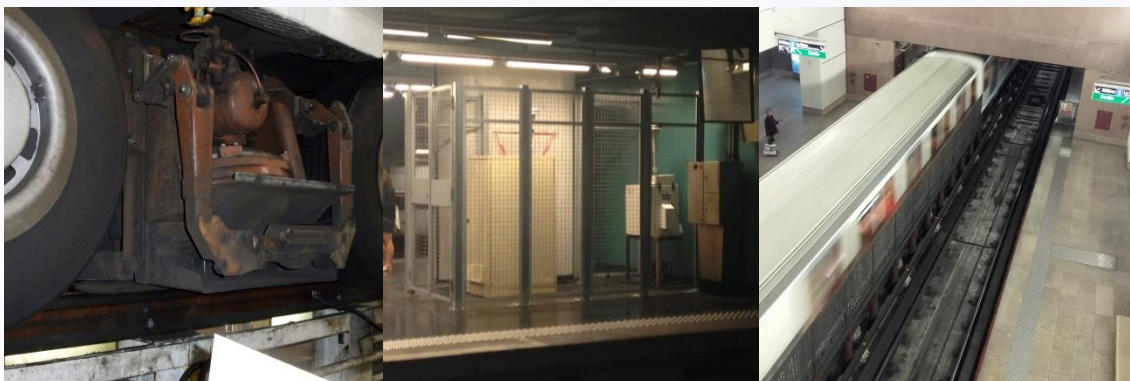


Qualité de l'air

PROVENCE - ALPES - CÔTE D'AZUR

Surveillance de la qualité de l'air dans le métro marseillais

Rapport d'étude – Été et hiver 2016



www.airpaca.org

AirPACA
QUALITÉ DE L'AIR



SOMMAIRE

1. Contexte et objectif	3
2. Mise en œuvre des mesures.....	4
2.1 Sites de prélèvement	4
2.2 Moyens mis en œuvre	4
2.2.1 Particules	4
2.2.2 Métaux	5
2.2.3 Hydrocarbures Aromatiques Monocycliques (HAM).....	6
2.2.4 Dioxyde d'azote (NO ₂)	6
2.2.5 Dioxyde de carbone (CO ₂)	6
2.3 Bilan de la phase de mesures.....	6
3. Résultats	7
3.1 Mesures dans les stations.....	7
3.1.1 Particules	7
3.1.2 Métaux	10
3.1.3 Dioxyde d'azote.....	12
3.1.4 Hydrocarbures Aromatiques Monocycliques	13
3.1.5 Comparaison avec d'autres études de la qualité de l'air dans les métros français.....	15
3.2 Mesures dans les rames.....	16
3.2.1 Dioxyde de carbone.....	16
3.2.2 Particules	16
4. Conclusion	18

Contact

Florie Chevrier
florie.chevrier@airpaca.org

Date de parution

septembre 2017

Références

24AI0713/ rapport-01

1. Contexte et objectif

La qualité de l'air intérieur des enceintes ferroviaires souterraines constitue une préoccupation importante depuis plusieurs années. La surveillance de la qualité de l'air dans le métro entre dans le cadre des missions d'intérêt général d'Air PACA. Six ans après une première campagne de mesures dans le métro marseillais (2010¹) menée par Air PACA, en collaboration avec la Régie des Transports Métropolitains (RTM), une nouvelle étude a été menée en 2016, durant 6 mois, intégrant deux saisons.

Le dispositif de surveillance a été adapté par rapport à celui de la campagne de 2010. Il combine des analyseurs automatiques de particules et de dioxyde de carbone, des prélèvements sur filtres permettant l'analyse des métaux (notamment les métaux lourds ciblés par la circulaire DGS/SD7B n°2003-314 du 30 juin 2003²), et de l'échantillonnage passif du benzène et du dioxyde d'azote. Les polluants ont été investigués suivant trois typologies de lieux : les quais, les zones d'échanges et les rames.

La campagne s'est déroulée au cours de l'été et de l'hiver 2016 au niveau de trois stations de métro : Saint Charles, et Castellane, deux stations de jonction entre les lignes 1 et 2, et La Fourragère. Les deux stations de jonction accueillent à elles seules près de 20 % de la fréquentation mensuelle du métro marseillais.

Ce rapport présente le dispositif mis en place de juin 2016 à décembre 2016, ainsi que les résultats des mesures obtenues dans les stations et les rames du métro marseillais.

¹ [Surveillance de la qualité de l'air dans le métro de Marseille - Rapport d'étude sur la base des campagnes de surveillance - Hiver 2010/Été 2010](#)

² [Circulaire DGS/SD 7 B n° 2003-314 du 30 juin 2003 relative à la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines](#)

2. Mise en œuvre des mesures

La RTM est l'établissement public à caractère industriel et commercial chargé de l'exploitation du réseau de transports en commun de Marseille, Septèmes-les-Vallons, Plan-de-Cuques et Allauch. En 2015, le réseau marseillais a été emprunté par 200 millions d'usagers, pour 800 000 voyages par jour. Près de la moitié du trafic concerne le métro.

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

- Ligne 1 entre La Rose et La Fourragère (18 stations dont 4 aériennes)
- Ligne 2 de Bougainville à Sainte-Marguerite Dromel (12 stations dont 2 aériennes)

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

2.1 Sites de prélèvement

Les sites de mesure ont été choisis en fonction de leur intérêt et des contraintes techniques.

Le quai de la station de métro de Saint-Charles a été équipé d'une cabine de mesure. Cette station a été choisie pour plusieurs raisons :

- elle avait déjà été échantillonnée en 2010
- elle connaît une fréquentation importante
- elle est le lieu de croisement des deux lignes de métro, quatre voies se présentent donc dans le même espace.

Des échantillonneurs passifs ont été placés aux stations Saint-Charles, Castellane et La Fourragère.

Enfin, des mesures dans les rames ont pris place, sur les deux lignes, en heures creuses et en heures pleines.

2.2 Moyens mis en œuvre

Air PACA a réalisé des mesures de particules PM₁₀, de métaux, de benzène, de dioxyde d'azote et de dioxyde de carbone sur plusieurs points, selon le plan d'échantillonnage indiqué dans le Tableau 1.

Tableau 1. Polluants investigués sur chaque site de mesure

	Saint Charles			Castellane			La Fourragère	Rames
	quai	tourniquets	couloir de sortie	quai	palier inférieur	tourniquets	quai	intérieur
PM ₁₀	X	-	-	-	-	-	-	X
PM _{2,5}	X	-	-	-	-	-	-	X
Métaux	X	-	-	-	-	-	-	-
Benzène	X	X	X	X	X	X	X	-
NO ₂	-	-	-	X	X	X	-	-
CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	X

2.2.1 Particules

Les particules sont des polluants atmosphériques constituées d'un mélange complexe de substances organiques et minérales en suspension dans l'air, sous forme solide et/ou liquide. Les particules sont de tailles, de compositions et d'origines diverses. Les particules mesurées dans la présente étude appelées PM₁₀ sont des particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10 µm.

L'émission directe des particules « primaires » dans l'atmosphère est le résultat de procédés anthropiques ou naturels. Les principales sources anthropiques sont la combustion de gazole type diesel des véhicules automobiles, l'utilisation de combustibles domestiques, les activités industrielles, l'érosion des chaussées sous l'effet de la circulation routière et l'abrasion des pneus et des freins, la remise en suspension des particules sous l'effet du déplacement à grande vitesse des véhicules, les travaux d'excavation et les activités minières.

Dans l'enceinte des métros, les particules sont généralement issues de l'abrasion des pneus, des freins et des rails, de la remise en suspension des particules par le passage à grande vitesse des rames dans les tunnels, le déplacement des usagers, et de l'air extérieur qui est utilisé pour ventiler les couloirs du métro.

Sur le quai du métro, une jauge bêta de marque Met One modèle BAM-1020 a été le moyen de mesure des particules utilisé. Son principe de fonctionnement est le suivant : les particules sont prélevées sur une bande filtrante, sous la forme de « tâches ». La jauge est équipée d'une source radioactive qui émet une quantité connue de rayonnement beta en direction de la tâche. Un récepteur, placé de l'autre côté de la tâche, mesure la quantité de rayonnement qui est passée au travers. L'atténuation de rayonnement observée, directement dépendante de la quantité de particules prélevée sur la tâche, permet d'estimer la quantité de particules présente dans l'air ambiant. Les particules de taille inférieure à 10 µm (PM₁₀) ont été mesurées sur le quai avec cet équipement.

Cette technique de mesure est équivalente à la méthode de référence définie dans la norme NF EN 12341³.

Dans les rames, les mesures en temps réel ont été réalisées avec un compteur optique de particules fines, le pDR 1500 de marque Thermo. Il s'agit d'un néphélomètre portatif qui permet une mesure de la concentration massique des poussières en suspension dans l'air. Une séparation en taille des particules au moyen d'un cyclone permet de mesurer la fraction choisie. Durant cette étude, deux pDR ont été utilisés afin de quantifier à la fois les particules PM₁₀ et les PM_{2,5}.

2.2.2 Métaux

Les métaux lourds regroupent une famille de composés assez vaste, dont le plus connu est le plomb, la plupart se trouvant à l'état particulaire. Les métaux réglementés dans l'air ambiant sont l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le nickel (Ni) et le plomb (Pb). Ils proviennent de la combustion des charbons, pétroles, ordures ménagères et de certains procédés industriels (métallurgie des métaux non ferreux notamment). Dans les enceintes ferroviaires, les métaux peuvent être émis lors du passage et du freinage des engins roulants sur les rails.

Le site de Saint Charles a été équipé d'un préleveur actif pour collecter en continu, avec un pas de temps hebdomadaire, des métaux sur filtre en quartz, conformément à la norme NF EN 14902 sur la fraction PM₁₀⁴.

Le préleveur actif est un Partisol de marque Thermo modèle 2025 fonctionnant en continu à un bas débit, de 1 m³/heure. Cet appareil était équipé d'un compartiment réfrigéré accueillant les filtres prélevés et permettant de limiter la volatilisation des espèces chimiques.

