

SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR DANS LE METRO DE MARSEILLE

Rapport d'étude sur la base des campagnes de surveillance

Hiver 2010

Été 2010

www.atmopaca.org



Source : Atmo PACA – Ateliers techniques de la Rose et appareils de mesure dans les stations du métro

Avec la participation d'Yves Noack et son équipe du CEREGE/CNRS www.cerege.fr



SIÈGE SOCIAL

Le Noilly Paradis
146 rue Paradis – 13294 Marseille cedex 06
Tél. : 04 91 32 38 00

ÉTABLISSEMENT DE NICE

333, Promenade des Anglais
06202 Nice Cedex 3
Tél. : 04 93 18 88 00

08/2011
Ref. projet : 06BDR09I

SOMMAIRE

1	CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	4
2	PROTOCOLE TECHNIQUE.....	5
2.1	SITES ECHANTILLONNES.....	5
2.2	PERIODE DE MESURE.....	5
2.3	MOYENS DE MESURE ET EQUIPEMENT DES ESPACES ECHANTILLONNES.....	5
2.3.1	STATION SAINT CHARLES.....	6
2.3.2	STATION CASTELLANE.....	7
2.4	CONTROLE QUALITE DES MESURES.....	8
3	RESULTATS DES CONCENTRATIONS DANS LES STATIONS.....	9
3.1	MESURE DES PARTICULES (PM10).....	9
3.1.1	SOURCES.....	9
3.1.2	EFFETS SANITAIRES.....	9
3.1.3	REGLEMENTATION.....	10
3.1.4	TENEURS OBSERVEES.....	11
3.2	HAP – HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES.....	19
3.2.1	ORIGINE, DYNAMIQUE ET EFFETS SANITAIRES.....	19
3.2.2	REGLEMENTATION.....	19
3.2.3	RESULTATS.....	19
3.3	SILICE ET FIBRES.....	21
3.4	METAUX LOURDS ET PARTICULES SUR FILTRES.....	21
3.4.1	ORIGINE ET DYNAMIQUE.....	21
3.4.2	EFFETS SANITAIRES.....	22
3.4.3	REGLEMENTATION.....	22
3.4.4	RESULTATS.....	22
3.5	DIOXYDE D'AZOTE.....	30
3.5.1	ORIGINE ET DYNAMIQUE.....	30
3.5.2	EFFETS SANITAIRES.....	30
3.5.3	REGLEMENTATION.....	30
3.5.4	RESULTATS.....	30
3.6	MESURES DE BENZENE, TOLUENE ET XYLENES DANS LE METRO.....	33
3.6.1	ORIGINE, DYNAMIQUE ET EFFETS SANITAIRES.....	33
3.6.2	REGLEMENTATION.....	34
3.6.3	RESULTATS.....	34
3.7	MONOXYDE DE CARBONE (CO).....	36
3.7.1	ORIGINE ET DYNAMIQUE.....	36
3.7.2	EFFETS SANITAIRES.....	36
3.7.3	REGLEMENTATION.....	36
3.7.4	RESULTATS.....	36
4	RESULTATS DES CONCENTRATIONS DANS LES RAMES.....	38
4.1	DIOXYDE DE CARBONE (CO ₂).....	38
4.1.1	ORIGINE.....	38
4.1.2	EFFETS SANITAIRES.....	38
4.1.3	RECOMMANDATION.....	38
4.1.4	RESULTATS.....	38
4.2	MESURES DES PARTICULES (PM10).....	40
4.2.1	INTRODUCTION.....	40
4.2.2	RESULTATS.....	40
4.3	DIOXYDE D'AZOTE (NO ₂).....	42
4.4	MESURE DU BENZENE (C ₆ H ₆).....	43

5	CONCLUSION.....	44
6	PERSPECTIVES.....	47
6.1	PROPOSITION DE SUIVI DE LA QUALITE DE L'AIR DANS LE METRO	47
6.2	PISTES D'AMELIORATION DE LA QUALITE DE L'AIR POUR LE METRO DE MARSEILLE	47
7	REFERENCES	48
8	TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX.....	49
9	ANNEXES	51
9.1	ANNEXE I : DESCRIPTIF DES APPAREILS DE MESURES : METHODES DE MESURES ET UTILISATION.....	51
9.2	ANNEXE II : EQUIPEMENTS DES ESPACES ECHANTILLONNES.....	52
9.3	ANNEXE III : CIRCULAIRE N° 2003-314 DU 30 JUIN 2003.....	53
9.4	ANNEXE IV : DEFINITION DES TERMES REGLEMENTAIRES	59
9.5	ANNEXE V : DIAGRAMME EN BOITE.....	60
9.6	ANNEXE VI : RESULTATS EN BTEX DANS LE METRO ET EN AIR EXTERIEUR PAR SAISON	61
9.7	ANNEXE VII: RATIOS AIR EXTERIEUR VERSUS AIR INTERIEUR.....	62
9.8	ANNEXE VIII : CALCUL DE L'EFFICACITE DE VENTILATION.....	63

REMERCIEMENTS

Atmo PACA remercie vivement la RTM pour son accueil et sa disponibilité. Cette première collaboration a rendu possible le déroulement de cette étude.

Atmo PACA remercie également Yves Noack et toute l'équipe du CEREGE pour leur participation dans l'étude des particules récoltées et notamment l'analyse des métaux.

INTERVENANTS

Intervenants techniques :

Grégory Gille (responsable Pôle Mesure), Daniel Lozano, Jérémie Soubise, Francis Levaudel, Christel Tordjman
Claire Blouvac

Intervenants études :

Coordination du projet :	Patricia Lozano
Rédaction du rapport :	Aurélie Stoerkel, Patricia Lozano
Relecture :	Carole Génévé, Alexandre Armengaud
Approbation :	Dominique Robin

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

La surveillance de la qualité de l'air dans différents environnements intérieurs s'inscrit dans les actions d'Atmo PACA.

De façon prioritaire, sont ciblés les espaces clos ouverts au public qui doivent faire l'objet d'évaluations périodiques au travers de campagnes de mesure et ce en accord avec les exploitants de ces lieux (enceintes ferroviaires, aéroports, gares, tunnels, écoles, crèches, piscines, gymnases, parkings, centres commerciaux, etc.).

Depuis quelques années des évaluations, au départ expérimentales, ont été conduites dans les métros. Initiée à Londres, la démarche a été suivie en France. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette première étude d'Atmo PACA sur la qualité de l'air dans le métro de Marseille, réalisée à la demande de la Régie des Transports de Marseille.

Le protocole retenu prend en compte les orientations nationales notamment :

- la circulaire DGS/SD 7B n° 2003-314 du 30 juin 2003 (Annexe III : Circulaire n° 2003-314 du 30 juin 2003) du ministère de la santé. Celle-ci préconise la surveillance des enceintes ferroviaires, afin d'évaluer l'exposition des usagers.
- Le MEDDTL précise l'importance de communiquer les résultats sur la qualité de l'air intérieur des lieux clos mis à la disposition du public.

