



QUALITE DE L'AIR INTERIEUR DU METRO DE MARSEILLE

Campagne 2023

Janvier 2024

Date de parution

Février 2024

Contact

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

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

Références

AFE-000122 / 01 / MID-ASN-ERT

Résumé

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. Les quatre précédentes campagnes de mesure de 2010, 2016, 2019 et 2021 dans le métro Marseillais ont permis de caractériser sur plusieurs stations, divers polluants parmi lesquels les particules fines PM₁₀ et PM_{2,5}, les métaux traces et certains polluants gazeux organiques et inorganiques.

Cette nouvelle étude 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 PM_{2,5}), 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 :

- Castellane et Notre-Dame-du-Mont sur la Ligne 2,
- La Blancarde sur la Ligne 1.

Il n'existe pas de valeurs contraignantes dans les enceintes ferroviaires souterraines mais des indicateurs de gestion de L'ANSES qui recommande *a minima* :

- de ne pas dépasser les concentrations en PM₁₀ et PM_{2,5} dans l'air des EFS calculées à partir des valeurs guides 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 PM_{2,5} sont respectivement de 140 et 80 µg/m³. La valeur C_{sout_Lim} pour une heure d'exposition pour les PM₁₀ est de 480 µg/m³ (non existante pour les PM_{2,5}).

► Sur les quais, des concentrations en PM₁₀ plus élevées à Castellane mais qui respectent la valeur de gestion limite dans les Enceintes Ferroviaires Souterraines (EFS)

L'ensemble des concentrations horaires maximales en PM₁₀ aux trois stations de métro dépassent la valeur de gestion C_{sout_OMS} de 140 µg/m³ mais sont significativement inférieures au C_{sout_Lim} de 480 µg/m³ à ne pas dépasser pour une exposition d'une heure.

Les concentrations moyennes sur les heures d'ouverture (5h à 1h) s'échelonnent de 105 µg/m³ à la station Blancarde (ligne 1) à 122 et 155 µg/m³ aux stations Notre-Dame-du-Mont et Castellane (ligne 2), cette dernière ayant montré une augmentation de concentration de 7 % depuis la campagne de 2021.

► Profils horaires en PM₁₀ sur les quais similaires entre les stations d'une même ligne

En comparant les données de cette campagne de mesure aux précédentes, on observe que les stations de la ligne 2 (Castellane, Notre-Dame-du-Mont et Périer) présentent des profils horaires similaires entre eux malgré des niveaux qui peuvent être différents. Les profils journaliers des stations desservant la ligne 1 (Blancarde, Saint-Charles et Réformés) montrent également des similitudes entre eux, avec des concentrations plus importantes pour la station Blancarde, des concentrations plus faibles pour St-Charles et des concentrations intermédiaires pour Réformés.

- ▶ **Des concentrations en PM2.5 sur les quais qui respectent la valeur de gestion**

Pour les PM2.5, les concentrations horaires maximales des stations Notre-Dame-du-Mont et de la Blancarde sont inférieures à la valeur de gestion C_{Sout_OMS} de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mais celle de la station Castellane la dépasse.

Les concentrations moyennes sur la période d'ouverture à la station Castellane ($54 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont légèrement plus importantes qu'à Notre-Dame du Mont ($43 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et Blancarde ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et sont stables par rapport à celles de la campagne 2021.

Les $PM_{2.5}$ représentent entre 33 % et 35 % des PM_{10} . L'évolution des concentrations au cours du temps suit celle des PM_{10} .

- ▶ **Les particules les plus fines sur les quais ne sont que peu influencées par les passages des rames de métro**

Il apparaît un comportement différent du nombre de particules les plus grossières ($> 1 \mu\text{m}$) qui sont influencées par la fréquence de passages de métro (cohérent avec l'évolution des concentrations en $PM_{2.5}$ et PM_{10}), et les particules plus fines dont l'évolution est plus progressive et dont l'origine des pics est associée à d'autres événements (contribution des occupants et/ou des concentrations extérieures).

Les particules de 250 nm à $1 \mu\text{m}$ semblent être émises en moindre quantité par le matériel roulant et dépendre davantage des concentrations extérieures ou de la contribution des passagers eux-mêmes.

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

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 (82 %) suivi du cuivre et de l'aluminium (6 à 7 %).

Les concentrations à Castellane sont plus importantes qu'aux stations Notre-Dame du Mont et Blancarde. Une augmentation progressive des concentrations en métaux est globalement observée au cours des années sur l'ensemble des stations, en lien potentiel avec le vieillissement du matériel roulant.

- ▶ **L'expérimentation la mise en marche de la ventilation permet une réduction significative des concentrations en particules fines et métaux sur les quais**

La mise en marche du système de ventilation aux heures de pointes s'avère très efficace puisqu'elle permet la diminution des concentrations en PM_{10} de 47 % sur ces périodes d'heures de pointe pour les stations Castellane et Blancarde et de 24 % pour la station Notre-Dame du Mont.

Elle occasionne également une diminution des concentrations sur l'ensemble de la période d'ouverture du métro de 32 % pour Castellane et 24 % pour les stations de Notre-Dame du Mont et Blancarde.

Ces baisses significatives de concentrations sur les heures de pointe ne permettent pas pour autant de passer en dessous de la valeur de gestion C_{Sout_OMS} pour l'ensemble des 3 stations échantillonnées.

- ▶ **Un confinement faible sur les quais mais à améliorer dans les rames**

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

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.

Néanmoins, près de 25 % des valeurs 1 minutes 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.

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

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

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 Iazard – AtmoSud

Alexis Stepanian – AtmoSud

Edwige Révélat - AtmoSud

SOMMAIRE

| | | |
|-------|---|----|
| I | Contexte de l'étude | 8 |
| II | Le Métro de Marseille..... | 8 |
| II.1 | Le réseau..... | 8 |
| II.2 | Matériel roulant actuel..... | 9 |
| II.3 | Fréquentation et horaires des métros | 10 |
| II.4 | Futur matériel roulant | 10 |
| III | Qualification de la qualité de l'air sur la zone d'étude..... | 11 |
| IV | Réalisation de la campagne de mesures..... | 12 |
| IV.1 | Méthodologie | 12 |
| IV.2 | Moyens mis en œuvre | 12 |
| IV.3 | Echantillonnage géographique et temporel | 15 |
| V | Valeurs de référence..... | 18 |
| VI | Résultats de la campagne 2022-2023..... | 20 |
| VI.1 | Campagne de mesure sur les quais | 20 |
| VI.2 | Campagne de mesures dans les rames..... | 38 |
| VII | Comparaison aux campagnes précédentes | 42 |
| VII.1 | Particules fines sur les quais | 42 |
| VII.2 | Métaux sur les quais | 45 |
| VII.3 | Mesures des particules en nombre sur les quais..... | 47 |
| VIII | Conclusion | 48 |

LISTE DES ANNEXES

| | | |
|----------|---|----|
| ANNEXE 1 | HIERARCHISATION DES QUAIS (DONNEES DE LA RTM) | 53 |
| ANNEXE 2 | BASE DE DONNEES DES MESURES DE PARTICULES FINES ET CO2 SUR LES QUAIS DES 3 STATIONS DE L'ETUDE 2023 | 56 |
| ANNEXE 3 | BASE DE DONNEES DES MESURES DE METAUX SUR LES QUAIS DES 3 STATIONS DE L'ETUDE 2023 | 68 |
| ANNEXE 4 | GRANULOMETRIE DES STATIONS ST-CHARLES ET BLANCARDE DE LA CAMPAGNE DE MESURE 2019 | 72 |
| ANNEXE 5 | REPRESENTATION STATISTIQUE DES PARAMETRES DE CONFORT SUR LES QUAIS A L'AIDE DE « BOXPLOT »..... | 74 |
| ANNEXE 6 | BASE DE DONNEES DES MESURES DE PARTICULES FINES DANS LES RAMES DES 2 LIGNES DE METRO | 78 |
| ANNEXE 7 | BASE DE DONNEES DES MESURES DE METAUX DANS LES RAMES DE METRO DES LIGNES 1 ET 2 | 79 |

ANNEXE 8 SOURCES DE POLLUTION, EFFETS SUR LA SANTE, REGLEMENTATION ET RECOMMANDATIONS OMS 80

I CONTEXTE DE L'ETUDE

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

L'objet de cette étude, menée par AtmoSud en partenariat avec la Régie des Transports Métropolitains (RTM), est de **poursuivre la surveillance de la qualité de l'air du métro de la ville de Marseille**. Quatre précédentes campagnes de mesure ont eu lieu en 2010, 2016, 2019 et 2021. 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 à certaines stations de mesure.

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 (ligne 2), La Fourragère, Périer, Les Réformés.

L'objectif de cette nouvelle étude est de poursuivre la surveillance de la qualité de l'air dans le métro Marseillais selon le protocole harmonisé de l'INERIS. Les trois stations retenues pour les campagnes sur les quais sont : Castellane, Notre-Dame du Mont et Blancarde.

En complément, AtmoSud et la RTM réalisent une expérimentation de l'impact sur la qualité de l'air de la mise en route du système de ventilation utilisé depuis les années 80 en tant que système de désenfumage.

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

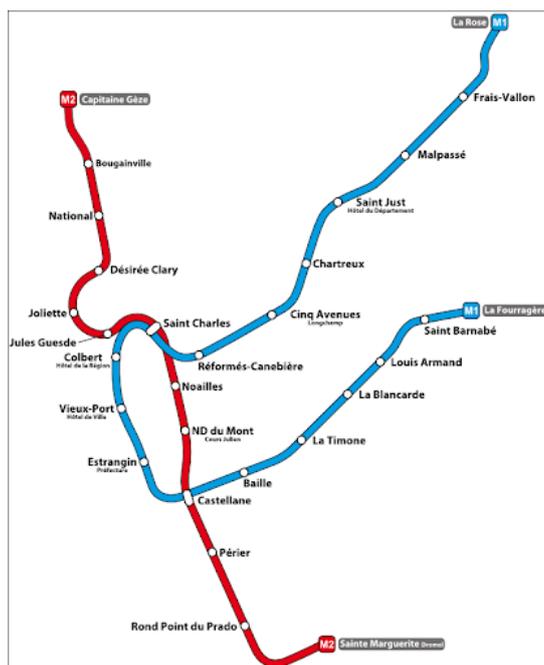
Le métro de Marseille compte deux lignes totalisant une longueur de 21,5 km et 28 stations :

- 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.

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

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

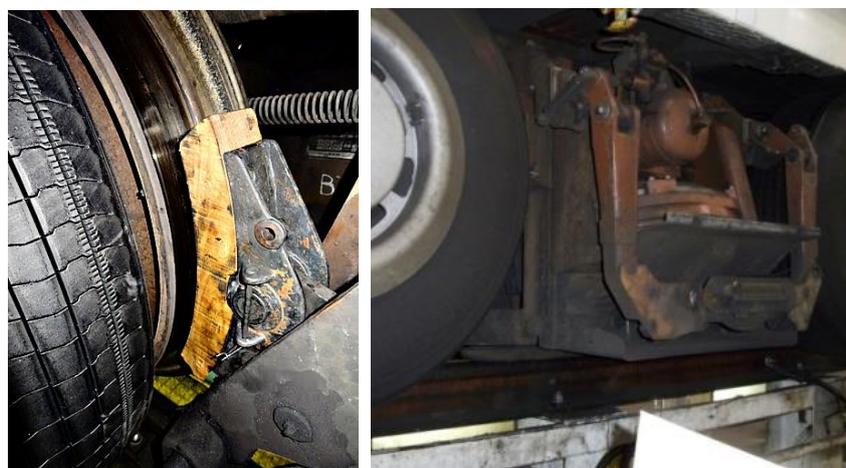


II.2 Matériel roulant actuel

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 bougies 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 de hêtre 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 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 Castellane est significativement plus importante que celle des stations Notre-Dame du Mont et Blancarde.

Tableau 1 : Evolution de la fréquentation du métro par station

| Fréquentation | 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 |
| Station Castellane (1978) | 2019 | 539 354 | 476 931 | 576 371 | 515 093 |
| | 2020 | 546 866 | 495 823 | 272 765 | 42 746 |
| | 2021 | 324 505 | 308 475 | 360 554 | 271 102 |
| | 2022 | 400 844 | 377 593 | 477 619 | 410 318 |
| | 2023 | 459 859 | 405 122 | 477 020 | 398 140 |
| Station Notre-Dame du Mont (1984) | 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 |
| Station Blancarde (2010) | 2019 | 123 793 | 108 263 | 133 655 | 117 042 |
| | 2020 | 135 414 | 116 531 | 67 723 | 10 974 |
| | 2021 | 83 091 | 79 078 | 90 506 | 68 884 |
| | 2022 | 93 474 | 88 002 | 114 140 | 97 649 |
| | 2023 | 111 682 | 98 220 | 122 502 | 95 552 |

Pour cette campagne de mesure 2023, les horaires des métros des jours sont identiques à celles des campagnes de 2019 et 2021.

II.4 Futur matériel roulant

De nouveaux trains de métro, entièrement automatiques, devraient être mis en service entre 2025 et 2026. Il s'agit de trains sur roues pneumatiques avec un freinage exclusivement électronique. L'ensemble des quais sera équipé de portes palières qui permettent un effet barrière au déplacement des particules vers le quai.

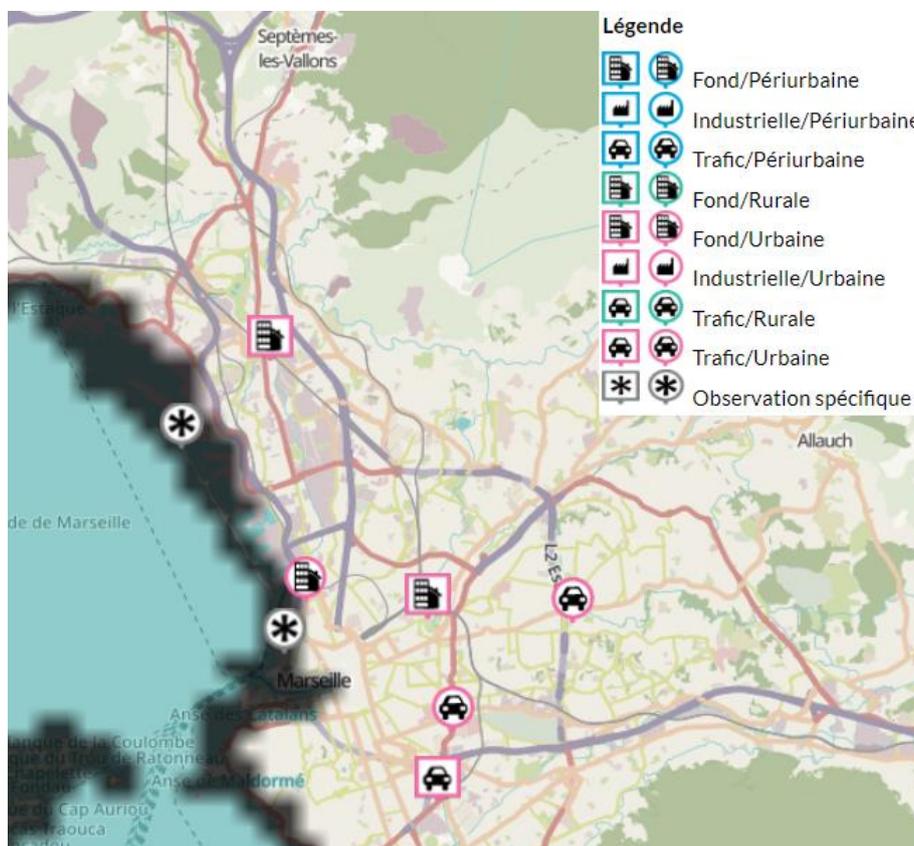
Figure 2 : Futures rames de métro (source : Métropole Aix-Marseille-Provence)



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. Sur Marseille, six stations surveillent la qualité de l'air ambiant².

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



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 | Urbaire | Trafic |
| | Influence | Fond | Fond |
| Polluants particulaires | PM ₁₀ | X | X |
| | PM _{2,5} | X | X |
| | PM ₁ | X | |
| | Granulométrie | X | |
| Métaux | Arsenic (As) | X | |
| | Cadmium (Cd) | X | |
| | Nickel (Ni) | X | |
| | Plomb (Pb) | X | |
| Autres | CO ₂ | X | |

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

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
- Particules ultrafines
- CO₂

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 métró |
|---|--------------------------------------|-----------------------|--|---|
| 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 |
| | Particules ultrafines | Granulomètre | 3 | - |
| Confort | Température/humidité | Analyseur infrarouge | 3 | 2 |

IV.2 Moyens mis en œuvre

Pour chacune des deux stations de métró 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 les suivants :

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

| Dispositif de mesure | Castellane | Notre-Dame du Mont | Blancarde | Rames |
|--|------------|--------------------|-----------|-------|
| Analyseur automatique (Particules PM ₁₀ puis PM _{2,5}) | X | X | X | - |
| Préleveur séquentiel (Particules PM ₁₀ + 14 métaux) | X | X | X | - |
| Prélèvement actif par impacteur (Particules PM ₁₀ , PM _{2,5} et 14 métaux dans les PM ₁₀) | - | - | - | X |
| Granulomètre MINI-LAS (Particules fines de diamètre compris entre 250 et 32 000 nm, Particules PM ₁₀ et PM _{2,5}) | X | X | X | - |
| Analyseur infrarouge (CO ₂ , température, humidité relative) | X | X | X | X |

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

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 : le BAM 1020 (appareil équivalent à la norme NF EN 12341). Il permet d'obtenir une concentration moyenne horaire en PM₁₀ sur l'ensemble de la période de mesure.

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



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** pour chaque semaine de mesure (norme NF EN 14902).

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



IV.2.3 Granulomètres

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

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



IV.2.4 Analyseur infrarouge

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

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

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



IV.2.5 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/minutes.

Photographie 6 : 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), trois points de mesures fixes ont été positionnés sur des quais des stations dans le cadre de cette campagne de mesures s'étalant du 7 décembre 2022 au 12 avril 2023 :

- Deux sur les quais des stations Notre-Dame du Mont (ligne 1) et Blancarde (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),
- Un au niveau de la ligne 2 à la station Castellane, qui est la station la plus fréquentée du Réseau effectif pendant la période de mesures retenue.

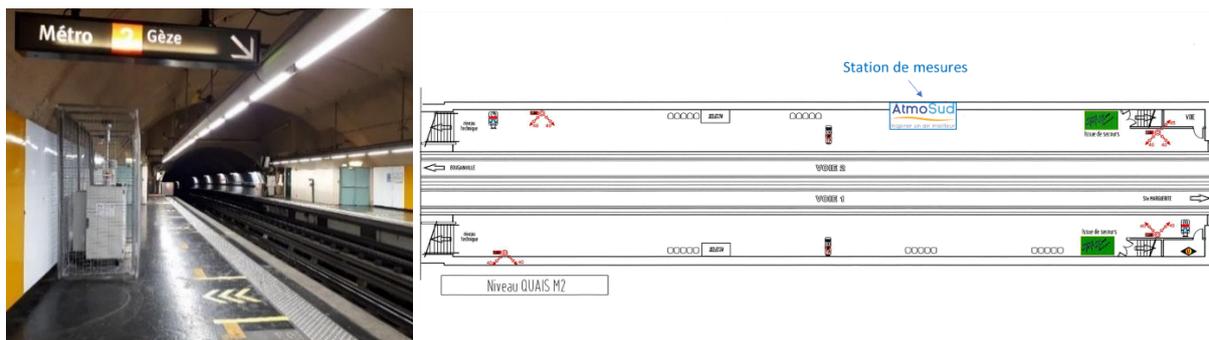
Remarque : la station la plus fréquentée est celle de St-Charles mais elle est indisponible sur la période de mesure en raison de travaux importants. La deuxième station la plus fréquentée étant celle de Castellane, cette dernière a été sélectionnée pour cette campagne de mesures.

De manière complémentaire, des mesures à l'intérieur des rames en mobilité sont réalisées sur les deux lignes de métro (Lignes 1 et 2) en juin 2023.

IV.3.1.1 Station Castellane (ligne 2)

A la station Castellane, la zone qui dessert la ligne 2 a été équipée. Celle-ci 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).

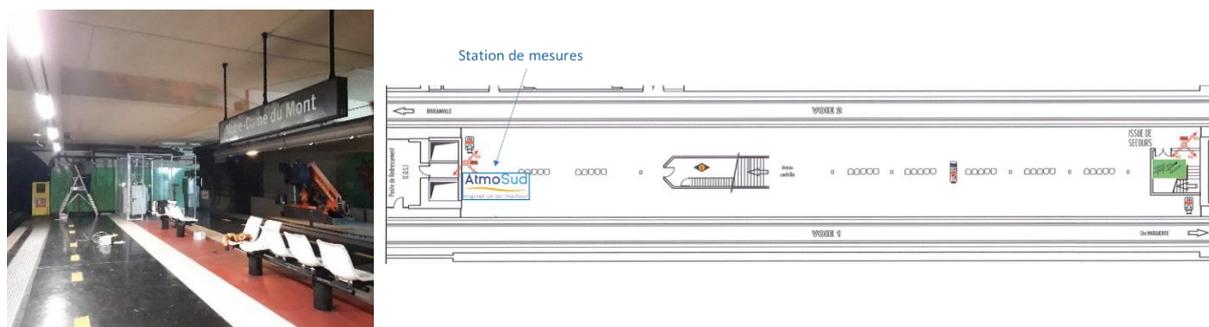
Figure 4 : Emplacement des appareils de mesure sur le quai de la station de Castellane



IV.3.1.2 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.

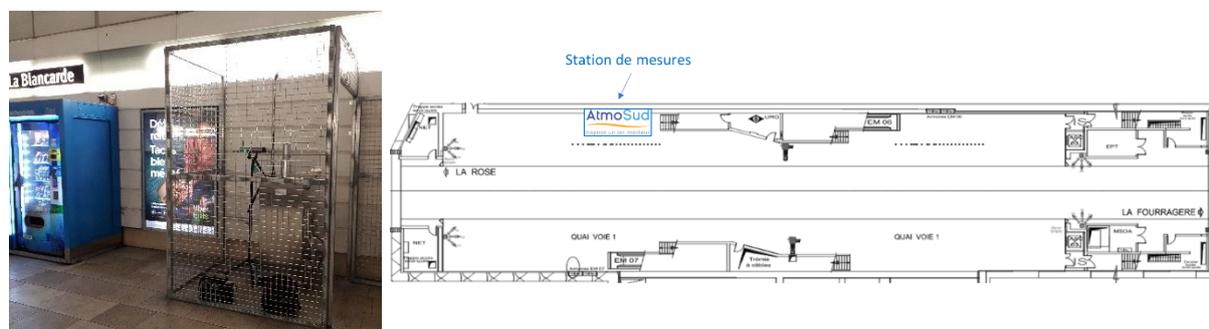
Figure 5 : Emplacement des appareils de mesure sur le quai de la station Notre-Dame du Mont



IV.3.1.3 Station Blancarde (ligne 1)

Comme à Castellane, la station Blancarde 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 6 : Emplacement des appareils de mesure sur le quai de la station Blancarde



IV.3.2 Echantillonnage temporel

IV.3.2.1 Campagnes sur les quais

Les campagnes de mesure des points fixes sur les quais des 3 stations de métro durent 3 semaines :

- 1 semaine de mesure des PM2.5 sans ventilation ;
- 1 semaine de mesure de PM10 sans ventilation ;
- 1 semaine de mesure de PM10 avec ventilation.