Dans la présente étude, cet appareil fonctionne alternativement sur la fraction PM₁₀ et sur la fraction PM_{2,5} (changement de tête de prélèvement toutes les deux semaines). Les filtres sont pesés avant le prélèvement, puis à nouveau pesés à l'issue de la semaine d'échantillonnage de façon à obtenir une concentration massique hebdomadaire. Ils sont ensuite envoyés pour analyse des métaux contenus dans les échantillons.

Les pesées sont réalisées par le laboratoire d'analyses gravimétriques d'Air PACA (processus de pesée conforme à la norme NF EN 12341). Les analyses de métaux sont effectuées au laboratoire TERA Environnement (accréditation COFRAC n° 1-5599 pour l'analyse du Cd, As, Ni, Pb dans l'air ambiant).

La liste des éléments analysés durant cette étude est indiquée dans le Tableau 2.

Tableau 2. Liste des éléments analysés

Composé	Symbole chimique	Composé	Symbole chimique	Composé	Symbole chimique
Aluminium	Al	Potassium	K	Rubidium	Rb
Arsenic	As	Lanthane	La	Antimoine	Sb
Baryum	Ba	Lithium	Li	Scandium	Sc
Calcium	Ca	Magnésium	Mg	Sélénium	Se
Cadmium	Cd	Manganèse	Mn	Étain	Sn
Cérium	Ce	Molybdène	Mo	Strontium	Sr

³ NF EN 12341 Juin 2014 - Air ambiant - Méthode normalisée de mesurage gravimétrique pour la détermination de la concentration massique MP10 ou MP2,5 de matière particulaire en suspension

⁴ NF EN 14902 Décembre 2005 - Qualité de l'air ambiant - Méthode normalisée pour la mesure du plomb, cadmium, de l'arsenic et du nickel dans la fraction MP10 de la matière particulaire en suspension

Cobalt	Co	Sodium	Na	Titane	Ti
Chrome	Cr	Nickel	Ni	Thallium	Tl
Césium	Cs	Plomb	Pb	Vanadium	V
Cuivre	Cu	Palladium	Pd	Zinc	Zn
Fer	Fe	Platine	Pt	Zirconium	Zr

2.2.3 Hydrocarbures Aromatiques Monocycliques (HAM)

Le **benzène (C₆H₆)** est un composé organique volatil. En milieu urbain, il provient majoritairement du transport. Il est aussi issu de la combustion de matière organique (bois, charbon) et des produits pétroliers. Il est produit naturellement par les combustibles fossiles (évaporation). Le benzène sert aussi de matière première pour la fabrication de nombreux produits industriels.

Le **toluène (C₆H₅-CH₃)**, habituellement ajouté à l'essence, provient principalement des gaz d'échappement des véhicules. Il est également souvent utilisé en tant que solvant et peut être libéré à partir de peintures et de revêtements, d'adhésifs, de produits automobiles et certains produits de soins personnels. Ils sont également présents dans la fumée du tabac.

L'**éthylbenzène (C₆H₅-C₂H₅)** entre dans l'atmosphère principalement à partir des émissions liées au trafic routier. Il est également émis lors de sa production et de son utilisation en industrie, par le raffinage du pétrole, par les pertes par évaporation et les fuites d'essence ou de fioul, lors de la préparation et le transport d'asphalte chaud destiné aux revêtements routiers et par les rejets d'incinérateurs.

Les **xylènes (ortho, méta et para-xylène) (CH₃-CH₄-CH₃)** sont émis par les véhicules automobiles et par certains produits tels que les peintures, les vernis, les colles ou les insecticides.

Les prélèvements des hydrocarbures monocycliques ont été réalisés par échantillonnage passif sur une cartouche Radiello code 145 couplée au corps diffusif jaune code 120 - 2. La cartouche code 145 est un tube de 4,8 mm de diamètre rempli avec 350 ± 10 mg de charbon graphité (Carbograph 4). Les composés organiques volatils sont piégés par adsorption, puis désorbés en laboratoire par désorption thermique et sont ensuite analysés par chromatographie gazeuse. Les analyses ont été conduites par le laboratoire GIE-LIC de Schiltigheim (accréditation COFRAC 1-2092). Le laboratoire fournit une incertitude d'analyse élargie inférieure à 13 %.

2.2.4 Dioxyde d'azote (NO₂)

Les oxydes d'azote se forment par des processus de combustion. En air extérieur urbain, les sources principales sont liées aux transports, ainsi qu'aux installations de combustion et au chauffage. Durant cette campagne, les mesures sont conduites exclusivement à la station de Castellane en raison des sorties aériennes qui débouchent sur la place Castellane soumise à une forte circulation routière, et de la liaison directe existant entre la station de métro et le parking automobile de la Place.

Le dioxyde d'azote a également été quantifié par échantillonnage passif, sur des tubes de marque Passam. Il s'agit d'un tube cylindrique contenant à une extrémité deux grilles en acier inoxydable imprégnées de solution de triéthanolamine qui piège le NO₂. Une fois récupérés, les tubes ont ensuite été analysés au laboratoire Passam.

2.2.5 Dioxyde de carbone (CO₂)

Le dioxyde de carbone est naturellement émis par la respiration. Ce n'est pas un polluant à proprement parler mais il sert de traceur du confinement d'un local en air intérieur. En air extérieur, ses concentrations sont de l'ordre de 400 ppm.

Les concentrations en dioxyde de carbone ont été mesurées dans les rames en temps réel à l'aide d'un Q-Track 7565-X associé à la sonde 982 Probe (fabricant TSI).

2.3 Bilan de la phase de mesures

La campagne s'est déroulée durant six mois. Compte tenu des opérations de calibrage, l'analyseur automatique de particules a été opérationnel à compter du 5 juillet et les prélèvements de métaux ont démarré le 30 juin.

Les mesures en rames se sont déroulées une journée par mois en période d’heures de pointe et d’heures creuses.

Les prélèvements par échantillonnage passif de benzène et de NO₂ ont été prévus pour couvrir quatre semaines en période chaude (septembre) et quatre semaines en saison froide (décembre). Or, en raison d’un problème au laboratoire d’analyse, une importante partie des résultats de benzène de la saison chaude a été invalidée. En conséquence, il a été décidé de prolonger de deux semaines la seconde campagne de mesure, en commençant les mesures dès la mi-novembre.

Le calendrier des mesures est présenté sur la Figure 1.

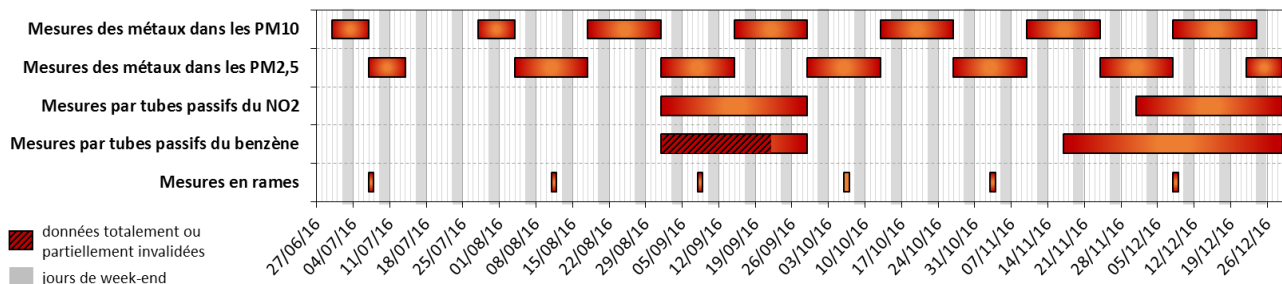


Figure 1 : Planification des mesures

3. Résultats

3.1 Mesures dans les stations

3.1.1 Particules

3.1.1.1 Valeurs de références

Les valeurs de référence en air extérieur et en air intérieur sont différentes. Pour les enceintes ferroviaires souterraines, les valeurs guides recommandées sont calculées en fonction de la concentration extérieure (C_{ext}), du temps passé dans l’espace ferroviaire souterrain (T_{sout}) et de la valeur limite de la directive air ambiant (Directive 2008/50/CE) (C_{limite} = 50 µg/m³) suivant l’expression (Circulaire DGS/SD n°2003-314 du 30 juin 2003)⁵ :

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

où P90_{ext} est le percentile 90 des concentrations journalières de PM₁₀ mesurées en air extérieur sur une année (c’est-à-dire que 90 % des valeurs sont inférieures à cette valeur) et C_{sout} la concentration souterraine en PM₁₀ à ne pas dépasser.

Pour l’année 2016, la valeur du percentile 90 en air extérieur est de 44 µg/m³, ce qui permet d’obtenir les valeurs regroupées dans le Tableau 3, pour différentes durées de séjour dans les enceintes ferroviaires souterraines.

Tableau 3 : Valeurs guides des concentrations de PM₁₀ à ne pas dépasser dans le métro marseillais en 2016

Temps d’exposition dans le métro (T _{sout})	Concentration souterraine à ne pas dépasser (C _{sout}) (µg/m ³)
15 min	620
30 min	332
1h	188
1h30	140
2h	116

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

3.1.1.2 Concentrations mesurées

La Figure 2 représente les concentrations journalières moyennes des PM₁₀ mesurées lors de la campagne 2016 de surveillance du métro marseillais. Cette figure présente les concentrations par mois et la concentration moyennée sur l'ensemble de la période de la mesure. Cette dernière peut être comparée aux sites fixes de surveillance de la qualité de l'air extérieur sur la même période et aux résultats de la mesure de 2010 menée sur le même site (station Saint Charles).

Les moyennes mensuelles, comprises entre 84 µg/m³ et 95 µg/m³, varient peu. Seules les concentrations du mois de décembre présentent une plus grande variabilité des concentrations, vraisemblablement en raison des divers travaux de maintenance réalisés au cours du mois, à côté de la station.

Les concentrations moyennes en PM₁₀ mesurées lors de la campagne 2016 sont globalement plus élevées que celles de la campagne de surveillance de 2010. Cette hausse peut être liée à des horaires d'ouverture étendus (5h -1h en 2016 contre 5h-22h30 en 2010) où les rames circulent et génèrent ainsi des particules sur une période plus longue.

