 / 157	110 / 123
		Maximum horaire	233 / 225	233 / 225	151 / 167
	Heures de pointe jours ouvrés (7h-9h ; 17h-19h)	Moyenne	-	166 / 176	-
		Maximum horaire	-	204 / 214	-
Semaine 4 avec ventilation quai extérieur / quai central (20/05/25 au 21/05/25)					
PM10 (µg/m³)	24h/24h	Moyenne	-	117 / 122	-
		Maximum horaire	-	210 / 210	-
	Heures d’ouverture (JO : 5h-22h ; WE : 5h-1h)	Moyenne	-	128 / 136	-
		Maximum horaire	-	187 / 177	-
	Heures de pointe jours ouvrés (7h-9h ; 17h-19h)	Moyenne	-	131 / 141	-
		Maximum horaire	-	153 / 164	-

A la station Saint-Charles, les concentrations moyennes 24h/24 sont comprises entre 107 et 112 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 et sont de 39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM2.5. Il apparaît qu'elles sont plus importantes lors des heures de fonctionnement du métro (133 à 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 et 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM2.5), lors des jours ouvrés, et plus particulièrement lors des heures de pointe.

Le maximum horaire en PM10 sur la période d'ouverture du métro (230 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) est inférieur à la valeur de gestion limite de l'ANSES ($C_{\text{sout-Lim}}$) pour une heure d'exposition de 480 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mais supérieur à la valeur de gestion OMS ($C_{\text{sout-OMS}}$) de 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Le maximum horaire en PM2.5 sur la période d'ouverture du métro de 81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ est tout juste supérieur à la valeur de gestion OMS de l'ANSES ($C_{\text{sout-OMS}}$) de 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La proportion moyenne des PM2,5 dans les PM10 est de 34 %.

Sur la première période de ventilation (semaine 3, uniquement sur le quai de la station St-Charles), il n'a pas été observé de baisses des concentrations en PM10, que ce soit à l'échelle d'une journée ou pendant les heures de pointe.

En revanche, lors deuxième période de ventilation (semaine 4, sur le quai de la station St-Charles et dans les tunnels adjacents), il a été observé une baisse des concentrations en PM10 sur les périodes de pointe de 19 %.

► Synthèse des trois stations

Aux trois stations échantillonnées, les concentrations horaires en PM10 ont toujours respecté la valeur de gestion limite de l'ANSES de 480 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les enceintes ferroviaires souterraines pour une heure d'exposition mais elles ont toutes dépassé la valeur de gestion OMS de 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La station St-Barnabé respecte la valeur de gestion OMS des PM2.5 pour une exposition d'une heure de 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mais les mesures aux stations Notre-Dame-du-Mont et St-Charles la dépassent légèrement (respectivement 86 et 81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Les proportions de PM2.5 dans les PM10 varient entre 31 et 34 % en fonction des stations, ce qui signifie que la majeure partie des particules sont plutôt grossières par rapport à ce qui est habituellement observé en air ambiant où les PM2.5 représentent en moyenne autour de 70 % des PM10.

La mise en marche de la ventilation aux heures de pointes à la station St-Charles s'avère efficace quand les systèmes de ventilation des tunnels adjacents sont mis en marche en plus de ceux du quai, puisqu'elle permet la diminution des concentrations en PM10 de 19 % sur ces périodes d'heures de pointe.

VI.1.1.2 Profils horaires des stations sans ventilation

Les profils horaires des PM10 et PM2.5 aux trois stations échantillonnées lors des jours ouvrés (Figure 9), montrent une augmentation significative des concentrations en PM10 après 5 heures du matin, heure d'ouverture du métro.

Les maximums sont globalement observés aux heures de forte affluence (trajet domicile/travail ou domicile/école) en matinée et en fin d'après-midi/début de soirée, mais ne sont pas identiques entre les stations :

- Au niveau de la station St-Barnabé, les maximums sont observés autour de 9h et 18h, avec des niveaux mesurés d'environ 175 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM2.5 à ces créneaux horaires. Les concentrations montrent des niveaux plus faibles et stables entre 11h et 16h, suivi par un pic vers 18h et une baisse significative à partir de 20h.
- A la station Notre-Dame du Mont, les concentrations en PM10 et PM2.5 augmentent le matin

jusqu'à 9h-10h, pour atteindre $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 et $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM2.5. Il est ensuite observé une décroissance progressive des concentrations en PM10 suivie d'une stabilisation jusqu'à 20h, heure à partir de laquelle les concentrations baissent significativement. Pour les PM2.5, il est également observé une augmentation des concentrations autour de 18h.

Pendant la nuit, il est observé une augmentation des concentrations significatives des PM10, vraisemblablement due à l'impact d'activités nocturnes pendant la semaine de mesure, qui consistent aux tests et travaux d'adaptation du réseau aux futures rames de métro.

- A la station St-Charles, le profil et les niveaux de concentrations en PM10 sont assez similaires à ce qui est observé à la station Notre-Dame du Mont. Elles atteignent leur maximum à 9h, aussi bien pour les PM10 que les PM2.5, pour atteindre entre 180 et $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne à cette heure pour les PM10 et autour de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM2.5, avant de décroître progressivement. L'augmentation observée en fin de journée est également moins importante que celle de la matinée.

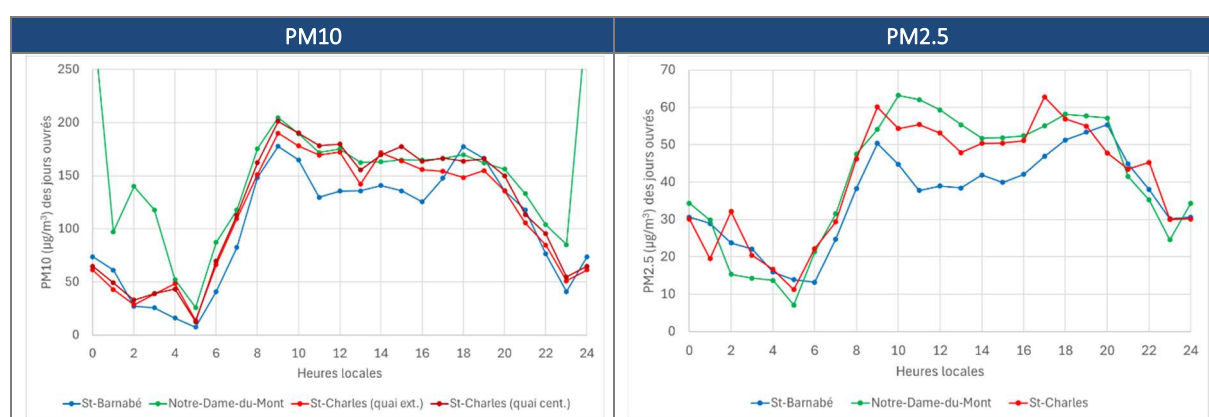


Figure 9 : Profils horaires des jours de semaine des concentrations en PM10 et PM2.5 – périodes sans ventilation

Les profils horaires en PM10 des trois stations échantillonnées montrent tous des augmentations des concentrations aux périodes d'affluence en matinée. Pour la période de pointe de l'après-midi, c'est essentiellement la station St-Barnabé qui montre une élévation significative autour de 18h. Aux stations Notre-Dame-du-Mont et St-Charles, les niveaux sont relativement stables de 10h à 19h. A partir de 20h, l'ensemble des stations montrent une baisse significative des concentrations.

Les concentrations observées en PM10 et PM2.5 sont plus importantes aux stations Notre-Dame-du-Mont et St-Charles qu'à la station St-Barnabé.

Des concentrations nocturnes importantes en PM10 ont été observées à la station Notre-Dame-du-Mont, vraisemblablement en lien avec les tests et travaux effectués sur le réseau lors de la semaine de mesure correspondante lors des heures de fermeture du réseau au public (entre 23h et 2h du matin).

VI.1.1.3 Comparaison aux périodes avec ventilation

A la station St-Charles, la comparaison des profils horaires entre les périodes avec et sans ventilation permet de mettre en évidence l'apport du système de ventilation (Figure 10).

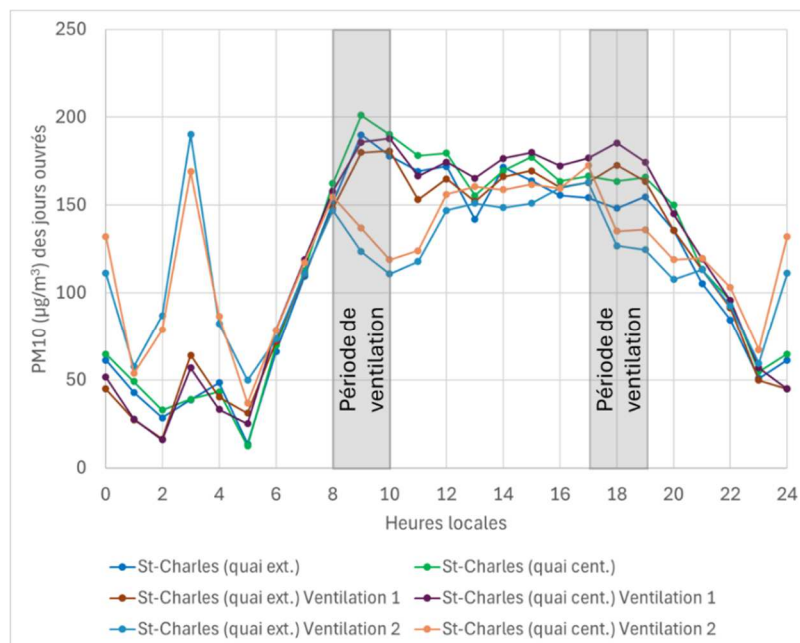


Figure 10 : Comparaison des profils journaliers en PM10 avec et sans ventilation à la station St-Charles

Ces profils montrent deux situations bien distinctes en fonction des périodes de ventilation :

- La première période de ventilation (« ventilation 1 ») qui ne montre pas d'effets positifs sur les concentrations en PM10 ;
- La deuxième période de ventilation (« ventilation 2 ») qui montre un effet significatif sur la baisse des concentrations en PM10 lors des heures de mise en place de la ventilation lors des périodes de pointe du matin et de fin d'après-midi. Cette efficacité de la ventilation est homogène entre les quais extérieur et central.

La première période de ventilation a consisté à la mise en place du système de ventilation uniquement sur le quai de la station St-Charles. L'absence de baisse des concentrations sur cette première période peut être expliquée par le fait que la mise en route unique du système de ventilation du quai ne suffise pas à lui-seul pour évacuer les particules émises et apportées par chaque passage de rames ou que le système de ventilation n'ait pas été réellement mis en place pendant cette semaine expérimentale.

La deuxième période de ventilation a consisté en la mise en marche des systèmes de ventilation du quai de St-Charles mais également des tunnels adjacents. Sur cette période, et dans ces conditions, il a bien été observé une baisse des concentrations sur les deux périodes de pointe (matin et après-midi). L'effet bénéfique de la ventilation dure jusqu'à une heure après la période de mise en marche. Ainsi, la mise en marche des systèmes de ventilation des tunnels adjacents semble être le facteur principal limitant l'accumulation des particules fine présentes sur les quais.

La mise en route du système de ventilation aux heures de pointe n'a pas été efficace sur la première période d'expérimentation où seul le système de ventilation du quai a été mis en place. Sur la deuxième période d'expérimentation, où les systèmes de ventilation des tunnels adjacents ont été mis en marche en complément de celui du quai, une baisse significative des concentrations a été observée (19 % lors des périodes de pointe), cet effet bénéfique de la ventilation perdure approximativement une heure après la mise en marche.

Ainsi, la mise en place de la ventilation sur le quai de la station St-Charles et dans les tunnels adjacents permet d'éviter la forte augmentation des concentrations sur ces heures où les concentrations sont habituellement les plus importantes.

VI.1.1.4 Comparaison aux concentrations extérieures

Le Tableau 13 montre que les concentrations extérieures de fond en PM10 ont été relativement stables (entre 12 et 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) au cours des différentes périodes de mesures. Elles ne semblent donc pas avoir pu significativement influencer les concentrations intérieures sur les quais.

Pour les PM2.5, les concentrations extérieures de fond ont été plus importantes lors de la période de mesure à la station St-Barnabé que pour les périodes de mesures aux stations Notre-Dame-du-Mont et St-Charles. Les concentrations intérieures sur les quais montrent une tendance inverse (moins importante St-Barnabé qu'aux deux autres stations).

L'impact des concentrations extérieures en PM2.5 sur l'intérieur n'est pas mis en évidence.

Les concentrations intérieures en PM10 et PM2.5 sur les quais des stations échantillonnées sont significativement plus importantes que les concentrations extérieures :

- En comparaison avec la station trafic de Marseille Rabatau :
 - De 5 à 8 fois plus importantes en PM10,
 - De 2 à 4 fois plus importantes en PM2.5.
- En comparaison avec la station de fond urbain de Longchamp :
 - De 7 à 9 fois plus importantes en PM10,
 - De 2 à 5 fois plus importantes en PM2.5.

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 PM2.5

Stations de métro	Fraction de particules fines	Concentrations moyennes 24h/24h dans le métro sur le quai ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentrations moyennes 24h/24h en air ambiant sur la même période d'une semaine ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
			Station Longchamp (fond urbain)	Station Rabatau (Trafic)
St-Barnabé	PM2.5 (14/01 au 20/01)	36	18	22
	PM10 (21/01 au 27/01)	97	14	19
Notre-Dame du Mont	PM2.5 (24/02 au 02/03)	40	9	19
	PM10 (03/03 au 09/03)	132	17	21
St-Charles	PM2.5 (24/03 au 30/03)	39	7	9
	PM10 (22/04 au 28/04)	107/112	12	13

Les concentrations intérieures en PM10 et PM2.5 sont significativement supérieures à celles observées en site de fond urbain ou trafic de Marseille.

VI.1.1.5 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 (Figure 11) 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, puis une baisse des concentrations qui accompagne la baisse du nombre de passages de métro.

Néanmoins, il est observé une différence d'impact du pic de fréquence de métro en fin d'après-midi début de soirée entre la station de St-Barnabé (plus influencée) et les autres stations qui le sont moins.