Lors des périodes ventilation, sont activés les systèmes de ventilation des quais de la station échantillonnée mais également ceux des tronçons de tunnels adjacents et ceux des quais des stations en amont et en aval, soit :

- Pour Castellane : quais de Castellane, Notre-Dame du Mont et Périer et tunnels entre Notre-Dame du Mont et Castellane et entre Castellane et Périer
- Pour Notre-Dame du Mont : quais de Notre-Dame du Mont, Noaille, et Castellane et tunnels entre Noaille et Notre-Dame du Mont et entre Notre-Dame du Mont et Castellane
- Pour Blancarde : quais de Blancarde, Timone et Louis Armand et tunnel entre Timone et Blancarde. Il n'y a pas de système de ventilation dans le tunnel entre Blancarde et Louis Armand.

Figure 7 : Représentation des systèmes de ventilation activés pour chaque station échantillonnée



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 | Pas de temps |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Analyseur automatique PM2.5 | 1 semaine | Horaire |
| Analyseur automatique PM10 | 2 semaines | Horaire |
| Préleveur actif métaux lourds | 3 semaines | Journalière 20h/24h |
| Granulomètre | 3 semaines | Horaire |
| Analyseur infrarouge | 3 semaines | Quart-horaire |

Pour respecter les périodes hors vacances scolaires, les périodes de mesures des PM2.5 et des PM10 ont été planifiées de manière discontinue pour les stations de Castellane et Notre-Dame du Mont.

Les périodes de mesures de 3 semaines à chaque station ont été réparties sur les périodes suivantes :

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 Castellane | 07/12/22 au 13/12/22 | 03/01/23 au 09/01/23 | 10/01/23 au 16/01/23 |
| Station Notre-Dame du Mont | 02/02/23 au 08/02/23 | 27/02/23 au 05/03/23 | 06/03/23 au 12/03/23 |
| Station Blancarde | 21/03/23 au 27/03/23 | 29/03/23 au 04/04/23 | 05/04/23 au 12/04/23* |

*Le jour férié du lundi 10 avril 2023 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 suivantes :

Tableau 8 : Périodes d'échantillonnage dans les rames

| Points de mesure | Période 1 | Période 2 | Période 3 |
|------------------|-----------|-----------|-----------|
| Ligne 1 | 22/06/23 | 26/06/23 | 29/06/23 |
| Ligne 2 | 23/06/23 | 28/06/23 | 30/06/23 |

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.

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

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 |
| 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

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

Les valeurs C_{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 2022-2023

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 le CO₂ 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 Castellane (ligne 2)

Les concentrations moyennes et maximales horaires en PM₁₀ et PM_{2.5} de la station Castellane 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 Castellane – analyseur automatique

| Polluant | Période | Valeur | Semaine (du lundi au dimanche) | Jours ouvrés (Lundi – Vendredi) | Jours de week-end |
|--|--|-----------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| Semaine 1 sans ventilation | | | | | |
| PM _{2.5} (µg/m ³) | 24h/24h | Moyenne | 48 | 54 | 35 |
| | | Maximum horaire | 106 | 106 | 62 |
| | Période d'ouverture du métro (5h-1h) | Moyenne | 54 | 61 | 39 |
| | | Maximum horaire | 106 | 106 | 62 |
| | Heures de pointe des jours ouvrés (7h à 9h – 17 à 19h) | Moyenne | - | 74 | - |
| | | Maximum horaire | - | 106 | - |
| Semaine 2 sans ventilation | | | | | |
| PM ₁₀ (µg/m ³) | 24h/24h | Moyenne | 136 | 149 | 104 |
| | | Maximum horaire | 277 | 277 | 167 |
| | Période d'ouverture du métro (5h-1h) | Moyenne | 155 | 170 | 119 |
| | | Maximum horaire | 277 | 277 | 167 |
| | Heures de pointe des jours ouvrés (7h à 9h – 17 à 19h) | Moyenne | - | 198 | - |
| | | Maximum horaire | - | 277 | - |
| Semaine 3 avec ventilation | | | | | |
| PM ₁₀ (µg/m ³) | 24h/24h | Moyenne | 102 | 100 | 106 |
| | | Maximum horaire | 241 | 232 | 241 |
| | Période d'ouverture du métro (5h-1h) | Moyenne | 118 | 116 | 123 |
| | | Maximum horaire | 241 | 232 | 241 |
| | Heures de pointe des jours ouvrés (7h à 9h – 17 à 19h) | Moyenne | - | 105 | - |
| | | Maximum horaire | - | 232 | - |

A la station Castellane, les concentrations moyennes 24h/24 sont respectivement de 136 et 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 et les PM2.5. Il apparaît qu'elles sont plus importantes lors des heures de fonctionnement du métro de 5h à 1h (155 et 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), lors des jours ouvrés, et plus particulièrement lors des heures de pointe.

Le maximum horaire en PM10 sur la période d'ouverture du métro (277 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 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 106 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ est 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 35 %.

La mise en place du système de ventilation pendant les heures de pointe des jours ouvrés permet une baisse des PM10 de 32 % des concentrations moyennes des heures d'ouverture et de 47 % sur les heures de pointe.

► 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 2023

| Polluant | Période | Valeur | Semaine (lundi – dimanche) | Jours ouvrés (Lundi – Vendredi) | Jours de week-end |
|------------------------------------|--|-----------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------|
| Semaine 1 sans ventilation | | | | | |
| PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 24h/24h | Moyenne | 40 | 42 | 36 |
| | | Maximum horaire | 74 | 74 | 64 |
| | Période d'ouverture du métro (5h-1h) | Moyenne | 43 | 46 | 37 |
| | | Maximum horaire | 74 | 74 | 64 |
| | Heures de pointe des jours ouvrés (7h à 9h – 17 à 19h) | Moyenne | - | 45 | - |
| | | Maximum horaire | - | 61 | - |
| Semaine 2 sans ventilation | | | | | |
| PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 24h/24h | Moyenne | 113 | 120 | 96 |
| | | Maximum horaire | 200 | 200 | 136 |
| | Période d'ouverture du métro (5h-1h) | Moyenne | 122 | 131 | 100 |
| | | Maximum horaire | 200 | 200 | 136 |
| | Heures de pointe des jours ouvrés (7h à 9h – 17 à 19h) | Moyenne | - | 143 | - |
| | | Maximum horaire | - | 188 | - |
| Semaine 3 avec ventilation | | | | | |
| PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 24h/24h | Moyenne | 91 | 91 | 91 |
| | | Maximum horaire | 173 | 173 | 165 |
| | Période d'ouverture du métro (5h-1h) | Moyenne | 100 | 100 | 102 |
| | | Maximum horaire | 173 | 173 | 165 |
| | Heures de pointe des jours ouvrés (7h à 9h – 17 à 19h) | Moyenne | - | 108 | - |
| | | Maximum horaire | - | 169 | - |

A la station Notre-Dame du Mont, les concentrations moyennes 24h/24 sont respectivement de 113 et 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 et les PM2.5. Comme à la station Castellane, elles sont plus importantes lors des heures de fonctionnement du métro de 5h à 1h (122 et 43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), lors des jours ouvrés, et plus particulièrement lors des heures de pointe.

Le maximum horaire en PM10 sur la période d'ouverture du métro (200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 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 74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ est inférieur 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 également de 35 %.

La mise en place du système de ventilation pendant les heures de pointe des jours ouvrés permet une baisse des PM10 de 24 % des concentrations moyennes des heures d'ouverture et des heures de pointe. Cette baisse est moins importante que celle observée à la station Castellane.

► Station Blancarde (ligne 1)

Les concentrations moyennes et maximales horaires en PM10 et PM2.5 de la station Blancarde 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 PM_{2.5} de la station Blancarde – analyseur automatique 2023

| Polluant | Période | Valeur | Semaine (du lundi au dimanche) | Jours ouvrés (Lundi – Vendredi) | Jours de week-end |
|------------------------------------|--|-----------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| Semaine 1 sans ventilation | | | | | |
| PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 24h/24h | Moyenne | 32 | 35 | 25 |
| | | Maximum horaire | 77 | 77 | 43 |
| | Période d'ouverture du métro (5h-1h) | Moyenne | 35 | 38 | 27 |
| | | Maximum horaire | 77 | 77 | 43 |
| | Heures de pointe des jours ouvrés (7h à 9h – 17 à 19h) | Moyenne | - | 45 | - |
| | | Maximum horaire | - | 66 | - |
| Semaine 2 sans ventilation | | | | | |
| PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 24h/24h | Moyenne | 93 | 105 | 62 |
| | | Maximum horaire | 208 | 208 | 156 |
| | Période d'ouverture du métro (5h-1h) | Moyenne | 105 | 120 | 68 |
| | | Maximum horaire | 208 | 208 | 156 |
| | Heures de pointe des jours ouvrés (7h à 9h – 17 à 19h) | Moyenne | - | 157 | - |
| | | Maximum horaire | - | 208 | - |
| Semaine 3 avec ventilation | | | | | |
| PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 24h/24h | Moyenne | 81 | 83 | 74 |
| | | Maximum horaire | 175 | 175 | 137 |
| | Période d'ouverture du métro (5h-1h) | Moyenne | 89 | 91 | 84 |
| | | Maximum horaire | 175 | 175 | 137 |
| | Heures de pointe des jours ouvrés (7h à 9h – 17 à 19h) | Moyenne | - | 83 | - |
| | | Maximum horaire | - | 170 | - |

A la station Blancarde, les concentrations moyennes 24h/24 sont respectivement de 93 et 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 et les PM2.5. Comme aux deux autres stations, elles sont plus importantes lors des heures de fonctionnement du métro de 5h à 1h (105 et 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), lors des jours ouvrés, et plus particulièrement lors des heures de pointe.

Le maximum horaire en PM10 sur la période d'ouverture du métro (208 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 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 77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ est inférieur 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 33 %.

La mise en place du système de ventilation pendant les heures de pointe des jours ouvrés permet une baisse des PM10 de 24 % des concentrations moyennes des heures d'ouverture et de 47 % sur les heures de pointe.

► 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 ont toute dépassé la valeur de gestion OMS de 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Castellane est la seule des trois stations échantillonnées ayant dépassé la valeur de gestion OMS des PM2.5 pour une exposition d'une heure de 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Le station Castellane présente les niveaux en PM10 et PM2.5 les plus importants des trois stations échantillonnées.

Les proportions de PM2.5 dans les PM10 sont de 33 à 35 %, 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 du système de ventilation aux heures de pointes s'avère très efficace puisqu'elle permet la diminution des concentrations en PM10 de 47 % sur ces périodes d'heures de pointe pour les stations Castellane et Blancarde et de 24 % pour la station Notre-Dame du Mont. Elle occasionne également une diminution des concentrations sur l'ensemble de la période d'ouverture du métro de 32 % pour Castellane et 24 % pour les stations de Notre-Dame du Mont et Blancarde.

VI.1.1.2 Profils horaires des stations sans ventilation

Les profils horaires des PM₁₀ et PM_{2.5} aux trois stations échantillonnées lors des jours ouvrés (cf. Figure 8), montrent une augmentation significative des concentrations en PM₁₀ après 5 heures du matin, l'heure d'ouverture du métro.

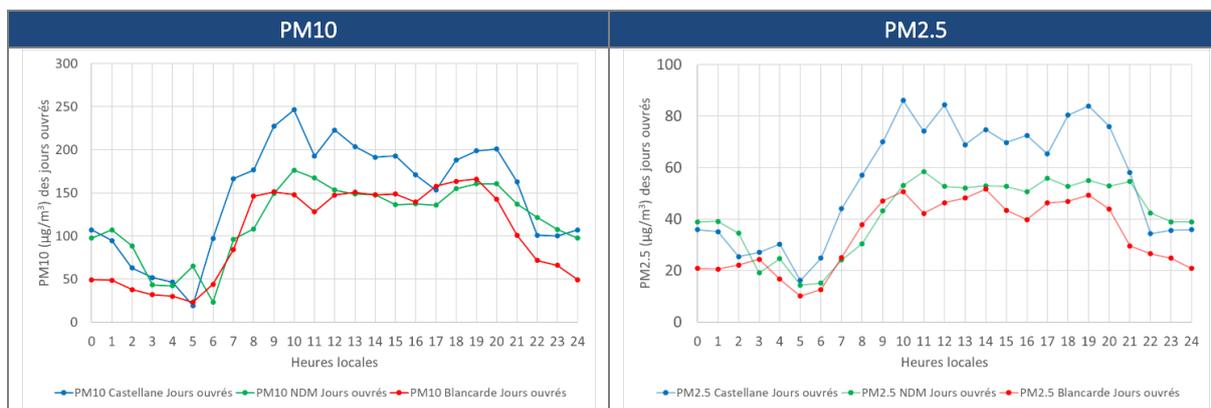
Les maximums sont globalement observés aux heures de forte affluence (trajet domicile/travail ou domicile/école) en matinée et en fin d'après-midi/début de soirée, mais ne sont pas identiques entre les stations :

- Au niveau de la station Blancarde, les maximums sont observés entre 8h et 10h et entre 17h à 19h. Les niveaux mesurés sont d'environ 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM₁₀ et 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{2.5} sur ces créneaux horaires. Les concentrations baissent à 11h, pour ensuite remonter et atteindre un palier sur le reste de la journée avant une ré-augmentation à partir de 17 h avec des concentrations légèrement plus importantes que celles de la matinée.
- A la station Notre-Dame du Mont, l'augmentation des concentrations continue jusqu'à 10 heures pour les PM₁₀ et 11h pour les PM_{2.5}, pour atteindre 175 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne à cette

heure pour les PM₁₀ et autour de 60 µg/m³ pour les PM_{2.5}, avant de décroître modérément. L'augmentation observée en fin de journée est moins importante que celle de la matinée.

- A la station Castellane, les concentrations sont globalement plus importantes qu'à Notre-Dame du Mont et Blancarde. Elles atteignent leur maximum à 10h, aussi bien pour les PM₁₀ que les PM_{2.5}, pour atteindre 250 µg/m³ en moyenne à cette heure pour les PM₁₀ et autour de 80 µg/m³ pour les PM_{2.5}, avant de décroître progressivement. L'augmentation observée en fin de journée est également moins importante que celle de la matinée.

Figure 8 : Profils horaires des jours de semaine des concentrations en PM10 et PM2.5 – périodes sans ventilation

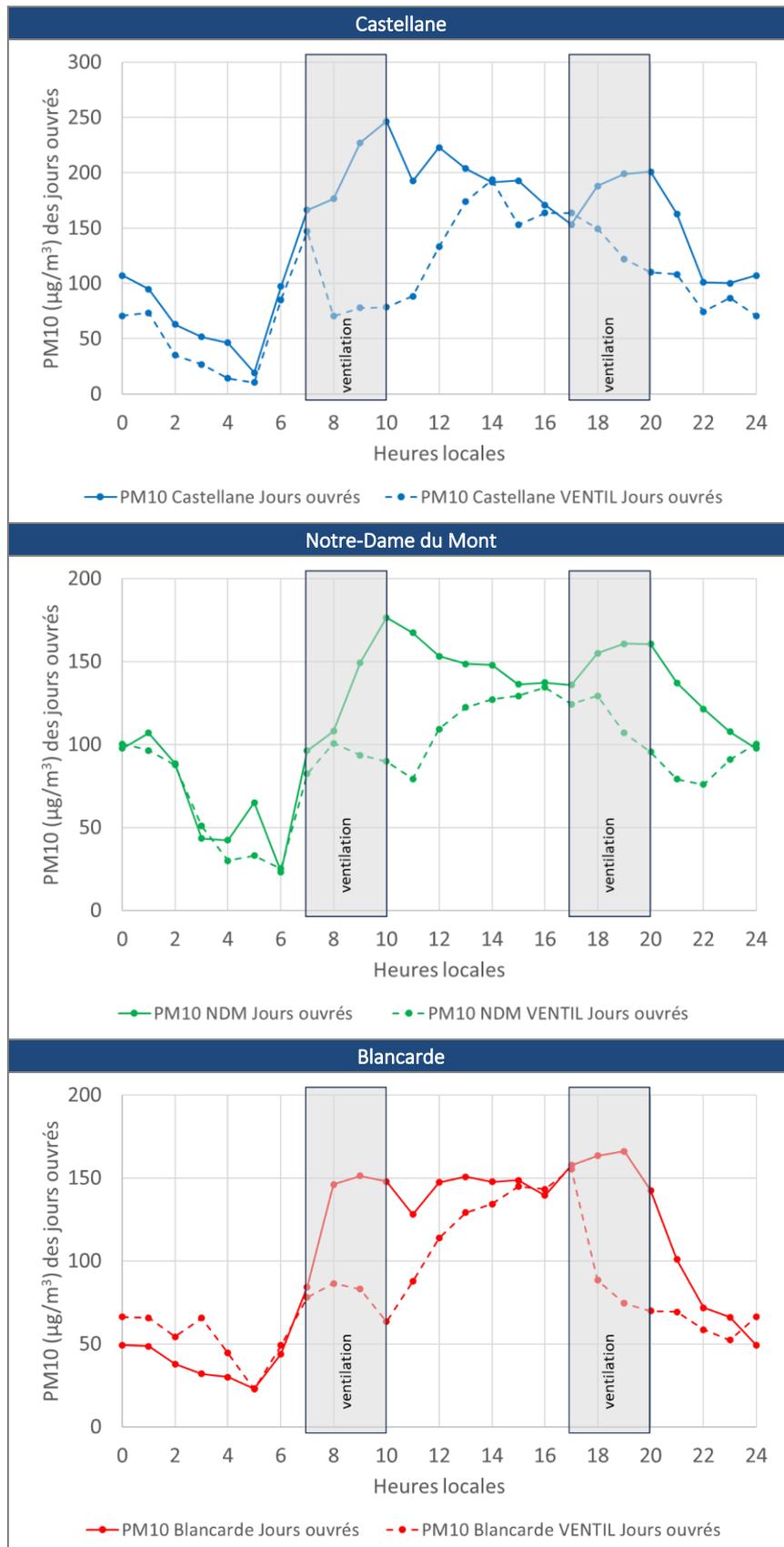


Les profils horaires en PM10 des trois stations échantillonnées montrent tous des augmentations des concentrations aux périodes d'affluence de la journée en matinée et fin d'après-midi/début de soirée. Les concentrations de pointe en PM10 et PM2.5 de la station Castellane sont significativement plus importantes qu'aux stations Notre-Dame du Mont et Blancarde.

VI.1.1.3 Comparaison aux périodes avec ventilation

Pour chacune des stations de métro échantillonnées, la comparaison des profils horaire entre les périodes avec et sans ventilation permet de mettre en évidence l'apport du système de ventilation dans la Figure 9.

Figure 9 : Comparaison des profils journaliers en PM10 avec sans ventilation aux trois stations échantillonnées



Ces profils montrent l'impact significatif de la ventilation sur les périodes où elle fonctionne, avec des

concentrations plus faibles aux périodes d'affluence ce qui représente un double avantage :

- Cela permet d'éviter les concentrations les plus extrêmes ;
- Cela implique qu'une grande partie des voyageurs qui prennent le métro aux heures de pointe soient exposés à des concentrations significativement plus faibles.

La mise en route du système de ventilation aux heures de pointe 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 la période de concentrations extérieures maximale en PM10 aux stations Marseille Longchamp et Rabatau correspond à la période de mesure sur le quai de la station Notre-Dame du Mont, qui a présenté une concentration moyenne intérieure légèrement supérieure à celle de la station Blancarde mais significativement inférieure à celle de Castellane. Les niveaux de fond extérieurs en particules fines ne peuvent donc pas expliquer les concentrations significativement supérieures de la station Castellane par rapport à celle de Notre-Dame du Mont. Cette différence de concentrations extérieure en PM10 pourrait expliquer en partie la légère différence de concentrations intérieures des stations Notre-Dame du Mont et Blancarde.

Pour les PM2.5, les différentes périodes de mesure ont montré des concentrations très similaires entre-elles. Les différences observées à l'intérieur des stations de métro ne peuvent donc pas avoir été influencées par les concentrations en air ambiant.

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

- De 2 à 3 fois plus importantes qu'à la station de type de trafic pour les PM10 et les PM2.5
- De 3 à 7 fois plus importantes qu'à la station de fond urbain de Longchamp pour les PM10, 2 à 5 fois pour les 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) |
| Castellane | PM10 | 136 | 19 | 41 |
| | PM2.5 | 48 | 15 | 16 |
| Notre-Dame du Mont | PM10 | 113 | 31 | 49 |
| | PM2.5 | 40 | 10 | 14 |
| Blancarde | PM10 | 93 | 19 | 42 |
| | PM2.5 | 32 | 7 | 9 |

Les évolutions des concentrations extérieures en PM10 et PM2.5 ne semblent que peu avoir influencé les différences de concentrations sur les quais des différentes stations de métro échantillonnées.

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

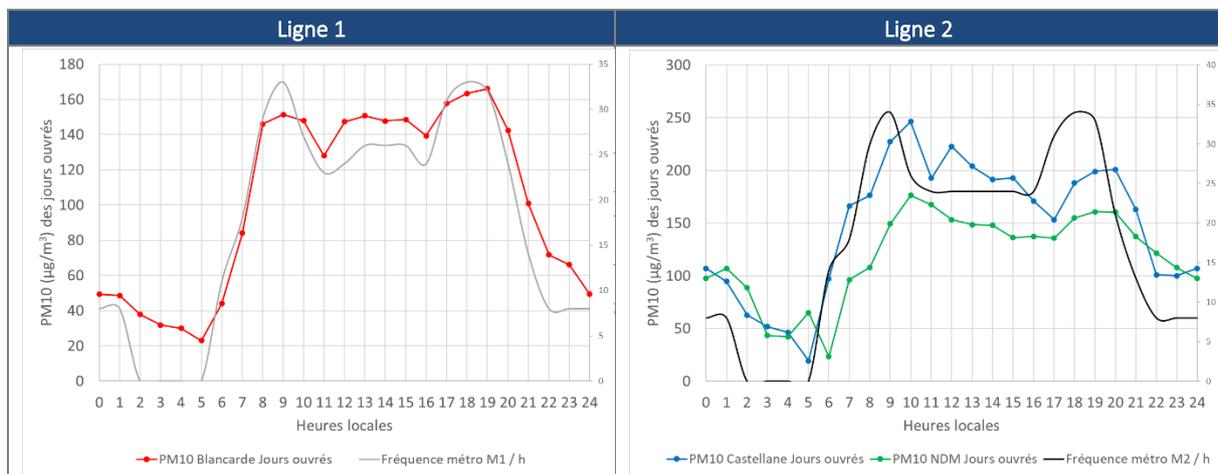
► **Influence du passage des rames sur l'évolution des concentrations en PM₁₀ sur les quais**

La comparaison des profils horaires avec la fréquence de passage des rames de métro des jours ouvrés (cf. Figure 10) semble indiquer que l'évolution des concentrations en particules fines est influencée par la fréquence de passage des rames, avec notamment une augmentation significative des niveaux de particules lors du passage des premiers métros le matin.