Ce **rapport** est réalisé à l'issue des deux campagnes de mesure effectuées en 2010 dans le métro de Marseille. Il présente le dispositif mis en place, **les résultats des mesures** et propose **une analyse par polluant, parmi ceux listés dans la circulaire de juin 2003**.

Les campagnes se sont déroulées sur deux saisons (été et hiver 2010). Les polluants mesurés sont ceux cités par la circulaire à savoir : les particules en suspension PM10, les métaux lourds, les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), le dioxyde d'azote, le benzène auxquels s'ajoute la quantification en silice. Ces polluants gazeux ou particulaires peuvent être émis dans l'enceinte du métro et reflètent les activités du lieu. Le dioxyde d'azote se distingue des autres polluants par son origine principalement extérieure ; son évaluation dans le métro permettra d'estimer les transferts entre intérieur et extérieur.

Les stations retenues, Saint Charles et Castellane métro 1 et 2, sont des stations de jonction. Elles accueillent le plus grand nombre d'usagers avec respectivement 3.9 et 3.7 millions/an d'usagers. Elles ont été équipées pour les mesures en continu en 2010 : Saint Charles (7 mois : janvier à août), Castellane métro 1 (12 jours en janvier et 8 jours en juin) et Castellane métro 2 (20 jours en janvier-février et 32 jours en juin-juillet).

Les résultats sont comparés aux normes de référence pour les espaces souterrains et l'air extérieur. L'exposition finale de l'utilisateur tient compte du temps de résidence moyen dans le métro.

Afin de distinguer les causes possibles de la pollution dans le métro, l'analyse tient compte de la période de la journée et du type d'activité dans le métro.

Une étude spécifique de caractérisation des particules est réalisée en collaboration avec le CEREGE (équipe de Monsieur Yves Noack, directeur de recherche au CNRS).

Des mesures itinérantes de particules sont aussi réalisées dans deux rames en fonctionnement à l'aide d'analyseurs portables.

2 PROTOCOLE TECHNIQUE

2.1 SITES ECHANTILLONNES

La RTM et Atmo PACA ont validé ensemble, au cours de réunions préalables à la campagne, le protocole technique, et déterminé les emplacements des appareils de mesures en regard des choix d'échantillonnage et des contraintes électriques, de sécurité et d'accès.

Trois **stations de métro** ont été équipées avec de la mesure en continu de gaz et particules à un pas de temps horaire dans les stations les plus fréquentées : Saint Charles, Castellane 1 et Castellane 2 (Annexe I : Descriptif des appareils de mesures : méthodes de mesures et utilisation, Annexe II : Equipements des espaces échantillonnés).

Deux **rames** ont été échantillonnées avec des moyens plus légers : une rame circulant sur la ligne 1 et une rame circulant sur la ligne 2.

D'**autres espaces souterrains**, niveaux intermédiaires des stations et bouts de quais, ont été équipés de capteurs hebdomadaires en dioxyde d'azote et benzène.

Des prélèvements ont été effectués aussi en **surface, à l'aplomb des stations** Saint Charles et Castellane. La station permanente de Marseille Thiers gérée par Atmo PACA a été parallèlement équipée de mesures passives de NO₂. Les teneurs extérieures en particules et dioxyde d'azote sont données par les stations du réseau fixe d'Atmo PACA : Cinq Avenues, Saint Louis, Thiers, et Timone.

2.2 PERIODE DE MESURE

Deux périodes privilégiées ont été retenues : **hivernale (février 2010) et estivale (juin 2010)**, afin de prendre en compte les variations saisonnières des paramètres de l'« atmosphère intérieure » (température, hygrométrie,...) et de fréquentation des usagers.

2.3 MOYENS DE MESURE ET EQUIPEMENT DES ESPACES ECHANTILLONNES

Tableau 1 : Equipement des stations et durée de prélèvement

Emplacement de la mesure	Matériel
Station Saint Charles	Analyseur automatique PM10 (7 mois)
	Analyseur automatique PM2,5 (7 mois)
	Préleveur bas débit PM10 (15 jours par période)
	Préleveur haut débit PM10 (7 jours par période)
	Analyseur automatique CO (7 mois)
	Analyseur automatique NO ₂ (7 mois)
Station Castellane métro 1	Analyseur automatique PM10 (15 jours par période)
	Préleveur bas débit PM10 (15 jours par période)
Station Castellane métro 2	Analyseur automatique PM10 (15 jours par période)
	Préleveur bas débit (15 jours par période)
Rame métro 1	Préleveur portatif PM10 (3 A/R par période)
	Préleveur portatif CO/CO ₂ (3 A/R par période)
Rame métro 2	Préleveur portatif PM10 (3 A/R par période)
	Préleveur portatif CO/CO ₂ (3 A/R par période)

2.3.1 STATION SAINT CHARLES

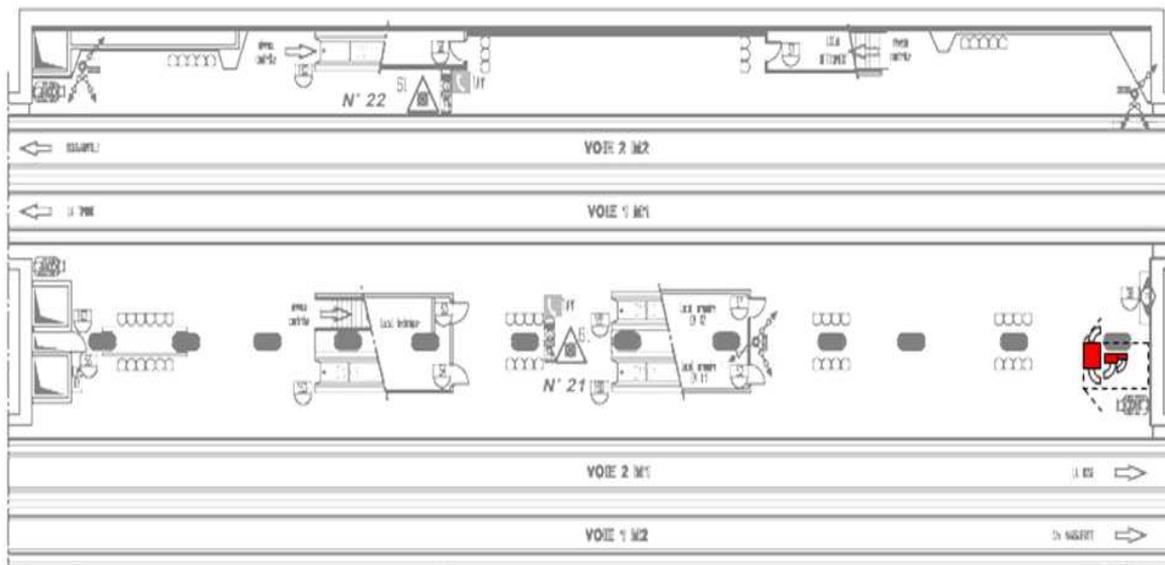


Figure 1: Plan de la station de métro Saint Charles avec la station de mesure (en rouge)