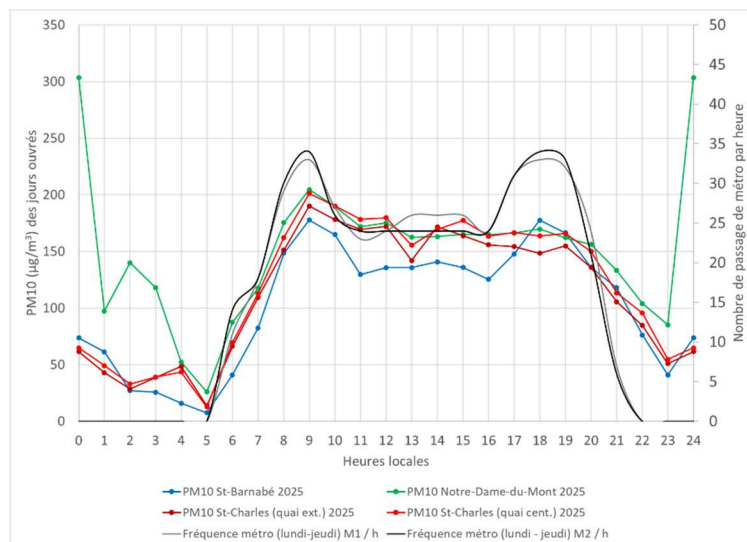


Figure 11 : Profils horaires en PM10 et fréquence de passage des métros des jours de semaine

Les profils horaires des concentrations en PM10 et PM2.5 sont vraisemblablement influencés par la fréquence de passage des métros au cours de la journée.

► Les différences de niveaux entre les stations

Les niveaux et les dynamiques des concentrations en PM10 et PM2.5 sont similaires entre les stations Notre-Dame-du-Mont et St-Charles. En revanche, la station St-Barnabé présente des concentrations inférieures et un profil légèrement différent, avec une baisse des concentrations accentuée entre 10h et 17h.

Ces différences pourraient être liées aux caractéristiques particulières de cette station récente (2010), dont l'encrassement des tunnels adjacents au fil du temps est moins important et dont la configuration est différente, avec des quais bien plus larges, des volumes intérieurs beaucoup plus importants et un échange avec l'extérieur facilité.

Lors des précédentes campagnes de mesures, il avait été observé que les stations avec un quai central qui dessert les 2 voies, présentaient des concentrations inférieures à celles dont les quais extérieurs desservent une seule voie.

L'expérimentation à la station St-Charles (mesures en parallèle sur le quai central et un quai latéral) montre des profils similaires entre les deux quais, mais c'est le quai central qui présente des concentrations légèrement plus importantes, tendance inverse de celle observées précédemment en comparant les résultats des différentes configurations des stations de métro. Ainsi, à la station St-Charles, le lieu de mesure n'influence que peu les niveaux de concentrations mesurées.

En revanche, on ne peut pas savoir si la configuration de la station de St-Charles, la seule du réseau à croiser deux lignes de métro dans les 2 sens dans un même volume d'air, est représentative des autres stations, qui ne possèdent que 2 quais pour desservir les 2 sens d'une même ligne de métro.

Les différences de niveaux observés en PM10 entre les stations St-Charles/Notre-Dame-du-Mont et la station St-Barnabé pourraient être expliquées par leur différence de fréquentation et de configuration de leur quais (central ou extérieurs).

En effet, la station St-Barnabé présente la fréquentation la plus faible des stations échantillonnées, avec seulement 50 000 passagers mensuels contre 140 000 pour Notre-Dame-du-Mont et 500 000 pour St-Charles. Son caractère plus récent et la configuration particulière de la station (largeur de quais, grand volume, accès facilité à l'extérieur) pourraient expliquer les concentrations plus faibles.

Les profils horaires des concentrations en PM10 et PM2.5 sont influencés par les heures de forte affluence. Les profils obtenus sont similaires mais les niveaux observés à la station St-Barnabé sont moins importants que ceux des stations Notre-Dame du Mont et St-Charles en PM10 et PM2.5. Cette disparité pourrait être expliquée par la configuration spatiale des quais, le volume intérieur et la facilité d'échanges avec l'air ambiant de la station St-Barnabé.

L'impact de la ventilation a deux effets différents sur chacune des stations. La mise en route du système de ventilation du quai de la station St-Charles aux heures de pointe n'occasionne pas d'effet significatif sur les concentrations en particules fines. En revanche, la mise en route conjointe des systèmes du quai de St-Charles et de ceux des tunnels adjacents permet d'éviter la forte augmentation des niveaux sur les heures où les concentrations sont habituellement les plus importantes (baisse de 19 % des PM10 aux heures de pointe).

Le profil d'évolution des concentrations au cours d'une journée est lié à la fréquence de passage des métros et aux créneaux horaires des périodes d'affluence dans le métro.

VI.1.2 Concentrations en métaux

Les différents résultats des concentrations de l'ensemble des métaux sont disponibles en Annexe 3.

VI.1.2.1 Résultats généraux de l'ensemble des périodes de mesures

Les concentrations des 14 métaux mesurés sur les quais des 3 stations échantillonnées sont présentées dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Concentrations en métaux aux différentes stations de mesures 2025

Stations	St-Barnabé	Notre-Dame du Mont	St-Charles sans ventilation	St-Charles avec ventilation (période 1)	St-Charles jour sans métro (1 ^{er} mai)
Nombre de prélèvements	14	14	14	7	1
PM10 (µg/m³)	117	130	125	126	12
Métaux (ng/m³)					
Aluminium (Al)	774	1006	959	852	64
Antimoine (Sb)	6.8	5.0	6.1	5.8	0.64
Arsenic (As)	10.7	21	20	19	0.26
Baryum (Ba)	9.9	11	15.2	13	6.4
Cadmium (Cd)	0.34	0.36	0.26	0.26	0.26
Calcium (Ca)	611	447	734	634	260
Chrome (Cr)	52	56	51	51	1
Cuivre (Cu)	3868	2829	4210	3909	20
Fer (Fe)	52294	40257	47903	45807	307
Manganèse (Mn)	483	369	436	425	6.4
Nickel (Ni)	46	37	41	39	6.4
Plomb (Pb)	4.7	5.1	3.9	4.3	1.4
Potassium (K)	226	254	240	240	64
Zinc (Zn)	125	151	90	77	64

Les concentrations moyennes cumulées des métaux de chaque station sont présentées sur la Figure 12.

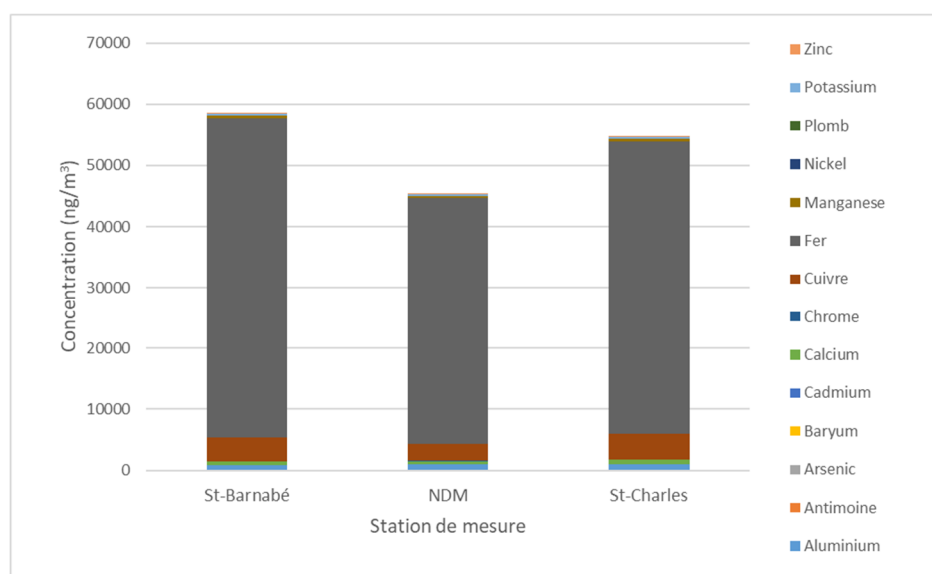


Figure 12 : Concentrations moyennes cumulées des 14 métaux mesurés aux différentes stations (sans ventilation)

Il est observé que :

- Les concentrations de la majorité des métaux sont plus importantes à la station St-Barnabé qu'aux stations Notre-Dame du Mont et St-Charles, ce qui est la tendance inverse des niveaux de concentrations en particules fines PM10. Cela indique que les concentrations plus importantes en PM10 observées aux stations Notre-Dame-du-Mont et St-Charles ne sont pas liées à la présence en plus grande quantité de métaux. Cela pourrait être dû à l'impact des travaux réalisés pour l'adaptation du réseau souterrain aux futures rames de métro, générant des particules non métalliques.
- 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).
- Parmi l'ensemble des métaux, le fer (Fe) est l'élément trace métallique le plus largement présent (88 % de la masse des métaux mesurés), suivi du cuivre (6 %).

Les concentrations en métaux sont plus importantes à la station St-Barnabé qu'aux stations Notre-Dame du Mont et St-Charles alors que les concentrations en PM10 sont plus importantes dans ces dernières.

Dans les enceintes ferroviaires souterraines, les concentrations en métaux sont généralement proportionnelles à la concentration en particules fines, ce qui n'est manifestement pas le cas dans le cadre dans la campagne 2025.

La particularité de cette année est la mise en place de nombreux travaux liés à l'adaptation du réseau aux futures rames de métro, qui pourraient être à l'origine d'une augmentation des concentrations en particules fines non métalliques.

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

Parmi l'ensemble des métaux, le fer (Fe) est l'élément trace métallique le plus présent, suivi par le cuivre et l'aluminium.

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.

VI.1.2.2 Comparaison aux périodes avec ventilation ou d'inactivité du métro

L'évolution des concentrations de métaux en fonction de la mise en route de la ventilation ou de l'arrêt de l'activité de transport des métros est présentée dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Evolution des concentrations en métaux à la station St-Charles en fonction de la ventilation ou de l'arrêt des métros

Stations	St-Charles sans ventilation	St-Charles avec ventilation (période 1)	St-Charles jour sans métro (1 ^{er} mai)
Nombre de prélèvements	14	7	1
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	125	+0.8%	-90.5%
Métaux (ng/m^3)			
Aluminium (Al)	959	-11.2%	-92.5%
Antimoine (Sb)	6.1	-4.9%	-89.0%
Arsenic (As)	20	-5.0%	-98.6%
Baryum (Ba)	15.2	-14.5%	-50.8%
Cadmium (Cd)	0.26	0.0%	0.0%
Calcium (Ca)	734	-13.6%	-59.0%
Chrome (Cr)	51	0.0%	-98.0%
Cuivre (Cu)	4210	-7.1%	-99.5%
Fer (Fe)	47903	-4.4%	-99.3%
Manganèse (Mn)	436	-2.5%	-98.5%
Nickel (Ni)	41	-4.9%	-83.6%
Plomb (Pb)	3.9	+10.3%	-67.4%
Potassium (K)	240	0.0%	-73.3%
Zinc (Zn)	90	-14.4%	-16.9%

L'évolution des concentrations en métaux en fonction de la mise en marche du système de ventilation n'a eu que peu d'effet sur les concentrations en métaux (première période avec mise en route uniquement du système de ventilation du quai de la station St-Charles). En effet, alors que les concentrations en PM10 se sont avérées très similaires entre les conditions avec et sans ventilation (respectivement 126 et 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), il se produit une légère baisse des concentrations de la plupart des métaux (5 à 10 %), excepté pour le Plomb dont la concentration augmente de 10%.

Nb : La deuxième période de ventilation (ventilation du quai de la station St-Charles et ventilation des tunnels adjacents) n'a pas bénéficié de mesures de métaux. Les concentrations en PM10 se sont avérées significativement moins importantes mais il n'y a donc pas d'information sur les concentrations en métaux à cette occasion.

Il y a une différence très significative entre les périodes d'activité à la station St-Charles (avec ou sans ventilation) par rapport au 1^{er} mai qui est le seul jour de l'année sans activité dans le réseau (fête du Travail). A cette occasion, il est observé des concentrations en PM10 dix fois inférieures et des concentrations en métaux très majoritairement plus faible.

On distingue cependant 3 catégories de métaux différemment influencés par l'activité du métro :

- Les métaux peu influencés (cadmium, zinc) ;
- Les métaux moyennement influencés à la baisse (baryum, calcium, plomb et potassium) ;
- Les métaux très significativement influencés à la baisse (aluminium, arsenic, antimoine, chrome, cuivre, fer, manganèse, nickel). Le fer et le cuivre sont les métaux les plus impactés avec des concentrations près de 150 à 200 fois moins importantes car ce ils sont les plus influencés par le passage des rames de métro (phénomène d'émission mais également de remise en suspension).

La mise en route de la ventilation sur le quai de la stations St-Charles a occasionné une légère baisse des concentrations en métaux (5 à 10%). L'arrêt de la circulation des rames de métros le 1^{er} mai à occasionné une très forte baisse des concentrations en PM10 et en métaux, en particulier l'Aluminium, Arsenic, Antimoine, Chrome, Cuivre, Fer, Manganèse et Nickel.

VI.1.2.3 Part des éléments traces métalliques dans les particules PM10

La somme des 14 métaux mesurés représente entre 35 et 50 % de la masse des PM₁₀ selon les stations, ce qui est **significativement plus important qu'en air ambiant** (en général inférieur à 10 %) (Figure 13).

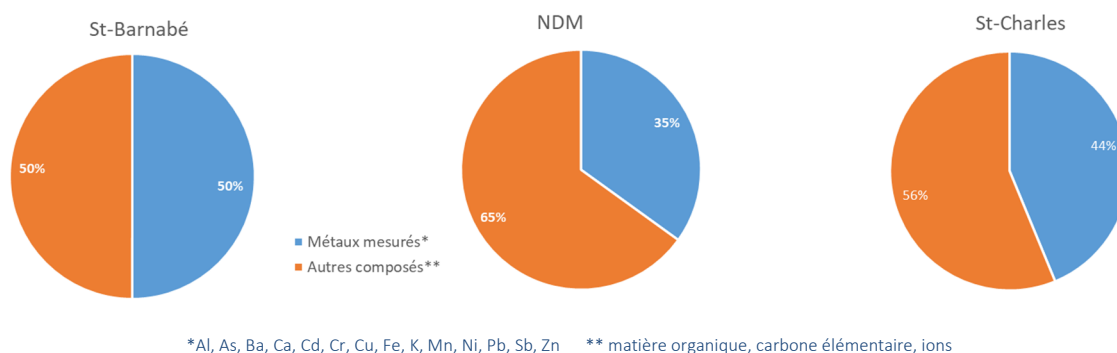


Figure 13 : Contribution relative de l'ensemble des métaux traces mesurés dans les PM10 sans ventilation

La part restante des PM₁₀ peut être composée de matières organiques, de carbone élémentaire ou d'ions.