Cependant, les concentrations mesurées uniquement lors des plages d'ouverture du métro ne présentent aucune différence significative entre 2010 et 2016 (93 µg/m³ en 2010 et 96 µg/m³ en 2016) (cf. Annexe 1).

Les concentrations moyennes observées dans la station de métro Saint Charles sont très nettement supérieures aux concentrations mesurées en air extérieur, que ce soit par rapport au site de Cinq Avenues, site de fond urbain, ou aux sites de Rabatau et Timone, sites urbains influencés par le trafic routier. L'air en enceinte ferroviaire souterraine est non seulement influencé par l'activité qui s'y passe mais également par l'air extérieur en raison de l'aération des zones souterraines.

(µg/m ³)	Saint Charles 2016						Saint Charles 2016	Saint Charles 2010	Cinq Avenues 2016	Rabatau 2016	Timone 2016
	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.					
Moyenne	89	89	94	84	85	95	89	78	28	38	39
Max.	101	111	109	104	111	145	145	119	114	89	118
Min.	58	58	58	51	54	61	51	26	9	15	7

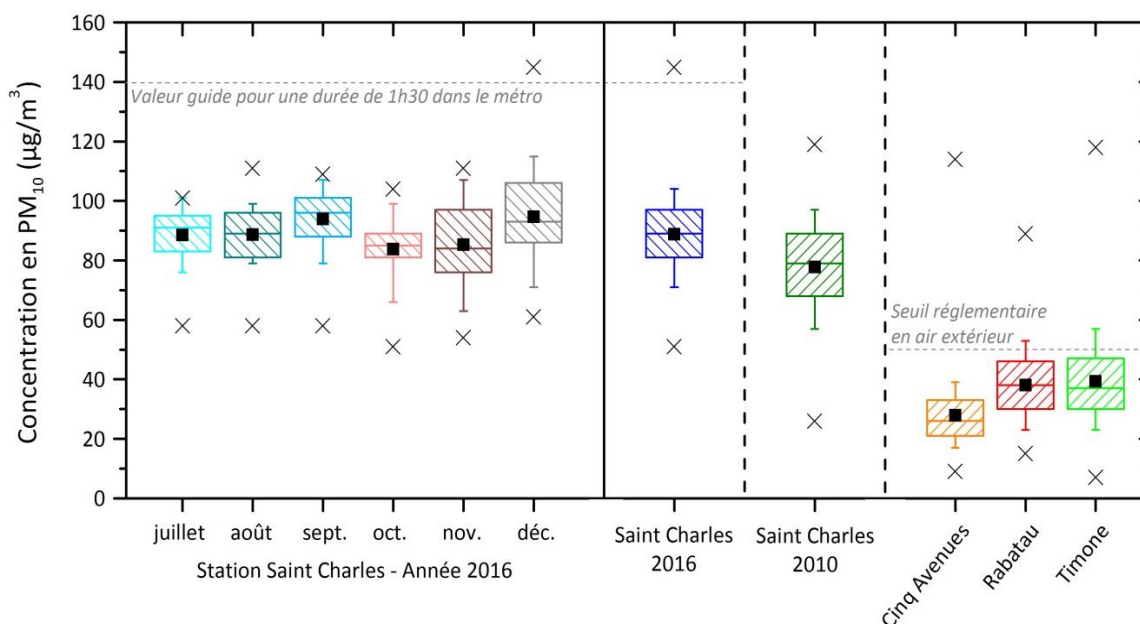


Figure 2 : Concentrations journalières des PM₁₀ sur le site de la station Saint Charles pour chaque mois de la campagne et pour toute la durée de la campagne (explication de la représentation en « boxplot » en Annexe 2)

La durée de trajet journalière des usagers du métro ne s'étend rarement à plus d'1h. Pour un temps d'exposition allant jusqu'à 1h30, la valeur guide de 140 µg/m³ est respectée. Une valeur en décembre, pouvant être liée aux

travaux de maintenance réalisés hors des horaires d'ouverture au public, dépasse $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mais n'impacte pas les usagers du métro.

3.1.1.3 Profils journaliers

Les concentrations en particules dans l'enceinte du métro sont très hétérogènes dans les différents espaces (quai, rames, couloirs, etc.) mais également dans le temps, suivant les heures de la journée et les jours de la semaine (comme pour des concentrations mesurées en air extérieur).

La Figure 3 présente les profils journaliers moyens des jours de semaine et des jours de weekend pour les périodes estivales et hivernales. Elle met en évidence des différences de concentrations entre la journée et la nuit. Que ce soit en période estivale ou en période hivernale, les jours de semaine ou de weekend, les heures de fermeture du métro sont très clairement identifiables. Les concentrations en PM_{10} peuvent descendre autour de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tandis qu'en plage d'ouverture du métro, celles-ci sont toujours supérieures à $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En période hivernale, les périodes d'heures de pointe (fréquence des rames et des passagers plus importante) se distinguent davantage qu'en période estivale. Une augmentation des concentrations en PM_{10} dans la station de métro est visible entre 7h et 11h et entre 16h et 21h (heure locale) où elles atteignent un maximum proche de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne en hiver. Les jours de weekend (samedi et dimanche), les concentrations mesurées sont globalement constantes tout au long de la journée, elles semblent liées à un flux de personnes et de rames toujours constant.

Les concentrations en PM_{10} en air extérieur sont elles aussi très marquées par les heures de pointe et les heures creuses, avec deux pics dans la journée, notamment à Timone, site très influencé par le trafic routier : entre 7h et 12h et entre 17h et minuit. Les concentrations en air extérieur sont plus faibles qu'en air intérieur, elles ne dépassent pas $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Contrairement aux espaces ferroviaires souterrains où la météo ne joue aucun rôle dans les concentrations mesurées, en air ambiant, le vent permet la dispersion des polluants et la pluie lessive l'atmosphère. C'est pourquoi les concentrations en air extérieur sont plus faibles l'après-midi en période estivale : le brassage des masses d'air est augmenté en cette période.

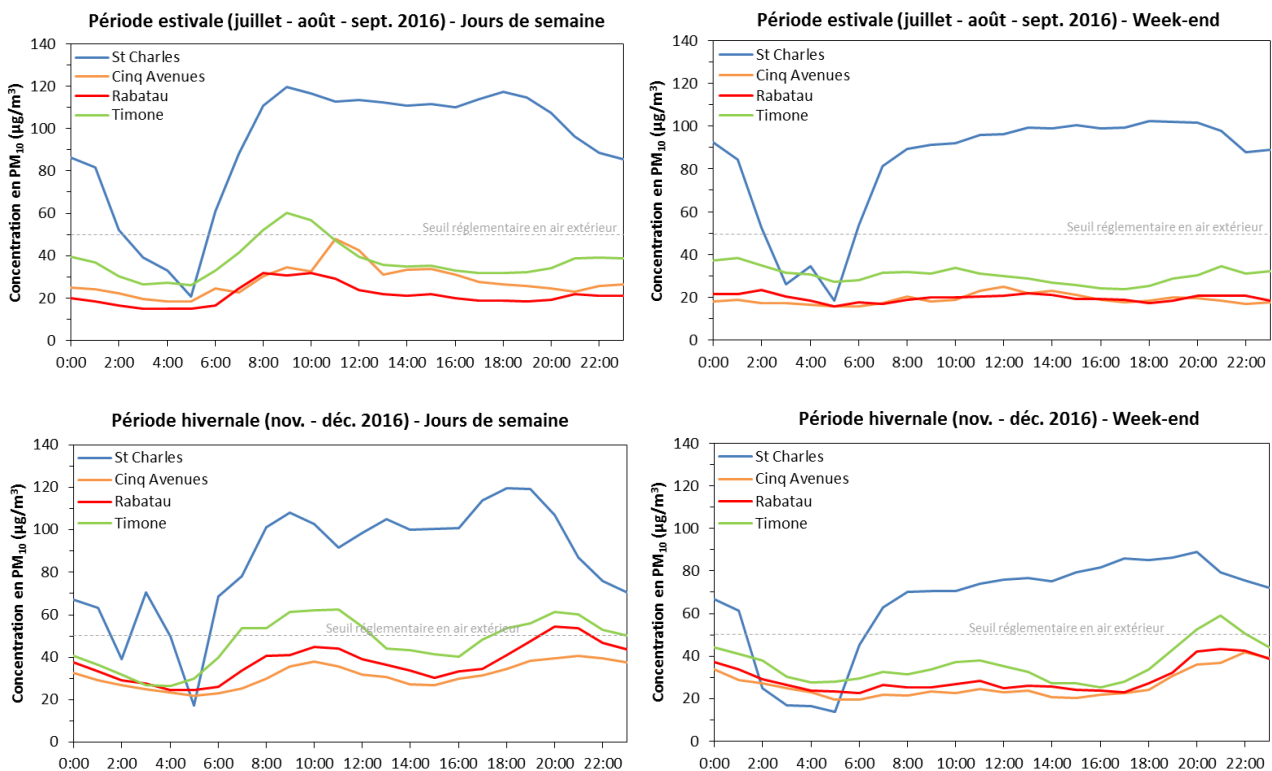


Figure 3 : Profils journaliers moyens des concentrations en PM_{10} lors des périodes estivale et hivernale et lors des jours de semaine et le week-end (heures basées sur l'heure locale)

3.1.2 Métaux

3.1.2.1 Valeurs de références

Les métaux contenus dans les PM_{10} ne sont pas réglementés en air intérieur, ni dans les enceintes ferroviaires souterraines, et seulement quatre métaux lourds le sont en air extérieur selon la directive cadre 96/62/EC (les directives 2008/50/CE et 2004/107/CE précisant les modalités d'application des mesures) : le plomb, l'arsenic, le cadmium et le nickel.

Tableau 4 : Valeurs de référence pour les métaux dans les particules atmosphériques en moyenne annuelle

ng/m ³	Plomb*	Arsenic	Cadmium	Nickel
Valeur cible ou *limite	500	6	5	20

3.1.2.2 Concentrations mesurées

Les filtres utilisés pour l'analyse des métaux ont été pesés pour déterminer les concentrations journalières en PM_{10} . Ces concentrations ont été comparées aux mesures en continu (partie 3.1.1) et montrent une bonne cohérence entre les deux méthodes (pesée et analyseur BAM) (cf. Annexe 3).