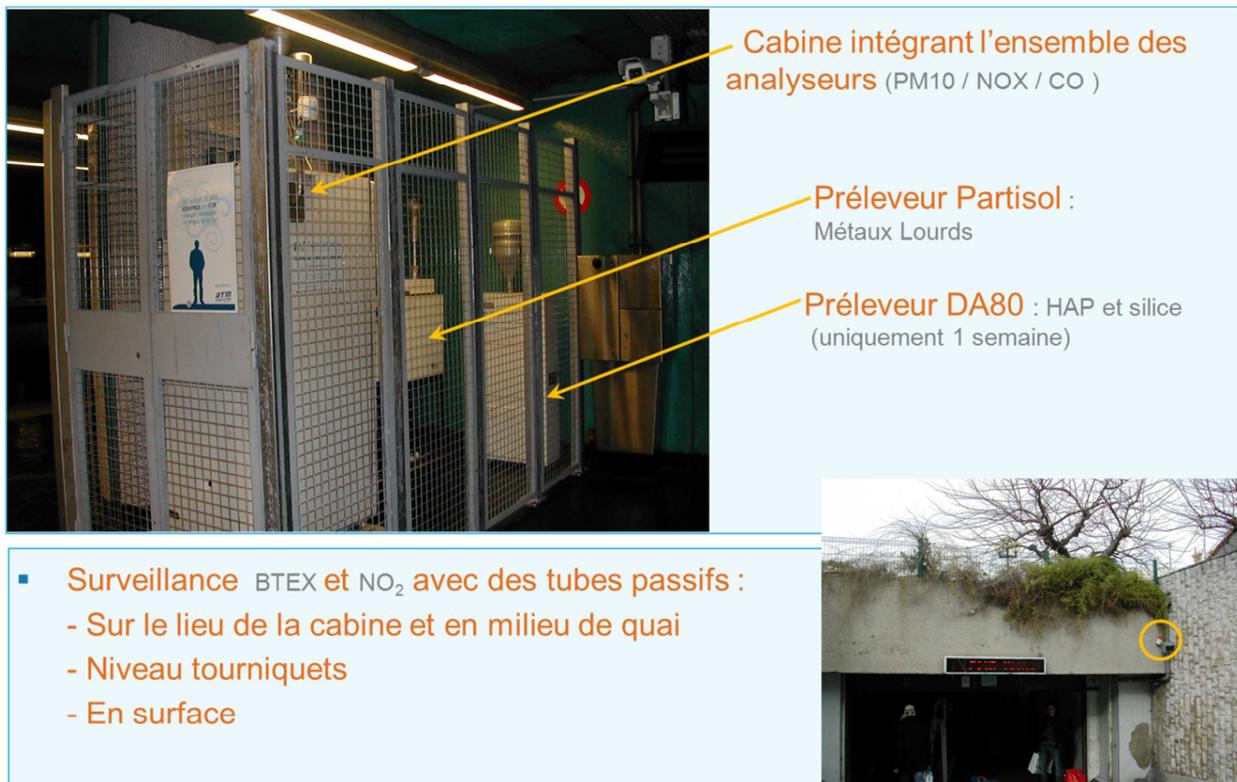


Figure 2 : Equipement de la station Saint Charles

2.3.2 STATION CASTELLANE

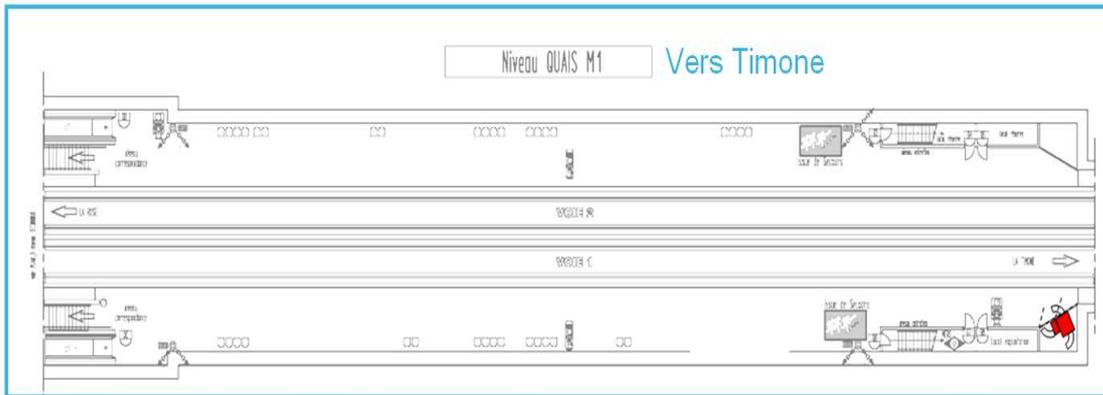


Figure 3 : Plan de la station de métro Castellane ligne 1 avec la station de mesure (en rouge)

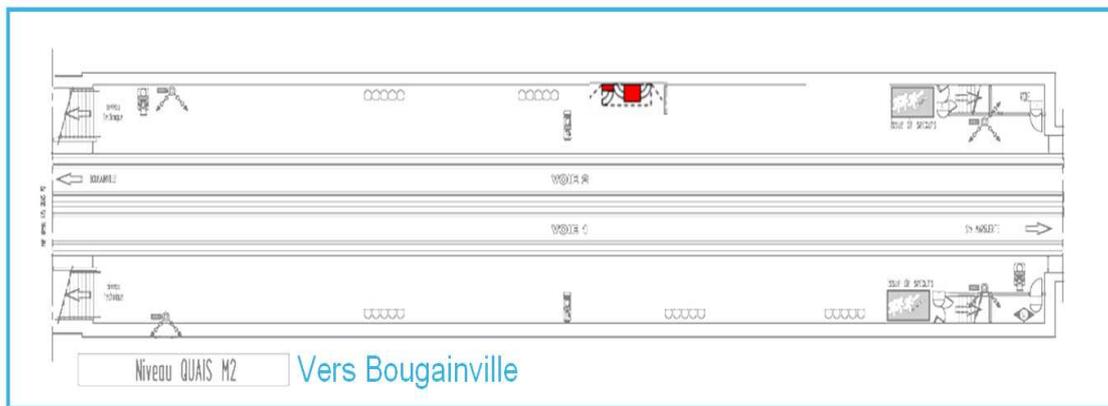
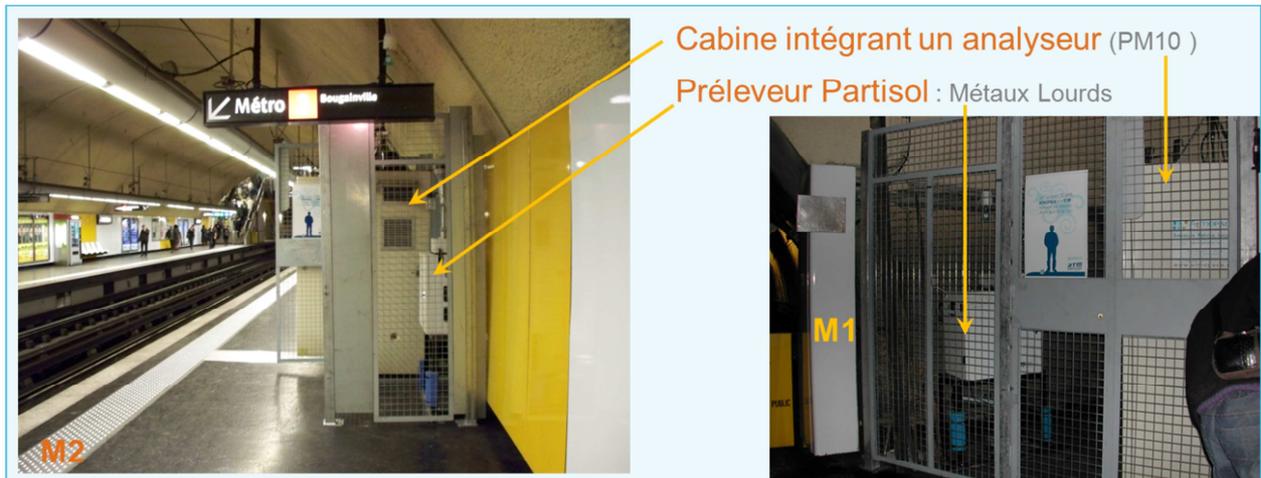