VI.1.2.4 Interprétation des résultats

► Différences des concentrations entre les stations

Une divergence apparait entre la tendance des concentrations des PM10 et celle des métaux : les concentrations en PM10 sont plus élevées à Notre-Dame-du-Mont et St-Charles, alors qu'à St-Barnabé, les concentrations en métaux y sont supérieures.

Les particules métalliques étant caractéristiques de l'abrasion des pièces d'usure du matériel roulant, une contribution autre que le passage des rames de métro, est probable à la station Notre-Dame-du-Mont, comme l'impact des travaux de restauration sur certaines stations, par exemple.

A la différence des précédentes campagnes de mesure, il est observé en 2025 une relation non proportionnelle entre les concentrations en PM10 et les concentrations en métaux. Il est possible que ces résultats soient liés aux travaux de rénovation de stations de métro pouvant influencer différemment les concentrations en particules non métalliques sur certaines des zones du réseau.

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 et le cuivre (Cu). Les concentrations en arsenic (As) et nickel (Ni) sont supérieures à la valeur cible en air ambiant.

La station St-Barnabé présente la concentration en PM10 et en métaux la plus importante.

La mise en marche de la ventilation à la station St-Charles a occasionné une légère baisse des concentrations en métaux de 5 à 10 %, excepté pour le plomb qui a vu sa concentration légèrement augmenter.

L'arrêt de la circulation des métros le 1^{er} mai a occasionné une forte baisse des concentrations en PM10 et des métaux, et plus particulièrement aluminium, arsenic, antimoine, chrome, cuivre, fer, manganèse, et nickel. **Ces derniers sont les principaux éléments émis ou remis en suspension par le passage des rames de métro.**

VI.1.3 Potentiel oxydant dans les PM10

VI.1.3.1 Réactivité spécifique des particules du métro

Pour rappel, les mesures de potentiel oxydant normalisées par la masse de particules (notées P_{Om}), qui représentent la réactivité intrinsèque d'un microgramme de particules de l'échantillon d'air analysé. Les résultats des mesures rassemblés dans la Figure 14 montrent une stabilité dans le temps, et entre les différentes stations de métro.

Les résultats des tests à l'acide ascorbique (AA), particulièrement sensibles aux métaux, présentent des niveaux plus élevés que le test DTT, dont la sensibilité est étendue à de plus nombreuses espèces chimiques.

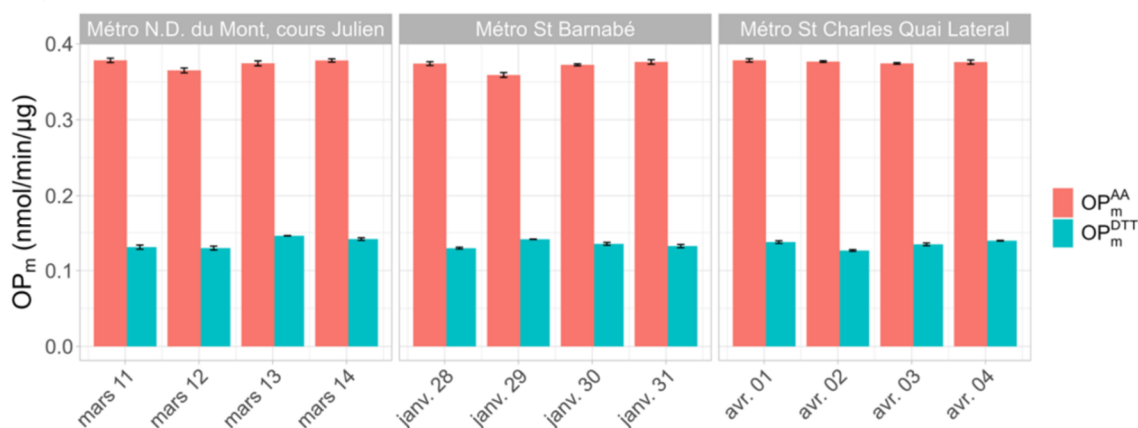


Figure 14 : Réactivité spécifique des particules (P_{Om}) du métro pour le PO AA et le PO DTT (Source : IGE)

La comparaison de ces résultats obtenus au niveau des stations du métro de la RTM avec des sites en air ambiant de typologies différentes, montre en Figure 15 que :

- Pour le test DTT, la réactivité spécifique des particules du métro est similaire à celles des particules en proximité de trafic routier (secteur avec la plus forte réactivité).
- Pour le test AA, la réactivité spécifique des particules du métro est presque 2 fois supérieure à celle des particules issues du trafic routier.

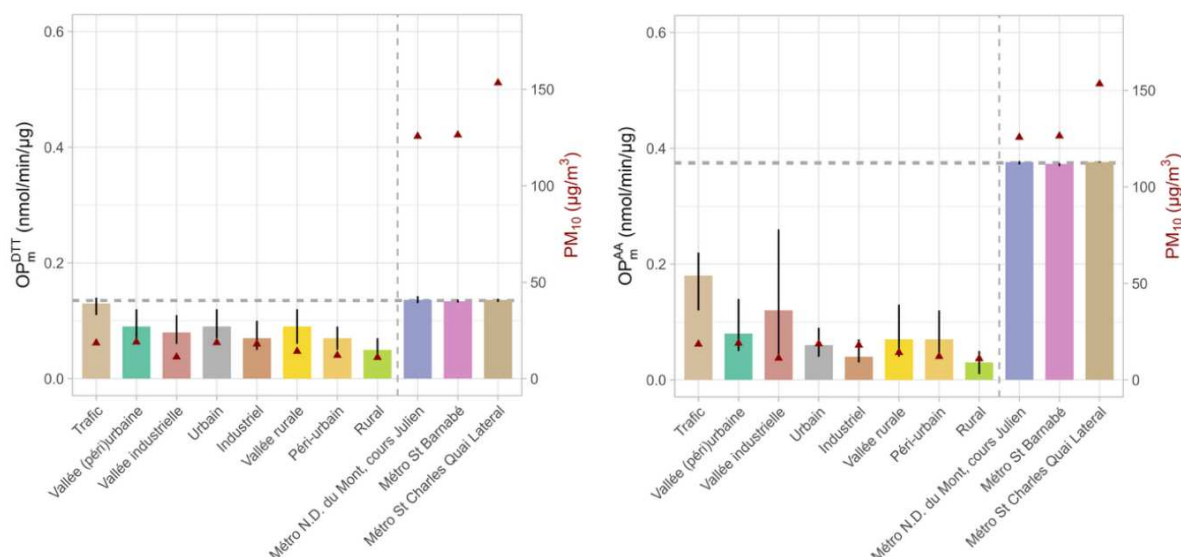


Figure 15 : Comparaison de la réactivité spécifique des particules du métro pour le PO AA et le PO DTT par rapport aux particules issues d'autres typologies de sites (moyennées pour des séries annuelles et plusieurs sites par typologie) (Source : IGE)

Les particules du métro présentent un potentiel oxydant DTT, dans la valeur haute des particules fines mesurées sur d'autres typologies de site en France.

Le potentiel oxydant AA est quant à lui près de 2 fois supérieur à ceux des autres typologies de site.

La composition majoritairement métallique des concentrations en PM₁₀ semble à l'origine d'un fort potentiel oxydant, que ce soit avec le test DTT ou le test AA.

VI.1.3.2 Exposition humaine par inhalation de l'air échantillonné,

Les mesures de potentiel oxydant exprimées par m³ d'air (PO_v) sont représentatives de l'exposition des usagers lors de leur passage dans l'enceinte du métro. Elles montrent des concentrations stables au cours du temps et entre les stations de métro (Figure 16).

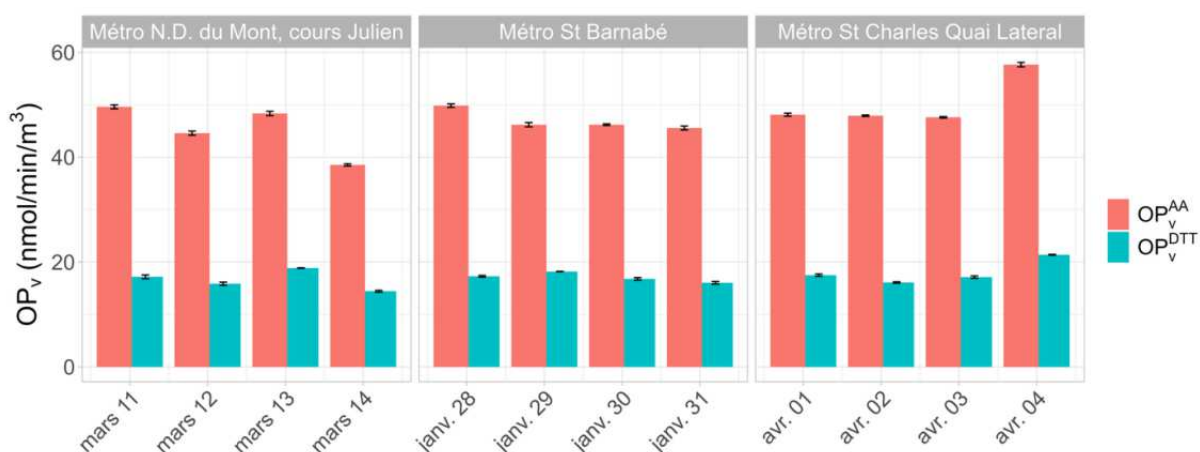


Figure 16 : Potentiel oxydant auquel les usagers sont exposés (PO_v) par inhalation dans le métro pour le PO AA et le PO DTT - Graphique IGE

La comparaison des résultats du potentiel oxydant représentatif de l'exposition des usagers du métro à ceux des différentes typologies de sites en air ambiant est présentée dans la Figure 17.

Le potentiel oxydant DTT, auquel les usagers sont exposés, est significativement supérieur au potentiel oxydant DTT auquel est exposée la population dans les autres typologies de sites de mesure.

Cela est lié au fait que les niveaux de particules fines PM₁₀ sont significativement supérieurs dans

l'enceinte du métro qu'en air ambiant. A potentiel oxydant spécifique équivalent, les usagers sont donc exposés à davantage d'oxydants.

Pour le potentiel oxydant AA, l'exposition des usagers est encore plus importante puisque la réactivité spécifique des particules du métro était déjà plus importante et que les concentrations en PM10 sont significativement plus importantes qu'en air ambiant.

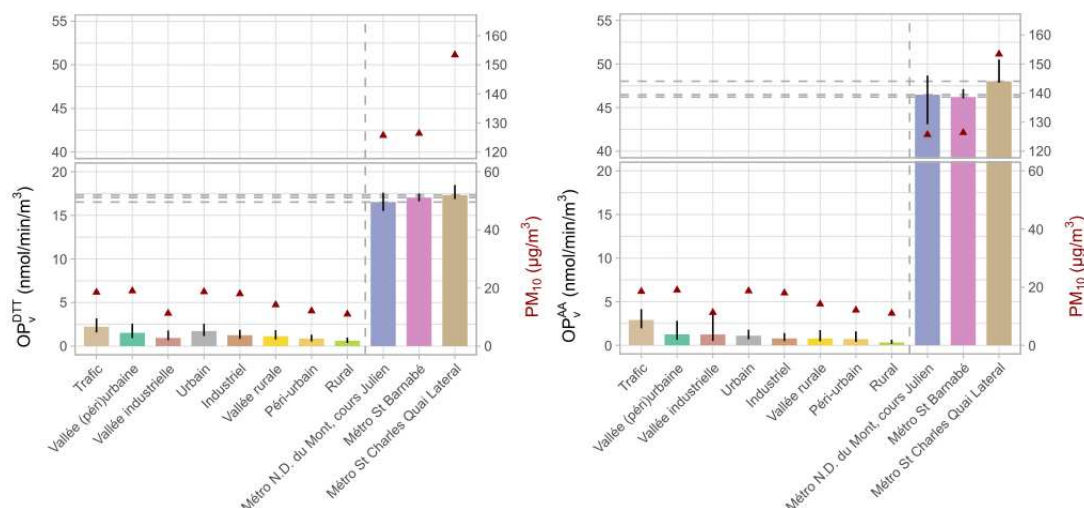


Figure 17 : Comparaison du potentiel oxydant représentatif de l'exposition des usagers du métro pour le PO AA et le PO DTT par rapport aux particules issues d'autres typologies de sites - Graphique IGE

Ces niveaux sont très nettement supérieurs à ceux mesurés en air ambiant, mais tout à fait compatibles avec les valeurs obtenues dans d'autres contextes ferroviaires en France et au niveau international (communication orale IGE, ⁷).

La spécificité de ce type d'environnement doit être liée à la réactivité spécifique des particules métallique dont certaines présentent un potentiel oxydant élevé et qui sont présentes en quantité importantes dans les EFS, car émises lors des phases l'abrasion des pièces mécaniques du matériel roulant.

Comparativement aux sites de mesure en air ambiant, la réactivité spécifique les particules du métro figurent parmi les plus importantes : le PO DTT atteint des niveaux élevés et le PO AA y est environ deux fois plus élevé.

Les concentrations en PM10 à l'intérieur de l'enceinte du métro étant significativement supérieures aux concentrations en air ambiant, les niveaux de potentiel oxydant représentatif de l'exposition des usagers du métro est significativement plus important que celui auquel la population générale est exposée en air ambiant.

Les mesures de potentiel oxydant dans le métro de Marseille révèlent une haute réactivité spécifique des particules dans cette enceinte. Il en résulte un potentiel oxydant, représentatif de l'exposition des usagers, plus important que celui de la population générale exposée en air ambiant, indifféremment de la typologie de sites de mesure.