Les concentrations en éléments traces métalliques analysés sont regroupées dans la Figure 4 pour ceux suivis en enceintes ferroviaires souterraines et en Annexe 4 pour l'ensemble des métaux.

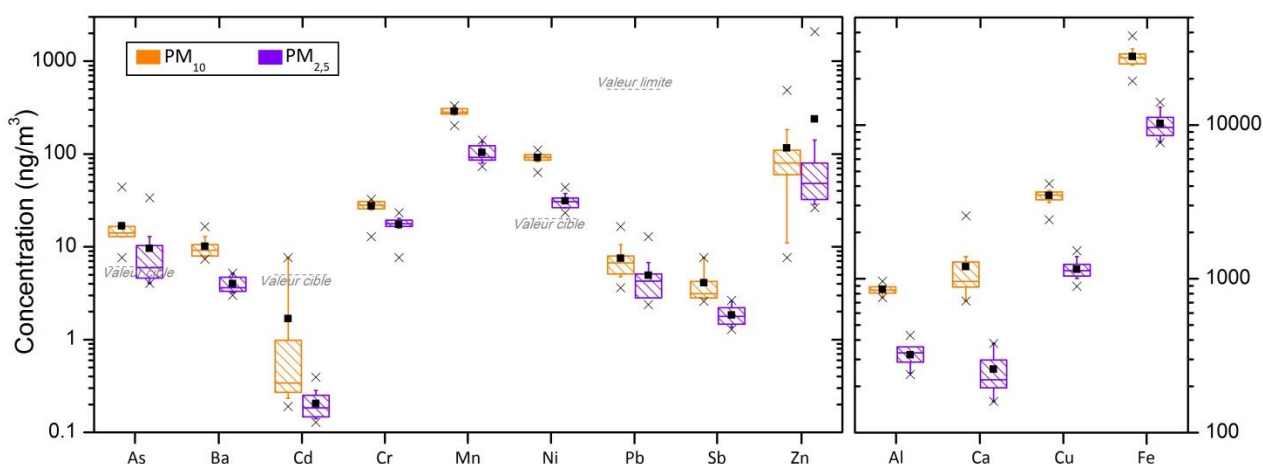


Figure 4 : Concentration des principaux éléments traces métalliques mesurés

Parmi les quatre métaux réglementés dans les PM_{10} en air ambiant, seulement deux respectent la valeur cible/limite correspondante : le cadmium (Cd) et le plomb (Pb).

Le **plomb (Pb)**, mesuré dans l'enceinte du métro, n'a jamais vu ses concentrations atteindre la valeur limite réglementaire (500 ng/m^3) ni même l'objectif de qualité (250 ng/m^3). Les teneurs maximales en Pb dans les PM_{10} ont été de 17 ng/m^3 . En air extérieur, la concentration moyenne de Pb a été de $5,7 \text{ ng/m}^3$. En air ambiant, le plomb est émis par les incinérateurs de déchets, les industries de fusion du plomb, la fabrication de batteries électriques ou la fabrication de certains verres.

Le **cadmium (Cd)**, de concentration moyenne de $1,7 \text{ ng/m}^3$, n'a pas dépassé la valeur cible de 5 ng/m^3 à l'exception des concentrations mesurées entre le 15 et le 29 septembre, atteignant $7,7 \text{ ng/m}^3$. Entre juillet et décembre 2016, il a été mesuré une concentration moyenne de $0,1 \text{ ng/m}^3$ sur le site de Cinq Avenues.

Les concentrations journalières en **arsenic (As)** ont systématiquement dépassé la valeur cible annuelle de 6 ng/m^3 en air ambiant. Elles ont atteint la valeur de 44 ng/m^3 en août 2016. En air extérieur, la concentration moyenne en As sur la durée de la campagne à Cinq Avenues (site de fond urbain) a été de $0,4 \text{ ng/m}^3$. Ces concentrations, très élevées dans la station de métro, indiquent une source fortement émettrice d'As à proximité de la station.

Les concentrations en **nickel (Ni)** ont dépassé la valeur cible de 20 ng/m³ avec une moyenne à 92 ng/m³. Sur le site de Cinq Avenues, la concentration moyenne a été de 2,9 ng/m³.

De nombreux métaux non réglementés, mais dont leurs sources d'émission sont supposées être situées dans le réseau ferroviaire souterrain, ont également été mesurés.

C'est le cas du **baryum (Ba)** dont les concentrations dans les PM₁₀ présentent une légère saisonnalité avec une moyenne de 8,9 ng/m³ en été et 11,9 ng/m³ en hiver. Ce composé peut provenir du matériau du système de freinage.

Le **calcium (Ca)**, présentant des concentrations moyennes de 1452 ng/m³ en été et de 975 ng/m³ en hiver, peut être issu de sources externes mais également de l'usure des matériaux de construction tels que l'abrasion des quais par les usagers.

Les concentrations très élevées en **fer (Fe)** (moyenne de 28 µg/m³) et en **cuivre (Cu)** (moyenne de 3,5 µg/m³) indiquent une source interne aux enceintes ferroviaires souterraines. En effet, ces deux éléments sont fortement émis par l'abrasion des pièces métalliques lors du contact frein-roue, du contact du matériel roulant avec le système d'alimentation électrique et du contact rail-roue. L'**aluminium (Al)** (moyenne de 852 ng/m³), le **manganèse (Mn)** (moyenne de 288 ng/m³) et le **zinc (Zn)** (moyenne de 116 ng/m³) peuvent également être émis par ce type d'abrasion.

Les concentrations en **chrome total (Cr)** (moyenne de 27 ng/m³) sont conformes à un environnement non exposé (5-200 ng/m³)⁶. Ce composé peut provenir de l'abrasion des rails, du cœur des voies ou des roues.

Enfin, l'**antimoine (Sb)** (moyenne de 4 ng/m³), peut être émis, en air ambiant, de manière anthropique par l'exploitation des métaux non ferreux, le raffinage, la combustion du charbon et de déchets mais il est également présent naturellement dans les sols.

Par rapport à la surveillance du métro qui avait été réalisée en 2010, certains métaux ont en moyenne augmenté, c'est le cas de As, Cd, Mn, Ni, Cu et Fe, tandis que d'autres ont vu leur moyenne diminuer (Ba, Cr, Pb, Zn et Ca) (Tableau 5).

Tableau 5 : Concentrations moyennes des éléments traces métalliques mesurées en 2010 et 2016 dans les PM₁₀ (*métaux réglementés)

ng/m ³	As*	Cd*	Mn	Ni*	Cu	Fe	Ba	Cr	Pb*	Zn	Ca
2010	4,0	0,2	138	15,0	2800	14700	46,0	38,0	12,0	688	3700
2016	16,7	1,7	288	91,6	3475	27753	10,1	27,5	7,5	116	1196

La somme des métaux représente en moyenne 44 % de la masse des PM₁₀ et 34 % de la masse des PM_{2,5} (Figure 5). Cette proportion est très importante par rapport à la somme des métaux en air extérieur qui dépassent rarement 10 % de la masse des PM₁₀. Dans le métro, le fer, élément trace métallique le plus abondant, représente 28 % de la masse des PM₁₀.

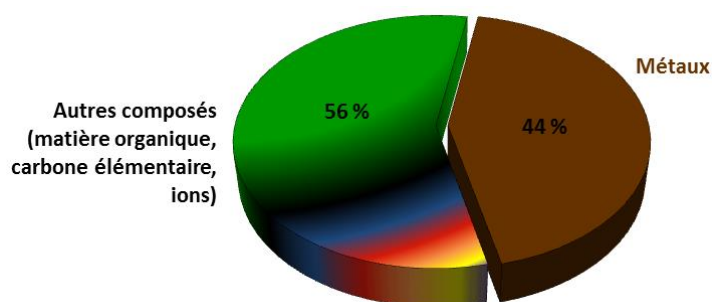


Figure 5 : Bilan de masse des PM₁₀ de juin à décembre 2016

⁶ World Health Organization (WHO): Air quality guidelines for Europe, 2000.

3.1.3 Dioxyde d'azote

Les mesures de dioxyde d'azote ont été conduites à la station Castellane, sur trois points de profondeur différente : le palier supérieur, le palier inférieur et le quai (point le plus profond). Les photos des sites de mesure sont présentées sur la Figure 6.



Figure 6 : Emplacements des mesures de dioxyde d'azote

Les échantillonnages ont été réalisés avec une fréquence hebdomadaire, durant quatre semaines au mois de septembre puis en décembre.

Les blancs de terrain de dioxyde d'azote ont montré des résultats inférieurs à la limite de détection, équivalente à $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 6. L'absence de données sur certaines périodes est liée à des vols de tubes. À des fins de comparaison, les concentrations moyennes de dioxyde d'azote relevées sur la station pérenne de Rabatau, de typologie de proximité automobile, sont également présentées.

Tableau 6. Concentrations mesurées en NO_2

$\mu\text{g}/\text{m}^3$		01/09 - 08/09	08/09 - 15/09	15/09 - 22/09	22/09 - 29/09	01/12 - 08/12	08/12 - 15/12	15/12 - 22/12	22/12 - 29/12	Moyenne
Castellane	palier supérieur	55	58	48	58	55	-	50	46	53
	palier inférieur	45	47	38	50	-	47	43	41	45
	quai	40	44	32	43	42	43	41	39	40
Rabatau		67	68	36	76	59	70	52	58	61

Les teneurs en dioxyde d'azote ont été élevées et les concentrations moyennes ont dépassées la valeur limite annuelle en air ambiant, fixée à $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figure 7). Néanmoins, les mesures ont été déployées en septembre et décembre et cette période a été particulièrement exposée à la pollution azotée : les niveaux mesurés à Rabatau, durant ces deux mois, ont été supérieurs de plus de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à la moyenne annuelle ($49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2016). Il en a été de même à la station Cinq Avenues, site de fond urbain, où la moyenne des concentrations en NO_2 a été de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durant les périodes de mesure dans le métro et de $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur toute l'année 2016. Ainsi, il est probable que la moyenne sur l'année soit inférieure aux niveaux mesurés lors de la campagne.