Figure 4 : Plan de la station de métro Castellane ligne 2 avec la station de mesure (en rouge)



- Surveillance BTEX et NO₂ avec des tubes passifs :
 - Sur le lieu de la cabine et en milieu de quai
 - Niveau supérieur de passage d'accès aux 2 métros
 - Niveau supérieur tourniquets
 - En surface, Place Castellane



Figure 5 : Equipement de la station de métro de Castellane rames 1 et 2

2.4 CONTROLE QUALITE DES MESURES

Le fonctionnement des analyseurs est vérifié lors des phases d'installation et de dépose par le personnel d'Atmo PACA. Les analyseurs sont ensuite contrôlés toutes les quatre semaines par la société de maintenance CETE APAVE SUD EUROPE suivant les procédures de maintenance validées par les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air de la région PACA.

Au cours de cette maintenance préventive (toutes les quatre semaines) la société de maintenance vérifie les caractéristiques principales des analyseurs et procède au remplacement des consommables. Elle réalise également le raccordement des analyseurs de gaz à la chaîne nationale d'étalonnage par l'intermédiaire d'étalon de transferts fournis par le laboratoire de référence de niveau 2 à Martigues (Réseau de mesure agréé Airfobep).

En cas de dysfonctionnement des analyseurs pendant l'intervalle de quatre semaines, une intervention curative a lieu dans un délai d'une semaine, jours ouvrés.

L'analyse des tubes passifs, des filtres HAP, de métaux lourds et de silice est confiée à des laboratoires externes (Radiello, Passam, Micro Polluants, Laboratoire Interrégional de Chimie, CEREGE/CNRS).

Les données de mesure collectées par la centrale d'acquisition sont validées quotidiennement pour s'assurer du bon fonctionnement de la chaîne mesure.

Avant d'être insérés dans le rapport de cette étude, les résultats des mesures sont vérifiés suivant les procédures de validation des données d'Atmo PACA (technique et étude).

3 RESULTATS DES CONCENTRATIONS DANS LES STATIONS

3.1 MESURE DES PARTICULES (PM10)

3.1.1 SOURCES

Les particules sont des polluants atmosphériques présents dans un mélange complexe de substances organiques et minérales en suspension dans l'air, sous forme solide et/ou liquide. Ces particules sont de taille, de composition et d'origine diverses. Leurs propriétés se définissent en fonction de leur diamètre aérodynamique appelé taille particulaire. Les particules mesurées dans la présente étude sont les PM10. Ce sont des particules dont le diamètre est inférieur à 10 µm (fraction thoracique des particules).

La taille des particules détermine leur temps de suspension dans l'atmosphère. Les PM10 finissent par disparaître de l'air ambiant dans les quelques heures qui suivent leur émission sous l'effet de la sédimentation et des précipitations.

Les particules peuvent être primaires ou secondaires en fonction de leur mécanisme de formation.

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 solides (charbon, lignite et biomasse), les activités industrielles (construction, secteur minier, cimenteries, fabrication de céramique et de briques, fonderie), 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.

Les particules secondaires sont formées dans l'atmosphère, généralement sous l'effet de réaction chimique avec des polluants gazeux. Elles sont le résultat de la transformation atmosphérique des oxydes d'azote principalement émis par la circulation automobile et certains procédés industriels, et de l'anhydride sulfureux provenant de combustibles contenant du soufre. Les particules secondaires sont surtout présentes dans les matières fines.

Dans l'environnement des métros, les sources de particules suspectées 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.

3.1.2 EFFETS SANITAIRES

Leurs effets sur la santé sont une altération de la fonction respiratoire chez l'enfant en particulier, une irritation des voies respiratoires inférieures, des effets mutagènes et cancérigènes (dus notamment aux hydrocarbures aromatiques polycycliques, HAP, adsorbés à la surface des particules), une atteinte des systèmes sanguins et cardiaques et une mortalité prématurée. Selon leurs tailles, ces particules fines ont une pénétration différente dans le système respiratoire ; plus elles sont fines, plus elles sont susceptibles de pénétrer profondément dans le système respiratoire, jusqu'au niveau des alvéoles pulmonaires. Les particules plus fines (inférieures à 1 µm) peuvent passer la membrane alvéolaire et se retrouver dans le sang.

Les études les plus récentes, effectuées dans le cadre du programme CAFE (Clean Air for Europe) permettent de chiffrer les impacts des PM2,5 sur les populations des pays de l'Union européenne : en Europe (UE-25), les études estiment à 350 000 le nombre de décès prématurés (dont 680 enfants) attribuables à la pollution par les poussières fines. Toujours d'après cette étude, les PM2,5 présentes dans l'atmosphère raccourcissent actuellement l'espérance de vie dans l'UE de plus de 8 mois.

3.1.3 REGLEMENTATION

MODALITE DE CALCUL DE LA VALEUR DE REFERENCE EN ENCEINTE FERROVIAIRE POUR LES PM10

Il est à noter que les valeurs de référence sont différentes en milieu extérieur et en milieu clos.

Dans le métro de Marseille, la valeur de référence pour les particules est calculée conformément à la circulaire du 30 juin 2003 (Annexe III : Circulaire n° 2003-314 du 30 juin 2003). Les valeurs de référence ont été calculées pour deux années, 2009 et 2010.