Ces résultats sont en cohérence avec ceux obtenus dans d'autres enceintes ferroviaires souterraines françaises.

⁷ Projet ToxinTransport : Caractérisations toxicologiques *in vitro*, chimiques et physiques de particules prélevées dans l'air d'habitacles de transport en roulage (p.53, p.76) : https://librairie.ademe.fr/index.php?controller=attachment&id_attachment=5274

VI.1.4 Paramètres de confort (CO₂, Humidité, Température)

En raison d'un dysfonctionnement, mis en évidence post-campagne, les données des paramètres de confort sur les quais ne sont pas disponibles pour cette campagne 2025.

VI.2 Campagne de mesures dans les rames

VI.2.1 Niveaux de concentration en particules fines

L'ensemble des données statistiques des mesures de particules fines est présenté en Annexe 6.

Les concentrations moyennes en particules fines dans les rames de la ligne 1 sont respectivement de 88 µg/m³ en PM10 et 73 µg/m³ en PM2.5 et pour la ligne 2 de 81 µg/m³ en PM10 et 69 µg/m³ en PM2.5 (Tableau 16). Ces concentrations en PM10 et PM2.5 sont globalement inférieures à celles observées en 2023 mais supérieures à celles de la campagne de 2021.

Tableau 16 : Concentrations moyennes (en µg/m³) en PM10 et PM2.5 dans les rames des lignes 1 et 2

Ligne	2025		2023		2021	
	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
Ligne 1	88	73	114	76	63	53
Ligne 2	81	69	113	73	87	76
Moyenne	84	71	114	75	75	65

VI.2.1.1 PM10

Les concentrations moyennes en PM10 dans les rames (84 µg/m³) sont deux fois moins importantes que celles observées en période de pointe sur les quais des stations de métro échantillonnées (171 µg/m³).

Les concentrations PM10, inférieures dans les rames par rapport aux 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 différentes stations de métro souterraines traversées qui peuvent potentiellement présenter des concentrations inférieures à celles retenues pour cette campagne.

VI.2.1.2 PM2.5

Le constat est différent pour les PM2.5 : les concentrations moyennes dans les rames (71 µg/m³) sont supérieures à celles observées en période de pointe sur les quais des stations de métro échantillonnées (52 µg/m³).

Dans les rames, la proportion moyenne de PM2.5 dans les PM10 est de l'ordre de 80 %, ce qui est significativement plus important que sur les quais (autour de 30 %).

Ces niveaux plus importants de PM2.5 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 PM10 dans les rames sont significativement inférieures à celles sur les quais alors que les concentrations en PM2.5 sont, elles, légèrement supérieures.

La proportion de PM2.5 dans les PM10 est plus importante dans les rames que sur les quais des métros.

L'un des facteurs principaux pouvant expliquer cette différence entre les PM10 et PM2.5 dans les rames de métro est lié à l'efficacité du système de filtration de l'air entrant des rames qui retient essentiellement les particules les plus grosses, les PM10.

VI.2.2 Concentration en métaux

L'ensemble des résultats de concentrations en métaux sont disponibles en Annexe 7, et la moyenne des résultats est présentée dans le Tableau 17.

Tableau 17 : Concentrations moyennes en métaux dans les rames de métro (en ng/m³)

Polluant	Concentration moyenne (ng/m ³) dans les PM10 2025		Concentration moyenne (ng/m ³) dans les PM10 2023		Concentration moyenne (ng/m ³) dans les PM10 2021	
	Ligne 1	Ligne 2	Ligne 1	Ligne 2	Ligne 1	Ligne 2
Aluminium	< 970*	< 958*	< 1030*	< 1033*	< 3310*	< 3310*
Antimoine	< 10*	< 10*	< 10*	< 10*	< 41*	< 41*
Arsenic	< 4*	< 4*	< 5*	10*	< 16.6*	< 16.6*
Baryum	< 97*	< 96*	< 103*	< 103*	< 414*	< 414*
Cadmium	< 4*	< 4*	< 5*	< 5*	< 16.6*	< 16.6*
Calcium	< 3878*	< 3832*	< 5000*	< 5000*	< 16552*	< 16552*
Chrome	39	< 20*	< 20*	< 20*	< 83*	< 83*
Cuivre	2017	2387	2843	3466	1917	2411
Fer	23998	26927	35217	38560	24711	33703
Manganèse	< 97*	< 96*	< 103*	< 140*	< 414*	< 414*
Nickel	< 97*	< 96*	< 103*	< 103*	< 414*	< 414*
Plomb	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*	< 0.04*	< 0.04*
Potassium	< 1*	< 1*	< 1*	< 1*	< 3.3*	< 3.3*
Zinc	< 970*	< 958*	< 1030*	< 1033*	< 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 le fer et le cuivre présentent des concentrations supérieures aux limites de quantification sur l'ensemble des prélèvements réalisés.

Il s'agit, comme démontré précédemment, des ETM les plus présents sur les quais des stations de métro échantillonnées. Pour le chrome, un seul prélèvement s'est avéré supérieur à la limite de quantification sur un prélèvement PM10.

Les concentrations moyennes des métaux obtenues dans les rames sur la fraction PM10 sont inférieures à celles du quai de la station de métro échantillonnée correspondante :

- Ligne 1 :
 - Fer : 24 000 ng/m³, pour une concentration moyenne sur le quai de la station de St-Barnabé de 52 300 ng/m³,

- Cuivre : 2 000 ng/m³, pour une concentration moyenne sur le quai de la station de St-Barnabé de 3 900 ng/m³,
- Ligne 2 :
 - Fer : 27 000 ng/m³, pour une concentration moyenne sur le quai de la station de Notre-Dame du Mont de 40 300 ng/m³,
 - Cuivre : 2 400 ng/m³, pour une concentration moyenne sur le quai de la station de Notre-Dame du Mont de 2 800 ng/m³.

Les concentrations en métaux (fer et cuivre) dans les rames représentent entre 45 et 70% des concentrations sur les quais correspondants. Ceci est cohérent avec ce qui est observé sur la concentration massique des PM10 (50 %).

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 différentes stations de métro souterraines traversées peuvent potentiellement présenter des concentrations inférieures à celles des stations retenues pour cette campagne.

Deux substances principales, le fer et le cuivre, ont pu être quantifiées dans les rames. Il s'agit des éléments présents en plus grande quantité 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 (45 à 70 % des concentrations obtenues sur les quais).

Comme pour les PM10, 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 grossières.

VI.2.3 Paramètres de confort

Les niveaux en CO₂ dans les rames des métros lors des heures de pointe des jours ouvrés montrent des concentrations moyennes de 670 ppm dans les rames de la ligne 1 et 760 ppm pour la ligne 2 (Figure 18).

Les valeurs maximales observées, respectivement de 1 166 ppm pour la ligne 1 et de 1 157 ppm pour la ligne 2 sont inférieures à la valeur d'action rapide du HCSP dans les établissements recevant du public de 1 500 ppm mais dépassent la valeur repère de 800 ppm.

Approximativement 25% des concentrations (mesurées au pas de temps de la minute) dépassent 800 ppm, la valeur recommandée par le HCSP dans les établissements recevant du public (valeur repère d'aide à la gestion comme objectif d'un renouvellement de l'air satisfaisant des locaux occupés, par apport d'air neuf).

Alors que les concentrations moyennes 2025 sont similaires à celles de 2023, les concentrations maximales au pas de temps minute sont significativement moins importantes.

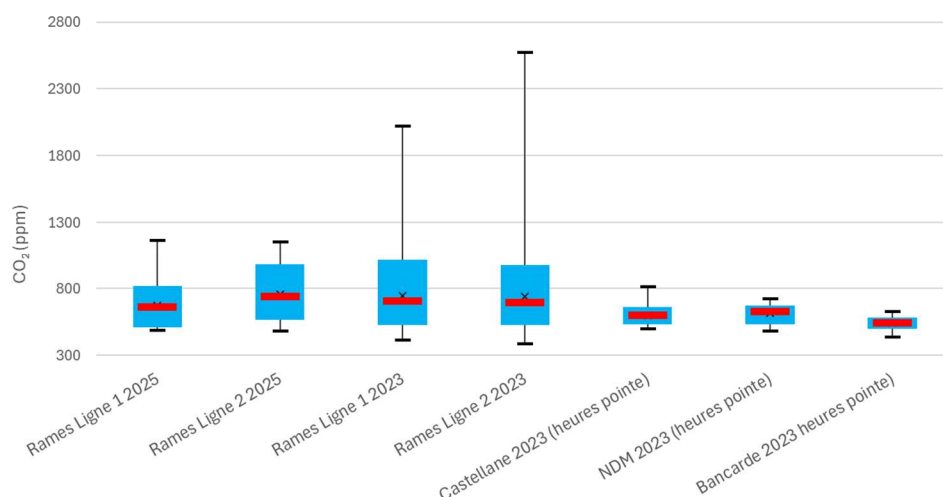


Figure 18 : Box-plot des concentrations en CO₂ dans les rames en comparaison des trois stations échantillonnées

Lors des périodes de pointe, les concentrations moyennes de CO₂ dans les rames montrent des concentrations moyennes inférieures à valeur repère du HCSP dans les Etablissements Recevant du Public. Néanmoins, près de 25 % des valeurs ont dépassé cette valeur repère dans les rames des deux lignes de métro sans pour autant dépasser la valeur d'action rapide (1 500 ppm).

Il s'avère donc que lors des périodes de forte occupation, les débits de renouvellement d'air pourraient certes être améliorés pour que les concentrations en CO₂ s'approchent de celles observées sur les quais mais ces dernières restent toutefois contenues pour un environnement intérieur qui peut s'avérer ponctuellement très fréquenté.

VII COMPARAISON AUX CAMPAGNES PRECEDENTES

VII.1 Particules fines sur les quais

VII.1.1 Rappels des études menées entre 2010 et 2023

Cinq précédentes campagnes de mesures ont été réalisées dans le métro Marseillais en 2010, 2016, 2019, 2021 et 2023, dont certaines sur des périodes de mesure beaucoup plus longues (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 18.

Tableau 18 : Paramètres de mesures des campagnes de 2010 à 2023

Année	Paramètre	Stations							Rames
		St-Charles	Castellane	Fourragère	Blancarde	Réformés	Périer	Notre-Dame-du-Mont	
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 (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 (6 mois)	Métaux	X			X				
	PM ₁₀	X			X*				
	PM _{2,5}	X			X*				
	Particules ultrafines	X			X				
	COV	X			X				
2021 (2 semaines dans chaque station)	Métaux		X			X	X		X
	PM ₁₀		X			X	X		X
	PM _{2,5}		X			X	X		X
	CO ₂		X			X	X		X
	Conditions hygrother- miques		X			X	X		X
2023 (2 semaines dans chaque station)	Métaux		X		X			X	X
	PM ₁₀		X		X			X	X
	PM _{2,5}		X		X			X	X
	CO ₂		X		X			X	X
	Conditions hygrother- miques		X		X			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.

VII.1.2 Comparaison des concentrations moyennes en PM10 entre la campagne 2025 et les campagnes précédentes

Les concentrations en PM10 de chaque campagne de mesure respectent toutes la valeur guide C_{sout-Lim} de l'ANSES dans les EFS de 480 µg/m³ pour une heure d'exposition (Tableau 19).

Les concentrations 24h/24h en PM10 à la station St-Charles ont présenté une augmentation en PM10 de 27 %, entre 2019 et 2025. Préalablement, entre 2010 et 2016, une augmentation de 14 % a été observée puis de 6 % entre 2016 et 2019. Cela représente une augmentation moyenne de 4 % par an.

Pour la station Notre-Dame-du-Mont, les concentrations 24h/24h a présenté une augmentation de 17 % entre 2023 et 2025, soit 8,5 % par an.

A la station Castellane, entre 2021 et 2023, une augmentation de 8 % est observée et de 39 % entre 2010 et 2021, soit 5 % par an.

En résumé, il est observé une augmentation systématique des concentrations en PM10 de depuis la campagne de mesure de 2010.

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						
			Castellane	Notre-Dame-du-Mont	Blancarde	Réformés	Périer	St-Charles	St-Barnabé
PM10	Période 24h/24h	2025	-	132**	-	-	-	115/119*	97
		2023	136	113	93	-	-	-	-
		2021	125	-	-	85	123	-	-
		2019	-	-	-	-	-	94	-
		2016	-	-	-	-	-	89	-
		2010	90	-	-	-	-	78	-
	Période d'ouverture du métro	2025	-	143	-	-	-	145/153*	122
		2023	155	122	105	-	-	-	-
		2021	145	-	-	96	144	-	-
		2019	-	-	-	-	-	105	-
		2016	-	-	-	-	-	96	-
		2010	104	-	-	-	-	93	-
PM2.5	Période 24h/24h	2025	-	40	-	-	-	39	36
		2023	48	40	32	-	-	-	-
		2021	50	-	-	24	37	-	-
	Période d'ouverture du métro	2025	-	48	-	-	-	45	40
		2023	54	43	35	-	-	-	-
		2021	57	-	-	27	43	-	-

*concentrations sur le quai extérieur / central de la station St-Charles

** La concentration moyenne 24h/24h est influencée par une augmentation importante nocturne à cette station sur la période de mesure correspondante

Une tendance à l'augmentation des concentrations PM10 est observée d'année en année sur toutes les stations échantillonnées. Elle peut être expliquée par la progression de la fréquentation du réseau, le vieillissement du matériel roulant et l'accumulation progressive de particules dans le réseau, remises en suspension à chaque passage de métro.

Les stations de Castellane Notre-Dame-du-Mont, Saint-Charles, et Périer sont les stations avec les niveaux de particules les plus importants sur la période d'ouverture du métro.

VII.1.3 Comparaison des profils horaires

Les profils horaires en PM10 de cette étude 2025 sont comparés à ceux obtenus sur les années précédentes aux mêmes stations (Figure 19).