Cependant, alors que les pics de concentration en PM₁₀ du matin et de l'après-midi à la station Blancarde sont relativement synchrones avec les pics de passage de rames de la ligne 1, il est observé un décalage d'une heure entre les pics de PM₁₀ du matin et du soir aux stations Castellane/Notre-Dame du Mont et la fréquence maximale de passage de métro de la ligne 2.

Le décalage des pics matinaux dans les stations de la ligne 2 n'est pas clairement expliqué. Il pourrait s'agir d'une conséquence de la remise en suspension par le passage des rames de métro de particules situées plus en amont dans le réseau de tunnel, qui finissent par impacter les stations de Notre-Dame du Mont et Castellane.

Figure 10 : Comparaison des profils horaires en PM₁₀ et de la fréquence de passage des métros sur la ligne correspondante des jours de semaine



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

► **Les différences de niveaux entre les stations**

Les niveaux en PM₁₀ et PM_{2.5} montrent des concentrations différentes à la station Castellane (ligne 2) par rapport aux stations de Notre-Dame du Mont (ligne 2) et Blancarde (ligne 1).

Les fréquences de passage des métros étant identiques entre les stations d'une même ligne et similaires d'une ligne à l'autre, le nombre de métro ne peut pas expliquer la différence de concentration notable entre les stations Castellane et Blancarde/Notre-Dame du Mont.

La fréquentation est près de 4 fois plus importante à la station Castellane qu'aux stations Blancarde et Notre-Dame du Mont. L'influence du nombre de personnes présentes pourrait être un facteur influençant notablement les concentrations en particules fines sur les quais. Cependant, ce n'est pas ce qui a été observé lors de la précédente campagne de mesure de 2021 entre les stations Castellane, Périer et Réformés⁶.

⁶ Qualité de l'air intérieur du métro de Marseille – Campagne 2021 : <https://www.atmosud.org/sites/sud/files/medias/documents/2022-03/Qualit%C3%A9%20de%20l%E2%80%99air%20int%C3%A9rieur%20du%20m%C3%A9tro%20de%20Marseille%20>

Lors des deux précédentes campagnes de mesures (2019 et 2021), 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. Cet élément pourrait expliquer en partie les niveaux supérieurs observés dans ces dernières, en raison des différences d'écoulement de l'air que les murs de l'enceinte provoquent sur les quais aux extrémités.

Ceci peut donc expliquer les différences observées entre la station Notre-Dame du Mont (avec un quai central) et Castellane (avec deux quais extérieurs).

La station Blancarde fait exception puisqu'elle présente des concentrations similaires à celles de Notre-Dame du Mont alors qu'elle possède des quais extérieurs. Néanmoins, la station Blancarde est particulière, il s'agit d'une station plus récente (2010) dont l'encrassement des tunnels adjacents au fil du temps est moins important et dont la configuration est différente, avec des quais plus larges, des volumes intérieurs beaucoup plus importants et, un échange avec l'extérieur facilité.

La différence de niveaux observés en PM10 entre Castellane et Notre-Dame du Mont pourrait être expliquée par leur différence de fréquentation et de configuration de leur quais (central ou extérieurs). Pour la station Blancarde, la différence de fréquentation, le 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 qu'à la station Castellane.

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 Castellane sont plus importants que ceux des stations Notre-Dame du Mont et Blancarde en PM10 et PM2.5. La mise en route du système de ventilation aux heures de pointe permet d'éviter la forte augmentation des niveaux sur les heures où les concentrations sont habituellement les plus importantes.

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.

Les disparités de niveaux observés entre la station Castellane et celles de Notre-Dame du Mont et de Blancarde pourraient être expliquées par la configuration spatiale des quais, le volume intérieur et la facilité d'échanges avec l'air ambiant.

VI.1.2 Concentrations en métaux

Dans le cadre de cette campagne de mesure, le préleveur de particules a été équipé pour prélever la masse et les métaux de la fraction PM10. Les différents résultats des concentrations de l'ensemble des métaux sont disponibles en Annexe 3.

VI.1.2.1 Résultats généraux des périodes sans ventilation

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 2023

| Stations | Castellane | Notre-Dame du Mont | Blancarde |
|------------------------|--|--------------------|-----------|
| Nombre de prélèvements | 7* | 14 | 14 |
| Polluants | Concentration moyenne (ng/m ³) | | |
| Aluminium | 4 910 | 4 687 | 4 955 |
| Antimoine | 7 | 6.4 | 3.9 |
| Arsenic | 24.2 | 18 | 13.1 |
| Baryum | 22.3 | 18.5 | 9.5 |
| Cadmium | 0.34 | 0.45 | 0.22 |
| Calcium | 967 | 1 017 | 220 |
| Chrome | 102 | 56 | 48 |
| Cuivre | 5 435 | 3 509 | 3 187 |
| Fer | 70 865 | 51 411 | 46 835 |
| Manganèse | 707 | 428 | 442 |
| Nickel | 133 | 79 | 71 |
| Plomb | 7.5 | 6 | 3.9 |
| Potassium | 1 606 | 1 464 | 1 456 |
| Zinc | 124 | 88 | 82 |

*un problème de prélèvement a occasionné une perte des 7 premiers jours de mesure de la période de mesure

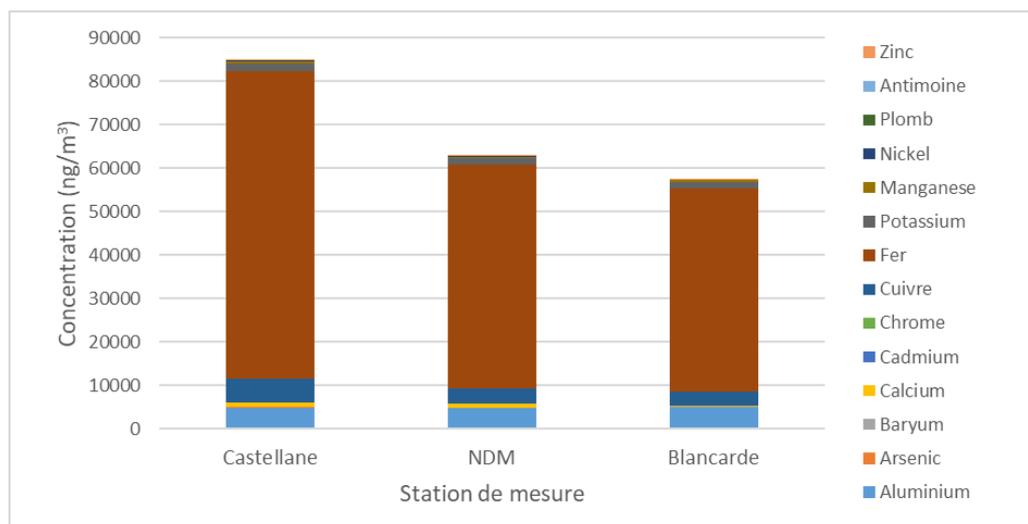
Il est observé que :

- Les concentrations de la majorité des métaux sont plus importantes à la station Castellane qu'aux stations Notre-Dame du Mont et Blancarde, ce qui est cohérent avec les différences de concentrations en particules fines PM10 et PM2.5.
- 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'ANSES⁷ : le cuivre (Cu) et le manganèse (Mn).

Les concentrations moyennes cumulées des métaux de chaque station sont présentées sur la Figure 11.

⁷ Polluants « émergents » dans l'air ambiant - Identification, catégorisation et hiérarchisation de polluants actuellement non réglementés pour la surveillance de la qualité de l'air – ANSES 2018

Figure 11 : Concentrations moyennes cumulées des 14 métaux mesurés aux différentes stations (sans ventilation)



Parmi l'ensemble des métaux, le fer (Fe) est l'élément trace métallique le plus largement présent (82 % de la masse des métaux mesurés), suivi du cuivre et de l'aluminium (6 à 7 %). La station de Castellane présente les cumuls de concentrations en métaux, ce qui est cohérent avec les concentrations en PM10 observées.

Les concentrations en métaux sont plus importantes à la station Castellane qu'aux stations Notre-Dame du Mont Blancarde.

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

L'évolution des concentrations en métaux en fonction de la mise en marche du système de ventilation est présentée dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Evolution des concentrations en métaux en fonction de la mise en marche du système de ventilation

| | Castellane | | Notre-Dame du Mont | | Blancarde | |
|------------------------|--------------------------------|---|--------------------------------|---|--------------------------------|---|
| Nombre de prélèvements | 7 | | 7 | | 7 | |
| Polluants | Concentration avec ventilation | Pourcentage de réduction des concentrations | Concentration avec ventilation | Pourcentage de réduction des concentrations | Concentration avec ventilation | Pourcentage de réduction des concentrations |
| Aluminium | 4 462 | -9% | 4 813 | 3% | 4 687 | -5% |
| Antimoine | 5.9 | -16% | 4.8 | -25% | 4.2 | 8% |
| Arsenic | 19.2 | -21% | 14.2 | -21% | 11.9 | -9% |
| Baryum | 21.4 | -4% | 12 | -35% | 9.8 | 3% |
| Cadmium | 0.31 | -9% | 0.25 | -44% | 0.22 | 0% |

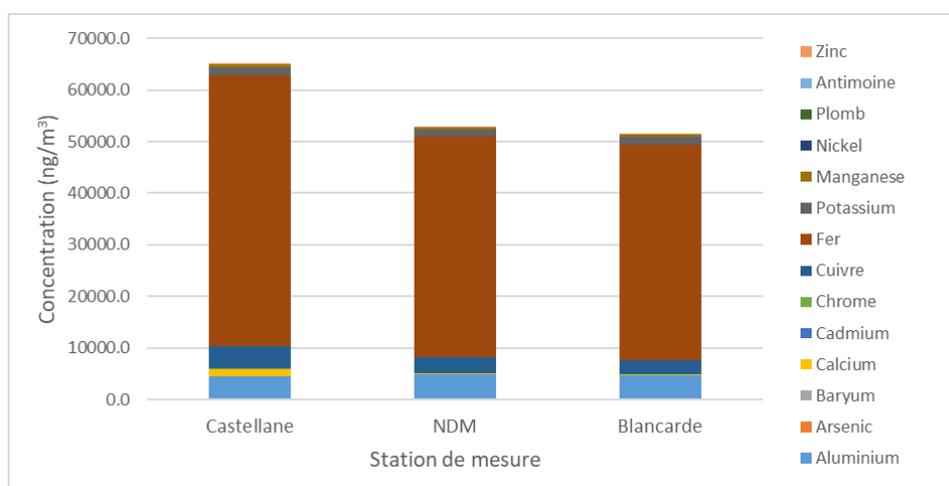
| | | | | | | |
|----------------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|--------------|
| Calcium | 1 437 | 49% | 220 | -78% | 220 | 0% |
| Chrome | 68 | -33% | 51 | -9% | 48 | 0% |
| Cuivre | 4 280 | -21% | 3 081 | -12% | 2 682 | -16% |
| Fer | 52 580 | -26% | 42 679 | -17% | 41 692 | -11% |
| Manganèse | 526 | -26% | 383 | -11% | 407 | -8% |
| Nickel | 104 | -22% | 66 | -16% | 61 | -14% |
| Plomb | 4.8 | -36% | 6.2 | 3% | 4.4 | 13% |
| Potassium | 1 474 | -8% | 1 400 | -4% | 1 551 | 7% |
| Zinc | 108 | -13% | 76 | -14% | 64 | -22% |
| Somme des 14 métaux | 84 911 | -23% | 62 788 | -16% | 57 326 | -10 % |

La mise en place de la ventilation a occasionné des baisses du cumul des concentrations en métaux des concentrations aux trois stations échantillonnées (10 à 23 %). Ces baisses concernent particulièrement l'arsenic, le cuivre, le fer, le manganèse, le nickel et le zinc. Pour les autres métaux, la ventilation n'a eu que peu d'effet ou des effets variés en fonction des stations. Ainsi, on peut considérer que les métaux les plus impactés par la ventilation sont ceux principalement d'origine intérieure au réseau.

Les concentrations moyennes cumulées des métaux de chaque station en période de mise en marche du système de ventilation sont présentées

Figure 12. La mise en route de la ventilation a fait baisser d'avantage certains métaux que d'autres (arsenic, cuivre, fer, manganèse, nickel, zinc) mais la proportion des métaux entre eux reste similaire, avec une grande majorité de fer, de cuivre et d'aluminium.

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

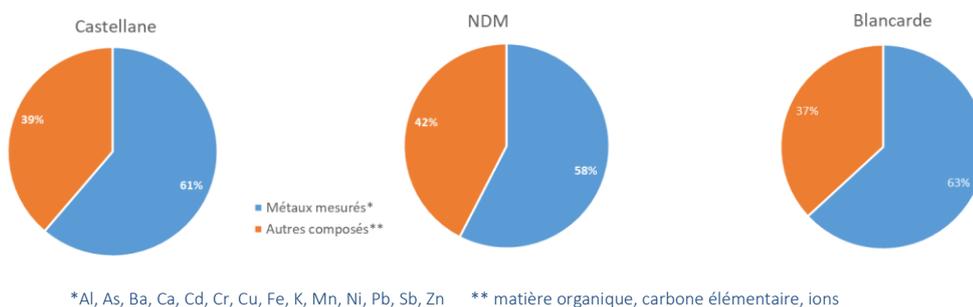


La mise en route de la ventilation a fait baisser les concentrations aux trois stations échantillonnées en arsenic, cuivre, fer, manganèse, nickel et zinc entre 10 et 23 %.

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

La Figure 13 montre que la somme des 14 métaux mesurés représente entre 37 et 42 % de la masse des PM₁₀ selon les stations, ce qui est **significativement plus important qu'en air ambiant** (en général inférieur à 10 %). La part restante des PM₁₀ peut être composée de matières organiques, de carbone élémentaire ou d'ions.

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



La somme des 14 métaux mesurés représente entre 58 et 63 % de la masse des PM10 selon les stations.

VI.1.2.4 Interprétation des résultats

► Différences des concentrations entre les stations

Le fait que les concentrations en métaux soient plus importantes à la station Castellane qu'aux stations Notre-Dame du Mont et Blancarde est logique puisque c'est ce qui est observé sur les PM10 et que les métaux représentent une part significative des PM10 dans les enceintes ferroviaires souterraines (INERIS, 2020).

Ainsi, les facteurs pouvant expliquer la différence de concentration entre les stations sont les mêmes que pour les PM10, à savoir, la configuration spatiale des quais, le volume intérieur et la facilité d'échanges avec l'air ambiant.

► Les niveaux supérieurs à la station Castellane

La concentration en métaux plus importantes à Castellane qu'aux deux autres stations pourrait être également expliquée par le fait que cette station, elle-même très fréquentée, est située au centre des deux autres stations les plus fréquentées de la ligne 2, St-Charles et Rond-point du Prado.

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

Depuis la campagne de mesure de 2019, il est observé qu'une majorité des stations possédant de 2 quais extérieurs desservant chacun une voie étaient plus propice à occasionner des concentrations importantes en particules fines et éléments trace métallique par rapport à une station avec quai central desservant 2 voies. Pour la station Blancarde, cela semble plutôt être la configuration spatiale de la station (quais larges, volumes intérieurs important et accès facilité à l'extérieur) qui semblent être à l'origine des concentrations plus faibles qu'à Castellane.

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

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

La mise en marche de la ventilation a occasionné une baisse globale des concentrations en métaux de 10 à 23 %. Les principaux métaux concernés par cette baisse sont l'arsenic, le cuivre, le fer, le manganèse, le nickel et le zinc.

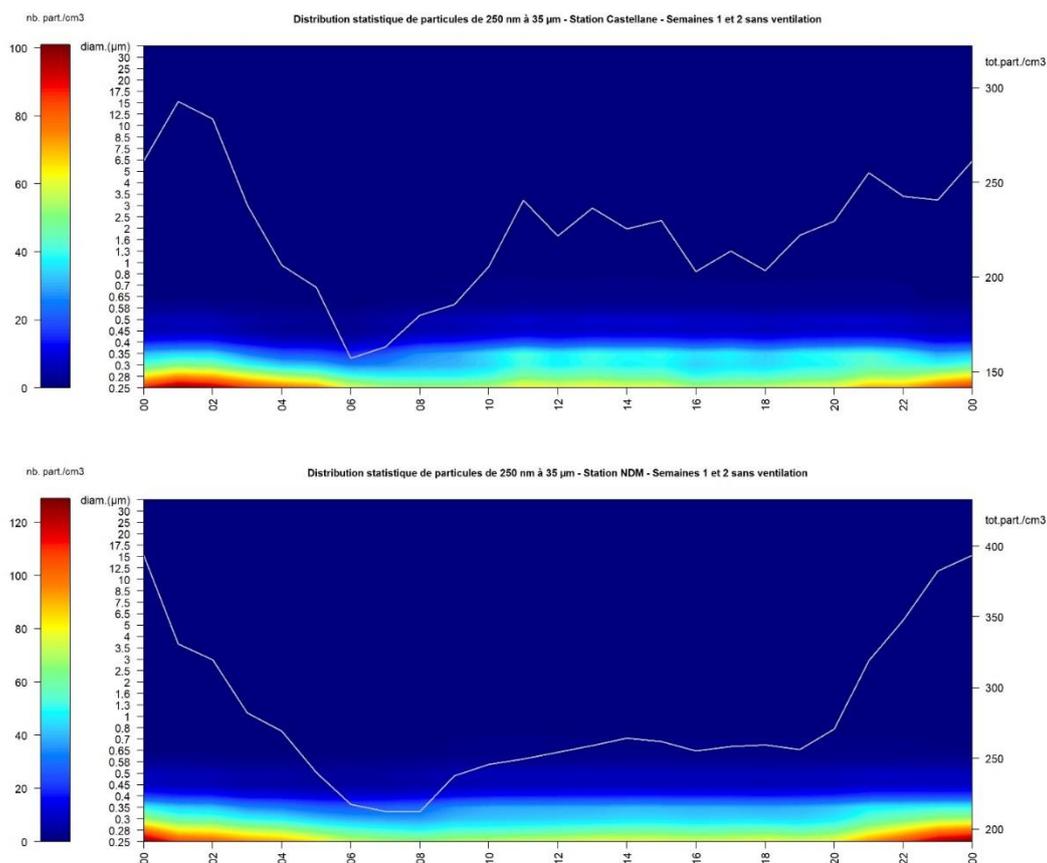
VI.1.3 Granulométrie des particules

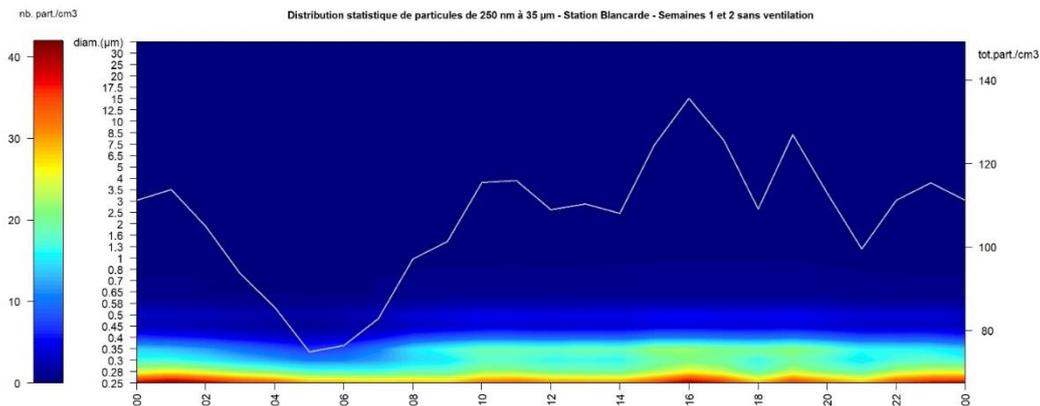
Le granulomètre installé aux stations de métro permet la mesure, en nombre, des particules de diamètre allant de 250 nm à 32 µm.

VI.1.3.1 Composition granulométrique des particules aux stations en condition sans ventilation

Le profil horaire de distribution granulométrique présentée en Figure 14, illustre l'évolution de la répartition granulométrique des particules de diamètre compris entre 250 nm et 35 µm.

Figure 14 : Répartition du nombre de particules/cm³ des fractions de 250 nm à 35 µm - stations Castellane, Notre-Dame du Mont et Blancarde





Le nombre de ces particules au cours des journées est sensiblement différent de celui des PM10 et PM2.5 en masse. Les particules les plus nombreuses augmentent effectivement dès l'ouverture du métro mais cette augmentation est plus progressive que pour les PM10 et PM2.5.

Les niveaux maximums sont observés en fin de soirée pour les stations historiques de Castellane et Notre-Dame du Mont et plutôt vers 16h pour la station Blancarde (stations inaugurées en 2010 et dont la configuration intérieure est sensiblement différente des stations historiques).

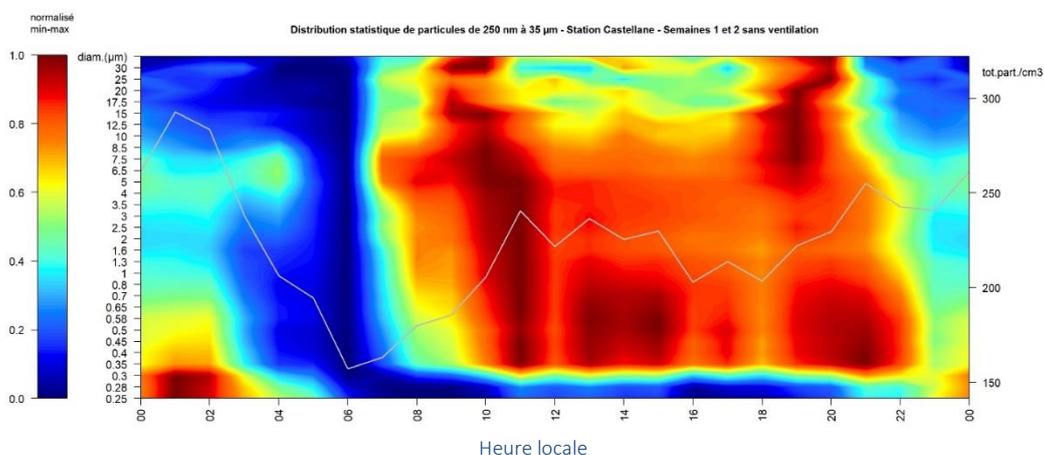
Sur l'ensemble de la gamme de mesures du granulomètre de 250 nm à 35 µm, ce sont **les particules les plus petites (comprises entre 250 nm et 500 nm) qui sont les plus nombreuses** (plus de 93 % des particules comptées sont dans cette gamme). Les profils d'évolution du nombre de particules au cours de la journée est sensiblement différent par rapport à celui des PM10 et PM2.5 en masse, avec une évolution plus progressive au cours de la journée.