En 2010, les concentrations mesurées sur le quai de la station Castellane étaient du même ordre de grandeur ($38 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que celles mesurées en 2016 ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

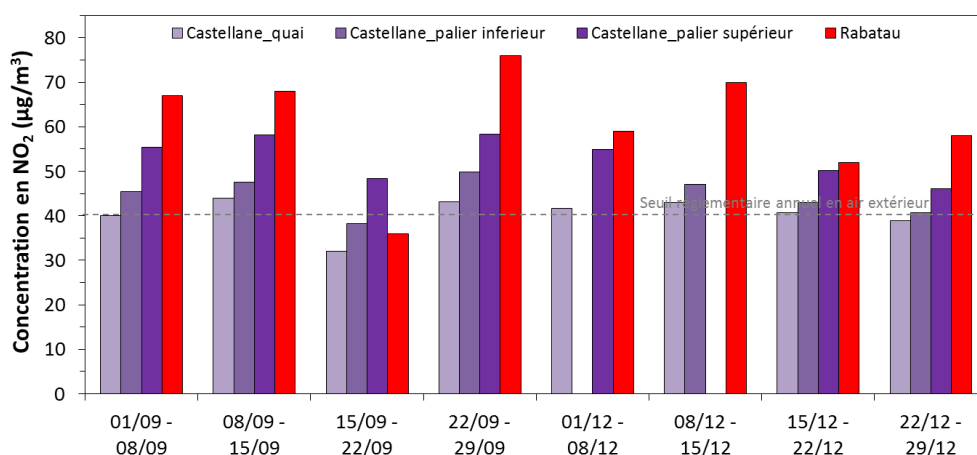


Figure 7 : Concentrations mesurées en NO₂

Les concentrations moyennes en NO₂ diminuent lorsque la profondeur augmente, ce qui témoigne d'un apport de dioxyde d'azote par l'extérieur. En effet, la station de métro Castellane comporte à la fois des sorties aériennes communiquant avec les tunnels et débouchant sur la place, qui est très fréquentée par les véhicules, ainsi qu'une liaison directe avec un parking souterrain (au niveau du palier supérieur). Les niveaux de dioxyde d'azote dans le métro semblent tributaires des teneurs extérieures.

3.1.4 Hydrocarbures Aromatiques Monocycliques

Les mesures des HAM ont été initialement prévues pour être conduites sur les mêmes périodes que le dioxyde d'azote (quatre semaines en septembre et en décembre). Cependant, les trois premières séries hebdomadaires (1^{er} au 22 septembre) ont dûes être invalidées sur tous les sites en raison d'un problème au laboratoire d'analyse. Les mesures ont donc finalement été réalisées du 22 au 29 septembre, puis du 17 novembre au 29 décembre.

À Castellane, les prélèvements ont été effectués sur les mêmes emplacements que pour le dioxyde d'azote (cf. Figure 6). À Saint-Charles, les trois points de mesures ont été placés à différentes profondeurs : dans le couloir de sortie qui mène vers la Place des Marseillaises, au niveau des tourniquets puis sur le quai (emplacement le plus profond). À La Fourragère, les tubes ont été placés au niveau du quai. Les photos des emplacements sont présentées sur la Figure 8.

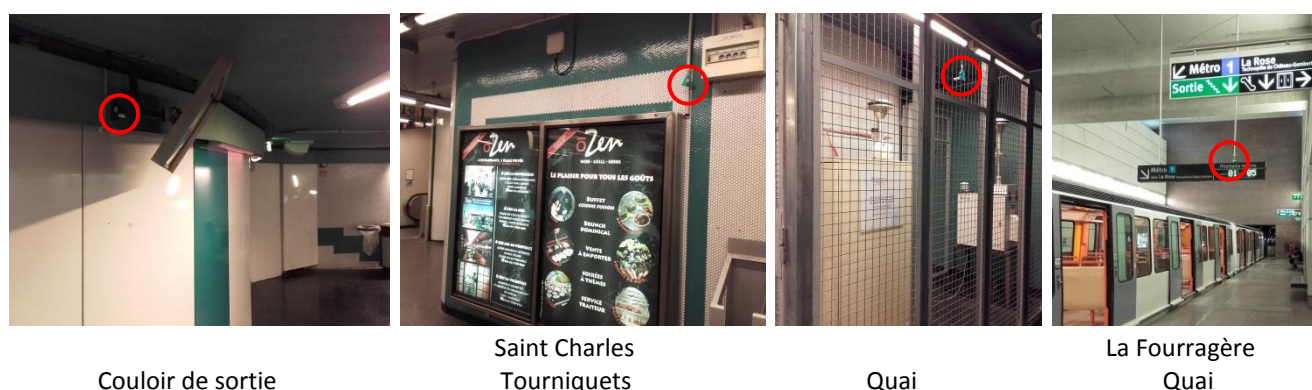


Figure 8 : Emplacements des mesures de benzène

Les concentrations moyennes de benzène sur l'ensemble des séries, par site, sont présentées dans le Tableau 7 et la Figure 9. Les résultats obtenus sur les stations pérennes de Cinq Avenues (typologie urbaine) et Rabatau (proximité automobiles) sont également présentés. La moyenne obtenue sur le point de mesure de Saint-Charles « couloir de sortie » n'est pas calculée sur la même période que les autres sites, en raison des vols répétés des tubes passifs sur les premières séries.

Tableau 7. Concentrations mesurées en benzène

$\mu\text{g}/\text{m}^3$		22/09 - 29/09	17/11 - 24/11	24/11 - 01/12	01/12 - 08/12	08/12 - 15/12	15/12 - 22/12	22/12 - 29/12	Moyenne
Castellane	palier supérieur	3,1	2,0	3,4	3,6	3,9	3,4	4,0	3,3
	palier inférieur	2,5	1,6	2,8	3,0	3,4	3,1	3,6	2,8
	quai	2,5	1,8	2,6	3,2	3,1	3,0	3,4	2,8
Saint Charles	couloir de sortie	-	-	2,8	2,4	3,0	2,8	2,8	2,6
	tourniquets	2,0	1,6	2,6	2,6	3,0	2,9	3,2	2,6
	quai	2,0	1,5	2,8	2,9	3,2	2,7	3,0	2,6
La Fourragère	quai	1,6	1,1	2,1	2,2	2,5	2,1	2,7	2,0
Cinq Avenues		1,9	0,5	1,3	1,5	1,7	1,6	2,0	1,5
Rabatau			2,1	2,6	2,6	3,8	3,0	3,8	3,3

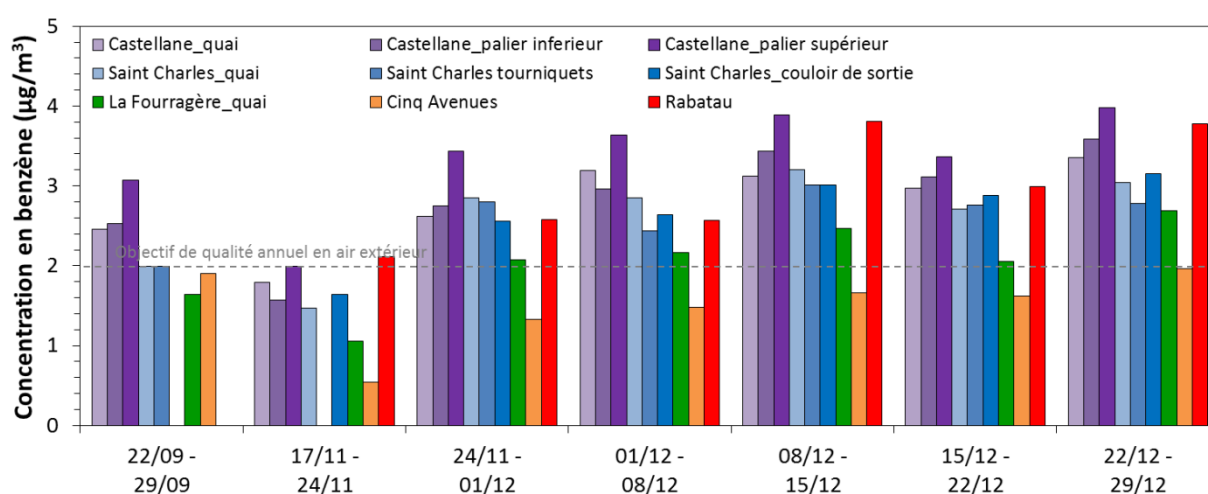


Figure 9 : Concentrations mesurées en benzène

À Castellane, les niveaux de benzène sont en cohérence avec les observations de dioxyde d’azote : le palier supérieur présente des concentrations légèrement supérieures au palier inférieur et au quai. Ces relevés témoignent à nouveau que les polluants d’origine automobile, provenant notamment du parking souterrain, pénètrent dans l’espace intérieur du métro. Les teneurs les plus faibles sont observées à La Fourragère.

À l’instar des résultats pour le dioxyde d’azote, les concentrations en benzène relevées sont relativement élevées : si la valeur limite annuelle de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est respectée, l’objectif de qualité annuel de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est dépassé. À noter cependant que les mois d’hiver durant lesquels ces mesures ont été conduites sont plus impactés par la pollution par le benzène : les moyennes annuelles sur les stations pérennes de Cinq Avenues et de Rabatau en 2016 sont respectivement égales à $1,1$ et $2,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ contre $1,5$ et $3,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur la période de mesure.

Les moyennes sur l’ensemble de la campagne des autres HAM ont été regroupées dans le Tableau 8. Les concentrations en toluène sont légèrement plus faibles qu’en site extérieur sous influence du trafic routier ($11,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Rabatau) à l’exception de la station de Castellane ($11,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau des quais). De plus, les concentrations dans le métro des autres HAM sont du même ordre de grandeur que pour les sites extérieurs influencés par les véhicules. Les concentrations plus importantes en HAM (dont le benzène) à Castellane qu’à Saint-Charles et La Fourragère peuvent s’expliquer par la liaison directe entre le parking souterrain et la station.