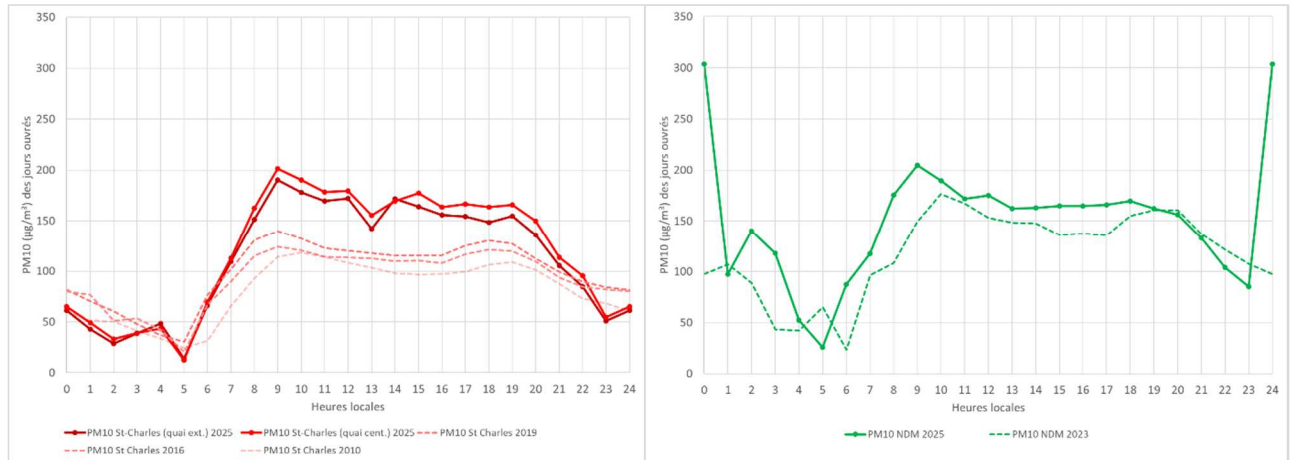


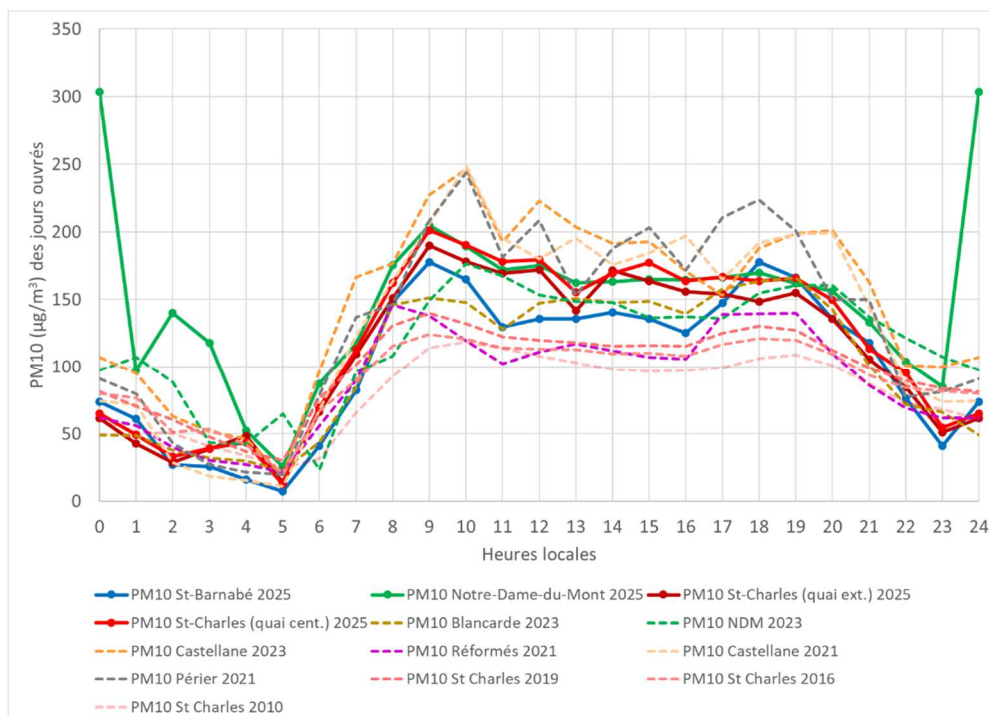
Figure 19 : Comparaison des profils moyens journaliers en PM10 des campagnes précédentes pour les stations St-Charles et Notre-Dame-du-Mont - périodes de jours ouvrés

On observe que le profil moyen journalier à la station St-Charles a évolué au fil du temps : en 2025 les niveaux sont globalement plus importants que les années antérieures, et restent plus constants au cours de la journée. En fin de soirée, les concentrations sont plus faibles en 2025 en raison de la fermeture du réseau à partir de 21h du lundi au jeudi.

Sur Notre-Dame-du-Mont, il est observé des niveaux plus importants en 2025 qu'en 2023, avec un pic matinal plus tôt et une pointe moins marquée en fin d'après-midi. Dans la nuit, une hausse significative des concentrations est mise en évidence sur le profil journalier, en lien avec l'impact à 2 reprises de travaux de maintenance nocturne.

La Figure 20 présente les profils moyens journaliers (jours ouvrés) de l'ensemble des sites de mesure de PM10 de 2010 à 2025.

Figure 20 : Comparaison des profils moyens journaliers en PM10 des campagnes 2010 à 2025 - jours ouvrés



Les profils moyens journaliers des stations de St-Charles et Notre-Dame-du-Mont se rapprochent de ceux de Castellane et Périer mais sont moins contrastés, avec des niveaux plus faibles et une moindre mise en évidence des pics de fréquentation du matin et de fin d'après-midi.

Le profil de la station St-Barnabé se rapproche quant à lui à celui de la station Blancarde (station similaire, plus récente avec une configuration intérieure similaire), avec des niveaux supérieurs et une plus forte influence des pics de fréquentation de la journée.

L'évolution des PM₁₀ à la station St-Charles lors des jours ouvrés montre des concentrations significativement supérieures à celles des années antérieures et plus constantes au cours de la journée. Il en est de même pour la station Notre-Dame-du-Mont.

Les stations St-Barnabé et de la Blancarde, aux caractéristiques communes, présentent un profil intermédiaire.

VII.1.4 Comparaison aux concentrations dans les enceintes ferroviaires françaises

Le guide de recommandations pour les enceintes ferroviaires souterraines de l'INERIS⁸ 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 françaises⁹ 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 2025 sur le métro de la RTM sont du même ordre que les concentrations moyennes dans les EFS françaises.

Les concentrations moyennes des 3 stations de mesures de la campagne 2025 sont cohérentes avec les concentrations moyennes dans les EFS françaises.

Quelle que soit la station, et l'année de la campagne, les concentrations intérieures en PM₁₀ sont systématiquement significativement supérieures (3 à 7 fois) à celles des stations d'air ambiant de Marseille sur les mêmes périodes.

La station Castellane présente pour toutes les campagnes des concentrations significativement plus importantes que celles des autres stations de métro. Les stations St-Charles, Notre-Dame-du-Mont et Périer sont celles présentant des concentrations parmi les plus importantes du réseau RTM.

VII.2 Concentration des métaux au niveau des 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 2025 ont été réalisés sur une durée et un pas de temps plus courts lors des campagnes de mesure de 2016 et 2019 menées par AtmoSud :

- 2025, 2023 et 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.

⁸ Guide de recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines – INERIS 2020

⁹ Qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines (EFS) en France – AtmoSud 2021

La Figure 21 présente la comparaison des concentrations moyennes cumulées des différents métaux mesurés lors des précédentes campagnes de mesures.

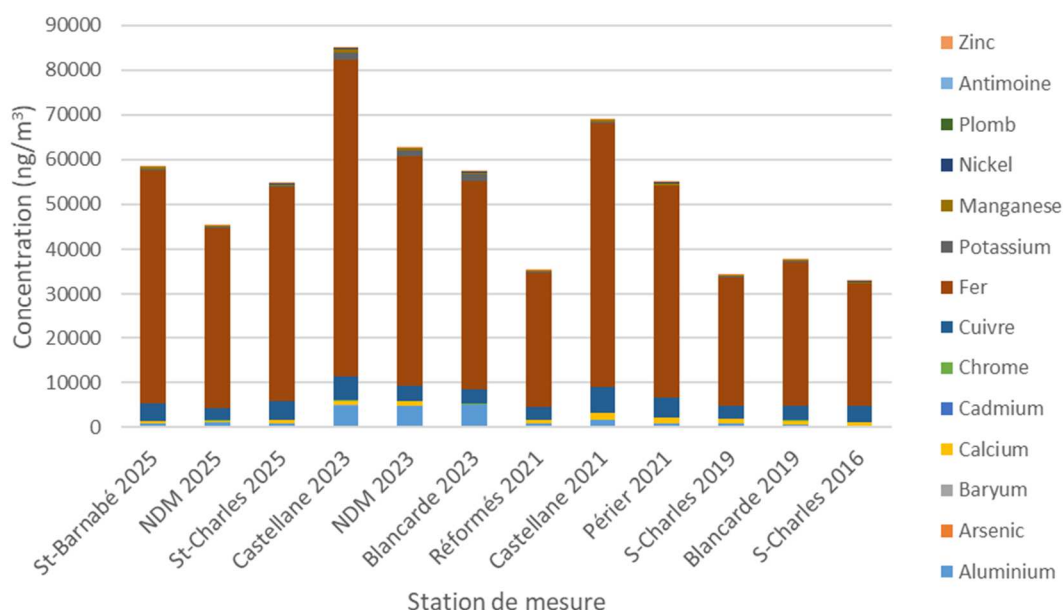


Figure 21 : Comparaison des concentrations moyennes cumulées des 14 métaux mesurés entre les campagnes 2016, 2019, 2021, 2023 et 2025

Le tableau détaillant les concentrations chiffrées de l'ensemble des campagnes de mesure est présenté en ANNEXE 4.

La concentration cumulée en métaux de la station Notre-Dame-du-Mont en 2025 est plus faible de 30 % que celle de la campagne de 2023. Cette différence est en partie due à l'augmentation significative des concentrations en aluminium sur l'ensemble des stations en 2023.

La concentration cumulée de la station St-Barnabé est similaire à ce qui a été observé en 2023 à la Blancarde, (station similaire en termes de volume, d'année de construction et de position sur le trajet de la ligne 1).

La concentration cumulée en métaux à la station St-Charles est significativement supérieure (+ 60%) à ce qui a été relevé en 2019 et 2016 mais significativement inférieure aux niveaux observés à la station Castellane. Cette dernière montre les concentrations les plus importantes en métaux de l'ensemble des mesures réalisées dans le métro de Marseille depuis 2010.

A l'exception de la station Notre-Dame-du-Mont, il est globalement observé une augmentation des concentrations en métaux au cours du temps, en cohérence avec celle des PM10.

Cette augmentation progressive des concentrations en métaux au cours des années semble vraisemblablement liée au vieillissement du matériel roulant et à l'accumulation progressive de particules dans l'ensemble du réseau, qui sont systématiquement remises en suspension lors du passage des métro.

La proportion des différents métaux montre que, quelle que soit l'année et la station, le Fer (Fe) est l'élément trace métallique le plus présent. Le cuivre (Cu) est en concentration significative comme les autres années.

Les concentrations observées sont de l'ordre de ce qui est observé dans les enceintes ferroviaires souterraines françaises. Les concentrations en fer, cuivre, nickel et arsenic correspondent aux valeurs hautes des gammes de concentrations observées dans les autres EFS françaises.

La proportion des concentrations en métaux reste similaire quelle que soit la station et la campagne de mesure, avec le fer (Fe) comme élément principal.

En 2025, les concentrations en métaux de la station Notre-Dame-du-Mont se sont avérées significativement inférieures à celles de 2023 qui montrait une concentration plus importante qu'à l'accoutumée en aluminium (Al).

A l'échelle de l'ensemble des campagnes de mesures, c'est la station Castellane qui présente les concentrations en métaux systématiquement les plus importantes.

L'évolution des concentrations en métaux aux différentes stations montre une tendance à l'augmentation au cours des années, à l'exception de Notre-Dame-du-Mont, et ce en lien probable avec le vieillissement du matériel roulant.

Les concentrations en métaux sont du même ordre que celles observées dans les autres enceintes ferroviaires souterraines françaises, 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.

VIII CONCLUSION

Les enceintes ferroviaires souterraines sont des environnements où sont présents les polluants issus du déplacement du matériel roulant, des occupants et de l'air extérieur. Cinq précédentes campagnes de mesures en 2010, 2016, 2019, 2021 et 2023 dans le métro Marseillais, ont permis de caractériser sur plusieurs stations divers polluants (particules fines PM10 et PM2,5, métaux traces et polluants gazeux organiques et inorganiques).

En 2025, cette nouvelle campagne de mesures spécifiques a comme premier objectif de poursuivre la surveillance de la qualité de l'air du métro de Marseille, par la mise en place du protocole de mesure harmonisé à l'échelle nationale. Il consiste à mesurer les particules fines, 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 PM10 : St-Barnabé sur la ligne 1, Notre-Dame du Mont sur la Ligne 2, et St-Charles au croisement des lignes 1 et 2.

Le deuxième objectif de cette campagne est d'expérimenter :

- la mise en place de mesures simultanées de particules fines sur un quai extérieur et sur le quai central de la station S-Charles pour évaluer les différences de concentrations,
- la mise en place des premières mesures de potentiel oxydant sur les particules prélevées sur les quais des trois stations échantillonnées.

► Des concentrations en PM10 plus élevées sur les quais des stations Notre-Dame-du-Mont et St-Charles mais qui respectent la valeur de gestion limite dans les EFS

L'ensemble des concentrations horaires maximales en PM10 aux trois stations de métro échantillonnées dépassent la valeur de gestion $C_{\text{sout_OMS}}$ de $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mais elles sont significativement inférieures au $C_{\text{sout_Lim}}$ de $480 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à ne pas dépasser pour une exposition d'une heure.

Les concentrations moyennes sur les heures d'ouverture (5h à 1h) s'échelonnent de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station S-Barnabé (ligne 1) à 145 et $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aux stations Notre-Dame-du-Mont et St-Charles (ligne 2), cette dernière ayant montré une augmentation de concentration de 43 % par rapport à la campagne de mesures en 2019.