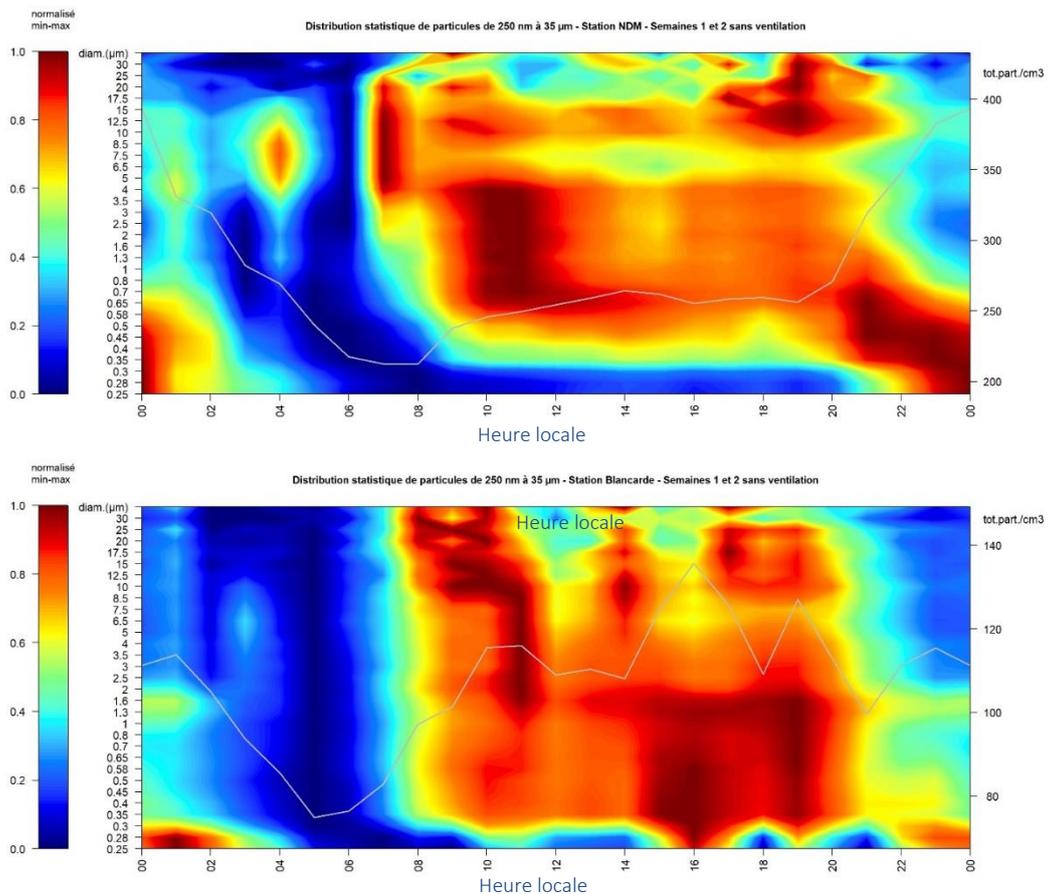
VI.1.3.2 Evolution temporelle

Chaque classe granulométrique de particule évolue différemment au cours du temps mais la représentation de leur évolution par le nombre de particules / cm³ permet de visualiser essentiellement les particules les plus fines qui sont les plus nombreuses.

Pour pallier ce biais, la normalisation par l'échelle min-max, permet de rendre compte de l'évolution horaire de la pollution particulaire par classe granulométrique. Cette méthode est appliquée ici et présentée dans la Figure 15.

Figure 15 : Profil horaire du nombre de particules/cm³ des fractions de 250 nm à 35 µm normalisé par le minimum et le maximum de chaque fraction - stations Castellane, Notre-Dame du Mont et Blancarde





Ainsi, sur les trois stations :

- Les particules les plus grossières augmentent avant les autres gammes après ouverture du réseau le matin, vraisemblablement en lien avec la remise en suspension des particules liée au passage des premiers métros,
- Un pic du nombre de particules les plus fines (entre 250 et 300 nm) est observé aux trois stations en fin de soirée/début de nuit, vraisemblablement en lien avec l'augmentation des concentrations habituellement observée en air ambiant à ces heures,
- Une augmentation du nombre des particules de taille intermédiaires (diamètre de 400 nm à plusieurs μm) autour de 10 h peut être en relation avec le pic d'affluence du matin. Il est également observé une augmentation du nombre de ces particules autour du pic d'affluence de l'après-midi mais celle-ci est particulièrement marquée à la station Blancarde et moins à Castellane et Notre-Dame du Mont.

Il apparaît un comportement différent des particules les plus grossières ($> 1\mu\text{m}$) et les particules plus fines.

Les particules grossières restent influencées par le nombre de passages de métro, en cohérence avec l'évolution des concentrations en $\text{PM}_{2.5}$ et PM_{10} . Les particules plus fines évoluent de manière plus progressive et les pics ne sont pas particulièrement associés à des événements clairement identifiés (contribution des occupants et/ou des concentrations extérieures).

Les particules les plus fines semblent être émises en moindre quantité par le matériel roulant et dépendre davantage des concentrations extérieures ou de la contribution des passagers eux-mêmes.

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

Les résultats de mesure des paramètres de confort en condition sans ventilation sont présentés dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Paramètres de confort sur les quais des 3 stations échantillonnées en 2023 sans ventilation

| Période | Valeur | Castellane | Notre-Dame du Mont | Blancarde |
|-----------------------|-------------------|------------|--------------------|-----------|
| CO ₂ (ppm) | Moyenne | 526 | 545 | 491 |
| | Minimum (10 min.) | 410 | 428 | 408 |
| | Maximum (10 min.) | 812 | 725 | 625 |
| Humidité relative (%) | Moyenne | 45 | 50 | 45 |
| | Minimum (10 min.) | 27 | 36 | 27 |
| | Maximum (10 min.) | 62 | 60 | 57 |
| Température (°C) | Moyenne | 22 | 19 | 22 |
| | Minimum (10 min.) | 18 | 15 | 19 |
| | Maximum (10 min.) | 24 | 20 | 24 |

Les résultats de mesure des paramètres de confort en condition sans ventilation sont présentés dans le Tableau 17 :

Tableau 17 : Paramètres de confort sur les quais des 3 stations échantillonnées en 2023 avec ventilation

| Période | Valeur | Castellane | Notre-Dame du Mont | Blancarde |
|-----------------------|-------------------|------------|--------------------|-----------|
| CO ₂ (ppm) | Moyenne | 513 | 516 | 488 |
| | Minimum (10 min.) | 413 | 424 | 415 |
| | Maximum (10 min.) | 758 | 671 | 619 |
| Humidité relative (%) | Moyenne | 41 | 57 | 41 |
| | Minimum (10 min.) | 32 | 39 | 21 |
| | Maximum (10 min.) | 61 | 69 | 60 |
| Température (°C) | Moyenne | 21 | 20 | 22 |
| | Minimum (10 min.) | 19 | 16 | 17 |
| | Maximum (10 min.) | 23 | 21 | 24 |

Conformément au guide de recommandations (INERIS, 2020), l'ensemble des données statistiques des mesures des paramètres de confort est présenté sous forme de tableau en Annexe 2 et sous forme de boxplot en Annexe 5.

VI.1.4.1 Humidité relative

Les taux d'humidité relative moyens, entre 40 et 60 %, respectent les taux recommandés en ambiance intérieure. La mise en route de la ventilation aux heures de pointe, ne semble pas avoir d'impact significatif sur le taux d'humidité de l'air.

VI.1.4.2 Températures

Les températures moyennes sont relativement homogènes dans les trois stations. Elles sont situées autour de 20°C. La mise en route de la ventilation aux heures de pointe, ne semble pas avoir d'impact significatif sur les températures intérieures.

VI.1.4.3 Confinement

Les concentrations en CO₂ sont très basses dans l'ensemble des 3 stations de métro échantillonnées, avec des concentrations moyennes autour de 500 ppm et des concentrations maximales sur 10 minutes

qui ne dépassent que très ponctuellement 800 ppm (concentration maximale observée à la station Castellane de 812 ppm).

Il n'existe pas de valeur de référence de CO₂ spécifique aux enceintes ferroviaires souterraines.

Cependant, à titre de comparaison, le règlement sanitaire départemental⁸ préconise le seuil de 1300 ppm en CO₂ (1000 ppm avec une tolérance à 1300 ppm pour les locaux non-fumeurs).

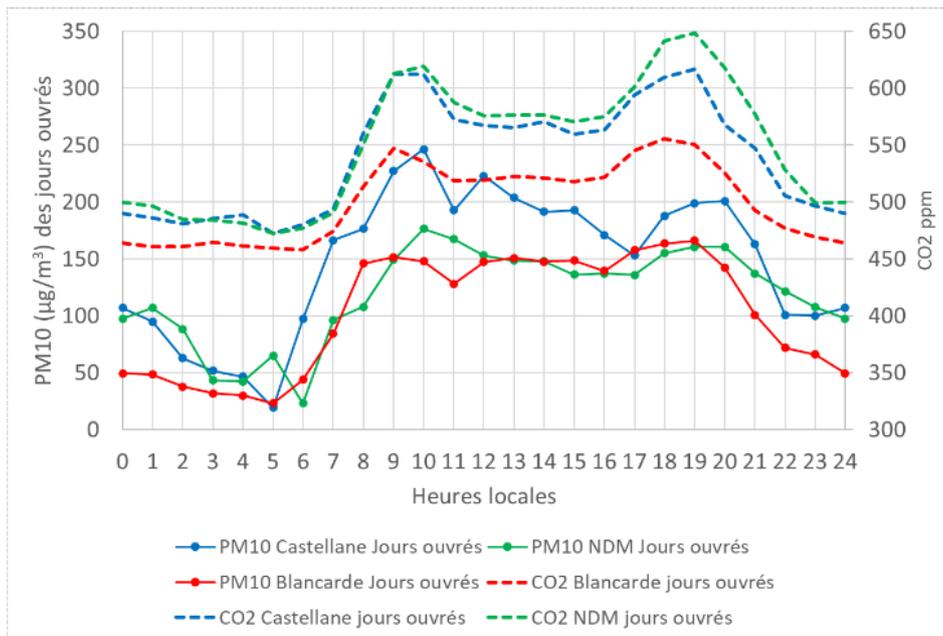
Le Haut Conseil de Santé Publique (HCSP) a émis un avis février 2022 concernant les niveaux de confinement admissibles dans les établissements recevant du public⁹. Ce dernier définit une valeur repère d'aide à la gestion pour une concentration de 800 ppm de CO₂ comme objectif d'un renouvellement de l'air satisfaisant des locaux occupés, par apport d'air neuf. Cette valeur de 800 ppm n'est dépassée dans aucune des stations de mesure pendant les périodes renseignées.

C'est la station Blancarde qui présente les concentrations globalement les plus faibles, ce qui cohérent avec la facilité d'accès aux espaces extérieurs facilitant ainsi que renouvellement d'air.

Les niveaux de confinement étant déjà faibles en condition sans ventilation, les mesures pendant les semaines où la ventilation a été mise en place aux heures de pointe n'ont pas montré de baisse significative des niveaux en CO₂.

Le profil horaire des concentrations dans les trois stations (cf. Figure 16 et Figure 17) montre une évolution en CO₂ au cours du temps similaire d'une station à l'autre, avec un pic le matin autour de 9h et le soir autour de 18h, ce qui correspond aux heures de pointe d'affluence du métro et de fréquence de passage des métros.

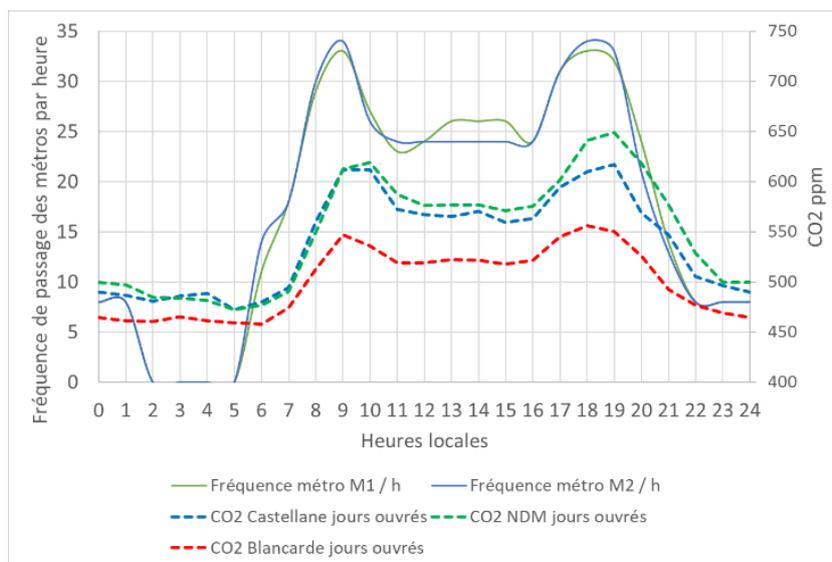
Figure 16 : Profil horaire de mesures de CO₂ mis en perspectives des concentrations en PM10



⁸ [REGLEMENT SANITAIRE DEPARTEMENTAL Bouches-du-Rhône](#)

⁹ Avis relatif à la mesure du dioxyde de carbone dans l'air intérieur des établissements recevant du public : <https://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=1154>

Figure 17 : Profil horaire de mesures de CO₂ mis en perspectives de la fréquence de passage des métros



Il n'est pas observé de problématique de confinement sur les quais du métro de Marseille, quelle que soit la station, pendant les périodes renseignées. L'évolution des concentrations en CO₂ sur les quais des trois stations suit la fréquence de passage des rames avec des pics entre 8h et 9h puis entre 18h et 19h. Ainsi, l'affluence correspond bien aux périodes où les métros sont les plus nombreux et où les concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5} sont les plus importantes.

Les quais des trois stations de métro échantillonnées montrent des concentrations en CO₂ faibles qui ne font pas état de problématique de confinement. L'évolution des concentrations en CO₂ suit les périodes de pointe de fréquentation du métro. Ainsi, c'est aux périodes où les concentrations en particules fines sont les plus importantes que le nombre de personnes exposés est le plus important. La mise en marche de la ventilation n'occasionne pas de différences significatives sur les concentrations en CO₂ puisqu'elles sont déjà faibles en conditions sans ventilation.

La ventilation permet une réduction très significative des concentrations en PM₁₀ sur les périodes où les niveaux sont les plus importants et où un maximum de personnes est présent dans le réseau et donc exposé à ces concentrations en particules fines importantes.

Les conditions hygrothermiques sont standards pour ce type d'environnement.

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. Le Tableau 18 montre que les concentrations moyennes en particules fines dans les rames de la ligne 2 sont respectivement de 113 µg/m³ en PM₁₀ et 73 µg/m³ en PM_{2.5}.

Pour les mesures dans les rames de la ligne 1, seuls les résultats de mesures de deux des trois périodes de mesures de 2 heures en période de pointe sont exploitables (un dysfonctionnement technique). Les concentrations moyennes en particules fines dans les rames de la ligne 1 sont respectivement de 114 µg/m³ en PM₁₀ et 76 µg/m³ en PM_{2.5}.

Il est observé une augmentation significative des concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5} en 2023 par rapport aux résultats de 2021 dans les rames des 2 lignes de métro, ce qui est cohérent avec les augmentations

de progressives des concentrations observées sur les quais.

Tableau 18 : Concentrations de PM10 et PM2.5 dans les rames des lignes 1 et 2

| C _{EFS} | Ligne | 2023 | | 2021 | |
|------------------------------|---------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | | PM ₁₀ | PM _{2.5} | PM ₁₀ | PM _{2.5} |
| Moyenne (µg/m ³) | Ligne 1 | 114 | 76 | 63 | 53 |
| Moyenne (µg/m ³) | Ligne 2 | 113 | 73 | 87 | 76 |

VI.2.1.1 PM₁₀

Les concentrations moyennes en PM₁₀ dans les rames sont moins importantes de 20 à 40 % que celles observées en période de pointe sur les quais des stations de métro échantillonnées avec :

- Station Blancarde (Ligne 1) : 157 µg/m³.
- Stations Castellane et Notre-Dame du Mont (Ligne 2) : 198 et 143 µg/m³.

Les concentrations PM₁₀ moins importantes dans les rames que sur les quais peuvent être attribuées :

- à la filtration de l'air entrant dans les rames (de type G2 qui retient essentiellement des particules grossières),
- à l'effet piston que génère le déplacement du métro dans les tunnels qui crée des mouvements d'air qui transportent les particules et impactent principalement les quais des stations de métro,
- aux différentes stations de métro souterraines traversées qui peuvent potentiellement présenter des concentrations inférieures à celles retenues pour cette campagne.

VI.2.1.2 PM_{2.5}

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

- Station Blancarde (Ligne 1) : 45 µg/m³.
- Stations Castellane et Notre-Dame du Mont (Ligne 2) : 74 et 45 µg/m³.

Ainsi, dans les rames, la proportion moyenne de PM_{2.5} dans les PM₁₀ est de l'ordre de 60 à 70 %, ce qui est significativement plus important que sur les quais (autour de 35 %).

Ces niveaux plus importants de PM_{2.5} dans les rames peuvent être potentiellement expliqués par :

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

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

La proportion de PM_{2.5} dans les PM₁₀ est plus importante dans les rames que sur les quais des métros.

L'un des facteurs principaux pouvant expliquer cette différence entre les PM₁₀ et PM_{2.5} dans les rames de métro est l'efficacité du système de filtration de l'air entrant des rames qui retient essentiellement les particules les plus grosses, les PM₁₀.

VI.2.2 Concentration en métaux

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

Les différents résultats des concentrations de l'ensemble des métaux sont disponibles en Annexe 7, et la moyenne des résultats est présentée dans le Tableau 19.

Tableau 19 : Concentrations moyennes en métaux dans les rames de métro

| Polluant | 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 |
| Aluminium | < 1030* | < 1033* | < 3310* | < 3310* |
| Antimoine | < 10* | < 10* | < 41* | < 41* |
| Arsenic | < 5* | 10* | < 16.6* | < 16.6* |
| Baryum | < 103* | < 103* | < 414* | < 414* |
| Cadmium | < 5* | < 5* | < 16.6* | < 16.6* |
| Calcium | < 5000* | < 5000* | <16552* | <16552* |
| Chrome | < 20* | < 20* | < 83* | < 83* |
| Cuivre | 2843 | 3466 | 1917 | 2411 |
| Fer | 35217 | 38560 | 24711 | 33703 |
| Manganèse | < 103* | < 140* | < 414* | < 414* |
| Nickel | < 103* | < 103* | < 414* | < 414* |
| Plomb | < 0.01* | < 0.01* | < 0.04* | < 0.04* |
| Potassium | < 1* | < 1* | < 3.3* | < 3.3* |
| Zinc | < 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 globalement supérieures aux limites de quantification disponibles. Il s'agit, comme démontré précédemment, des ETM les plus présents dans les stations.

Pour l'Arsenic, 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 pour la plupart légèrement inférieures à celles des stations :

- Ligne 1 :
 - Fer : 35 200 ng/m³, pour une concentration moyenne sur les sur les quais des stations de Blancarde de 41 700 ng/m³,
 - Cuivre : 2 840 ng/m³, pour une concentration moyenne sur les sur les quais des stations de Blancarde de 2 680 ng/m³,
- Ligne 2 :
 - Fer : 38 600 ng/m³, pour une concentration moyenne sur les quais des stations de Castellane et Notre-Dame du Mont de respectivement 52 600 et 42 700 ng/m³
 - Cuivre : 3 470 ng/m³, pour une concentration moyenne sur les quais des stations de Castellane et Notre-Dame du Mont de respectivement 4 300 et 3 100 ng/m³

Les tailles des particules métalliques étant plutôt grossières et les métaux représentant une part importante des PM10 (40%), il est logique que l'abattement observé en PM10 entre les quais et les rames soit retrouvé sur les métaux, soit entre 55 % et 75 % des concentrations mesurées sur les quais des stations échantillonnées sont retrouvées à l'intérieur de la rame de métro.

Ainsi, les mêmes hypothèses que pour les PM10 peuvent être avancées pour expliquer les différences de concentrations en métaux entre les quais et les rames :

- la filtration de l'air entrant dans les rames (de type G2 qui retient essentiellement des particules grossières),
- l'effet piston que génère le déplacement du métro dans les tunnels qui crée des mouvements d'air qui transportent les particules et impactent principalement les quais des stations de métro,
- les 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 (55 % à 75 % des concentrations obtenues sur les quais).

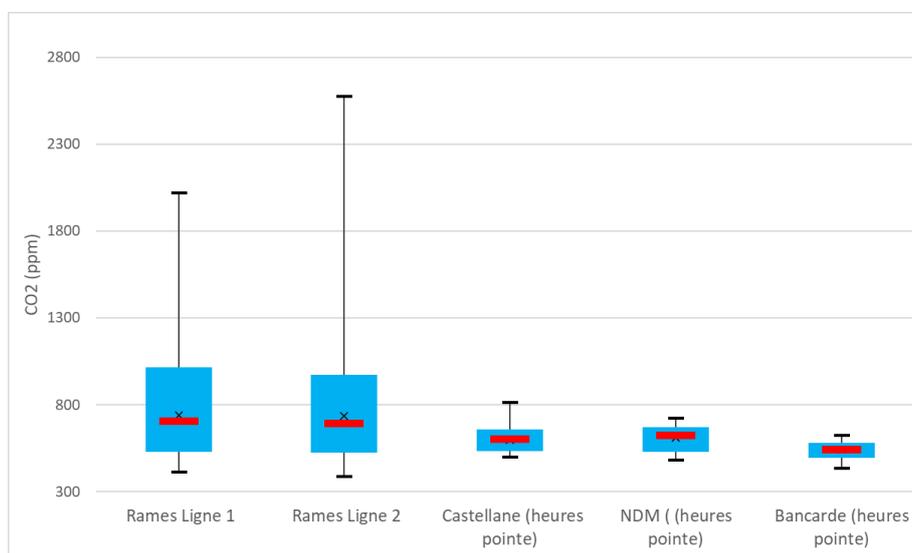
Comme pour les PM10, l'un des facteurs principaux pouvant expliquer les différences de concentrations en métaux dans les rames de métro par rapport aux quais des stations échantillonnées est l'efficacité du système de filtration de l'air entrant des rames qui retient essentiellement les particules les plus grosses dont les particules métalliques.