Méthode de calcul :

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

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

Avec :

- C_{sout} : la concentration dans l'enceinte ferroviaire du métro,
- T_{sout} : le temps d'exposition dans l'enceinte du métro,
- P90_{ext} : le percentile 90¹ des valeurs journalières d'une année enregistrées en air extérieur,
- CLim : la concentration limite journalière en air extérieur (50 µg/m³).

Tableau 2 : PM10 – Valeurs de référence à Marseille (2009) et à Paris en fonction du temps de résidence dans le métro

Temps d'exposition dans le métro	PM10 - Concentration souterraine à ne pas dépasser (en µg/m ³)	
	Marseille P90 ext (Cinq Avenues et Thiers, stations urbaines) en 2009 : moyenne des P90 44 µg/m³	Paris P90ext en 2005 : 23 µg/m³
30 min (0,5 h)	332	1319
15 min (0,25 h)	620	2615

La valeur de référence en PM10 dans le métro dépend des teneurs en PM10 en air extérieur. Plus le percentile 90 est élevé en air extérieur, plus la valeur de référence à ne pas dépasser dans le métro est faible. Ainsi, **la valeur de référence 2009** de la qualité de l'air pour le métro de Marseille pour **un temps de résidence de 30 min est de 332 µg/m³**. **Pour un temps de résidence au quart d'heure, la même valeur passe à 620 µg/m³**.

Les **valeurs de référence pour l'année 2010** calculées à partir de la station urbaine Cinq Avenues de Marseille (Station Thiers définitivement arrêtée le 15/12/2009) **sont de 567 µg/m³ pour un temps de résidence de 30 mn et de 1095 µg/m³ pour un temps de résidence de 15mn** (Tableau 3).

Tableau 3 : PM10 – Valeurs de référence à Marseille en 2010 en fonction du temps de résidence dans le métro.

Temps d'exposition dans le métro	PM10 - Concentration souterraine à ne pas dépasser (en µg/m ³)
	Marseille P90 ext (Cinq Avenues station urbaine) en 2010 : P90 39 µg/m³
30 min (0,5 h)	567
15 min (0,25 h)	1095

¹ Le percentile 90 : valeur pour laquelle 90% des concentrations mesurées lui sont inférieures.

La valeur à ne pas dépasser dans le métro parisien est beaucoup plus élevée que celle dans le métro marseillais. A Marseille, la concentration en PM10 en air extérieur, plus élevée qu'à Paris est un facteur fortement pénalisant.

NORMES EN AIR EXTERIEUR - INDICATIF

Tableau 4 : PM10 - Valeurs du décret du 23 octobre 2010

Polluant	PM10
Objectif de qualité ²	Moyenne annuelle : 30 µg/m ³ (France uniquement)
Valeur limite	Moyenne annuelle : 40 µg/m ³ Moyenne journalière : 50 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 35 jours/an
Seuil d'information	50 µg/m ³ en moyenne sur 24h (France uniquement)
Seuil d'alerte	80 µg/m ³ en moyenne sur 24h (France uniquement)

3.1.4 TENEURS OBSERVEES

NIVEAUX MOYENS

Tableau 5 : Teneurs en PM10 - Stations de métro et stations permanentes en air ambiant

Marseille	PM10 µg/m ³	Moy	Max journalier	Max horaire	Max horaire entre 5h et 21h
Métro station Saint Charles	Du 14 janvier au 9 août 2010 (7 mois)	78	119 04/02/10	371* 18/04 24h	285
Métro station Castellane Ligne 1	Du 14 au 26 janvier 2010 (12 jours) et du 01 au 8 juin (8 jours)	74	93 22/0/10	150 22/01 10h	150
Métro station Castellane Ligne 2	Du 27 janvier au 15 février 2010 (20 jours) et du 9 juin au 13 juillet (32 jours)	90	117 12/02/10	190 28/02 10h	190
Site en air extérieur Timone (Trafic)	Du 14 janvier au 9 août 2010 (7 mois)	33	70 12/02	304 02/03 7h	304
Site en air extérieur Cinq Avenues (Urbain)	Du 14 janvier au 9 août 2010 (7 mois)	21	47 21/03	98 03/07 11h	98

* La valeur maximale de 371 µg/m³ à St Charles est une mesure unique 'atypique' observée à minuit. Elle correspond à un passage d'un train diesel pour la maintenance.

Les concentrations **moyennes hivernales** dans le métro marseillais au niveau des stations Castellane sont respectivement de 75 sur la ligne 1 et de 90 µg/m³ sur la ligne 2. Elles sont de 79 µg/m³ pour la station de Saint Charles.

Les concentrations **moyennes estivales** dans le métro marseillais au niveau des stations Castellane sont respectivement de 73 sur la ligne 1 et de 89 µg/m³ sur la ligne 2. Elles sont de 81 µg/m³ pour la station de Saint Charles.

Les concentrations **moyennes sur les deux périodes hivernale et estivale**, au niveau des stations Castellane sont respectivement de 74 sur la ligne 1 et de 90 µg/m³ sur la ligne 2. Elles sont de 78 µg/m³ pour la station de St Charles.

² Les termes réglementaires sont définis en Annexe IV : Définition des termes réglementaires

La station Castellane 2 relève les concentrations moyennes les plus élevées ; Saint Charles et Castellane 1 obtiennent des moyennes équivalentes. Les prélèvements à Castellane 2 ont été faits au milieu du quai. Cette station est plus sensible aux soulèvements des poussières par les rames et le passage des usagers qui sont aussi plus nombreux en milieu de quai. Ce phénomène est atténué dans le cas des stations de St Charles et Castellane 1, puisqu'elles sont situées en bout de quai.

Pour les trois stations, les concentrations en PM10 sont comparables à celles mesurées dans d'autres enceintes souterraines ou métros de France qui varient de 35 µg/m³ (Rennes : AIR Breizh, 2005) à 278 µg/m³ (Strasbourg : ASPA, 2008). Il est à noter que dans les autres enceintes, les périodes de mesures souterraines sont souvent brèves contrairement à ce qui a été réalisé à Marseille. Les valeurs présentées sont indicatives (Tableau 6).

→ Les valeurs de référence 2009 (332 µg/m³) et 2010 (567 µg/m³) pour un temps de résidence des usagers de 30 min dans l'enceinte du métro de Marseille sont respectées sur les trois stations de métro.

Tableau 6 : PM10 – Niveaux observés dans des enceintes souterraines en France et à Londres.