► L'expérimentation de la mise en marche de la ventilation (quai + tunnels adjacents) permet une réduction significative des concentrations en PM10

La mise en marche aux heures de pointe du système de ventilation uniquement de la station St-Charles n'a pas occasionné de différence significative sur les concentrations en particules fines et métaux.

En revanche, la mise en marche simultanée des systèmes de ventilation des tunnels adjacents en complément de celui du quai de la station St-Charles s'avère efficace puisque cela permet la diminution des concentrations en PM10 de 20 % sur ces périodes d'heures de pointe. Ces baisses de concentrations sur les heures de pointe ne permettent pas pour autant de passer en dessous de la valeur de gestion $C_{\text{sout_OMS}}$.

► Des concentrations en PM2.5 sur les quais supérieures à la valeur de gestion

Pour les PM2.5, les concentrations horaires maximales des stations Notre-Dame-du-Mont et St-Charles sont légèrement supérieures à la valeur de gestion $C_{\text{sout_OMS}}$ de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ alors que celles de St-Barnabé la respectent.

Les concentrations moyennes sur la période d'ouverture à la station Notre-Dame-du-Mont ($48 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont légèrement plus importantes qu'à St-Charles ($45 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et St-Barnabé ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et sont stables par rapport à celles des campagnes 2023 et 2021.

Les PM_{2,5} représentent entre 31 % et 33 % des PM10. L'évolution des concentrations au cours du temps

suit celle des PM10.

‣ **Des concentrations en métaux plus élevées sur le quai de la station St-Barnabé**

La proportion des métaux les uns par rapport aux autres reste similaire quelle que soit la station, avec le fer (Fe) comme élément le plus présent (89 %) suivi du cuivre (6 à 8 %).

Les concentrations à St-Barnabé sont plus importantes qu'aux stations St-Charles et Notre-Dame du Mont. Une augmentation progressive des concentrations en métaux est globalement observée au cours des années, à l'exception de celles mesurées à la station Notre-Dame-du-Mont qui diminuent entre 2023 et 2025.

‣ **Les premières mesures de potentiel oxydant montrent des niveaux significativement plus importants qu'en air ambiant.**

Les mesures de potentiel oxydant dans le métro de Marseille font état d'une haute réactivité spécifique des particules du métro. Cela signifie que la composition des particules fines présentes dans l'enceinte ferroviaire possède un fort potentiel oxydant.

Les concentrations en particules fines étant plus importantes qu'en air ambiant, le potentiel oxydant représentatif de l'exposition des usagers du métro est significativement plus important que celui auquel la population générale est exposée dans les différentes typologies de sites de mesure en air ambiant. Ces résultats seraient cependant similaires à ceux obtenus dans d'autres enceintes ferroviaires souterraines françaises.

‣ **Un confinement qui pourrait être amélioré dans les rames**

Les concentrations moyennes de CO₂ dans les rames lors des périodes de pointe montrent des concentrations moyennes inférieures à valeur repère du HCSP dans les établissements recevant du public (800 ppm).

Néanmoins, près de 25 % des valeurs (moyenne sur 1 minute) ont dépassé cette valeur repère dans les rames des deux lignes de métro. Il s'avère donc que lors des périodes de forte occupation, les débits de renouvellement d'air des rames pourraient être améliorés afin de réduire le confinement.

‣ **Dans les rames, des concentrations en PM10 inférieures à celles des quais mais supérieures en PM2.5**

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 PM2.5 sont légèrement supérieures. La proportion de PM2.5 dans les PM10 est donc plus importante dans les rames. Ceci peut être expliqué par les filtres grossiers des prises d'air des rames, principalement efficaces pour les particules les plus grosses, réduisant ainsi l'entrée des PM10 mais moins celle des PM2.5.

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

Les deux seules substances ayant pu être quantifiées dans les rames sont le fer et le cuivre, soit les éléments parmi 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 Biotope.

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 HIERARCHISATION DES QUAIS (DONNEES 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

Remarque : Les mesures ponctuelles réalisées pour hiérarchiser les stations en fonction des niveaux en PM10 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 souterraines, toutes soumises à une densité de particules similaire.

Tableau 20 : 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	13700
M1	Cinq Avenues	1977	25	7860	Non	Naturelle			2	11000
M1	Réformés	1977	15	5500	Non	Naturelle			2	16400
M1	Saint Charles	1977	27	6600	Non	Naturelle	Ligne M2 dans le même volume	Gare SNCF, parking	4	103400
M1	Colbert	1978	20	5400	Non	Naturelle			2	9800
M1	Vieux port	1978	17	4800	Non	Naturelle			2	28000
M1	Estrangin	1978	21	3200	Non	Naturelle			2	19400
M1	Castellane M1	1978	12	4300	Non	Naturelle	Ligne M2 à un niveau différent	Carrefour routier, parking	2	77300
M1	Baille	1986	12	3400	Non	Naturelle			2	13800
M1	Timone	1986	18	2900	Non	Naturelle			2	27600
M1	Blancarde	2010	21	9900	Non	Naturelle			2	11400
M1	Louis Armand	2010	10	8568	Non	Naturelle			2	4200
M1	Saint Barnabé	2010	18	6750	Non	Naturelle			2	5200
M1	Fourragère	2010	16	9700	Non	Naturelle			2	9700

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	17000
M2	Désirée Clary	1987	18	2950	Non	Naturelle			2	13500
M2	Joliette	1984	14	4424	Non	Naturelle			2	25600
M2	Jules Guesde	1984	13	4241	Non	Naturelle			2	8200
M2	Saint Charles M2	1984	27	6600	Non	Naturelle	Ligne M1 dans le même volume	Gare SNCF	4	103400
M2	Noailles	1984	15	4080	Non	Naturelle	Ligne T1 à un niveau différent		2	29600
M2	Notre Dame du Mont	1984	25	5880	Non	Naturelle			2	17500
M2	Castellane M2	1984	17	5810	Non	Naturelle	Ligne M1 à un niveau différent	Parking souterrain carrefour routier	2	77300
M2	Périer	1986	13	3600	Non	Naturelle			2	18600
M2	Rond Point Prado	1986	10	4060	Non	Naturelle		Carrefour routier	2	44300

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	15 500

Tableau 21 : Caractéristiques du 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

Tableau 22 : Résultats de 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	11-déc.	16h30-16h45	31	586	22,1	63,8	
M1	Chartreux	Milieu du quai	1m 50	22-janv.	17h01-17h20	50				
M1	Chartreux	Milieu du quai	1m 50	13-mars	7h47-8h02	46	528	19	49,2	42,3
M1	Cinq Avenues	Milieu du quai	1m 50	11-déc.	16h46-17h05	72	546	20	65	
M1	Cinq Avenues	Milieu du quai	1m 50	22-janv.	17h23-17h38	54				
M1	Cinq Avenues	Milieu du quai	1m 50	13-mars	7h27-7h44	44	489	19	49,3	56,7
M1	Réformés	Milieu du quai	1m 50	11-déc.	17h07-17h23	69	567	22,4	55,9	
M1	Réformés	Milieu du quai	1m 50	22-janv.	17h41-17h57	61				
M1	Réformés	Milieu du quai	1m 50	22-févr.	8h52-9h07	50	529	20,3	64,8	60,0
M1	Saint Charles	Milieu du quai	1m 50	11-déc.	17h24-17h40	76	594	21,4	62,6	
M1	Saint Charles	Milieu du quai	1m 50	22-janv.	17h59-18h15	61				
M1	Saint Charles	Milieu du quai	1m 50	22-févr.	8h32-8h47	56	555	20,5	65,1	64,3
M1	Colbert	Milieu du quai	1m 50	11-déc.	17h42-17h57	61	594	19,9	65,4	
M1	Colbert	Milieu du quai	1m 50	22-janv.	18h17-18h32	57				
M1	Colbert	Milieu du quai	1m 50	22-févr.	8h10-8h25	49	499	499	19,7	55,7
M1	Vieux-Port	Milieu du quai	1m 50	11-déc.	17h58-18-16	59	565	20,4	63,6	
M1	Vieux-Port	Milieu du quai	1m 50	22-janv.	18h34-18h49	55				
M1	Vieux-Port	Milieu du quai	1m 50	22-févr.	7h51-8h06	56	489	19,8	62,4	56,7
M1	Estrangin	Milieu du quai	1m 50	11-déc.	18h18-18h33	75	591	21,1	61,9	
M1	Estrangin	Milieu du quai	1m 50	13-févr.	18h14-18h31	59	607	20,6	46,3	
M1	Estrangin	Milieu du quai	1m 50	22-févr.	7h31-7h46	45	476	19,8	62,4	59,7
M1	Castellane	Milieu du quai	1m 50	11-déc.	18h35-18h51	81	713	22,8	60,2	
M1	Castellane	Milieu du quai	1m 50	25-janv.	17h29-17h44	57	679	22,4	49	
M1	Castellane	Milieu du quai	1m 50	22-févr.	7h13-7h28	45	500	21,4	59,5	61,0
M1	Baille	Milieu du quai	1m 50	12-déc.	17h00-17h15	67	(-)	(-)	(-)	
M1	Baille	Milieu du quai	1m 50	24-janv.	15h47-19h02	78				
M1	Baille	Milieu du quai	1m 50	23-févr.	7h10-7h25	34	436	21,9	44	59,7
M1	Timone	Milieu du quai	1m 50	12-déc.	17h17-17h32	58	(-)	(-)	(-)	
M1	Timone	Milieu du quai	1m 50	24-janv.	18h13-18h28	78				
M1	Timone	Milieu du quai	1m 50	23-févr.	7h32-7h47	44	478	21,3	38,7	60,0
M1	Blancarde	Milieu du quai	1m 50	12-déc.	17h33-17h52	54	(-)	(-)	(-)	
M1	Blancarde	Milieu du quai	1m 50	24-janv.	17h53-18h08	64				
M1	Blancarde	Milieu du quai	1m 50	23-févr.	7h49-8h04	32	465	19,9	42,4	50,0
M1	Louis Armand	Milieu du quai	1m 50	12-déc.	17h53-18h11	74	(-)	(-)	(-)	
M1	Louis Armand	Milieu du quai	1m 50	24-janv.	17h34-17h49	58				
M1	Louis Armand	Milieu du quai	1m 50	23-févr.	8h08-8h23	37	472	21,1	39,5	56,3
M1	Saint Barnabé	Milieu du quai	1m 50	12-déc.	18h12-18h28	79	(-)	(-)	(-)	
M1	Saint Barnabé	Milieu du quai	1m 50	24-janv.	17h16-17h31	65				
M1	Saint Barnabé	Milieu du quai	1m 50	23-févr.	8h26-8h41	45	481	22,8	36,5	63,0
M1	Fourragère	Milieu du quai	1m 50	12-déc.	18h31-18h47	57	(-)	(-)	(-)	
M1	Fourragère	Milieu du quai	1m 50	24-janv.	16h54-17h09	57	526	25,2	37,3	
M1	Fourragère	Milieu du quai	1m 50	23-févr.	8h47-9h02	17	491	22,8	31,2	43,7

Tableau 23 : Résultats de 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	14-déc.	17h13-17h32	33	452	19,7	37,3	
M2	National	Milieu du quai	1m 50	8-févr.	16h59-17h14	82	547	19,9	49	
M2	National	Milieu du quai	1m 50	15-mars	7h39-7h54	38	498	17,9	53,6	51,0
M2	Désirée Clary	Milieu du quai	1m 50	14-déc.	17h33-17h49	58	477	22,4	37,1	
M2	Désirée Clary	Milieu du quai	1m 50	13-févr.	16f59-17h17	53	546	21,2	45	
M2	Désirée Clary	Milieu du quai	1m 50	15-mars	7h57-8h11	45	509	19,5	55,5	52,0
M2	Joliette	Milieu du quai	1m 50	14-déc.	17h51-18-h08	51	508	22,7	37,4	
M2	Joliette	Milieu du quai	1m 50	13-févr.	17h20-17h38	61	680	21	45	
M2	Joliette	Milieu du quai	1m 50	13-mars	8h58-9h15	105	599	19,8	45,3	56,0
M2	Jules Guesde	Milieu du quai	1m 50	14-déc.	18h09-18h26	46	486	20,8	45,3	
M2	Jules Guesde	Milieu du quai	1m 50	8-févr.	17h59-18h14	80	609	20,5	56,3	
M2	Jules Guesde	Milieu du quai	1m 50	13-mars	8h30-8h45	54	561	19,2	51,8	60,0
M2	Saint Charles	Milieu du quai	1m 50	13-déc	17h-17h18	45	496	21,8	54,8	
M2	Saint Charles	Milieu du quai	1m 50	07-févr	16h58-17h13	56	523	20,7	50,1	
M2	Saint Charles	Milieu du quai	1m 50	13-mars	8h13-8h28	45	564	18,9	50,8	48,7
M2	Noailles	Milieu du quai	1m 50	13-déc	17h20-17h37	57	530	20,4	59,3	
M2	Noailles	Milieu du quai	1m 50	07-févr	17h18-17h33	57	525	19,6	56,4	
M2	Noailles	Milieu du quai	1m 50	14-mars	8h35-8h50	53	569	19,1	57,4	55,7
M2	ND du Mont	Milieu du quai	1m 50	13-déc	17h38-17h54	58	573	21,1	62,4	
M2	ND du Mont	Milieu du quai	1m 50	07-févr	17h39-17h54	64	607	20,1	60,1	
M2	ND du Mont	Milieu du quai	1m 50	14-mars	8h15-8h30	54	561	19,4	59,5	58,7
M2	Castellane	Milieu du quai	1m 50	13-déc	17h55-18h11	45	539	21,6	51	
M2	Castellane	Milieu du quai	1m 50	25-janv	17h47-18h02	56	634	22,5	44,1	
M2	Castellane	Milieu du quai	1m 50	14-mars	7h55-8h10	44	560	19,5	48,6	48,3
M2	Périer	Milieu du quai	1m 50	13-déc	18h12-18h29	42	512	20,2	52,7	
M2	Périer	Milieu du quai	1m 50	07-févr	18h12-18h17	65	580	20,7	49,9	
M2	Périer	Milieu du quai	1m 50	14-mars	7h35-7h31	38	503	18	55,5	48,3
M2	RP du Prado	Milieu du quai	1m 50	13-déc	18h30-18h47	27	489	19,1	52,8	
M2	RP du Prado	Milieu du quai	1m 50	25-janv	18h10-18h25	41	554	19,5	44,6	
M2	RP du Prado	Milieu du quai	1m 50	14-mars	7h15-7h30	43	484	15,7	58	37,0

Tableau 24 : Résultats de mesures sur les quais de la ligne de tram T1

Ligne	Station	Localisation du système de prélèvement	Hauteur du prélèvement	Date	Heure	PM10 (µg/m3)	CO2 (ppm)	Température (°C)	HR (%)	Moyenne PM10
T1	Noailles	Milieu du quai	1m 50	13-déc.	18h31-18h47	65	513	16,5	47,3	
T1	Noailles	Milieu du quai	1m 50	13-janv.	17h48-18h03	66	668	17	48	
T1	Noailles	Milieu du quai	1m 50	14-mars	8h54-09h09	68	582	16,4	41,7	66,3

Sélection des stations à investiguer

La station la plus fréquentée est la station **Saint Charles**, elle est donc retenue comme station à échantillonner.