VI.2.3 Paramètres de confort

Les niveaux en CO₂ dans les rames des métros lors des heures de pointe des jours ouvrés (cf. Figure 18) montrent des **concentrations légèrement supérieures à celles rencontrées sur les quais**, avec une concentration moyenne de 740 ppm dans les rames des deux lignes de métro (contre entre 540 et 610 ppm sur les quais).

Près de 25 % des concentrations au pas de temps d'une 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).

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 établissements recevant du public. Néanmoins, près de 25 % des valeurs 1 minutes 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.

VII COMPARAISON AUX CAMPAGNES PRECEDENTES

VII.1 Particules fines sur les quais

VII.1.1 Rappels des études menées entre 2010 et 2021

Quatre précédentes campagnes de mesures ont été réalisées dans le métro Marseillais en 2010, 2016, 2019 et 2021, dont certaines sur des périodes de mesure beaucoup plus longues, de l'ordre de 6 mois. Elles ont permis d'évaluer la qualité de l'air de plusieurs stations de métro selon plusieurs paramètres de mesure.

Le détail de chaque campagne est présenté dans le Tableau 20.

Tableau 20 : Paramètres de mesures des campagnes de 2010 à 2021

| Année | Paramètre | Stations | | | | | | Rames |
|---|----------------------------|---------------|------------|------------|-----------|----------|--------|-------|
| | | Saint-Charles | Castellane | Fourragère | Blancarde | Réformés | Périer | |
| 2010 | Métaux | X | | | | | | |
| | PM ₁₀ | X | X | | | | | X |
| | PM _{2,5} | X | X | | | | | |
| | Benzène | X | X | | | | | X |
| | NO ₂ | X | | | | | | X |
| | HAP | X | | | | | | |
| | Amiante/silice cristalline | X | | | | | | |
| | CO | X | | | | | | |
| | CO ₂ | | | | | | | X |
| 2016 (durée de 6 mois) | Métaux | X | | | | | | X |
| | PM ₁₀ | X | | | | | | X |
| | PM _{2,5} | | | | | | | X |
| | Benzène | X | | X | | | | X |
| | NO ₂ | X | | X | | | | X |
| | CO ₂ | X | | | | | | X |
| 2019 (durée de 6 mois) | Métaux | X | | | X | | | |
| | PM ₁₀ | X | | | X* | | | |
| | PM _{2,5} | X | | | X* | | | |
| | Particules ultrafines | X | | | X | | | |
| | COV | X | | | X | | | |
| 2021 (durée de 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 hygrothermiques | | 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 2023 et les campagnes précédentes

Les campagnes de mesure de 2010 à 2019 ont été réalisées sur des périodes significativement plus longues (6 mois/station) et sont donc d'avantage représentatives statistiquement que la campagne

2021 (1 semaine/station).

Le Tableau 21 montre que les concentrations en PM10 de chaque campagne de mesure respectent toutes la valeur guide $C_{\text{sout-Lim}}$ de l'ANSES dans les EFS de $480 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une heure d'exposition.

La concentration en PM10 de la station Castellane ont augmenté d'une dizaine de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre la campagne de 2021 ($125 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et celle de 2023 ($136 \mu\text{g}/\text{m}^3$), alors que les concentrations en PM2.5 sont relativement stables (48 et $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

C'est la station Castellane qui montre les concentrations les plus importantes parmi l'ensemble des stations échantillonnées dans l'ensemble des campagnes de mesure.

La station Blancarde présente des concentrations en PM10 similaires à celles observées à la station St-Charles en 2019.

La station Notre-Dame du Mont présente des concentrations en PM10 légèrement inférieures à celle observées à la station Périer en 2021.

Comme pour chaque campagne de mesure, les concentrations intérieures en PM10 et PM2.5 sur les quais des stations échantillonnées sont significativement plus importantes que les concentrations extérieures.

Tableau 21 : Concentrations en PM10 par analyseur automatique des différentes campagnes de mesure dans le métro de Marseille

| Concentrations moyennes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | Années | Dans le métro | | | | | En air ambiant | | |
|--|------------------------------|--------|---------------|------------|------------|-----------|-----------|----------------|------------------|-------------------------|
| | | | Castellane | NDM | Blancarde | Réformés | Périer | St-Charles | Rabatau (Trafic) | Longchamp (fond urbain) |
| PM10 | Période 24h/24h | 2023 | 136 | 113 | 93 | - | - | - | 41/49/42* | 19//31/19* |
| | | 2021 | 125 | - | - | 85 | 123 | - | 43/45/36** | 27/20/22** |
| | | 2019 | - | - | - | - | - | 94 | 35 | 19 |
| | | 2016 | - | - | - | - | - | 89 | 38 | 28 |
| | | 2010 | 90 | - | - | - | - | 78 | - | 26 |
| | Période d'ouverture du métro | 2023 | 155 | 122 | 105 | - | - | - | - | - |
| | | 2021 | 145 | - | - | 96 | 144 | - | - | - |
| | | 2019 | - | - | - | - | - | 105 | - | - |
| | | 2016 | - | - | - | - | - | 96 | - | - |
| | | 2010 | 104 | - | - | - | - | 93 | - | - |
| PM2.5 | Période 24h/24h | 2023 | 48 | 40 | 32 | - | - | - | - | - |
| | | 2021 | 50 | - | - | 24 | 37 | - | - | - |
| | Période d'ouverture du métro | 2023 | 54 | 43 | 35 | - | - | - | - | - |
| | | 2021 | 57 | - | - | 27 | 43 | - | - | - |

*périodes correspondant dans l'ordre de gauche à droite aux campagnes de mesure aux stations Castellane, Notre-Dame du Mont et Blancarde

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

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

La station Castellane présente des concentrations en hausse de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à la campagne 2021. Les niveaux atteints sont significativement plus importants que ceux des autres stations de métro échantillonnées lors de cette étude ou des études précédentes.

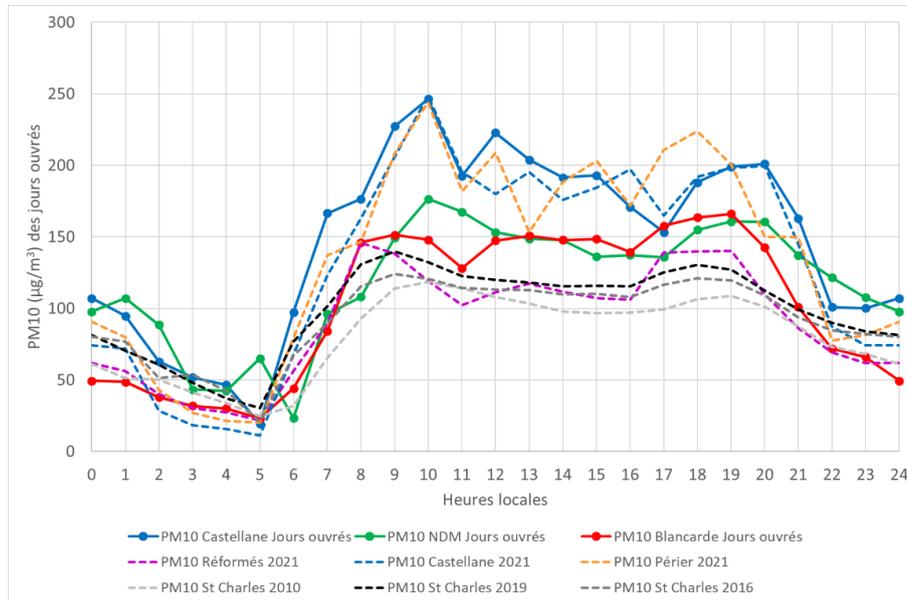
Les hypothèses pouvant expliquer les concentrations plus importantes à Castellane sont sa fréquentation importante, sa localisation entre deux autres stations très fréquentées ainsi que sa configuration avec quais extérieurs desservant chacun une voie.

L'augmentation des concentrations à cette station entre 2021 et 2023 peut être expliquée par la progression de la fréquentation et le vieillissement du matériel roulant.

VII.1.3 Comparaison des profils horaires

Les profils horaires en PM10 de cette étude 2023 sont comparés à ceux obtenus sur les années précédentes sur la station de Saint Charles (Figure 19).

Figure 19 : Comparaison des profils moyens journaliers en PM10 des campagnes 2010 à 2023 - périodes de jours ouvrés



Le profil journalier des jours ouvrés de la station Castellane (ligne 2) en 2023 est similaire à celui de 2021 et ressemblant avec celui de la station Périer (ligne 2) en 2021, à la différence près que le pic du soir est plus tardif.

Le profil de la station Notre-Dame du Mont (ligne 2) est également similaire à celui de la station Castellane mais avec des concentrations moins élevées.

Le profil de la station Blancarde (ligne 1) est plus proche de ce qui est observé aux stations Réformés (ligne 1) et de Saint-Charles (mesures réalisées sur le quai central desservant la ligne 1), avec des concentrations plus importantes.

La station St-Charles est commune aux deux lignes de métro. Ainsi, les arrivées des rames provenant des deux lignes peuvent influencer la qualité de l'air intérieur sur les quais. Il semble néanmoins que ce soit principalement la ligne 1 qui influence notablement la qualité de l'air au vu de la dynamique du profil journalier observé. Il est à noter que la station de mesures est située sur le quai central qui dessert la ligne 1.

Nb : Les profils journaliers de Castellane de 2023 et 2021 ne peuvent pas être comparés à celui de 2010 puisque la plage d'ouverture et la fréquence de passage des métros étaient alors complètement différentes.

Les stations de la ligne 2 (Castellane, Notre-Dame du Mont et Périer) présentent des profils journaliers similaires entre eux, avec des niveaux concentrations inférieurs pour Notre-Dame du Mont et un pic de fin d'après-midi plus précoce pour la station Périer. Les profils journaliers des stations desservant la ligne 1 (Blancarde, Saint-Charles et Réformés) montrent également des similitudes entre eux, avec des concentrations plus importantes pour la station Blancarde, des concentrations plus faibles pour St-Charles et des concentrations intermédiaires pour Réformés.

Ainsi, il semble que ce soit la ligne desservant les stations qui influence principalement la dynamique des profils journaliers de concentrations en PM10.

VII.1.4 Comparaison aux concentrations dans les enceintes ferroviaires françaises

Le guide de recommandations pour les enceintes ferroviaires souterraines de l'INERIS¹⁰ 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 françaises¹¹ 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 2023 sont du même ordre que les concentrations moyennes dans les EFS françaises.

Quelle que soit la station et l'année, 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 des concentrations significativement plus importantes que celles des autres stations de métro échantillonnées lors de cette étude ou des études précédente, avec une augmentation de 10 µg/m³ observée par rapport à la campagne de 2021.

Les hypothèses pouvant expliquer les concentrations plus importantes à Castellane sont sa fréquentation importante, sa localisation entre deux autres stations très fréquentées ainsi que sa configuration avec quais extérieurs desservant chacun une voie. L'augmentation des concentrations à cette station entre 2021 et 2023 peut être expliqués par la progression de la fréquentation et le vieillissement du matériel roulant.

Il semble que ce soit la ligne desservant les stations qui influence principalement la dynamique des profils journaliers de concentrations en PM₁₀, qui est donc similaire pour une même ligne de métro.

Les concentrations moyennes des 3 stations de mesures de la campagne 2023 sont cohérentes avec les concentrations moyennes dans les EFS françaises.

VII.2 Métaux sur les quais

Pour suivre les recommandations du guide de recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines », les prélèvements de la campagne 2023 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 :

- 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,
- 201 : prélèvements hebdomadaires, 12 filtres de 7 jours de prélèvement, répartis sur 6 mois.

Le Tableau 22 présente **à titre informatif** les résultats obtenus sur ces différentes campagnes pour permettre une comparaison :

¹⁰ Guide de recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines – INERIS 2020

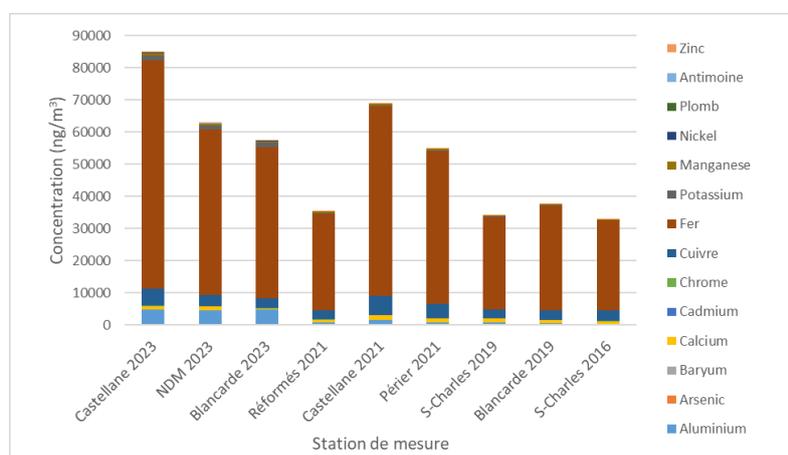
¹¹ Qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines (EFS) en France – AtmoSud 2021

Tableau 22 : Concentrations moyennes en métaux des campagnes 2016, 2019, 2021 et 2023

| Concentrations moyennes (ng/m ³) Prélèvement (J : Journalier, H : Hebdomadaire) | Castellane 2023 | NDM 2023 | Blancarde 2023 | Castellane 2021 | Réformés 2021 | Périer 2021 | St-Charles 2019 | Blancarde 2019 | St Charles 2016 | Autres EFS françaises ¹² (min - max) |
|--|-----------------|----------|----------------|-----------------|---------------|-------------|-----------------|----------------|-----------------|--|
| | J | J | J | J | J | J | H | H | H | |
| As | 24.2 | 18 | 13.1 | 22 | 13,1 | 17 | 14,3 | 10,8 | 16,7 | 0,4 - 16,7 |
| Cd | 0.34 | 0.45 | 0.22 | 0,24 | 0,4 | 0,26 | 0,4 | 0,3 | 1,7 | 0,3 - 3,9 |
| Ni | 133 | 79 | 71 | 134 | 60 | 111 | 78 | 86 | 91,6 | 5 - 91,6 |
| Pb | 7.5 | 6 | 3.9 | 5,4 | 7,4 | 5,2 | 8,4 | 6,8 | 7,5 | 6 - 120 |
| Al | 4 910 | 4 687 | 4 955 | 1 562 | 747 | 874 | 763 | 535 | - | 235 - 1332 |
| Ca | 967 | 1 017 | 220 | 1 513 | 952 | 1 168 | 1 234 | 953 | 1 196 | 1 196 - 2 854 |
| K | 1 606 | 1 464 | 1 456 | 243 | 269 | 221 | 189 | 144 | - | - |
| Ba | 22.3 | 18.5 | 9.5 | 17 | 9,6 | 13 | 11,1 | 9,7 | 10,1 | 10,1 - 336 |
| Cr | 102 | 56 | 48 | 51 | 23 | 61 | 22,6 | 25,7 | 27,5 | 27,5 - 204 |
| Cu | 5 435 | 3 509 | 3 187 | 5 889 | 2 802 | 4 468 | 2 702 | 3 153 | 3 475 | 165 - 5443 |
| Fe | 70 865 | 51 411 | 46 835 | 58 947 | 30 125 | 47 479 | 28 891 | 32 416 | 27 753 | 2 296 - 70 678 |
| Mn | 707 | 428 | 442 | 519 | 293 | 469 | 262 | 301 | 288 | 25 - 442 |
| Sb | 7 | 6.4 | 3.9 | 5,9 | 3,9 | 4,2 | 4,7 | 5,1 | - | 1 - 336 |
| Zn | 124 | 88 | 82 | 43,5 | 63 | 56 | 76 | 71 | 116 | 47,5 - 2 028 |

La Figure 20 présente la comparaison des concentrations moyennes cumulées des différents métaux mesurés lors des précédentes campagnes de mesures.

Figure 20 : Comparaison des concentrations moyennes cumulées des 14 métaux mesurés entre les campagnes 2016, 2019, 2021 et 2023



Au cours de la campagne 2023, il est observé une augmentation significative des concentrations en aluminium par rapports aux mesures effectuées les autres années.

La station Castellane présente les concentrations cumulées en métaux les plus importantes avec en 2023 des niveaux plus importants qu'en 2021. La station Blancarde montre une élévation significative des concentrations en métaux entre la campagne 2019 et 2023.

Les 3 stations dont le cumul des 14 métaux est le plus important sont les stations échantillonnées en 2023 (Castellane, Notre-Dame du Mont et Blancarde). Cela est influencé en partie par l'augmentation des concentrations en aluminium mais témoigne vraisemblablement d'une augmentation progressive des concentrations en métaux au cours des années, comme cela est observé sur les PM10, en lien avec

¹² Qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines (EFS) en France – AtmoSud 2020

le vieillissement du matériel roulant.

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, avec en 2023 des concentrations significatives aluminium (Al).

A l'exception de l'aluminium, les concentrations observées sont du même ordre ce que 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 métaux les uns par rapport aux autres reste similaire quelle que soit la station et la campagne de mesure, avec le Fer (Fe) comme élément principal.

En 2023, on observe une augmentation significative des concentrations en aluminium.

C'est la station Castellane qui présente la concentration en métaux la plus importante, suivie dans l'ordre par les stations Notre-Dame du Mont, Blancarde en 2023 suivi de Périer en 2021. Les stations de Réformés en 2021 et St-Charles (2016 à 2019) ferment la marche.

L'évolution des concentrations en métaux aux différentes stations montrent une augmentation systématique au cours des années, en lien potentiel avec le vieillissement du matériel roulant.

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

VII.3 Mesures des particules en nombre sur les quais

Les données de granulométrie des précédentes campagnes de mesure (2019 et 2021), présentées en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** confirment les tendances suivantes :

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

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

Les données de granulométrie de la campagne 2023 aux stations Castellane, Notre-Dame du Mont et Blancarde montrent des résultats similaires à ceux des campagnes 2019 et 2021 dans les stations St-Charles, Réformés et Périer.

Les particules inférieures à 1 µm ont une évolution au cours du temps différente des particules plus grossières, elles sont moins influencées par le passage des rames de métro.

Les émissions de particules liées au déplacement du matériel roulant ne semblent pas être prépondérantes pour les tailles de particules inférieures à 1 µm qui semblent essentiellement influencées par la présence des occupants et les concentrations extérieures.

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. Les quatre précédentes campagnes de mesure de 2010, 2016, 2019 et 2021 dans le métro Marseillais 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 a pour but 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 : Castellane et Notre-Dame du Mont sur la Ligne 2, et Blancarde sur la Ligne 1.

- ▶ **Sur les quais, des concentrations en PM10 plus élevées à Castellane mais qui respectent la valeur de gestion limite dans les Enceintes Ferroviaires Souterraines (EFS)**

L'ensemble des concentrations horaires maximales en PM10 aux trois stations de métro 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 $105 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station Blancarde (ligne 1) à 122 et $155 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aux stations Notre-Dame-du-Mont et Castellane (ligne 2), cette dernière ayant montré une augmentation de concentration de 7 % depuis la campagne de 2021.

- ▶ **Profils horaires en PM10 sur les quais similaires entre les stations d'une même ligne**

En comparant les données de cette campagne de mesure aux précédentes, on observe que les stations de la ligne 2 (Castellane, Notre-Dame-du-Mont et Périer) présentent des profils horaires similaires entre eux malgré des niveaux qui peuvent être différents. Les profils journaliers des stations desservant la ligne 1 (Blancarde, Saint-Charles et Réformés) montrent également des similitudes entre eux, avec des concentrations plus importantes pour la station Blancarde, des concentrations plus faibles pour St-Charles et des concentrations intermédiaires pour Réformés.

- ▶ **Des concentrations en PM2.5 sur les quais qui respectent la valeur de gestion**

Pour les PM2.5, les concentrations horaires maximales des stations Notre-Dame-du-Mont et de la Blancarde sont inférieures à la valeur de gestion C_{Sout_OMS} de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mais celle de la station Castellane la dépasse.

Les concentrations moyennes sur la période d'ouverture à la station Castellane ($54 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont légèrement plus importantes qu'à Notre-Dame du Mont ($43 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et Blancarde ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et sont stables par rapport à celles de la campagne 2021.

Les PM_{2.5} représentent entre 33 % et 35 % des PM10. L'évolution des concentrations au cours du temps suit celle des PM10.

- ▶ **Les particules les plus fines sur les quais ne sont que peu influencées par les passages des rames de métro**

Il apparaît un comportement différent du nombre de particules les plus grossières ($> 1 \mu\text{m}$) qui sont influencées par la fréquence de passages de métro (cohérent avec l'évolution des concentrations en PM2.5 et PM10), et les particules plus fines dont l'évolution est plus progressive et dont l'origine des pics est associée à d'autres événements (contribution des occupants et/ou des concentrations extérieures). Les particules de 250 nm à $1 \mu\text{m}$ semblent être émises en moindre quantité par le matériel

roulant et dépendre davantage des concentrations extérieures ou de la contribution des passagers eux-mêmes.

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

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 (82 %) suivi du cuivre et de l'aluminium (6 à 7 %).

Les concentrations à Castellane sont plus importantes qu'aux stations Notre-Dame du Mont et Blancarde. Une augmentation progressive des concentrations en métaux est globalement observée au cours des années sur l'ensemble des stations, en lien potentiel avec le vieillissement du matériel roulant.

- ▶ **L'expérimentation la mise en marche de la ventilation permet une réduction significative des concentrations en particules fines et métaux sur les quais**

La mise en marche du système de ventilation aux heures de pointes s'avère très efficace puisqu'elle permet la diminution des concentrations en PM10 de 47 % sur ces périodes d'heures de pointe pour les stations Castellane et Blancarde et de 24 % pour la station Notre-Dame du Mont.

Elle occasionne également une diminution des concentrations sur l'ensemble de la période d'ouverture du métro de 32 % pour Castellane et 24 % pour les stations de Notre-Dame du Mont et Blancarde.

Ces baisses significatives de concentrations sur les heures de pointe ne permettent pas pour autant de passer en dessous de la valeur de gestion $C_{\text{sout_OMS}}$ pour l'ensemble des 3 stations échantillonnées.

- ▶ **Un confinement faible sur les quais mais à améliorer dans les rames**

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

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.

Néanmoins, près de 25 % des valeurs 1 minutes 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.