	Période de mesure	Moy. µg/m ³	Max. j µg/m ³	Max. h µg/m ³
Marseille – Station Saint Charles – Atmo PACA	Du 14/01 au 9/08/2010	78	119	371*
Marseille – Station Castellane ligne 2 – Atmo PACA	Du 27/01 au 15/02/2010 Du 09/06 au 13/07/2010	90	117	190
Paris – Station Faidherbe Chaligny - Airparif	Du 01/12 au 15/12/2008	61	/	249
Paris – Station Chatelet Ligne 4 - réseau SQUALES RATP	Du 01/12 au 15/12/2008	107	/	697
Paris – Station Auber RER A - réseau SQUALES RATP	Du 01/12 au 15/12/2008	154	/	621
Lille – Station République – Atmo Nord Pas De Calais	Moyenne été hiver (18/06 au 16/07/07 et 14/01 au 11/02/08)	136	187	289
Lille – Station Euro-téléport – Atmo Nord Pas De Calais	Moyenne été hiver (18/06 au 16/07/07 et 14/01 au 11/02/08)	45	77	151
Toulouse – Station Esquirol - ORAMIP	Du 23/01 au 10/02/2006 (hiver)	165	221	474
Toulouse – Station Esquirol - ORAMIP	Du 31/08 au 23/09/2005 (été)	152	278	354
Toulouse – Station Jean Jaurès - ORAMIP	Du 23/01 au 10/02/2006 (hiver)	105	165	562
Toulouse – Station Jean Jaurès - ORAMIP	Du 31/08 au 23/09/2005 (été)	82	132	273
Rennes – Station Triangle (semi-profonde) - Air Breizh	Du 21/07 au 19/08/2004 (été)	56	/	153
Rennes – Station Triangle (semi-profonde) - Air Breizh	Du 20/01 au 17/02/2005 (hiver)	35	/	181
Rennes – Station république (profonde) - Air Breizh	Du 20/01 au 17/02/2005 (hiver)	47	/	188
Gare de Strasbourg – Sous la verrière (ASPA)	Du 11 au 28 avril 2008	278	418	/
Métro de Londres – Holland Park Station – Central Line	3 jours durant Janvier 2003	1000		
Métro de Londres – Hampstead Station – Northen Line	3 jours durant Janvier 2003	1500		
Métro de Londres – Oxford Circus Station – Victoria Line	1 jour durant Janvier 2003	1100		

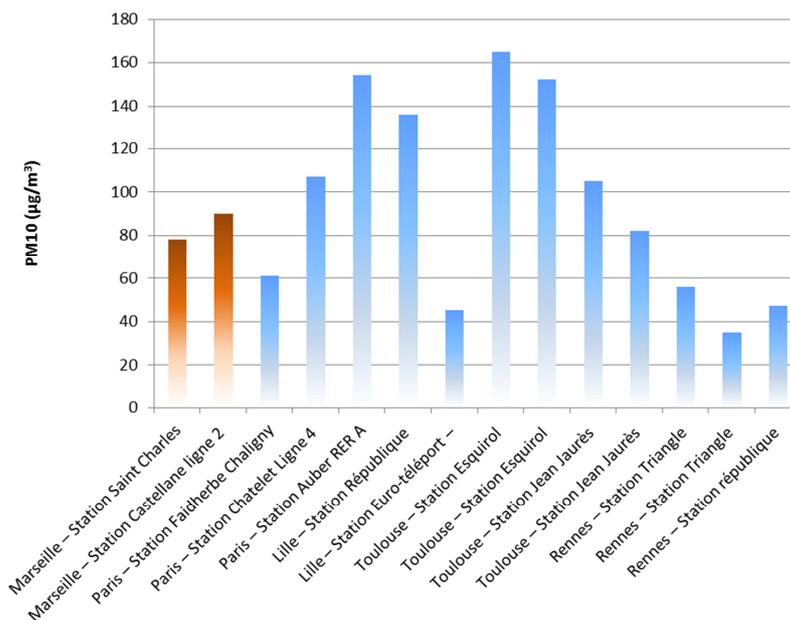


Figure 6 : PM10 - Comparaison avec d'autres études similaires dans des enceintes souterraines françaises (cf. Références, page 48)

REPRESENTATION EN DIAGRAMMES EN BOITE

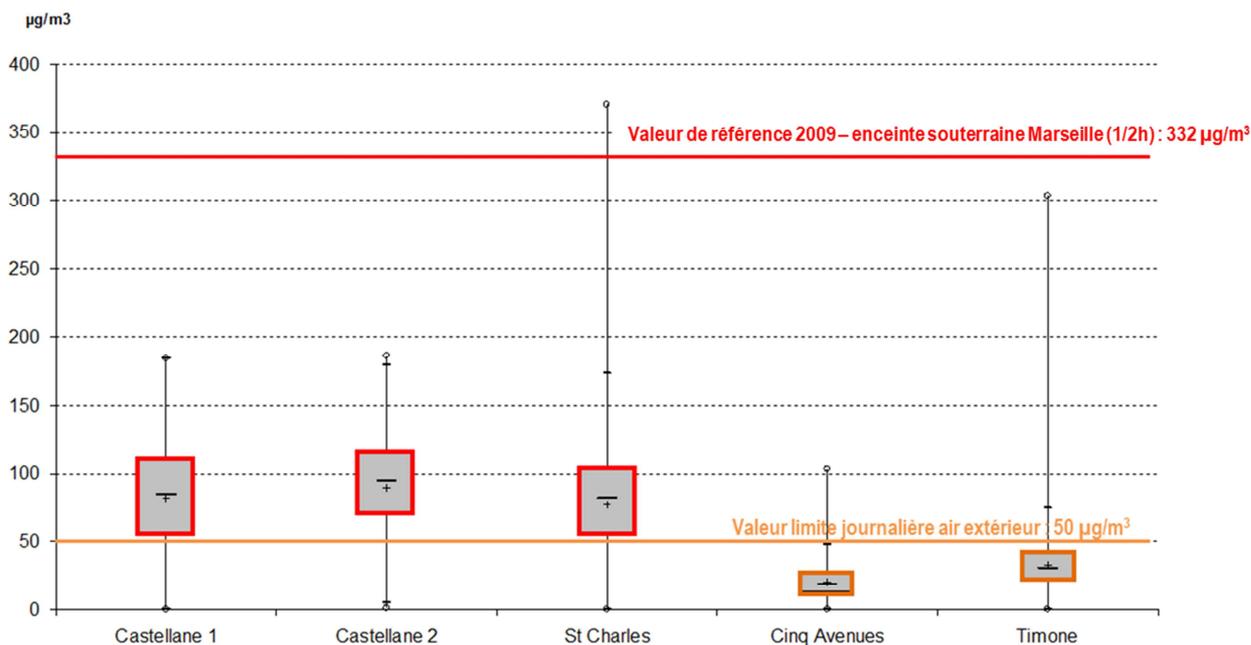


Figure 7 : Distribution des concentrations en PM10 sur toute la période (hiver – été)

Les diagrammes³ en Figure 7 montrent un comportement similaire pour les trois stations de métro : bien que quelques valeurs extrêmes se manifestent à Saint Charles, la moitié des valeurs se répartissent sur un intervalle d'environ 50 µg/m³.