Tableau 8 : Concentrations mesurées moyennes sur toute la durée de la campagne en HAM

$\mu\text{g}/\text{m}^3$		Toluène	Éthylbenzène	m+p-xylène	o-xylène
Castellane	palier supérieur	14,9	3,8	14,8	5,8
	palier inférieur	12,1	4,2	15,8	6,2
	quai	11,5	2,5	10,3	4,0
Saint Charles	couloir de sortie	10,1	2,2	8,9	3,4
	tourniquets	10,2	2,1	8,6	3,4
	quai	10,0	2,1	8,3	3,2
La Fourragère	quai	7,4	1,6	6,5	2,7
Cinq Avenues		3,5	0,6	2,3	1,0
Rabatau		11,1	2,0	8,0	3,1

3.1.5 Comparaison avec d'autres études de la qualité de l'air dans les métros français

Le Tableau 9 présente les concentrations moyennes obtenues lors d'études de la qualité de l'air dans différentes enceintes ferroviaires souterraines françaises. Le métro marseillais se distingue par de plus fortes concentrations en As, Cd, Ni, Cu et benzène. Il présente également de concentrations en PM_{10} , Mn, Fe et Zn supérieures aux métros provinciaux mais inférieures aux métros parisiens. Les composés tels que le Cr et le Pb présentent, quant à eux, des concentrations inférieures aux mesures réalisées dans les autres métros.

Tableau 9 : Concentrations moyennes des différents polluants mesurés lors d'études de métros français

	Marseille (Saint Charles et Castellane)	Paris (Châtelet) ⁷	Paris ⁸	Toulouse (Esquirol) ⁹	Toulouse (Compans Caffarelli) ¹⁰	Lille (Eurotéléport) ¹¹	Rennes (République) ¹²	unité
Année	2016	2016	2003-2005	2015	2016	2013-2014	2004-2005	
PM_{10}	89	143	-	110	29	23	47	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Pb	7,5	-	93	-	-	7,9	8,2	ng/m^3
As	16,7	-	8	-	-	0,4	-	ng/m^3
Cd	1,7	-	-	-	-	0,3	-	ng/m^3
Ni	91,6	-	35	-	-	5,2	6,8	ng/m^3
Mn	288	-	334	-	-	24,9	80,7	ng/m^3
Cu	3475	-	760	-	-	164,9	-	ng/m^3
Fe	27753	-	33242	-	-	2296	8614,3	ng/m^3
Ba	10,1	-	475	-	-	-	-	ng/m^3
Cr	27,5	-	128	-	-	<LD	45,1	ng/m^3
Zn	116	-	326	-	-	47,5	-	ng/m^3
Ca	1196	-	-	-	-	-	-	ng/m^3
NO_2	40	33	-	13,5	47	35	31	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Benzène	2,7	-	-	1,9	1,7	-	1,1	$\mu\text{g}/\text{m}^3$

⁷ RATP : [Qualité de l'air mesurée dans la station Châtelet](#)

⁸ Anses : [Pollution chimique de l'air des enceintes de transports ferroviaires souterrains et risques sanitaires associés chez les travailleurs](#)

⁹ Atmo Occitanie : [Plan de surveillance de la qualité de l'air dans le métro toulousain](#)

¹⁰ Atmo Occitanie : [Plan de surveillance de la qualité de l'air dans le métro toulousain](#)

¹¹ Atmo Nord-Pas-de-Calais : [Rapport d'étude - Evaluation de la qualité de l'air intérieur - Station du métro de l'agglomération lilloise](#)

¹² Air Breizh : [Etude de la qualité de l'air dans le métro rennais](#)

3.2 Mesures dans les rames

3.2.1 Dioxyde de carbone

Le CO₂, indicateur de confinement, n'est pas réglementé dans les enceintes ferroviaires souterraines mais il existe des valeurs de référence en air intérieur qui permettent d'évaluer le confinement : 1300 ppm pour le règlement sanitaire départemental type. En air extérieur, ses concentrations avoisinent 400 ppm. La Figure 10 montre qu'à l'intérieur des rames, les concentrations peuvent atteindre 1200 ppm en heure de pointe.

Les concentrations en CO₂ sont directement influencées par le confinement et la quantité de personnes présentes dans la rame. Par exemple, le 8 décembre 2016 à 9h, un nombre considérable de personnes se trouvaient dans le métro et la concentration en CO₂ a atteint 1485 ppm.

Comme le montre la Figure 10, les concentrations diminuent à l'approche des bouts de ligne, en lien avec :

- une diminution du nombre de personnes à bord
- des stations aériennes permettant une aération plus importante.

De plus, les passages à l'extérieur lors des changements de rames (Sainte Marguerite Dromel, Bougainville, La Rose, La Fourragère) sont très nettement visibles : les mesures sur les quais correspondent à la concentration extérieure en CO₂ (autour de 400 ppm).

Lors du changement de ligne de métro à Saint Charles ou Castellane, une baisse des concentrations est visible lors de la mesure du CO₂ sur les quais. Cette baisse est moins marquée que lors des changements de métro en bout de ligne puisque qu'il s'agit de lieux clos avec de grands volumes.

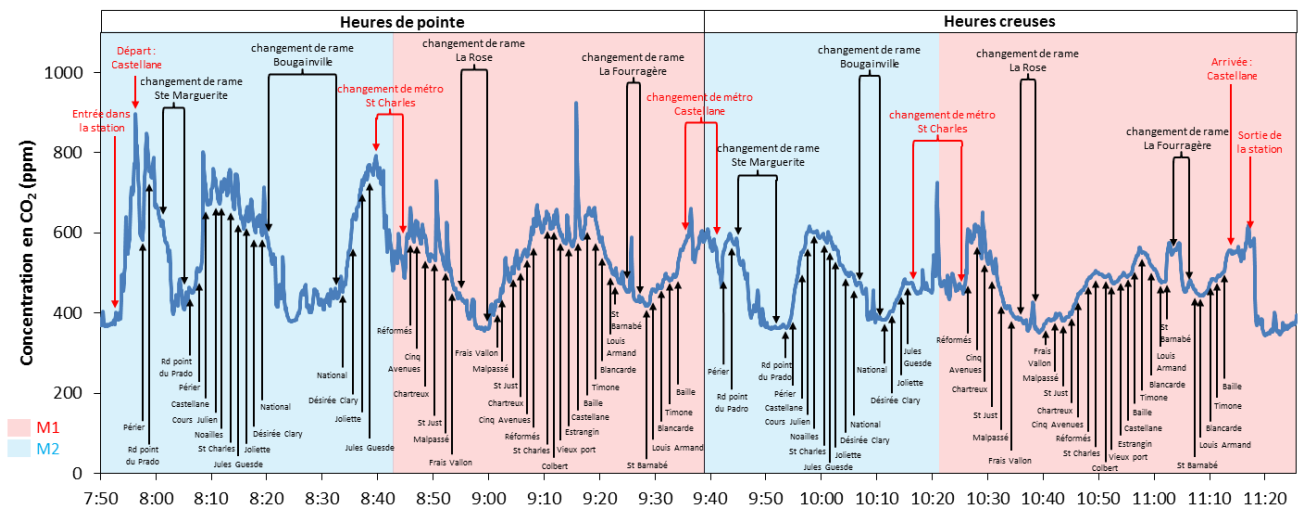


Figure 10 : Concentration en CO₂ mesurée le 8 septembre 2016

3.2.2 Particules

En parallèle des mesures de CO₂ dans les rames, des mesures de PM₁₀ et PM_{2,5} ont été réalisées.

Une comparaison de différents appareils de mesures des particules a été réalisée sur 27h sur le quai de Saint Charles et a montré que les pDR (appareils utilisés pour la mesure dans les rames) sous-estiment de manière non négligeable les concentrations en particules (cf. Annexe 3). Ainsi, les mesures présentées par la suite doivent être considérées de manière qualitative et non quantitative.

Quelle que soit la saison d'échantillonnage, l'évolution des concentrations en particules dans les rames suit le même comportement (Figure 11): lorsque le métro est aérien ou qu'un changement de rame est effectué en extérieur, les concentrations en particules chutent car l'air intérieur de la rame est renouvelé par l'air extérieur. Au contraire, lorsque le métro est souterrain, et en particulier au niveau des croisements des deux lignes de métro (Castellane et Saint Charles), l'air à l'intérieur des rames se charge en particules provenant des voies de circulation du métro.

De plus, la Figure 11 montre l'influence des fumées de cigarette sur les concentrations en particules : lorsqu'une personne fume, les concentrations doublent.

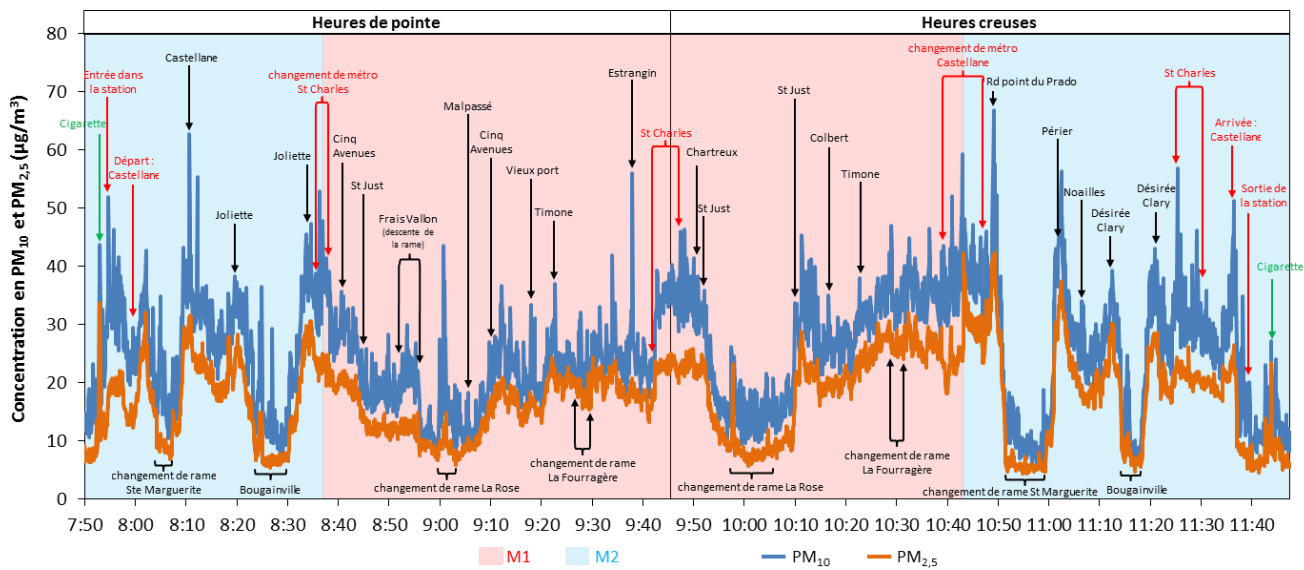


Figure 11 : Concentrations en PM₁₀ et PM_{2,5} mesurées le 7 juillet 2016

4. Conclusion

Au cours du second semestre 2016 (de fin juin à fin décembre), Air PACA a instrumenté trois stations du métro marseillais et a effectué des mesures dans les rames dans le but d'évaluer l'exposition des usagers aux différents polluants surveillés.