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

Les deux seules substances ayant pu être quantifiées dans les rames sont le fer et le cuivre, soit les éléments 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 (NOx 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

NOx : 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 23 : Caractéristiques des quais

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

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

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

Tableau 24 : 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 | Méto | MPM76 | oui | non | 1 | 155,96 | Rail | pneu | électrique+friction | bois |
| M2 | Méto | MPM76 | oui | non | 1 | 155,96 | Rail | pneu | électrique+friction | bois |

Tableau 25 : 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 | 15-mars | 15h48-16h10 | 44 | 407 | 18.2 | 45.8 | |
| M1 | Chartreux | Milieu du quai | 1m 50 | 28-avr. | 16h11-16h26 | 35 | 436 | 21.9 | 44.6 | |
| M1 | Chartreux | Milieu du quai | 1m 50 | 5-mai | 7h56-8h10 | 59 | (-) | (-) | (-) | 46.0 |
| M1 | Cinq Avenues | Milieu du quai | 1m 50 | 15-mars | 16h11-16h26 | 62 | 504 | 20.1 | 52.2 | |
| M1 | Cinq Avenues | Milieu du quai | 1m 50 | 28-avr | 16h28-16h44 | 80 | 480 | 22.2 | 56.2 | |
| M1 | Cinq Avenues | Milieu du quai | 1m 50 | 5-mai | 8h11-8h29 | 71 | (-) | (-) | (-) | 71.0 |
| M1 | Réformés | Milieu du quai | 1m 50 | 15-mars | 16h27-16h43 | 70 | 480 | 20.4 | 52.4 | |
| M1 | Réformés | Milieu du quai | 1m 50 | 28-avr. | 16h46-17h04 | 70 | 493 | 22.5 | 51.6 | |
| M1 | Réformés | Milieu du quai | 1m 50 | 5-mai | 8h31-8h49 | 75 | (-) | (-) | (-) | 71.7 |
| M1 | Saint Charles | Milieu du quai | 1m 50 | 15-mars | 17h08-17h24 | 71 | 522 | 20 | 54.2 | |
| M1 | Saint Charles | Milieu du quai | 1m 50 | 28-avr | 17h06-17h22 | 65 | 513 | 22.2 | 53.4 | |
| M1 | Saint Charles | Milieu du quai | 1m 50 | 3-mai | 8h40-8h57 | 75 | 546 | 21.8 | 55.9 | 70.3 |
| M1 | Colbert | Milieu du quai | 1m 50 | 15-mars | 17h26-17h41 | 67 | 516 | 20.2 | 50.3 | |
| M1 | Colbert | Milieu du quai | 1m 50 | 25-avr | 16h11-16h28 | 36 | 444 | 21.1 | 51.7 | |
| M1 | Colbert | Milieu du quai | 1m 50 | 03-mai | 8h25-8h39 | 65 | 511 | 21.2 | 51.7 | 56.0 |
| M1 | Vieux-Port | Milieu du quai | 1m 50 | 17-mars | 16h35-16h52 | 58 | 475 | 20.3 | 50.1 | |
| M1 | Vieux-Port | Milieu du quai | 1m 50 | 25-avr | 16h29-16h47 | 33 | 433 | 20.4 | 52.2 | |
| M1 | Vieux-Port | Milieu du quai | 1m 50 | 3-mai | 8h08-8h24 | 72 | 506 | 21.7 | 52 | 54.3 |
| M1 | Estrangin | Milieu du quai | 1m 50 | 17-mars | 16h54-17h10 | 69 | 499 | 20.7 | 51 | |
| M1 | Estrangin | Milieu du quai | 1m 50 | 25-avr. | 16h49-17h08 | 47 | 482 | 21.9 | 51.9 | |
| M1 | Estrangin | Milieu du quai | 1m 50 | 3-mai | 7h48-8h06 | 73 | 527 | 22.1 | 52.5 | 63.0 |
| M1 | Castellane | Milieu du quai | 1m 50 | 17-mars | 17h12-17h29 | 66 | 646 | 22 | 50.2 | |
| M1 | Castellane | Milieu du quai | 1m 50 | 25-avr | 17h09-17h26 | 39 | 562 | 22.7 | 48.8 | |
| M1 | Castellane | Milieu du quai | 1m 50 | 3-mai | 7h29-7h46 | 65 | 562 | 23.2 | 51.6 | 56.7 |
| M1 | Baille | Milieu du quai | 1m 50 | 16-mars | 17h49-18h06 | 79 | 607 | 22.5 | 51.9 | |
| M1 | Baille | Milieu du quai | 1m 50 | 27-avr. | 18h01-18h18 | 117 | 524 | 24.2 | 47.5 | |
| M1 | Baille | Milieu du quai | 1m 50 | 3-mai | 7h08-7h27 | 59 | 467 | 22.9 | 48.7 | 85.0 |
| M1 | Timone | Milieu du quai | 1m 50 | 16-mars | 17h32-17h48 | 86 | 522 | 20 | 54.1 | |
| M1 | Timone | Milieu du quai | 1m 50 | 27-avr | 17h42-17h59 | 83 | 479 | 24.2 | 45.3 | |
| M1 | Timone | Milieu du quai | 1m 50 | 16-mai | 7h26-7h43 | 46 | 480 | 22.8 | 51 | 53.8 |
| M1 | Blancarde | Milieu du quai | 1m 50 | 16-mars | 17h14-17h30 | 71 | 507 | 21.2 | 48.4 | |
| M1 | Blancarde | Milieu du quai | 1m 50 | 27-avr | 17h26-17h41 | 163 | 494 | 23.7 | 47.6 | |
| M1 | Blancarde | Milieu du quai | 1m 50 | 16-mai | 8h46-9h04 | 66 | 521 | 24.5 | 47.2 | 100.0 |
| M1 | Louis Armand | Milieu du quai | 1m 50 | 16-mars | 16h57-17h13 | 77 | 483 | 22.2 | 45 | |
| M1 | Louis Armand | Milieu du quai | 1m 50 | 27-avr | 17h09-17h25 | 75 | 465 | 23.9 | 45.4 | |
| M1 | Louis Armand | Milieu du quai | 1m 50 | 16-mai | 8h29-8h44 | 62 | 467 | 24.7 | 42.7 | 71.3 |
| M1 | Saint Barnabé | Milieu du quai | 1m 50 | 16-mars | 16h38-16h56 | 73 | 473 | 23 | 42.6 | |
| M1 | Saint Barnabé | Milieu du quai | 1m 50 | 27-avr | 16h53-17h08 | 67 | 469 | 25.8 | 43.9 | |
| M1 | Saint Barnabé | Milieu du quai | 1m 50 | 16-mai | 8h13-8h28 | 53 | 479 | 25.1 | 41.8 | 64.3 |
| M1 | Fourragère | Milieu du quai | 1m 50 | 16-mars | 16h18-16h25 | 63 | 490 | 23.9 | 40.8 | |
| M1 | Fourragère | Milieu du quai | 1m 50 | 27-avr | 16h33-16h49 | 53 | 481 | 26.2 | 41.4 | |
| M1 | Fourragère | Milieu du quai | 1m 50 | 16-mai | 7h54-8h10 | 31 | 471 | 25.2 | 38.2 | 49.0 |

Tableau 26 : 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 | 23-mars | 16h20-16h37 | 72 | 468 | 19.8 | 37 | |
| M2 | National | Milieu du quai | 1m 50 | 5-avr. | 16h23-16h39 | 42 | 407 | 17.9 | 27.7 | |
| M2 | National | Milieu du quai | 1m 50 | 6-mai | 8h32-8h48 | 122 | 502 | 21.1 | 56.2 | 78.7 |
| M2 | Désirée Clary | Milieu du quai | 1m 50 | 23-mars | 16h39-16h56 | 67 | 507 | 20.2 | 41 | |
| M2 | Désirée Clary | Milieu du quai | 1m 50 | 05-avr | 16h40-16h56 | 44 | 560 | 19.8 | 39.2 | |
| M2 | Désirée Clary | Milieu du quai | 1m 50 | 6-mai | 8h15-8h31 | 135 | 516 | 22.6 | 56.6 | 82.0 |
| M2 | Joliette | Milieu du quai | 1m 50 | 23-mars | 16h57-17h14 | 66 | 503 | 21 | 35.4 | |
| M2 | Joliette | Milieu du quai | 1m 50 | 5-avr. | 16h57-17h13 | 66 | 535 | 20.1 | 38.8 | |
| M2 | Joliette | Milieu du quai | 1m 50 | 10-mai | 8h30-8h46 | 122 | 620 | 23.6 | 56.1 | 63.5 |
| M2 | Jules Guesde | Milieu du quai | 1m 50 | 23-mars | 17h15-17h30 | 74 | 523 | 20.4 | 45.7 | |
| M2 | Jules Guesde | Milieu du quai | 1m 50 | 05-avr | 17h14-17h29 | 62 | 490 | 18.9 | 44.3 | |
| M2 | Jules Guesde | Milieu du quai | 1m 50 | 10-mai | 8h14-8h29 | 73 | 522 | 22.2 | 56.9 | 69.7 |
| M2 | Saint Charles | Milieu du quai | 1m 50 | 23-mars | 17h31-17h46 | 76 | 524 | 21 | 44.2 | |
| M2 | Saint Charles | Milieu du quai | 1m 50 | 05-avr | 17h31-17h47 | 58 | 527 | 20.3 | 43.2 | |
| M2 | Saint Charles | Milieu du quai | 1m 50 | 10-mai | 8h52-9h08 | 92 | 563 | 22.9 | 57.1 | 75.3 |
| M2 | Noailles | Milieu du quai | 1m 50 | 18-mars | 16h11-16h29 | 87 | 547 | 20.6 | 54 | |
| M2 | Noailles | Milieu du quai | 1m 50 | 05-avr | 17h49-18h05 | 73 | 543 | 19.2 | 47.7 | |
| M2 | Noailles | Milieu du quai | 1m 50 | 6-mai | 7h51-8h08 | 141 | 516 | 20.8 | 64.3 | 100.3 |
| M2 | ND du Mont | Milieu du quai | 1m 50 | 18-mars | 16h31-16h49 | 85 | 566 | 20.2 | 60 | |
| M2 | ND du Mont | Milieu du quai | 1m 50 | 6-avr. | 16h37-16h56 | 77 | 525 | 19.7 | 53.7 | |
| M2 | ND du Mont | Milieu du quai | 1m 50 | 6-mai | 7h34-7h49 | 119 | 497 | 21.1 | 66.3 | 93.7 |
| M2 | Castellane | Milieu du quai | 1m 50 | 18-mars | 16h50-17h08 | 71 | 600 | 21.7 | 47 | |
| M2 | Castellane | Milieu du quai | 1m 50 | 06-avr | 16h58-17h14 | 134 | 557 | 20.9 | 41.5 | |
| M2 | Castellane | Milieu du quai | 1m 50 | 6-mai | 7h17-7h31 | 87 | 490 | 22.1 | 59.3 | 97.3 |
| M2 | Périer | Milieu du quai | 1m 50 | 18-mars | 17h09-17h25 | 97 | 523 | 20.4 | 51.7 | |
| M2 | Périer | Milieu du quai | 1m 50 | 6-avr. | 17h15-17h31 | 110 | 519 | 19.8 | 45.9 | |
| M2 | Périer | Milieu du quai | 1m 50 | 10-mai | 7h48-8h05 | 45 | 516 | 21.8 | 49.9 | 84.0 |
| M2 | RP du Prado | Milieu du quai | 1m 50 | 18-mars | 17h27-17h43 | 73 | 531 | 19.8 | 48 | |
| M2 | RP du Prado | Milieu du quai | 1m 50 | 06-avr | 17h33-17h49 | 64 | 548 | 18.4 | 45.6 | |
| M2 | RP du Prado | Milieu du quai | 1m 50 | 16-mai | 9h15-9h31 | 45 | 500 | 23.3 | 44.3 | 60.7 |

Tableau 27 : 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 | 23-mars | 17h52-18h08 | 93 | 551 | 17.7 | 42.6 | |
| T1 | Noailles | Milieu du quai | 1m 50 | 28-avr. | 17h28-17h44 | 44 | 556 | 21.6 | 43.9 | |
| T1 | Noailles | Milieu du quai | 1m 50 | 5-mai | 8h59-9h15 | 114 | (-) | (-) | (-) | 83.7 |

Sélection des stations à investiguer

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

Les deux stations montrant des concentrations les plus élevées sont Blancarde pour la ligne 1 et Noaille pour la ligne 2.

La station Noaille n'est pas retenue en raison de travaux importants programmés sur la période de la campagne de mesures. Elle est remplacée par la station **Notre-Dame du Mont**, la station la plus élevée après Noaille et Castellane.

Ainsi, les 3 stations retenues pour la campagne de mesure 2023 sont :

- Castellane
- Notre-Dame du Mont
- Blancarde

ANNEXE 2 BASE DE DONNEES DES MESURES DE PARTICULES FINES ET CO2 SUR LES QUAIS DES 3 STATIONS DE L'ETUDE 2023

Station Castellane - Sans ventilation

Tableau 28 : Statistiques de mesure sur la totalité de la campagne de mesure à la station Castellane

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM _{2.5} (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|--|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 168 | 168 | 2016 | 2016 | 2016 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 94.05% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 48 | 136 | 526 | 22 | 45 |
| | Médiane | 44 | 138 | 514 | 22 | 47 |
| | Percentile 10 | 19 | 43 | 457 | 20 | 32 |
| | Percentile 90 | 85 | 223 | 609 | 23 | 55 |
| | Minimum | 7 | 12 | 410 | 18 | 27 |
| | Maximum | 106 | 277 | 812 | 24 | 62 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 140 | 140 | 1680 | 1680 | 1680 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 92.86% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 54 | 155 | 535 | 22 | 45 |
| | Médiane | 49 | 153 | 527 | 22 | 47 |
| | Percentile 10 | 25 | 86 | 463 | 21 | 33 |
| | Percentile 90 | 87 | 229 | 615 | 23 | 55 |
| | Minimum | 10 | 53 | 414 | 18 | 27 |
| | Maximum | 106 | 277 | 812 | 24 | 62 |

Tableau 29 : Statistiques de mesure sur les jours de semaine à la station Castellane

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM _{2.5} (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|--|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 120 | 120 | 1440 | 1440 | 1440 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 91.67% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 54 | 149 | 542 | 22 | 46 |
| | Médiane | 49 | 160 | 538 | 22 | 47 |
| | Percentile 10 | 21 | 51 | 465 | 20 | 36 |
| | Percentile 90 | 88 | 231 | 621 | 23 | 55 |
| | Minimum | 8 | 13 | 414 | 18 | 27 |
| | Maximum | 106 | 277 | 812 | 24 | 62 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 100 | 100 | 1200 | 1200 | 1200 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 90.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 61 | 170 | 554 | 22 | 46 |
| | Médiane | 63 | 173 | 558 | 22 | 47 |
| | Percentile 10 | 30 | 92 | 476 | 21 | 36 |
| | Percentile 90 | 90 | 233 | 625 | 23 | 55 |

| | | | | | | |
|--|---------|-----|-----|-----|----|----|
| | Minimum | 10 | 53 | 414 | 18 | 27 |
| | Maximum | 106 | 277 | 812 | 24 | 62 |

Tableau 30 : Statistiques de mesure sur les jours de week-end à la station Castellane

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM _{2.5} (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|--|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 48 | 48 | 576 | 576 | 576 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 35 | 104 | 486 | 22 | 45 |
| | Médiane | 39 | 113 | 486 | 22 | 50 |
| | Percentile 10 | 17 | 32 | 445 | 21 | 31 |
| | Percentile 90 | 56 | 155 | 528 | 23 | 55 |
| | Minimum | 7 | 12 | 410 | 20 | 28 |
| | Maximum | 62 | 167 | 574 | 24 | 59 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 40 | 40 | 480 | 480 | 480 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 39 | 119 | 490 | 22 | 44 |
| | Médiane | 41 | 126 | 489 | 22 | 50 |
| | Percentile 10 | 23 | 79 | 450 | 21 | 31 |
| | Percentile 90 | 56 | 159 | 532 | 23 | 55 |
| | Minimum | 15 | 59 | 422 | 20 | 28 |
| | Maximum | 62 | 167 | 574 | 23 | 59 |

Tableau 31 : Statistiques de mesure les heures de pointes à la station Castellane

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM _{2.5} (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|--|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Heures de pointes (7h à 9h – 17 à 19h) | Nombre de valeurs | 20 | 20 | 240 | 240 | 240 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 90.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 74 | 198 | 600 | 22 | 46 |
| | Médiane | 77 | 198 | 601 | 22 | 47 |
| | Percentile 10 | 45 | 167 | 534 | 20 | 36 |
| | Percentile 90 | 94 | 225 | 658 | 23 | 56 |
| | Minimum | 39 | 152 | 500 | 19 | 29 |
| | Maximum | 106 | 277 | 812 | 24 | 62 |

Station Castellane – Avec ventilation

Tableau 32 : Statistiques de mesure sur la totalité de la campagne de mesure à la station Castellane

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 168 | 932 | 932 | 932 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100% | 92% | 92% | 92% |
| | Moyenne | 102 | 513 | 21 | 41 |
| | Médiane | 94 | 503 | 22 | 41 |
| | Percentile 10 | 19 | 449 | 20 | 35 |
| | Percentile 90 | 187 | 593 | 23 | 46 |
| | Minimum | 3 | 413 | 19 | 32 |
| | Maximum | 241 | 758 | 23 | 61 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 140 | 764 | 764 | 764 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 90% | 90% | 90% |
| | Moyenne | 118 | 526 | 21 | 41 |
| | Médiane | 111 | 519 | 22 | 41 |
| | Percentile 10 | 58 | 459 | 20 | 36 |
| | Percentile 90 | 189 | 602 | 23 | 46 |
| | Minimum | 15 | 413 | 19 | 32 |
| | Maximum | 241 | 758 | 23 | 61 |

Tableau 33 : Statistiques de mesure sur les jours de semaine à la station Castellane

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 120 | 644 | 644 | 644 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 89% | 89% | 89% |
| | Moyenne | 100 | 515 | 21 | 40 |
| | Médiane | 91 | 509 | 22 | 40 |
| | Percentile 10 | 19 | 450 | 20 | 35 |
| | Percentile 90 | 187 | 589 | 23 | 46 |
| | Minimum | 3 | 413 | 19 | 32 |
| | Maximum | 232 | 758 | 23 | 61 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 100 | 600 | 600 | 600 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 87% | 87% | 87% |
| | Moyenne | 116 | 528 | 21 | 40 |
| | Médiane | 105 | 523 | 22 | 40 |
| | Percentile 10 | 56 | 463 | 19 | 35 |
| | Percentile 90 | 189 | 594 | 23 | 46 |
| | Minimum | 15 | 413 | 19 | 32 |
| | Maximum | 232 | 758 | 23 | 61 |

Tableau 34 : Statistiques de mesure sur les jours de week-end à la station Castellane

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 48 | 288 | 288 | 288 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100% | 100% | 100% |
| | Moyenne | 106 | 509 | 22 | 42 |
| | Médiane | 106 | 489 | 22 | 42 |
| | Percentile 10 | 19 | 447 | 21 | 38 |
| | Percentile 90 | 176 | 607 | 23 | 47 |
| | Minimum | 10 | 423 | 20 | 34 |
| | Maximum | 241 | 716 | 23 | 50 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 40 | 240 | 240 | 240 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100% | 100% | 100% |
| | Moyenne | 123 | 520 | 22 | 43 |
| | Médiane | 127 | 501 | 22 | 44 |
| | Percentile 10 | 72 | 455 | 21 | 38 |
| | Percentile 90 | 190 | 620 | 23 | 48 |
| | Minimum | 47 | 426 | 20 | 34 |
| | Maximum | 241 | 716 | 23 | 50 |

Tableau 35 : Statistiques de mesure les heures de pointes à la station Castellane

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Heures de pointes (7h à 9h – 17 à 19h) | Nombre de valeurs | 20 | 108 | 108 | 108 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 90% | 90% | 90% |
| | Moyenne | 105 | 561 | 21 | 40 |
| | Médiane | 78 | 554 | 21 | 40 |
| | Percentile 10 | 58 | 506 | 19 | 35 |
| | Percentile 90 | 199 | 633 | 23 | 46 |
| | Minimum | 55 | 480 | 19 | 32 |
| | Maximum | 232 | 758 | 23 | 47 |

Station Notre-Dame-du-Mont - Sans ventilation

Tableau 36 : Statistiques de mesure 24h/24h à la station Notre-Dame-du-Mont – semaines sans ventilation

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM _{2.5} (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|--|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 165 | 167 | 2016 | 2016 | 2016 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 98.21% | 99.40% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 40 | 113 | 545 | 19 | 50 |
| | Médiane | 40 | 117 | 542 | 19 | 50 |
| | Percentile 10 | 19 | 46 | 468 | 18 | 43 |
| | Percentile 90 | 60 | 162 | 628 | 20 | 56 |
| | Minimum | 6 | 8 | 428 | 15 | 36 |
| | Maximum | 74 | 200 | 725 | 20 | 60 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 137 | 140 | 1680 | 1680 | 1680 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 97.86% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 43 | 122 | 557 | 19 | 51 |
| | Médiane | 43 | 127 | 560 | 19 | 51 |
| | Percentile 10 | 25 | 76 | 482 | 18 | 45 |
| | Percentile 90 | 60 | 165 | 634 | 20 | 56 |
| | Minimum | 6 | 11 | 434 | 15 | 37 |
| | Maximum | 74 | 200 | 725 | 20 | 60 |

Tableau 37 : Statistiques de mesure sur les jours de semaine à la station Notre-Dame-du-Mont – semaines sans ventilation

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM _{2.5} (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|--|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 117 | 119 | 1440 | 1440 | 1440 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 97.50% | 99.17% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 42 | 120 | 552 | 19 | 50 |
| | Médiane | 43 | 132 | 556 | 19 | 51 |
| | Percentile 10 | 19 | 50 | 469 | 18 | 42 |
| | Percentile 90 | 61 | 166 | 640 | 20 | 56 |
| | Minimum | 6 | 8 | 428 | 15 | 36 |
| | Maximum | 74 | 200 | 725 | 20 | 60 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 97 | 100 | 1200 | 1200 | 1200 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 97.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 46 | 131 | 566 | 19 | 51 |
| | Médiane | 47 | 143 | 568 | 19 | 52 |
| | Percentile 10 | 26 | 86 | 484 | 18 | 44 |
| | Percentile 90 | 61 | 169 | 647 | 20 | 56 |
| | Minimum | 6 | 11 | 434 | 15 | 37 |
| | Maximum | | | 725 | 20 | 60 |

Tableau 38 : Statistiques de mesure sur les jours de week-end à la station Notre-Dame-du-Mont – semaines sans ventilation

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM _{2.5} (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|--|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 48 | 48 | 576 | 576 | 576 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 36 | 96 | 527 | 19 | 50 |
| | Médiane | 34 | 101 | 527 | 19 | 49 |
| | Percentile 10 | 21 | 45 | 468 | 19 | 44 |
| | Percentile 90 | 49 | 128 | 585 | 20 | 55 |
| | Minimum | 10 | 27 | 432 | 18 | 38 |
| | Maximum | 64 | 136 | 651 | 20 | 58 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 40 | 40 | 480 | 480 | 480 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 37 | 100 | 535 | 19 | 50 |
| | Médiane | 35 | 102 | 535 | 19 | 51 |
| | Percentile 10 | 26 | 74 | 480 | 19 | 45 |
| | Percentile 90 | 51 | 129 | 588 | 20 | 55 |
| | Minimum | 10 | 27 | 435 | 18 | 38 |
| | Maximum | 64 | 136 | 651 | 20 | 58 |

Tableau 39 : Statistiques de mesure les heures de pointes à la station Notre-Dame-du-Mont – semaines sans ventilation