Le comportement en air extérieur est différent. La répartition des concentrations est moins étalée et recentrée sur des concentrations plus basses ; la moitié des valeurs se répartissent sur une plage de 30 µg/m³.

³ La composition et lecture d'un diagramme en boîte sont explicitées Annexe V : Diagramme en boîte

La valeur de référence 2009 pour les enceintes du métro marseillais ($332\mu\text{g}/\text{m}^3$) n'est jamais atteinte pour les trois stations, excepté durant une seule heure à Saint Charles sur les sept mois de mesures. Cette valeur de $371\mu\text{g}/\text{m}^3$ est mesurée le 18/04 à minuit, hors période d'ouverture du métro aux usagers. Elle peut correspondre à des travaux de maintenance accompagnés du passage d'une locomotive diesel. La valeur de référence 2010 ($567\mu\text{g}/\text{m}^3$) n'est jamais atteinte.

L'air de l'enceinte du métro provient aussi de l'extérieur. La qualité de l'air extérieur est donc essentielle pour celle de l'air dans l'enceinte du métro. Sur les deux stations extérieures considérées, Cinq Avenues et Timone, la moyenne journalière est inférieure aux $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ la plupart du temps (près de 9/10^{ème} du temps à Cinq Avenues et $\frac{3}{4}$ du temps à Timone).

LES PROFILS JOURNALIERS : STATIONS DE METRO ET STATIONS EXTERIEURES

Les profils journaliers sont calculés à partir des données horaires et moyennés pour chaque période (estivale et hivernale). Les tendances sont identiques pour les deux périodes. La Figure 8 présente le profil estival.

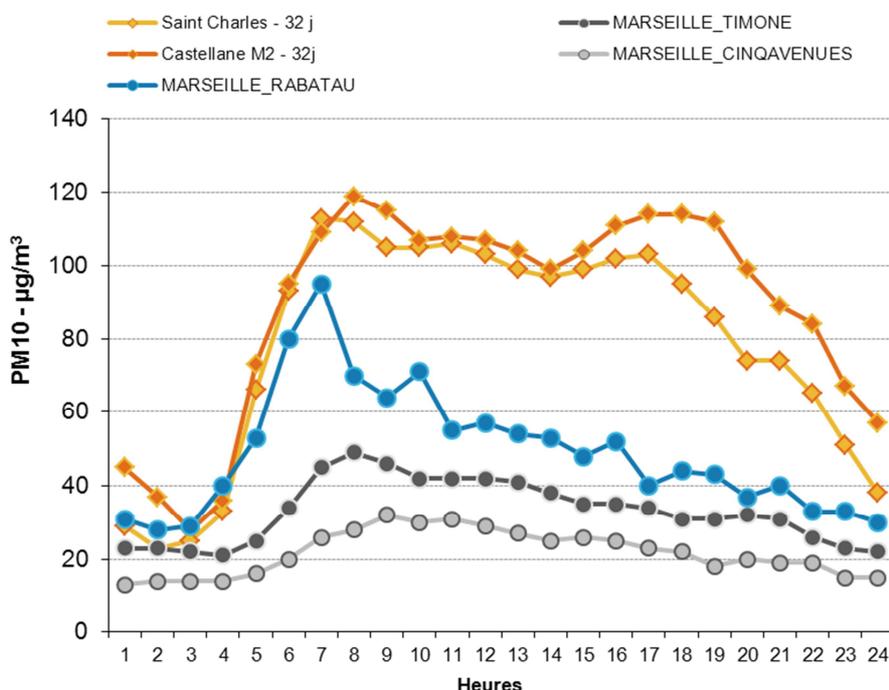


Figure 8 : Profil journalier moyen en particules PM10 : période estivale : du 9/06 au 13/07/10

Les concentrations dans l'enceinte du métro

La nuit, les concentrations en PM10 dans le métro sont plus faibles : la station Saint Charles par exemple enregistre une concentration moyenne de $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ durant la nuit et de $92\mu\text{g}/\text{m}^3$ en journée.

En journée dès l'ouverture, les teneurs augmentent ; le pic atteint son maximum vers 8h00 : $119\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Castellane M2 et $113\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Saint Charles. Les niveaux de particules baissent peu en journée et restent supérieurs à $100\mu\text{g}/\text{m}^3$. En soirée, on retrouve une augmentation des concentrations à partir de 16h00 jusqu'à 17h00 voire 20h00 (Figure 8). Le profil des teneurs semble corrélé à la fréquence des rames et des passagers. Ce comportement est observé en période estivale et hivernale.

En atmosphère intérieure, l'influence de la météorologie est limitée. Le vent et la pluie n'interviennent pas directement sur les teneurs en particules du métro. Le profil horaire est assez constant d'un jour à l'autre.

Les concentrations en air extérieur

Elles sont plus faibles la nuit qu'en journée, et ce contraste est encore plus marqué pour les stations trafic. La station Timone par exemple enregistre $23\mu\text{g}/\text{m}^3$ la nuit et $38\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne sur la journée.

Durant la journée, les teneurs sont plus élevées en matinée entre 7h00 et 9h00, période où les émissions dues au trafic routier sont les plus importantes (Figure 8). Les concentrations sont comprises entre 50 et 95 µg/m³ pour les stations de mesure trafic (Rabatau et Timone). Une élévation des teneurs en fin d'après-midi est aussi constatée – jusqu'à 40 µg/m³ pour la station Timone - plus modérée qu'en matinée.

Pour les niveaux de particules en extérieur, la météo a une influence directe. Le vent disperse les polluants. Plus le vent est fort, plus les particules sont dispersées et leurs concentrations diminuent. Plus la pluie est intense, plus les particules sont lessivées et ramenées au sol et les concentrations dans l'atmosphère faibles. En toute saison, on observe une augmentation en matinée, facilitée par une atmosphère généralement plus stable et des émissions routières plus intenses. Ce contraste durant les heures diurnes est accentué en période estivale où les conditions météorologiques sont plus dispersives l'après-midi grâce à des températures plus élevées. Le brassage vertical des masses d'air est facilité dans ce cas (convection) et les émissions au moment du pic de trafic du soir sont alors mieux dispersées. L'apparition des brises thermiques facilite également une meilleure dispersion des polluants. C'est pourquoi l'augmentation des concentrations en particules n'est pas très visible en milieu urbain en soirée estivale comme l'illustre la Figure 8.