Les concentrations en PM_{10} , mesurées à la station Saint Charles, ont toujours respecté les valeurs guides pour 30 min d'exposition ($332 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 1h d'exposition ($188 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ou 1h30 d'exposition ($140 \mu\text{g}/\text{m}^3$). La concentration moyenne sur toute la durée de la campagne, de $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (peu de différence entre été et hiver), plus importante que celle mesurée lors de la campagne de 2010, qui était de $78 \mu\text{g}/\text{m}^3$, peut être due à un allongement des horaires d'ouverture du métro et à une augmentation du nombre d'usagers. En effet, lors de la plage d'ouverture du métro au public (5h-1h en 2016 et 5h-22h30 en 2010) les concentrations moyennes mesurées en 2016 et 2010 sont semblables. En outre, l'évolution journalière des concentrations en particules est très marquée par les heures de fermeture du métro où les teneurs en PM_{10} diminuent à des niveaux de concentrations mesurées en air extérieur. Les concentrations observées en heures creuses et en heures de pointe, plus marquées en période hivernale qu'en été, permettent d'identifier la relation directe entre concentrations en particules sur le quai du métro et fréquentation du métro marseillais.

Dans les PM_{10} , quatre métaux sont réglementés en air ambiant (As, Cd, Ni, Pb), dont leur présence indique un apport d'air en provenance de l'extérieur. Dans le métro marseillais, l'As et le Ni dépassent les valeurs cibles données pour l'air ambiant. En enceinte ferroviaire souterraine les métaux prédominants sont, par ordre décroissant, Fe, Cu, Ca, Al, Mn et Zn. Ces métaux sont majoritairement issus de l'abrasion au roulement des pièces métalliques lors du contact frein-roue ou rail-roue. Les éléments traces métalliques représentent 44 % des PM_{10} dans l'enceinte du métro marseillais, dont le fer est le principal avec une proportion de 28 % de la masse de ces particules.

Le NO_2 et le benzène ont été mesurés à la station Castellane à différents niveaux de profondeur. Cette étude a mis en évidence l'apport important de ces composés venant du trafic routier vers l'enceinte ferroviaire. En effet, plus le site de mesure est éloigné de la surface, plus les concentrations sont faibles. Les concentrations en benzène ont été les plus fortes à Castellane au niveau du palier supérieur ($3,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), du fait de sa liaison avec le parking, et les plus faibles à La Fourragère, sur le quai ($2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ces concentrations respectent le seuil réglementaire de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{an}$.

Des mesures dans les rames, sur toute la longueur des deux lignes de métro ont été effectuées. Elles mettent en évidence des concentrations en dioxyde de carbone (CO_2) allant de 360 à 800 ppm avec quelques pics supérieurs à 1200 ppm. L'augmentation des concentrations en CO_2 dans les rames indique l'importance du confinement dans celles-ci et le taux de remplissage de la rame. De même, les concentrations en particules dans les rames dépendent de la situation du métro : aérien ou souterrain. Lorsque le métro est aérien les concentrations mesurées dans les rames avoisinent les teneurs en air extérieur (environ $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) tandis que lorsque le métro est souterrain, l'air est d'avantage chargé en particules (atteignant $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) provenant des frottements rail-roue, roue-frein, de la remise en suspension de diverses particules et d'apports extérieurs.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Polluants investigués sur chaque site de mesure	4
Tableau 2. Liste des éléments analysés	5
Tableau 3 : Valeurs guides des concentrations de PM ₁₀ à ne pas dépasser dans le métro marseillais en 2016	7
Tableau 4 : Valeurs de référence pour les métaux dans les particules atmosphériques en moyenne annuelle	10
Tableau 5 : Concentrations moyennes des éléments traces métalliques mesurées en 2010 et 2016 dans les PM ₁₀ (*métaux réglementés)	11
Tableau 6. Concentrations mesurées en NO ₂	12
Tableau 7. Concentrations mesurées en benzène	14
Tableau 8 : Concentrations mesurées moyennes sur toute la durée de la campagne en HAM	15
Tableau 9 : Concentrations moyennes des différents polluants mesurés lors d'études de métros français	15
Tableau 10 : Concentrations en PM ₁₀ mesurées à la station Saint Charles en 2010 et 2016 dans la plage d'ouverture du métro (5h - 1h)	21
Tableau 11 : Concentrations en métaux mesurés dans les PM ₁₀ et les PM _{2,5} (l'absence de donnée pour le Na et le Sc est due à une contamination du blanc terrain)	24

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Planification des mesures	7
Figure 2 : Concentrations journalières des PM ₁₀ sur le site de la station Saint Charles pour chaque mois de la campagne et pour toute la durée de la campagne (explication de la représentation en « boxplot » en Annexe 2)	8
Figure 3 : Profils journaliers moyens des concentrations en PM ₁₀ lors des périodes estivale et hivernale et lors des jours de semaine et le week-end (heures basées sur l'heure locale)	9
Figure 4 : Concentration des principaux éléments traces métalliques mesurés	10
Figure 5 : Bilan de masse des PM ₁₀ de juin à décembre 2016	11
Figure 6 : Emplacements des mesures de dioxyde d'azote	12
Figure 7 : Concentrations mesurées en NO ₂	13
Figure 8 : Emplacements des mesures de benzène	13
Figure 9 : Concentrations mesurées en benzène	14
Figure 10 : Concentration en CO ₂ mesurée le 8 septembre 2016	16
Figure 11 : Concentrations en PM ₁₀ et PM _{2,5} mesurées le 7 juillet 2016	17
Figure 12 : Schéma explicatif du diagramme en boîte	22
Figure 13 : Comparaison des concentrations moyennes en PM ₁₀ mesurées par la méthode de référence (BAM) et par pesée	23
Figure 14 : Comparaison des concentrations en PM ₁₀ mesurées par plusieurs méthodes	23

ANNEXES

ANNEXES

ANNEXE 1 : Concentrations en PM ₁₀ dans la plage d'ouverture du métro (5h - 1h)	21
ANNEXE 2 : Représentation statistique des données à l'aide de « boxplot »	22
ANNEXE 3 : Comparaison des différents moyens de mesure des particules	23
ANNEXE 4 : Concentrations en métaux mesurés à la station Saint Charles	24

ANNEXE 1 : Concentrations en PM₁₀ dans la plage d'ouverture du métro (5h - 1h)

Tableau 10 : Concentrations en PM₁₀ mesurées à la station Saint Charles en 2010 et 2016 dans la plage d'ouverture du métro (5h - 1h)

µg/m ³	Moyenne		Maximum journalier		Maximum horaire	
	Été	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver
Saint Charles 2016	97	95	111	145	234	220
Saint Charles 2010	98	91	118	151	160	285
Cinq Avenues 2016	28	31	114	57	413	100
Rabatau 2016	39	40	54	61	115	144
Timone 2016	37	47	118	78	355	240

Le Tableau 10 montre qu'en période d'ouverture du métro la valeur guide pour 30 min est toujours respectée et que la valeur guide pour 1h est respectée à l'exception de quatre périodes de 1h (dont une lors de l'incendie à Vitrolles le 10 août 2016).

ANNEXE 2 : Représentation statistique des données à l'aide de « boxplot »

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

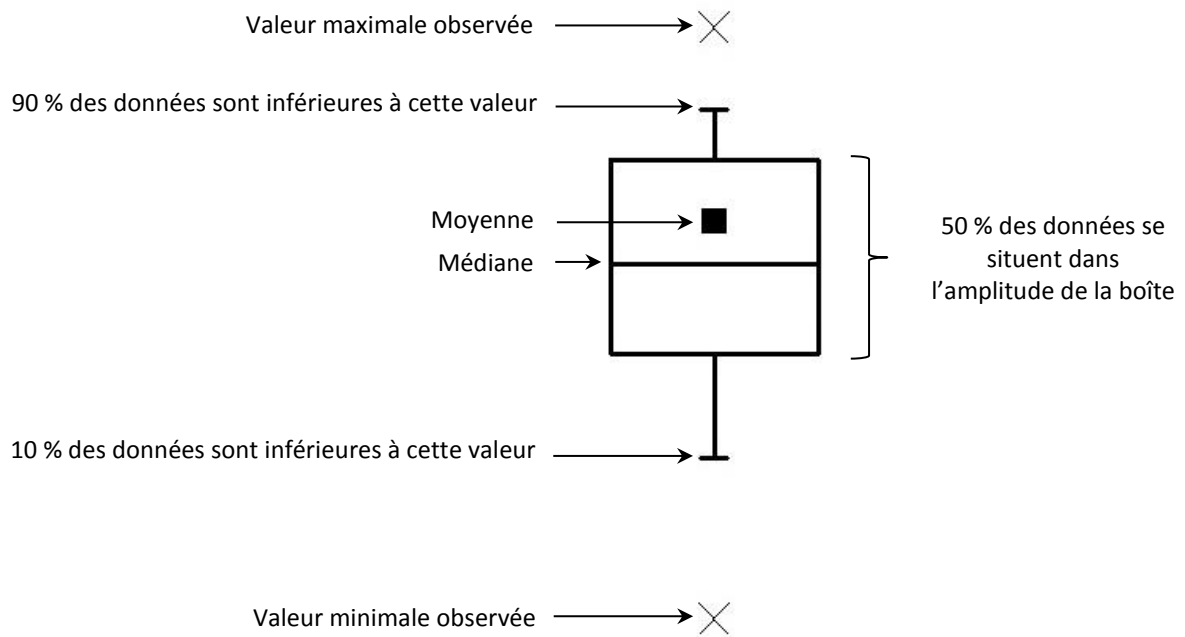


Figure 12 : Schéma explicatif du diagramme en boîte

ANNEXE 3 : Comparaison des différents moyens de mesure des particules

Les filtres prélevés ayant servis pour l'analyse des métaux ont été pesés permettant d'effectuer une comparaison entre deux méthodes différentes de référence de mesure des PM₁₀. Les résultats, présentés dans la Figure 13, montrent une très bonne cohérence entre les deux méthodes.