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM _{2.5} (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|--|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Heures de pointes (7h à 9h – 17 à 19h) | Nombre de valeurs | 20 | 20 | 240 | 240 | 240 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 45 | 143 | 613 | 19 | 53 |
| | Médiane | 46 | 148 | 626 | 19 | 54 |
| | Percentile 10 | 31 | 108 | 530 | 18 | 48 |
| | Percentile 90 | 60 | 176 | 673 | 19 | 58 |
| | Minimum | 25 | 90 | 482 | 15 | 42 |
| | Maximum | 61 | 188 | 725 | 20 | 60 |

Station Notre-Dame-du-Mont - Avec ventilation

Tableau 40 : Statistiques de mesure 24h/24h à la station Notre-Dame-du-Mont – semaine avec ventilation

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 168 | 932 | 932 | 932 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100 % | 92 % | 92 % | 92 % |
| | Moyenne | 91 | 516 | 20 | 57 |
| | Médiane | 96 | 507 | 20 | 59 |
| | Percentile 10 | 29 | 459 | 19 | 48 |
| | Percentile 90 | 150 | 590 | 21 | 65 |
| | Minimum | 7 | 424 | 16 | 39 |
| | Maximum | 173 | 671 | 21 | 69 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 140 | 840 | 840 | 840 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 100 | 526 | 20 | 58 |
| | Médiane | 106 | 521 | 20 | 59 |
| | Percentile 10 | 36 | 467 | 18 | 49 |
| | Percentile 90 | 153 | 596 | 21 | 65 |
| | Minimum | 7 | 424 | 16 | 39 |
| | Maximum | 173 | 671 | 21 | 69 |

Tableau 41 : Statistiques de mesure sur les jours de semaine à la station Notre-Dame-du-Mont – semaine avec ventilation

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 120 | 720 | 720 | 720 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 91 | 515 | 19 | 56 |
| | Médiane | 97 | 503 | 20 | 57 |
| | Percentile 10 | 31 | 458 | 18 | 46 |
| | Percentile 90 | 153 | 595 | 20 | 64 |
| | Minimum | 14 | 424 | 16 | 39 |
| | Maximum | 173 | 671 | 21 | 69 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 100 | 600 | 600 | 600 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 100 | 524 | 19 | 57 |
| | Médiane | 106 | 515 | 19 | 57 |
| | Percentile 10 | 34 | 463 | 18 | 47 |
| | Percentile 90 | 155 | 599 | 20 | 65 |
| | Minimum | 14 | 424 | 16 | 39 |
| | Maximum | 173 | 671 | 21 | 69 |

Tableau 42 : Statistiques de mesure sur les jours de week-end à la station Notre-Dame-du-Mont – semaine avec ventilation

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 48 | 212 | 212 | 212 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 73.61% | 73.61% | 73.61% |
| | Moyenne | 91 | 520 | 21 | 61 |
| | Médiane | 95 | 521 | 21 | 61 |
| | Percentile 10 | 25 | 460 | 20 | 56 |
| | Percentile 90 | 136 | 574 | 21 | 65 |
| | Minimum | 7 | 433 | 20 | 52 |
| | Maximum | 165 | 644 | 21 | 67 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 40 | 240 | 240 | 240 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 102 | 531 | 21 | 62 |
| | Médiane | 109 | 534 | 21 | 63 |
| | Percentile 10 | 67 | 476 | 20 | 57 |
| | Percentile 90 | 136 | 579 | 21 | 66 |
| | Minimum | 7 | 437 | 20 | 54 |
| | Maximum | 165 | 644 | 21 | 67 |

Tableau 43 : Statistiques de mesure les heures de pointes à la station Notre-Dame-du-Mont – semaine avec ventilation

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Heures de pointes (7h à 9h – 17 à 19h) | Nombre de valeurs | 20 | 120 | 120 | 120 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 108 | 531 | 19 | 56 |
| | Médiane | 113 | 515 | 19 | 57 |
| | Percentile 10 | 37 | 478 | 17 | 44 |
| | Percentile 90 | 154 | 632 | 20 | 65 |
| | Minimum | 29 | 444 | 16 | 42 |
| | Maximum | 169 | 671 | 20 | 68 |

Station Blancarde 2023 – Sans ventilation

Tableau 44 : Statistiques de mesure 24h/24h à la station Blancarde – semaines sans ventilation

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM _{2.5} (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|--|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 168 | 168 | 2016 | 2016 | 2016 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 32 | 93 | 491 | 22 | 45 |
| | Médiane | 29 | 86 | 482 | 23 | 44 |
| | Percentile 10 | 12 | 21 | 445 | 22 | 39 |
| | Percentile 90 | 54 | 159 | 553 | 23 | 52 |
| | Minimum | 2 | 4 | 408 | 19 | 27 |
| | Maximum | 77 | 208 | 625 | 24 | 57 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 140 | 140 | 1680 | 1680 | 1680 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 35 | 105 | 498 | 22 | 44 |
| | Médiane | 32 | 111 | 490 | 23 | 44 |
| | Percentile 10 | 16 | 27 | 449 | 22 | 38 |
| | Percentile 90 | 56 | 162 | 557 | 23 | 52 |
| | Minimum | 7 | 14 | 408 | 19 | 27 |
| | Maximum | 77 | 208 | 625 | 24 | 57 |

Tableau 45 : Statistiques de mesure sur les jours de semaine à la station Blancarde – semaines sans ventilation

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM _{2.5} (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|--|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 121 | 120 | 1440 | 1440 | 1440 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 35 | 105 | 501 | 22 | 45 |
| | Médiane | 32 | 116 | 498 | 23 | 47 |
| | Percentile 10 | 13 | 31 | 449 | 22 | 38 |
| | Percentile 90 | 56 | 165 | 560 | 23 | 52 |
| | Minimum | 2 | 5 | 408 | 19 | 27 |
| | Maximum | 77 | 208 | 625 | 24 | 57 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 100 | 100 | 1200 | 1200 | 1200 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 38 | 120 | 509 | 23 | 45 |
| | Médiane | 38 | 137 | 508 | 23 | 47 |
| | Percentile 10 | 17 | 54 | 456 | 22 | 38 |
| | Percentile 90 | 57 | 165 | 564 | 23 | 52 |
| | Minimum | 7 | 16 | 415 | 19 | 27 |
| | Maximum | 77 | 208 | 625 | 24 | 57 |

Tableau 46 : Statistiques de mesure sur les jours de week-end à la station Blancarde – semaines sans ventilation

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM _{2.5} (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|--|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 47 | 48 | 576 | 576 | 576 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 25 | 62 | 466 | 22 | 42 |
| | Médiane | 26 | 51 | 465 | 22 | 42 |
| | Percentile 10 | 11 | 17 | 439 | 20 | 39 |
| | Percentile 90 | 37 | 121 | 495 | 23 | 48 |
| | Minimum | 4 | 4 | 408 | 19 | 32 |
| | Maximum | 43 | 156 | 537 | 23 | 57 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 40 | 40 | 480 | 480 | 480 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 27 | 68 | 469 | 22 | 42 |
| | Médiane | 29 | 72 | 468 | 22 | 41 |
| | Percentile 10 | 14 | 19 | 439 | 19 | 39 |
| | Percentile 90 | 38 | 123 | 498 | 23 | 46 |
| | Minimum | 8 | 14 | 408 | 19 | 32 |
| | Maximum | 43 | 156 | 537 | 23 | 57 |

Tableau 47 : Statistiques de mesure les heures de pointes à la station Blancarde – semaines sans ventilation

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM _{2.5} (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|--|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Heures de pointes (7h à 9h – 17 à 19h) | Nombre de valeurs | 20 | 20 | 240 | 240 | 240 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 45 | 157 | 541 | 23 | 46 |
| | Médiane | 45 | 154 | 543 | 23 | 48 |
| | Percentile 10 | 29 | 135 | 495 | 22 | 38 |
| | Percentile 90 | 60 | 177 | 583 | 24 | 53 |
| | Minimum | 23 | 127 | 434 | 21 | 30 |
| | Maximum | 66 | 208 | 625 | 24 | 56 |

Station Blancarde 2023 – Avec ventilation

Tableau 48 : Statistiques de mesure 24h/24h à la station Blancarde – semaine avec ventilation

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 168 | 932 | 932 | 932 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 92.46% | 92.46% | 92.46% |
| | Moyenne | 81 | 488 | 22 | 41 |
| | Médiane | 72 | 480 | 22 | 41 |
| | Percentile 10 | 28 | 449 | 20 | 30 |
| | Percentile 90 | 142 | 542 | 23 | 52 |
| | Minimum | 11 | 415 | 17 | 21 |
| | Maximum | 175 | 619 | 24 | 60 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 140 | 840 | 840 | 840 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 89 | 493 | 22 | 41 |
| | Médiane | 80 | 484 | 22 | 41 |
| | Percentile 10 | 37 | 452 | 20 | 30 |
| | Percentile 90 | 151 | 544 | 23 | 52 |
| | Minimum | 14 | 415 | 17 | 21 |
| | Maximum | 175 | 619 | 24 | 60 |

Tableau 49 : Statistiques de mesure sur les jours de semaine à la station Blancarde – semaine avec ventilation

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 120 | 644 | 644 | 644 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 89.44% | 89.44% | 89.44% |
| | Moyenne | 83 | 493 | 22 | 42 |
| | Médiane | 69 | 483 | 22 | 41 |
| | Percentile 10 | 29 | 449 | 20 | 31 |
| | Percentile 90 | 155 | 547 | 23 | 53 |
| | Minimum | 13 | 415 | 17 | 21 |
| | Maximum | 175 | 619 | 24 | 60 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 100 | 600 | 600 | 600 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 91 | 498 | 22 | 42 |
| | Médiane | 75 | 494 | 22 | 40 |
| | Percentile 10 | 36 | 451 | 19 | 32 |
| | Percentile 90 | 157 | 550 | 23 | 52 |
| | Minimum | 14 | 415 | 17 | 21 |
| | Maximum | 175 | 619 | 24 | 60 |

Tableau 50 : 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) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Toutes données horaires | Nombre de valeurs | 48 | 288 | 288 | 288 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 74 | 475 | 22 | 40 |
| | Médiane | 79 | 474 | 23 | 42 |
| | Percentile 10 | 21 | 449 | 22 | 30 |
| | Percentile 90 | 123 | 500 | 23 | 46 |
| | Minimum | 11 | 428 | 21 | 26 |
| | Maximum | 137 | 542 | 23 | 48 |
| Période d'ouverture du métro (5h – 1h) | Nombre de valeurs | 40 | 240 | 240 | 240 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 84 | 478 | 22 | 40 |
| | Médiane | 86 | 478 | 23 | 42 |
| | Percentile 10 | 48 | 457 | 22 | 29 |
| | Percentile 90 | 125 | 501 | 23 | 46 |
| | Minimum | 30 | 428 | 21 | 26 |
| | Maximum | 137 | 542 | 23 | 48 |

Tableau 51 : Statistiques de mesure les heures de pointes à la station Blancarde – semaine avec ventilation

| | PM ₁₀ (µg/m ³) | PM ₁₀ (µg/m ³) | CO ₂ (ppm) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|--|---|---------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Heures de pointes (7h à 9h – 17 à 19h) | Nombre de valeurs | 20 | 120 | 120 | 120 |
| | Taux de couverture de la période prévue | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| | Moyenne | 83 | 506 | 21 | 42 |
| | Médiane | 73 | 505 | 22 | 41 |
| | Percentile 10 | 30 | 454 | 18 | 34 |
| | Percentile 90 | 139 | 564 | 23 | 52 |
| | Minimum | 25 | 432 | 17 | 29 |
| | Maximum | 170 | 619 | 23 | 55 |

ANNEXE 3 BASE DE DONNEES DES MESURES DE METAUX SUR LES QAIS DES 3 STATIONS DE L'ETUDE 2023

Tableau 52 : Concentrations de PM₁₀ (par prélèvement) et de métaux à la station Castellane 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 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Moyenne | 24 | 0.34 | 133 | 7.6 | 4910 | 967 | 1606 |
| Médiane | 26 | 0.22 | 127 | 6.3 | 5085 | 1020 | 1670 |
| P10 - P90 | 20-28 | 0.22-0.52 | 111-161 | 3.7-12.3 | 3830-5726 | 644-1274 | 1246-1854 |
| (Min - Max) | 18-30 | 0.22-0.55 | 102-164 | 3.6-12.4 | 3372-5989 | 500-1460 | 1210-1890 |
| 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 | 22.3 | 102 | 5435 | 70865 | 707 | 7.1 | 124 |
| Médiane | 28.1 | 102 | 5397 | 71117 | 714 | 8 | 135 |
| P10 - P90 | 5.4-33.5 | 63-137 | 4614-6195 | 56495-84797 | 553-852 | 4-9.2 | 87-158 |
| (Min - Max) | 5.4-34.1 | 63-137 | 4281-6457 | 51921-86411 | 510-875 | 3.6-9.5 | 54-175 |

Tableau 53 : Concentrations de PM₁₀ (par prélèvement) et de métaux à la station Castellane 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 | 0.3 | 104 | 4.8 | 4462 | 1437 | 1474 |
| Médiane | 18 | 0.2 | 101 | 5.1 | 4570 | 1540 | 1510 |
| P10 - P90 | 15-23 | 0.22-0.52 | 81-126 | 3.5-6.2 | 3402-5474 | 912-1852 | 1128-1820 |
| (Min - Max) | 13-25 | 0.22-0.54 | 73-132 | 3.3-7.2 | 3088-5847 | 570-2110 | 1050-1940 |
| 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 | 21 | 68 | 4280 | 52580 | 526 | 5.9 | 108 |
| Médiane | 21 | 68 | 4087 | 51359 | 516 | 6.4 | 124 |
| P10 - P90 | 14-30 | 50-87 | 3343-5251 | 41514-63543 | 414-645 | 4.1-7.8 | 54-136 |

| | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-----------|-------------|---------|---------|--------|
| (Min - Max) | 12-31 | 44-94 | 3001-5527 | 35061-64889 | 347-655 | 3.9-7.9 | 54-143 |
|-------------|-------|-------|-----------|-------------|---------|---------|--------|

Tableau 54 : 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 | 18 | 0.45 | 79 | 6 | 4687 | 1017 | 1464 |
| Médiane | 18 | 0.46 | 82 | 5.9 | 4722 | 755 | 1505 |
| P10 - P90 | 14-22 | 0.2-0.6 | 63-94 | 4.4-7.59 | 3775-55356 | 220-2181 | 1219-1595 |
| (Min - Max) | 12-24 | 0.2-1 | 56-9 | 3.98-8.29 | 3182-5665 | 220-2490 | 1120-1850 |
| 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 | 19 | 56 | 3509 | 51411 | 428 | 6.4 | 88 |
| Médiane | 18 | 60 | 3699 | 54468 | 455 | 6.1 | 54 |
| P10 - P90 | 14-24 | 41-70 | 2656-4267 | 39075-65348 | 315-531 | 4.9-8.2 | 54-138 |
| (Min - Max) | 11-26 | 38-71 | 2594-4554 | 25984-68613 | 299-558 | 4.1-8.7 | 54-148 |

Tableau 55 : Concentrations de PM₁₀ (par prélèvement) et de métaux à la station Notre-Dame du Mont 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 | 14 | 0.3 | 66 | 6.2 | 4813 | 220 | 1400 |
| Médiane | 17 | 0.2 | 74 | 5.9 | 4629 | 220 | 1420 |
| P10 - P90 | 9-17 | 0.2-0.3 | 41-83 | 3.1-10 | 4291-5518 | 220-220 | 1268-1516 |
| (Min - Max) | 1-18 | 0.2-0.4 | 5-83 | 2.8-12.9 | 4223-5578 | 220-220 | 1160-1600 |
| 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 | 12 | 51 | 3081 | 42679 | 383 | 4.8 | 76 |
| Médiane | 16 | 56 | 3705 | 50014 | 439 | 4.9 | 54 |

| | | | | | | | |
|-------------|------|-------|-----------|-------------|---------|---------|--------|
| P10 - P90 | 5-18 | 38-58 | 1807-3895 | 27620-53330 | 250-475 | 4.2-5.6 | 54-130 |
| (Min - Max) | 5-18 | 22-59 | 44-3939 | 1711-54398 | 23-492 | 4.1-5.6 | 54-133 |

Tableau 56 : Concentrations de PM₁₀ (par prélèvement) et de métaux à la station Blancarde 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 | 13 | 0.2 | 71 | 3.9 | 4955 | 220 | 1456 |
| Médiane | 13 | 0.2 | 72 | 4.1 | 4988 | 220 | 1465 |
| P10 - P90 | 8-17 | 0.2-0.2 | 48-95 | 2.6-5.1 | 4706-5162 | 220-220 | 1366-1537 |
| (Min - Max) | 6-24 | 0.2-0.2 | 30-108 | 1.9-5.8 | 4626-5432 | 220-220 | 1340-1560 |
| 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 | 48 | 3187 | 46835 | 442 | 3.9 | 82 |
| Médiane | 11 | 46 | 3230 | 46929 | 433 | 4.0 | 54 |
| P10 - P90 | 5-13 | 29-70 | 2073-4331 | 30610-63332 | 284-591 | 2.6-5 | 54-136 |
| (Min - Max) | 5-17 | 22.12-81.03 | 1248.53-4826.78 | 21030-76158 | 213-756 | 1.7-6.3 | 54-162 |

Tableau 57 : Concentrations de PM₁₀ (par prélèvement) et de métaux à la station Blancarde 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 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| Moyenne | 12 | 0.2 | 61 | 4.4 | 4687 | 220 | 1551 |
| Médiane | 12 | 0.2 | 62 | 4.5 | 4700 | 220 | 1540 |
| P10 - P90 | 10-15 | 0.2-0.2 | 49-73 | 3.5-5.2 | 4438-4893 | 220-220 | 1480-1634 |
| (Min - Max) | 9-16 | 0.2-0.2 | 45-75 | 3.5-5.2 | 4424-5005 | 220-220 | 1450-1640 |
| 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 | 48 | 2682 | 41692 | 407 | 4.2 | 64 |
| Médiane | 5 | 52 | 2711 | 43959 | 430 | 3.9 | 54 |

| | | | | | | | |
|-------------|------|-------|-----------|-------------|---------|---------|--------|
| P10 - P90 | 5-16 | 37-54 | 2132-3290 | 32227-49953 | 316-484 | 2.9-5.3 | 54-82 |
| (Min - Max) | 5-17 | 30-55 | 2032-3483 | 29497-52218 | 291-498 | 2.8-5.5 | 54-123 |

ANNEXE 4 GRANULOMETRIE DES STATIONS ST-CHARLES ET BLANCARDE DE LA CAMPAGNE DE MESURE 2019

Figure 21 : Répartition du nombre de particules/cm³ des fractions de 250 nm à 1 µm - station St-Charles – campagne 2019

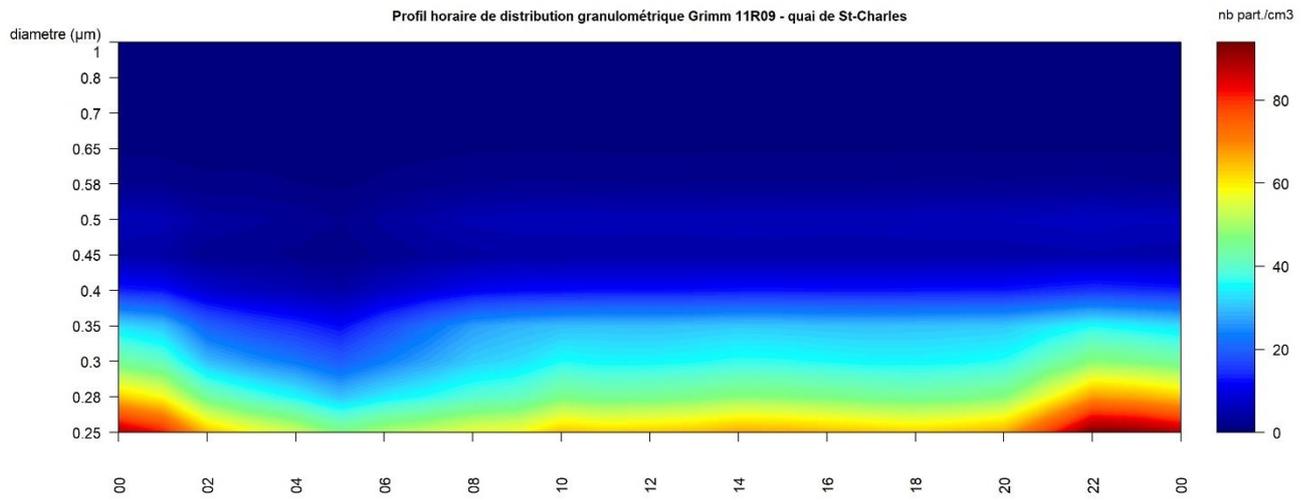


Figure 22 : Profil moyen journalier du nombre de particules/litre des fractions de 250 nm à 1 µm - station Blancarde - campagne 2019

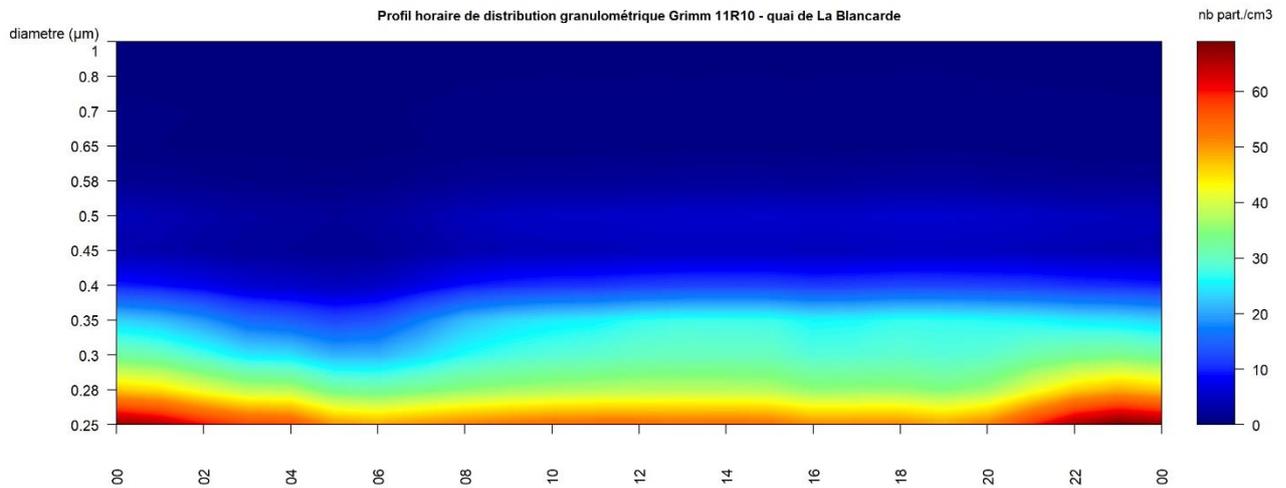


Figure 23 : Profil moyen journalier du nombre de particules/cm³ des fractions de 250 nm à 32 µm normalisé par le maximum de chaque fraction - station St-Charles - campagne 2019