Sur la ligne 1, la station autre que St-Charles qui montre des concentrations ponctuelles plus élevées est **St-Barnabé**, qui est donc retenue.

Sur la ligne 2, la station autre que St-Charles qui montre des concentrations ponctuelles plus élevées est Jules Guesdes. Elle n'est pas retenue en raison des lourds travaux prévus pendant la période de la campagne de mesure. La deuxième station présentant les concentrations ponctuelles les plus élevées est **Notre-Dame-du-Mont**, qui est donc retenue pour la ligne 2.

Ainsi, les 3 stations retenues pour la campagne de mesure 2025 sont :

- St-Charles
- Notre-Dame du Mont
- St-Barnabé

ANNEXE 2 BASE DE DONNEES DES MESURES DE PARTICULES FINES ET CO₂

Station St-Barnabé

Tableau 25 : Statistiques de mesure sur la semaine de mesure à la station St-Barnabé

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	168	168
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	36	97
	Médiane	37	98
	Percentile 10	16	13
	Percentile 90	52	169
	Minimum	7	2
	Maximum	65	234
Période d'ouverture du métro (5h – 22h)	Nombre de valeurs	119	119
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	40	122
	Médiane	42	127
	Percentile 10	23	65
	Percentile 90	54	173
	Minimum	9	22
	Maximum	65	206

Tableau 26 : Statistiques de mesure des jours ouvrés à la station St-Barnabé

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	120	120
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	36	104
	Médiane	39	123
	Percentile 10	15	15
	Percentile 90	53	175
	Minimum	7	2
	Maximum	65	234
Période d'ouverture du métro (5h – 22h)	Nombre de valeurs	85	85
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	41	132
	Médiane	44	136
	Percentile 10	22	73
	Percentile 90	55	183
	Minimum	9	22
	Maximum	65	206

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

	PM ₁₀ (µg/m³)	PM _{2.5} (µg/m³)	PM ₁₀ (µg/m³)
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	48	48
	Taux de couverture de la période prévue	100.00%	100.00%
	Moyenne	34	81
	Médiane	33	82
	Percentile 10	21	12
	Percentile 90	51	129
	Minimum	9	4
	Maximum	61	167
Période d'ouverture du métro (5h – 1h)	Nombre de valeurs	40	40
	Taux de couverture de la période prévue	100.00%	100.00%
	Moyenne	37	94
	Médiane	37	91
	Percentile 10	25	62
	Percentile 90	51	139
	Minimum	10	26
	Maximum	61	167

Tableau 28 : Statistiques de mesure les heures de pointes à la station St-Barnabé

	PM ₁₀ (µg/m³)	PM _{2.5} (µg/m³)	PM ₁₀ (µg/m³)
Heures de pointes (7h à 9h – 17 à 19h)	Nombre de valeurs	20	20
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	48	167
	Médiane	48	167
	Percentile 10	37	141
	Percentile 90	58	196
	Minimum	36	133
	Maximum	58	206

Station Notre-Dame-du-Mont

Tableau 29 : Statistiques de mesure sur la semaine de mesure à la station Notre-Dame-du-Mont

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	167	168
	Taux de couverture de la période prévue	99%	100%
	Moyenne	40	132
	Médiane	43	137
	Percentile 10	12	45
	Percentile 90	66	190
	Minimum	5	8
	Maximum	86	656
Période d'ouverture du métro (5h – 22h)	Nombre de valeurs	118	119
	Taux de couverture de la période prévue	99%	100%
	Moyenne	48	143
	Médiane	46	154
	Percentile 10	28	89
	Percentile 90	68	188
	Minimum	18	46
	Maximum	86	232

Tableau 30 : Statistiques de mesure des jours ouvrés à la station Notre-Dame-du-Mont

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	119	120
	Taux de couverture de la période prévue	99%	100%
	Moyenne	41	145
	Médiane	44	158
	Percentile 10	10	51
	Percentile 90	70	200
	Minimum	5	8
	Maximum	86	656
Période d'ouverture du métro (5h – 22h)	Nombre de valeurs	84	85
	Taux de couverture de la période prévue	99%	100%
	Moyenne	50	157
	Médiane	48	163
	Percentile 10	28	106
	Percentile 90	72	192
	Minimum	18	59
	Maximum	86	232

Tableau 31 : Statistiques de mesure sur les jours de week-end à la station Notre-Dame-du-Mont

	PM ₁₀ (µg/m³)	PM _{2.5} (µg/m³)	PM ₁₀ (µg/m³)
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	48	48
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	37	98
	Médiane	42	98
	Percentile 10	14	40
	Percentile 90	51	140
	Minimum	9	18
	Maximum	68	148
Période d'ouverture du métro (5h – 1h)	Nombre de valeurs	40	40
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	42	108
	Médiane	44	101
	Percentile 10	28	74
	Percentile 90	52	141
	Minimum	22	46
	Maximum	68	148

Tableau 32 : Statistiques de mesure les heures de pointes à la station Notre-Dame-du-Mont – semaines sans ventilation

	PM ₁₀ (µg/m³)	PM _{2.5} (µg/m³)	PM ₁₀ (µg/m³)
Heures de pointes (7h à 9h – 17 à 19h)	Nombre de valeurs	19	20
	Taux de couverture de la période prévue	99%	100%
	Moyenne	54	178
	Médiane	50	170
	Percentile 10	46	158
	Percentile 90	70	212
	Minimum	41	144
	Maximum	82	232

Station St-Charles - Sans ventilation

Tableau 33 : Statistiques de mesure sur la semaine de mesure à la station St-Charles – semaines sans ventilation

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³) EXT / CENT
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	156	168
	Taux de couverture de la période prévue	93%	100%
	Moyenne	39	107 / 112
	Médiane	40	112 / 119
	Percentile 10	15	20 / 20
	Percentile 90	60	172 / 178
	Minimum	3	6 / 7
	Maximum	94	232 / 231
Période d'ouverture du métro (5h – 22h)	Nombre de valeurs	113	140
	Taux de couverture de la période prévue	95%	100%
	Moyenne	45	133 / 140
	Médiane	46	137 / 145
	Percentile 10	27	84 / 87
	Percentile 90	61	178 / 185
	Minimum	12	41 / 42
	Maximum	81	232 / 231

Tableau 34 : Statistiques de mesure des jours ouvrés à la station St-Charles – semaines sans ventilation

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³) EXT / CENT
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	109	120
	Taux de couverture de la période prévue	91%	100%
	Moyenne	42	115 / 119
	Médiane	46	136 / 141
	Percentile 10	15	17 / 18
	Percentile 90	61	178 / 185
	Minimum	3	6 / 7
	Maximum	94	232 / 231
Période d'ouverture du métro (5h – 22h)	Nombre de valeurs	79	85
	Taux de couverture de la période prévue	93%	100%
	Moyenne	49	145 / 153
	Médiane	52	151 / 160
	Percentile 10	37	92 / 98
	Percentile 90	62	186 / 192
	Minimum	12	44 / 48
	Maximum	81	232 / 231

Tableau 35 : Statistiques de mesure sur les jours de week-end à la station St-Charles – semaines sans ventilation

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³) EXT / CENT
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	47	48
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	32	90 / 95
	Médiane	32	96 / 99
	Percentile 10	22	34 / 35
	Percentile 90	43	127 / 136
	Minimum	6	14 / 9
	Maximum	64	140 / 151
Période d'ouverture du métro (5h – 1h)	Nombre de valeurs	40	40
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	34	102 / 108
	Médiane	33	102 / 113
	Percentile 10	26	77 / 80
	Percentile 90	42	129 / 138
	Minimum	14	41 / 42
	Maximum	58	140 / 151

Tableau 36 : Statistiques de mesure les heures de pointes à la station St-Charles – semaines sans ventilation

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³) EXT / CENT
Heures de pointes (7h à 9h – 17 à 19h)	Nombre de valeurs	18	20
	Taux de couverture de la période prévue	90%	100%
	Moyenne	55	163 / 173
	Médiane	55	159 / 170
	Percentile 10	47	140 / 152
	Percentile 90	61	189 / 194
	Minimum	39	137 / 145
	Maximum	64	215 / 230

Station St-Charles - avec ventilation 1

Tableau 37 : Statistiques de mesure 24h/24h à la station Blancarde – semaine avec ventilation

	PM ₁₀ (µg/m³)	PM ₁₀ (µg/m³) quai extérieur	PM ₁₀ (µg/m³) quai Central
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	168	168
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	111	119
	Médiane	120	130
	Percentile 10	17	17
	Percentile 90	178	192
	Minimum	6	8
	Maximum	258	225
Période d'ouverture du métro (5h – 22h)	Nombre de valeurs	119	119
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	137	147
	Médiane	138	152
	Percentile 10	89	94
	Percentile 90	186	195
	Minimum	41	49
	Maximum	233	225

Tableau 38 : Statistiques de mesure sur les jours de semaine à la station Blancarde – semaine avec ventilation

	PM ₁₀ (µg/m³)	PM ₁₀ (µg/m³) quai extérieur	PM ₁₀ (µg/m³) quai Central
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	120	120
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	115	122
	Médiane	136	142
	Percentile 10	14	15
	Percentile 90	187	195
	Minimum	6	8
	Maximum	258	225
Période d'ouverture du métro (5h – 22h)	Nombre de valeurs	85	85
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	147	157
	Médiane	151	165
	Percentile 10	90	93
	Percentile 90	192	201
	Minimum	47	52
	Maximum	233	225

Tableau 39 : Statistiques de mesure sur les jours de week-end à la station Blancarde – semaine avec ventilation

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³) quai extérieur	PM ₁₀ (µg/m ³) quai Central
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	48	48
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	98	110
	Médiane	103	115
	Percentile 10	39	50
	Percentile 90	136	156
	Minimum	9	10
	Maximum	151	167
Période d'ouverture du métro (5h – 1h)	Nombre de valeurs	40	40
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	110	123
	Médiane	106	117
	Percentile 10	89	97
	Percentile 90	140	164
	Minimum	41	49
	Maximum	151	167

Tableau 40 : Statistiques de mesure les heures de pointes à la station Blancarde – semaine avec ventilation

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³) quai extérieur	PM ₁₀ (µg/m ³) quai Central
Heures de pointes (7h à 9h – 17 à 19h)	Nombre de valeurs	20	20
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	166	176
	Médiane	166	180
	Percentile 10	138	149
	Percentile 90	194	206
	Minimum	127	131
	Maximum	204	214

Station St-Charles - avec ventilation 2

Tableau 41 : Statistiques de mesure sur les jours de semaine à la station Blancarde – semaine avec ventilation 2

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³) quai extérieur	PM ₁₀ (µg/m ³) quai Central
Toutes données horaires	Nombre de valeurs	48	48
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	117	122
	Médiane	121	131
	Percentile 10	62	63
	Percentile 90	162	170
	Minimum	35	21
	Maximum	210	210
Période d'ouverture du métro (5h – 22h)	Nombre de valeurs	34	34
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	128	136
	Médiane	134	146
	Percentile 10	82	93
	Percentile 90	160	169
	Minimum	72	76
	Maximum	187	177

Tableau 42 : Statistiques de mesure les heures de pointes à la station Blancarde – semaine avec ventilation 2

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³) quai extérieur	PM ₁₀ (µg/m ³) quai Central
Heures de pointes (7h à 9h – 17 à 19h)	Nombre de valeurs	8	8
	Taux de couverture de la période prévue	100%	100%
	Moyenne	131	141
	Médiane	138	150
	Percentile 10	106	115
	Percentile 90	150	160
	Minimum	101	108
	Maximum	153	164

ANNEXE 3 BASE DE DONNEES DES MESURES DE METAUX SUR LES QUAIS

Tableau 43 : Concentrations de PM₁₀ (par prélèvement) et de métaux à la station St-Barnabé

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	7	7	7	7	7	7	7
Moyenne	10.7	0.34	46	4.7	774	611	226
Médiane	11.2	0.26	48	3.9	808	575	205
P10 - P90	7.3-13.1	0.26-0.26	35-54	2.3-6.2	484-963	260-1026	140-338
(Min - Max)	5.7-13.5	0.26-1.3	24-59	1.4-17.1	337-1174	260-1050	64-356
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	9.9	52	3868	52294	483	6.8	125
Médiane	6.4	52	4194	52636	487	4.6	129
P10 - P90	6.4-16.2	40-68	2459-4512	41337-61941	388-581	3.1-11.9	64-221
(Min - Max)	6.4-17.5	23-73	1877-4899	26406-63592	242-593	2.2-29.1	64-252

Tableau 44 : Concentrations de PM₁₀ (par prélèvement) et de métaux à la station Notre-Dame du Mont sans ventilation

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	21	0.26	37	5.1	1006	447	254
Médiane	21	0.26	38	4.2	1074	260	252
P10 - P90	16-25	0.26-0.26	30-43	3.6-8.2	732-1180	260-738	178-321
(Min - Max)	11-25	0.26-1.7	24-44	3.2-10.4	660-1355	260-850	168-416
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	10.8	56	2829	40257	369	5.0	151
Médiane	6.4	54	2931	40037	366	5.2	64
P10 - P90	6.4-16	39-78	2334-3304	34330-46101	312-451	3.8-6.1	64-153
(Min - Max)	6.4-22	36-86	1528-3367	23650-46793	202-454	3.6-6.6	64-974