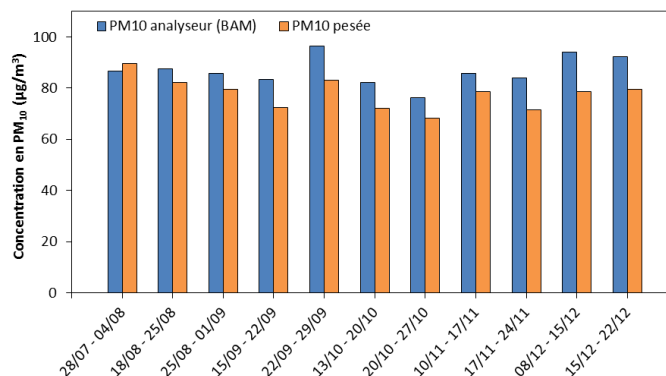


Figure 13 : Comparaison des concentrations moyennes en PM₁₀ mesurées par la méthode de référence (BAM) et par pesée

Les mesures dans les rames sont conduites à l'aide de compteurs optiques type pDR. La conversion de la mesure de la concentration en nombre (en nombre de particules par cm³) à une concentration massique exprimée en µg/m³ est réalisée par l'appareil qui utilise une densité moyenne estimée pour les particules usuellement observées en air ambiant ou en air intérieur « classique ».

Pendant 27 heures, le pDR a été placé en parallèle du matériel de référence (BAM) ainsi que d'un autre compteur optique de marque GRIMM. Le résultat de cette comparaison est présenté sur la Figure 14. Cette figure montre que les compteurs optiques sous-estiment fortement les concentrations, excepté la nuit (entre 1h et 3h).

Cette sous-estimation n'est pas liée aux niveaux de concentration qui seraient hors-gamme, le pDR étant opérationnel sur une très large gamme de concentration, allant de 1 µg/m³ à 400 mg/m³. Elle est due à la calibration de l'appareil, qui est conduite avec de la poudre minérale normalisée (SAE fine) dont la densité est inférieure à celle des particules rencontrées durant la présente étude, qui sont majoritairement constituées de fer.

Les concentrations mesurées dans les rames avec le compteur optique doivent alors n'être considérées que de manière relative.

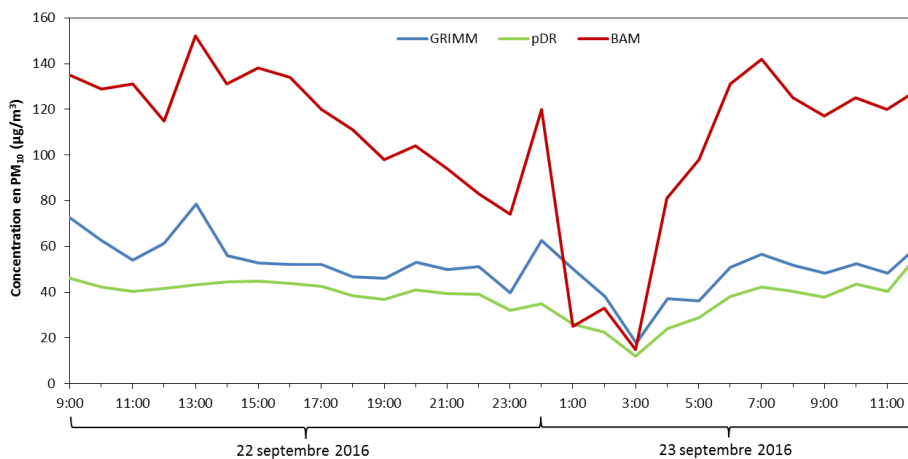


Figure 14 : Comparaison des concentrations en PM₁₀ mesurées par plusieurs méthodes

ANNEXE 4 : Concentrations en métaux mesurés à la station Saint Charles

Tableau 11 : Concentrations en métaux mesurés dans les PM₁₀ et les PM_{2,5} (l'absence de donnée pour le Na et le Sc est due à une contamination du blanc terrain)

ng/m ³	PM ₁₀					PM _{2,5}				
	Campagne	Été		Hiver		Campagne	Été		Hiver	
	Moyenne	Moyenne	Max	Moyenne	Max	Moyenne	Moyenne	Max	Moyenne	Max
Al	851,7	853,9	901,8	825,4	895,7	320,6	352,7	429,4	290,6	344,1
As	16,7	19,2	44,2	13,6	15,3	31,6	6,5	10,3	14,6	33,7
Ba	10,1	8,8	9,8	11,8	16,6	4,0	3,4	3,9	4,4	5,2
Ca	1196,0	1452,0	2564,6	975,4	1392,6	258,5	260,5	297,0	289,8	380,1
Cd	1,7	2,9	7,7	0,3	0,4	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
Ce	2,1	3,2	7,7	0,9	1,0	0,8	0,7	0,8	0,9	1,0
Co	5,2	6,0	7,7	4,1	4,5	1,7	1,8	2,1	1,7	2,5
Cr	27,5	27,1	31,9	26,6	28,8	17,4	18,8	23,3	14,3	19,4
Cs	1,3	2,6	7,7	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Cu	3474,9	3245,7	3666,5	3742,5	4153,4	1152,2	1252,5	1521,5	1086,1	1154,1
Fe	27752,8	29333,6	37914,1	25502,5	27362,0	10208,6	10948,5	14073,6	9756,7	13068,1
K	194,4	157,8	203,0	252,0	282,2	144,8	132,3	245,4	172,6	190,3
La	1,7	2,9	7,7	0,6	0,6	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5
Li	1,5	2,7	7,7	0,3	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
Mg	124,0	116,1	141,1	127,7	147,2	48,2	54,1	79,8	47,2	56,4
Mn	288,1	292,5	331,3	289,2	331,3	103,5	115,5	141,1	95,5	114,7
Mo	3,5	4,6	7,7	2,6	3,3	1,5	1,7	2,6	1,0	1,1
Na	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	91,6	87,2	98,2	95,9	110,4	31,2	33,9	43,6	29,0	33,7
Pb	7,5	8,0	16,6	7,6	10,6	4,9	3,5	4,8	5,4	6,7
Pd	1,3	2,6	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pt	1,3	2,6	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Rb	1,7	2,8	7,7	0,6	0,8	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5
Sb	4,1	4,5	7,7	3,7	4,4	1,8	1,5	1,8	2,4	2,7
Sc	0,1	-	-	0,1	0,1	0,1	-	-	0,1	0,1
Se	1,7	2,8	7,7	0,4	0,5	0,4	0,4	0,5	0,3	0,3
Sn	5,7	5,8	7,7	5,8	6,7	2,6	2,6	3,2	2,5	2,7
Sr	5,2	6,1	10,5	4,2	4,9	1,3	1,5	2,0	1,3	1,5
Ti	12,8	14,2	24,6	11,2	12,9	3,9	4,3	5,2	3,7	4,2
Tl	1,3	2,6	7,7	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
V	4,6	6,4	7,7	2,7	3,4	3,9	5,1	6,7	1,8	2,6
Zn	115,6	150,7	485,9	85,5	110,4	237,1	56,8	142,0	53,5	79,8
Zr	2,1	3,1	7,7	1,1	1,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5



Surveillance de la qualité de l'air dans le métro marseillais

En 2016, Air PACA a mené une campagne de surveillance du métro marseillais faisant suite à la campagne effectuée en 2010. Des mesures ont été effectuées aux stations Saint-Charles, Castellane et La Fourragère. Des mesures de dioxyde de carbone et de particules ont également été effectuées dans les rames sur les deux lignes de métro lors d'heures de pointe et d'heures creuses.

Les concentrations en particules, respectant les valeurs guides, ont été plus élevées qu'au cours de la campagne de 2010 du fait de plages horaires d'ouverture du métro plus grandes. Si certains métaux constituant les PM₁₀ ont augmenté, d'autres tels que le chrome, le plomb ou le zinc ont diminué par rapport à 2010.

L'apport d'air extérieur dans l'enceinte du métro a non seulement été visible à travers la présence de certains métaux uniquement émis par des sources extérieures mais également par les évolutions des concentrations en benzène et en dioxyde d'azote entre le palier supérieur du métro et le quai. De plus, à Castellane, l'impact de la liaison entre le parking souterrain et la station de métro est très clairement visible dans les mesures de dioxyde d'azote et de benzène.

Ainsi, la qualité de l'air dans les stations de métro est fonction :

- de la fréquence de circulation des rames de métro
- du trafic routier à proximité de la station de métro
- des aérations au sein de la station

Enfin, les mesures dans les rames ont mis en évidence l'influence du confinement, du taux de remplissage et de la situation du métro (aérien ou souterrain) sur les concentrations en dioxyde de carbone et en particules.

En partenariat avec :



AirPACA
QUALITÉ DE L'AIR
www.airpaca.org

Siège social

146, rue Paradis
« Le Noilly Paradis »
13294 Marseille Cedex 06
Tél. 04 91 32 38 00
Télécopie 04 91 32 38 29

Établissement de Martigues

Route de la Vierge
13500 Martigues
Tél. 04 42 13 01 20
Télécopie 04 42 13 01 29

Établissement de Nice

333, Promenade des Anglais
06200 Nice
Tél. 04 93 18 88 00
Télécopie 04 93 18 83 06



Responsable de publication : Florie Chevrier - Publication : septembre 2017

Photos : Archives Air PACA