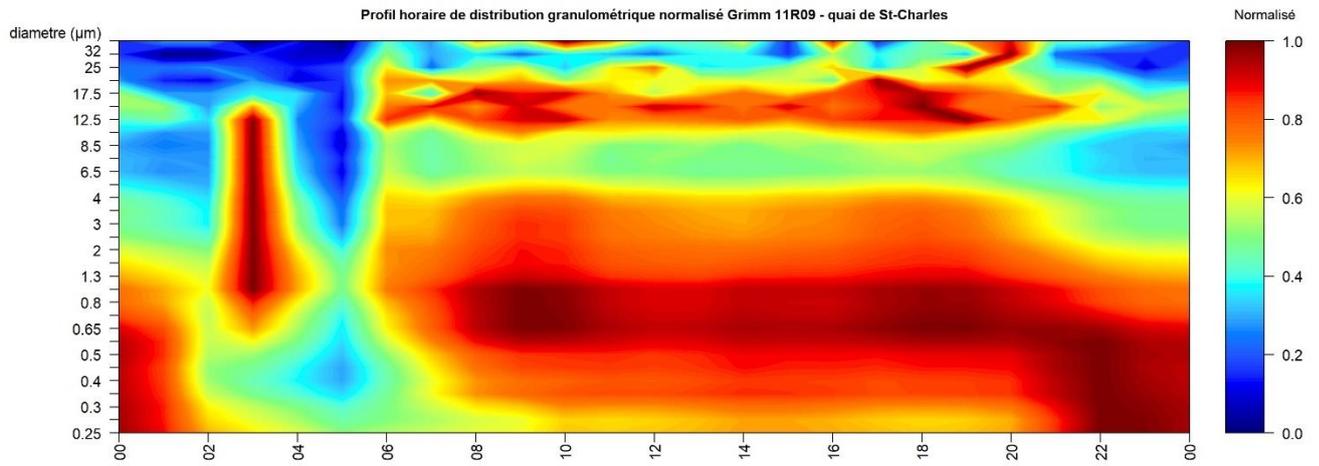
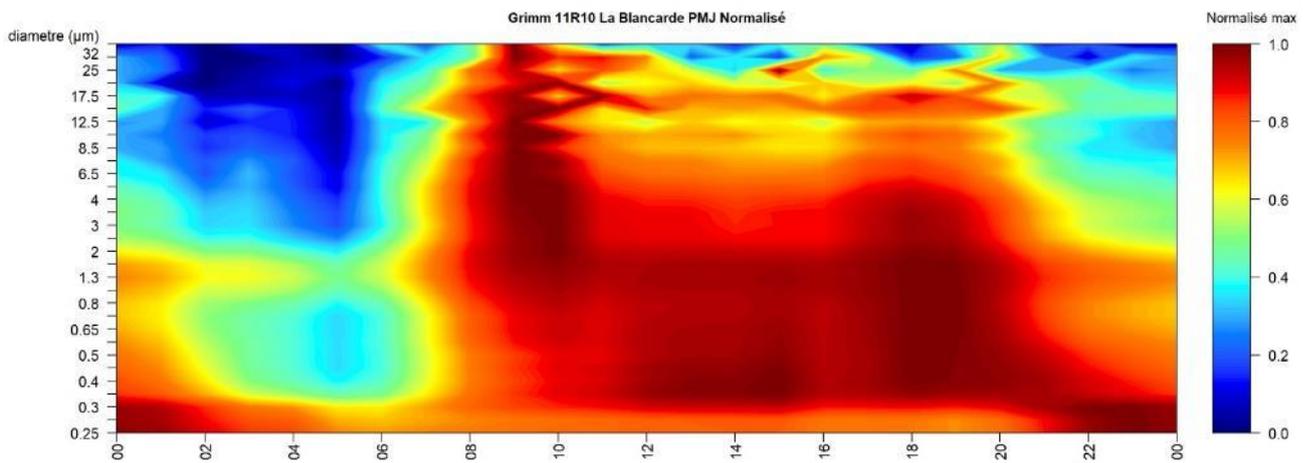


Figure 24 : Profil moyen journalier du nombre de particules/litre des fractions de 250 nm à 32 µm normalisé par le maximum de chaque fraction - station Blancarde – campagne 2019



ANNEXE 5 REPRESENTATION STATISTIQUE DES PARAMETRES 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 25 : Schéma explicatif du diagramme en boîte

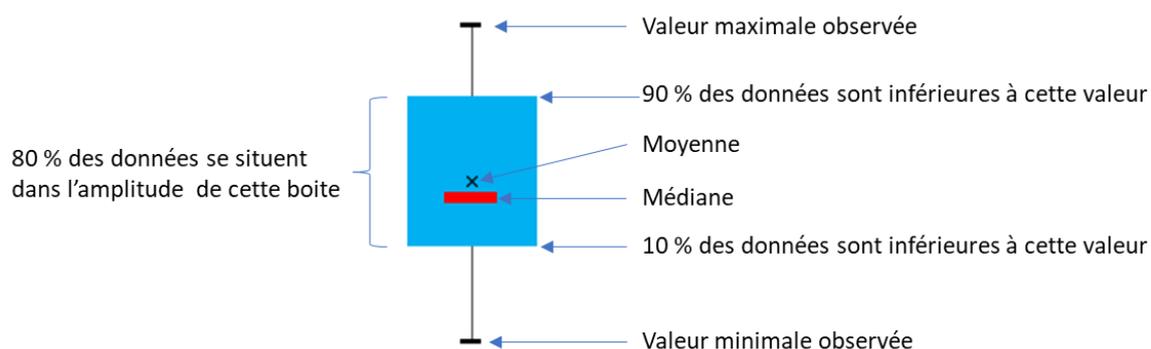


Figure 26 : Box-plot des concentrations en CO₂ sur les quais des trois stations échantillonnées en condition sans ventilation

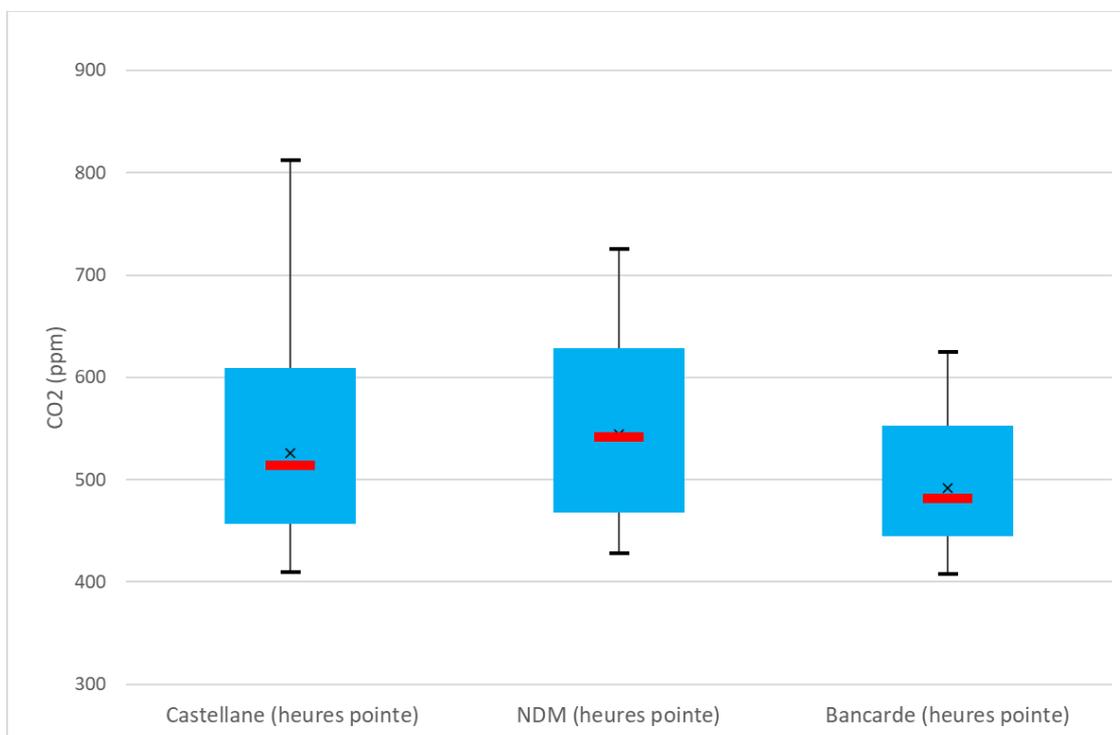


Figure 27 : Box-plot des concentrations en CO₂ sur les quais des trois stations échantillonnées en condition avec ventilation

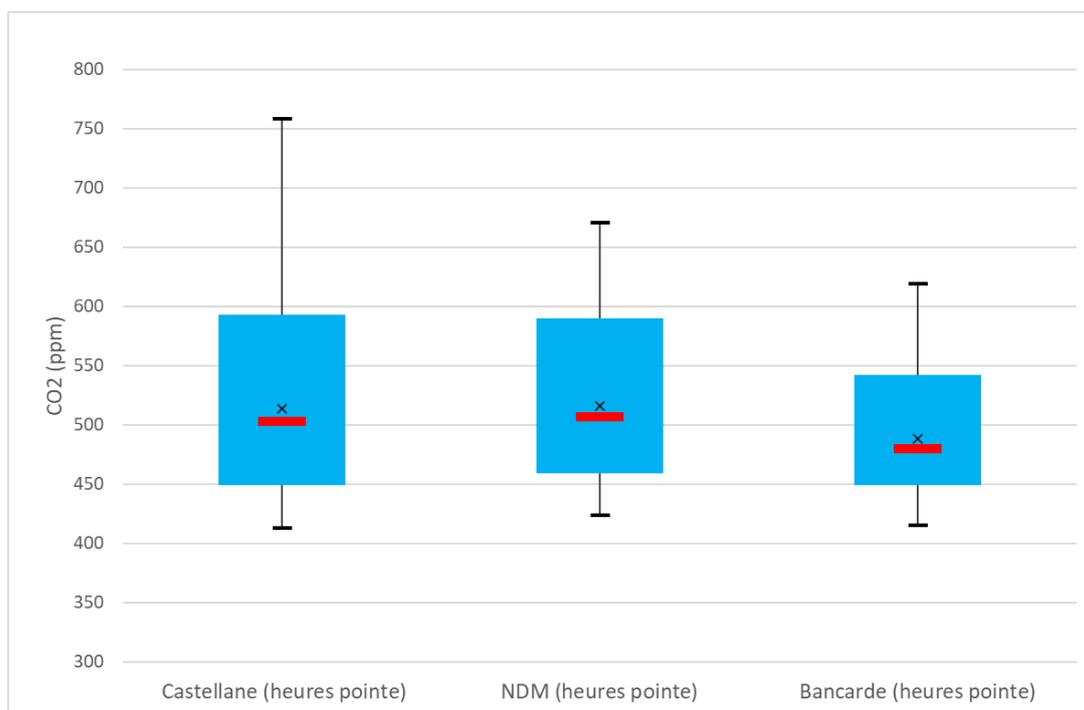


Figure 28 : Box-plot des taux d'humidité relative sur les quais des trois stations échantillonnées en condition sans ventilation

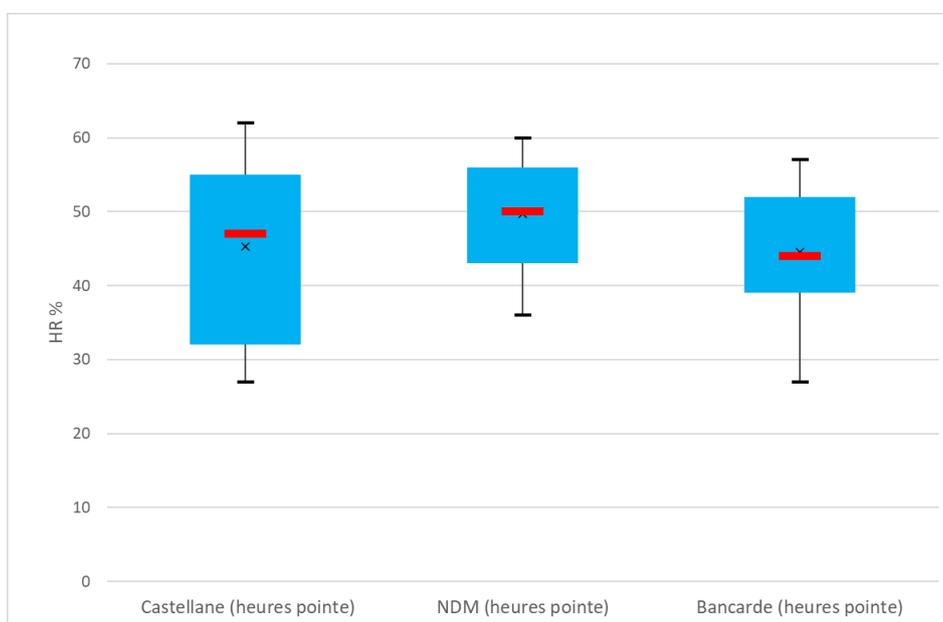


Figure 29 : Box-plot des taux d'humidité relative sur les quais des trois stations échantillonnées en condition avec ventilation

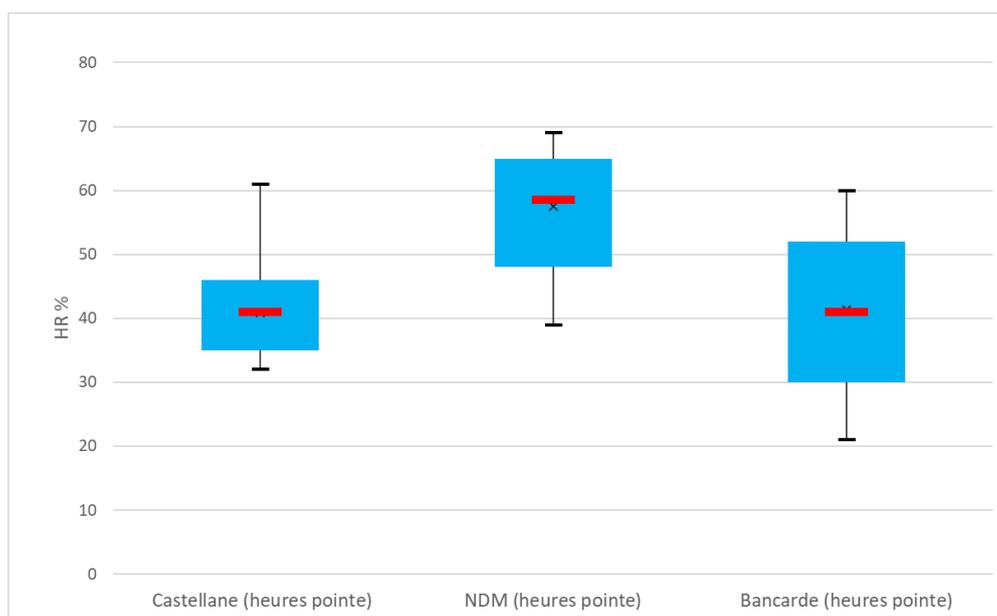


Figure 30 : Box-plot des températures sur les quais des trois stations échantillonnées en conditions sans ventilation

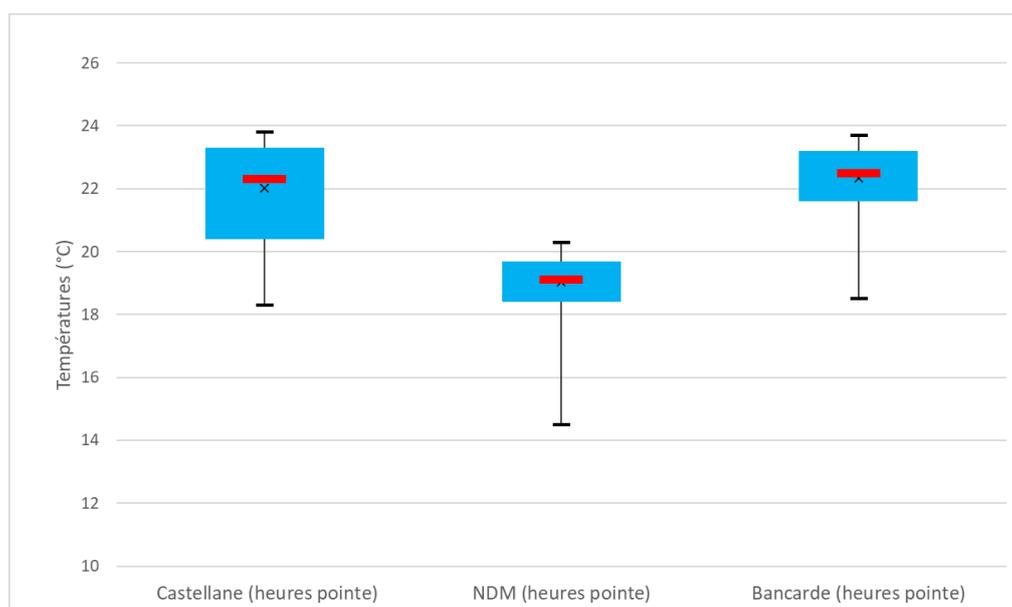
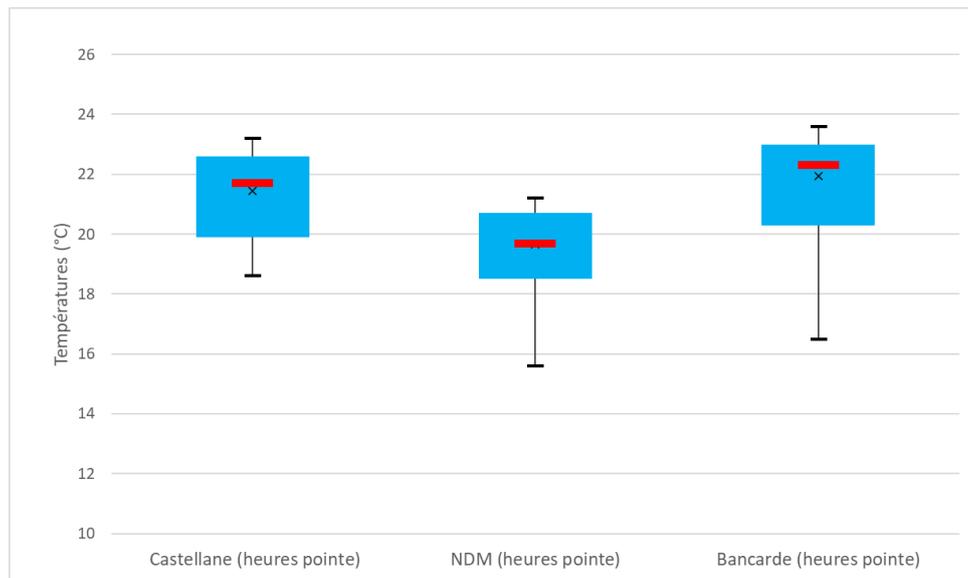


Figure 31 : Box-plot des températures sur les quais des trois stations échantillonnées en conditions avec ventilation



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

Tableau 58 : 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 | 2* | 3 |
| Durée cumulée des Prélèvements (minutes) | 240 | 360 |
| Moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 114 | 76 |
| Min – Max ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 110 - 117 | 81 - 71 |

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

Tableau 59 : 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 | 2* | 3 |
| Durée cumulée des Prélèvements (minutes) | 240 | 360 |
| Moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 113 | 73 |
| Min – Max ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 105 - 120 | 63 - 82 |

*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

Tableau 60 : 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) | < 16.6* | < 16.6* | < 414* | < 0.04* | < 3310* | <16552* | < 3.3* |
| Min – Max (ng/m ³) | < 16.6* | < 16.6* | < 414* | < 0.04* | < 3310* | <16552* | < 3.3* |
| C _{EFS} | Abrasion des pièces métalliques du matériel roulant | | | | | | |
| | Ba (ng/m ³) | Cr (ng/m ³) | Cu (ng/m ³) | Fe (ng/m ³) | Mn (ng/m ³) | Sb (ng/m ³) | Zn (ng/m ³) |
| Nombre de valeurs | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Durée cumulée des prélèvements (minutes) | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 |
| Moyenne (ng/m ³) | < 414* | < 83* | 1917 | 24711 | < 414* | < 41* | < 3310* |
| Min – Max (ng/m ³) | < 414* | < 83* | 1482 - 2533 | 18576 - 33755 | < 414* | < 41* | < 3310* |

* concentration inférieure à la limite de quantification correspondante

Tableau 61 : 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) | < 16.6* | < 16.6* | < 414* | < 0.04* | < 3310* | <16552* | < 3.3* |
| Min – Max (ng/m ³) | < 16.6* | < 16.6* | < 414* | < 0.04* | < 3310* | <16552* | < 3.3* |
| C _{EFS} | Abrasion des pièces métalliques du matériel roulant | | | | | | |
| | Ba (ng/m ³) | Cr (ng/m ³) | Cu (ng/m ³) | Fe (ng/m ³) | Mn (ng/m ³) | Sb (ng/m ³) | Zn (ng/m ³) |
| Nombre de valeurs | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Durée cumulée des prélèvements (minutes) | 240 | 240 | 240 | 240 | 240 | 240 | 240 |
| Moyenne (ng/m ³) | < 414* | < 83* | 2411 | 33703 | < 414* | < 41* | < 3310* |
| Min – Max (ng/m ³) | < 414* | < 83* | 2174 - 2649 | 33052 - 34354 | < 414* | < 41* | < 3310* |

* concentration inférieure à la limite de quantification correspondante

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

Sources de pollution

Les polluants atmosphériques ont diverses origines.

| Polluants | Sources principales |
|---|---|
| O₃ 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. |
| SO₂ 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 | Jour (maximum 35 j / an) |
| | | 40 | 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 | Heure (maximum 18h / an) |
| | | 40 | Année |
| SO ₂ Dioxyde de soufre | Seuil d'information- recommandations | 300 | Heure |
| | Seuil d'alerte | 500 | Heure (pendant 3h) |
| | Valeurs limites | 350 | Heure (maximum 24h / an) |
| | | 125 | 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 | 24 heures |
| PM2.5 Particules | | 20 | 1 an |
| NO ₂ Dioxyde d'azote | Faible altération de la fonction pulmonaire (asthmatiques) | 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.



www.atmosud.org

A propos d'AtmoSud

Siège social

146 rue Paradis « Le Noilly Paradis »
13294 Marseille Cedex
Tel. 04 91 32 38 00
Fax 04 91 32 38 29
Contact.air@atmosud.org

Etablissement de Martigues

06Route de la Vierge
13500 Martigues
Tel. 04 42 13 01 20
Fax 04 42 13 01 29

Etablissement de Nive

37 bis avenue Henri Matisse
06200 Nice
Tel. 04 93 18 88 00

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

AtmoSud
Inspirer un air meilleur