Tableau 45 : Concentrations de PM₁₀ (par prélèvement) et de métaux à la station St-Charles sans ventilation

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	20	0.26	41	3.9	959	734	240
Médiane	21	0.26	42	3.8	961	680	238
P10 - P90	14-23	0.26-0.26	31-48	3.1-5	661-1147	260-1368	205-276
(Min - Max)	11-23	0.26-0.26	25-48	2.2-5.4	608-1288	260-1870	179-323
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	15	51	4210	47903	436	6.1	90
Médiane	16	53	4279	49086	445	6.1	64
P10 - P90	6-23	35-63	3096-5091	34763-57710	322-514	4.6-7.3	64-165
(Min - Max)	6-46	30-71	2743-5154	29827-60253	274-531	4.3-7.8	64-179

Tableau 46 : Concentrations de PM₁₀ (par prélèvement) et de métaux à la station St-Charles avec ventilation

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	7	7	7	7	7	7	7
Moyenne	19	0.26	39	4	852	0.6	240
Médiane	18	0.26	40	4	922	0.8	254
P10 - P90	16-24	0.26-0.26	33-47	3-5	664-987	0.3-1	194-282
(Min - Max)	14-24	0.26-0.26	30-48	3-7	518-1003	0.3-1	173-317
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	7	7	7	7	7	7	7
Moyenne	13	51	3909	45807	425	5.8	77
Médiane	15	52	3812	47665	433	5.9	64
P10 - P90	6-19	40-63	3270-4663	36734-55591	350-515	4.9-6.6	64-101
(Min - Max)	6-20	38-66	2982-5057	32509-57558	319-526	3.9-7	64-156

ANNEXE 4 TABLEAU COMPARATIF DES CONCENTRATIONS EN METAUX SUR LES QUAIS DES DIFFERENTES CAMPAGNES DE MESURES DANS LE METRO DE MARSEILLE

Le Tableau 47 présente à titre informatif les résultats obtenus sur ces différentes campagnes pour permettre une comparaison :

Tableau 47 : Concentrations moyennes en métaux des campagnes 2016, 2019, 2021, 2023 et 2025.

Concentrations moyennes (ng/m³)	St-Barnabé 2025	NDM 2025	St-Charles 2025	Castellane 2023	NDM 2023	Blancarde 2023	Castellane 2021	Réformés 2021	Périer 2021	St-Charles 2019	Blancarde 2019	St Charles 2016	Autres EFS françaises ¹⁰ (min - max)
Prélèvement (J : Journalier, H : Hebdomadaire)	J	J	J	J	J	J	J	J	J	H	H	H	
Al	774	1006	959	4 910	4 687	4 955	1 562	747	874	763	535	-	235 - 1332
Sb	6.8	5	6.1	7	6.4	3.9	5,9	3,9	4,2	4,7	5,1	-	1 - 336
As	10.7	21	20	24.2	18	13.1	22	13,1	17	14,3	10,8	16,7	0,4 - 16,7
Ba	9.9	11	15.2	22.3	18.5	9.5	17	9,6	13	11,1	9,7	10,1	10,1 - 336
Cd	0.34	0.36	0.26	0.34	0.45	0.22	0,24	0,4	0,26	0,4	0,3	1,7	0,3 - 3,9
Ca	611	447	734	967	1 017	220	1 513	952	1 168	1 234	953	1 196	1 196 - 2 854
Cr	52	56	51	102	56	48	51	23	61	22,6	25,7	27,5	27,5 - 204
Cu	3868	2829	4210	5 435	3 509	3 187	5 889	2 802	4 468	2 702	3 153	3 475	165 - 5443
Fe	52294	40257	47903	70 865	51 411	46 835	58 947	30 125	47 479	28 891	32 416	27 753	2 296 - 70 678
Mn	483	369	436	707	428	442	519	293	469	262	301	288	25 - 442
Ni	46	37	41	133	79	71	134	60	111	78	86	91,6	5 - 91,6
Pb	4.7	5.1	3.9	7.5	6	3.9	5,4	7,4	5,2	8,4	6,8	7,5	6 - 120
K	226	254	240	1 606	1 464	1 456	243	269	221	189	144	-	-
Zn	125	151	90	124	88	82	43,5	63	56	76	71	116	47,5 - 2 028

¹⁰ Qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines (EFS) en France – AtmoSud 2020

ANNEXE 5 REPRÉSENTATION STATISTIQUE DES PARAMÈTRES DE CONFORT SUR LES QUAIS A 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.

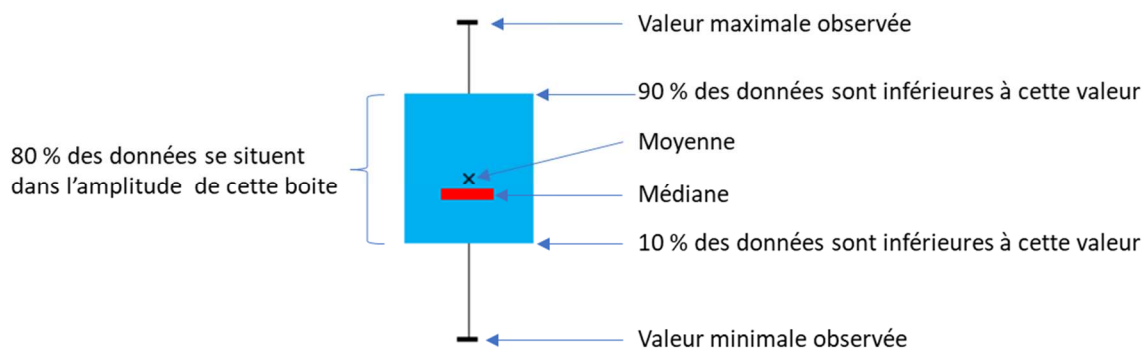


Figure 22 : Schéma explicatif du diagramme en boîte

ANNEXE 6 BASE DE DONNEES DES MESURES DE PARTICULES FINES DANS LES RAMES DES 2 LIGNES DE METRO EN 2025

Tableau 48 : Concentrations de PM_{10} et $PM_{2.5}$ dans les rames de la ligne 1

C _{EFS}	PM ₁₀	PM _{2.5}
Nombre de valeurs	3	3
Durée cumulée des Prélèvements (minutes)	360	360
Moyenne (µg/m³)	88	73
Min – Max (µg/m³)	81 - 92	66 - 84

*invalidation des données d'un prélèvement en raison d'un problème technique

Tableau 49 : Concentrations de PM_{10} et $PM_{2.5}$ dans les rames de la ligne 2

C _{EFS}	PM ₁₀	PM _{2.5}
Nombre de valeurs	3	3
Durée cumulée des Prélèvements (minutes)	360	360
Moyenne (µg/m³)	81	69
Min – Max (µg/m³)	62 - 101	60- 81

*invalidation des données d'un prélèvement en raison d'un problème technique

ANNEXE 7 BASE DE DONNEES DES MESURES DE METAUX DANS LES RAMES DE METRO DES LIGNES 1 ET 2 EN 2025

Tableau 50 : 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/m ³)	< 4*	< 4*	< 97*	< 0.01*	< 97*	< 3878*	< 1*
Min – Max (ng/m 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/m ³)	< 97*	39**	2 017	23 998	< 414*	< 10*	< 970*
Min – Max (ng/m ³)	-	80 - 80	1 770 - 2 343	21 589 - 28 153	-	-	-

* concentration inférieure à la limite de quantification correspondante

**Un seul prélèvement supérieur à la limite de quantification

Tableau 51 : 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/m ³)	< 4*	< 4*	< 96*	< 0.01*	< 958*	< 3832*	< 1*
Min – Max (ng/m 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/m ³)	< 96*	< 20*	2387	26 927	< 96*	< 10*	< 958*
Min – Max (ng/m ³)	-	-	2 257 - 2 468	24 350 - 28 895	-	-	-

* concentration inférieure à la limite de quantification correspondante

ANNEXE 8 SOURCES DE POLLUTION, EFFETS SUR LA SANTE, REGLEMENTATION ET RECOMMANDATIONS OMS

Sources de pollution

Les polluants atmosphériques ont diverses origines.

Polluants	Sources principales
O ₃ Ozone	L'ozone (O ₃) n'est pas directement rejeté par une source de pollution. C'est un polluant secondaire formé à partir des NO _x et des COV.
Particules en suspension (PM)	Les particules proviennent en majorité de la combustion à des fins énergétiques de différents matériaux (bois, charbon, pétrole), du transport routier (imbrûlés à l'échappement, usure des pièces mécaniques par frottement, des pneumatiques...), d'activités industrielles très diverses (sidérurgie, incinération, chaufferie) et du brûlage de la biomasse (incendie, déchets verts).
NO _x Oxydes d'azote	Les sources principales sont les véhicules et les installations de combustion.
SO ₂ Dioxyde de soufre	Le dioxyde de soufre (SO ₂) est un polluant essentiellement industriel. Les sources principales sont les centrales thermiques, les grosses installations de combustion industrielles, le trafic maritime, l'automobile et les unités de chauffage individuel et collectif.
COV dont le benzène Composés organiques volatils	Les COV proviennent de sources mobiles (transports), de procédés industriels (industries chimiques, raffinage de pétrole, stockage et distribution de carburants et combustibles liquides, stockages de solvants). Certains COV, comme les aldéhydes, sont émis par l'utilisation de produits d'usage courant : panneaux de bois en aggloméré, certaines mousses pour l'isolation, certains vernis, les colles, les peintures, les moquettes, les rideaux, les désinfectants... D'autres COV sont également émis naturellement par les plantes.
HAP Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques	Les HAP se forment par évaporation mais sont principalement rejetés lors de la combustion de matière organique. La combustion domestique du bois et du charbon s'effectue souvent dans des conditions mal maîtrisées (en foyer ouvert notamment), qui entraînent la formation de HAP.
CO Monoxyde de carbone	Combustion incomplète (mauvais fonctionnement de tous les appareils de combustion, mauvaise installation, absence de ventilation), et ce quel que soit le combustible utilisé (bois, butane, charbon, essence, fuel, gaz naturel, pétrole, propane).

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
O ₃ Ozone	Irritation des yeux Diminution de la fonction respiratoire	Agression des végétaux Dégradation de certains matériaux Altération de la photosynthèse et de la respiration des végétaux
Particules en suspension	Irritation des voies respiratoires Dans certains cas, altération des fonctions pulmonaires	Effets de salissures sur les bâtiments Altération de la photosynthèse
NO _x Oxydes d'azote		Pluies acides Précurseur de la formation d'ozone Effet de serre Déséquilibre les sols sur le plan nutritif
SO ₂ Dioxyde de soufre		Pluies acides Dégradation de certains matériaux Dégradation des sols
COV dont le benzène Composés organiques volatils	Toxicité et risques d'effets cancérigènes ou mutagènes, en fonction du composé concerné	Formation de l'ozone
HAP Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques		Peu dégradables Déplacement sur de longues distances
Métaux lourds	Toxicité par bioaccumulation Effets cancérigènes	Contamination des sols et des eaux
CO Monoxyde de carbone	Prend la place de l'oxygène Provoque des maux de tête Létal à concentration élevée	Formation de l'ozone Effet de serre

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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. 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 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Durée d'exposition
O ₃ Ozone	Seuil d'information- recommandations	180	Heure
	Seuil d'alerte	240	Heure
	Valeur cible		Maximum journalier de la moyenne sur 8 heures (maximum 25 j / an)
	Objectif de qualité	120	8 heures
PM10 Particules	Seuil d'information- recommandations	50	Jour
	Seuil d'alerte	80	Jour
	Valeurs limites	50 40	Jour (maximum 35 j / an) Année
	Objectif de qualité	30	Année
PM2.5 Particules	Valeur limite	25	Année
	Valeurs cibles	20	Année
	Objectif de qualité	10	Année
NO ₂ Dioxyde d'azote	Seuil d'information- recommandations	200	Heure
	Seuil d'alerte	400	Heure
	Valeurs limites	200 40	Heure (maximum 18h / an) Année
SO ₂ Dioxyde de soufre	Seuil d'information- recommandations	300	Heure
	Seuil d'alerte	500	Heure (pendant 3h)
	Valeurs limites	350 125	Heure (maximum 24h / an) Jour (maximum 3 j / an)
	Objectif de qualité	50	Année
C ₆ H ₆ Benzène	Valeur limite	5	Année
	Objectif de qualité	2	Année
Pb Plomb	Valeur limite	0,5	Année
	Objectif de qualité	0,25	Année
CO Monoxyde de carbone	Valeur limite	10 000	8 heures
BaP Benzo(a)pyrène	Valeur cible	0,001	Année
As Arsenic	Valeur cible	0,006	Année
Cd Cadmium	Valeur cible	0,005	Année
Ni Nickel	Valeur cible	0,02	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 recommandée par l'OMS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Durée moyenne d'exposition
O ₃ Ozone	Impact sur la fonction respiratoire	100	8 heures
PM10 Particules	Affection des systèmes respiratoire et cardiovasculaire	50 20	24 heures 1 an
PM2.5 Particules		25 10	24 heures 1 an
NO ₂ Dioxyde d'azote	Faible altération de la fonction pulmonaire (asthmatiques)	200 40	1 heure 1 an
SO ₂ Dioxyde de soufre	Altération de la fonction pulmonaire (asthmatiques) Exacerbation des voies respiratoires (individus sensibles)	500 20	10 minutes 24 heures
Pb Plomb	Niveau critique de plomb dans le sang < 10 – 150 g/l	0,5	1 an
Cd Cadmium	Impact sur la fonction rénale	0,005	1 an
CO Monoxyde de carbone	Niveau critique de CO Hb < 2,5 % Hb : hémoglobine	100 000	15 minutes

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 »
13006 Marseille

Site de Martigues

06 Route de la Vierge
13500 Martigues

Site de Nice

37bis avenue Henri Matisse
06200 Nice

 [atmosud.org](https://www.atmosud.org)
 04 91 31 38 00
 contact.air@atmosud.org

AtmoSud
Inspirer un air meilleur

SIRET : 324 465 632 00044 – APE – NAF : 7120B – TVA intracommunautaire : FR 65 324 465 632