Relation entre air extérieur et air dans l'enceinte du métro

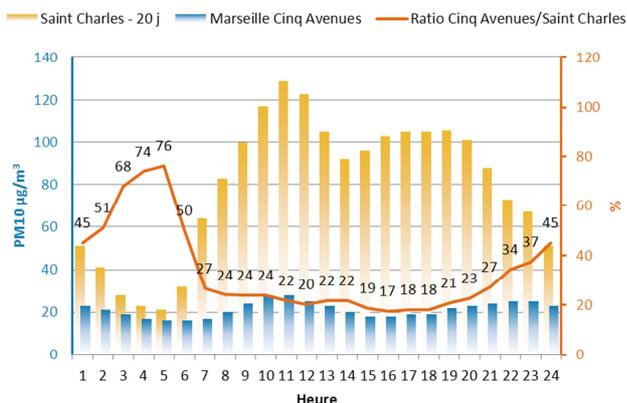
Pour les deux environnements, air extérieur et air dans le métro, les concentrations en particules diminuent la nuit. L'arrêt des activités en est la cause (diminution du trafic routier, arrêt de la circulation des rames).

En journée, les concentrations augmentent au même moment dans le métro et dans la rue.

Les teneurs dans le métro sont nettement plus élevées qu'à l'extérieur : à la pollution interne au métro (circulation des rames, passage des usagers,...) s'ajoutent les apports de particules venant de l'air extérieur.

Le calcul d'un ratio permet de quantifier la proportion d'air extérieur entrant dans l'enceinte du métro.

Hiver



Été

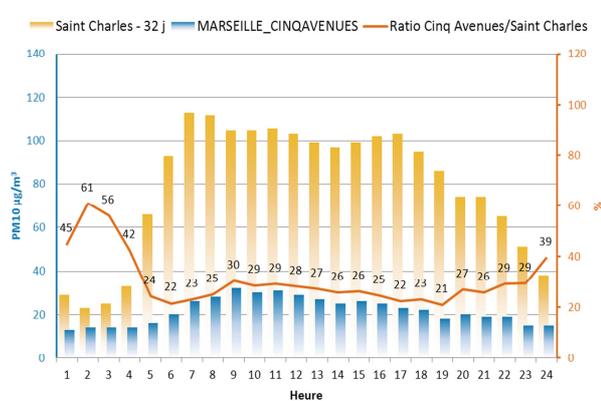


Figure 9 : Comparaison hiver – été des stations Saint Charles – Cinq Avenues : Profils moyens journaliers et ratio Cinq Avenues/Saint Charles

Le ratio « particules extérieures sur particules intérieures » a été calculé pour les stations de métro Saint Charles et Castellane M2 (Annexe VII: ratios air extérieur versus air intérieur). La Figure 9 présente le ratio Cinq Avenues/Saint Charles pour les deux périodes, c'est-à-dire la part des particules extérieures (pollution de fond urbain) importées dans la station de métro.

Été comme hiver, le ratio est plus élevé la nuit : les concentrations en air extérieur diminuent, et celles dans le métro chutent pour se rapprocher des concentrations en extérieur.

Au cours de la journée, le ratio est plus faible : les concentrations dans le métro sont quatre à six fois plus importantes que celles de la nuit, alors que les teneurs en extérieur n'augmentent que très peu.

Ce ratio nous indique que les concentrations en air extérieur pendant la journée pourraient contribuer à hauteur de 20% aux concentrations mesurées dans l'enceinte du métro.

RELATIONS ENTRE LES STATIONS DE METRO

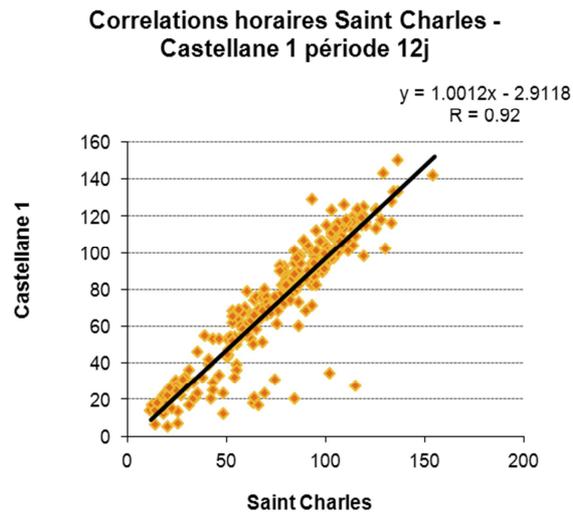


Figure 10 : Exemple de corrélation horaire en PM10 entre les stations Saint Charles et Castellane 1 (période 12 jours)

Sur cette période de 12 jours, entre Saint Charles (moyenne $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et Castellane 1 (moyenne $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$), la corrélation horaire est de 0,92 (Figure 10). Cela signifie que l'évolution horaire des concentrations est très similaire entre la station de Castellane 1 et Saint Charles. Une évolution parfaitement identique entre les deux stations aurait conduit à une corrélation de 1.

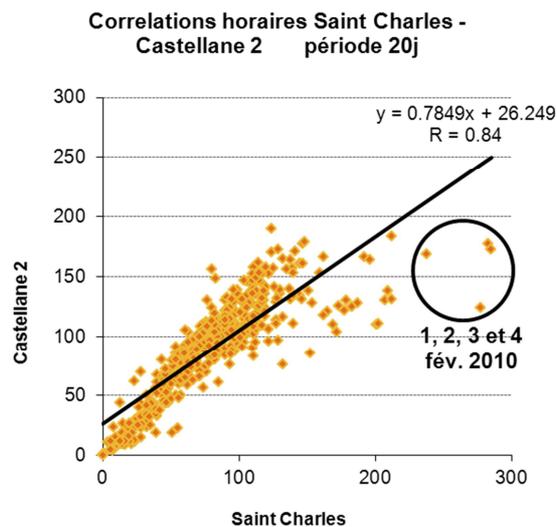


Figure 11 : Exemple de corrélation horaire en PM10 entre les stations saint Charles et Castellane 2 (période 20 jours)

Sur cette période de 20 jours, entre la station Castellane 2 (moyenne $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$), et la station Saint Charles (moyenne $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$), la corrélation horaire est de 0,84 (Figure 11). Là encore, cela signifie que l'évolution horaire des concentrations est très similaire d'une station à l'autre.

Bien que la station de Saint Charles relève 4 journées plus polluées les 1, 2, 3 et 4 février par rapport à la station de Castellane 2, la moyenne reste un peu plus élevée sur Castellane 2. Il est à noter que cette cabine de prélèvement est positionnée au milieu du quai, pour des raisons de contraintes techniques. Ce n'est pas le cas pour Saint Charles où la cabine est en bout de quai.

Le passage des rames et l'affluence des usagers sur les quais impactent directement les concentrations mesurées. Les usagers sont plus nombreux en milieu de quai, la remise en suspension des particules y est plus importante. C'est le cas de la station de Castellane 2.

QUELQUES EVENEMENTS ATYPIQUES

- A Saint Charles, le 19/01 vers 3h00, le 20/01 vers 1h00, le 21/01 à 3h00 et le 22/01 vers 1h00, des pics de particules et d'oxydes d'azote sont observés simultanément (Figure 12). Les concentrations en PM10 atteignent 100 µg/m³. Ces épisodes nocturnes coïncident avec le passage d'une locomotive diesel utilisée pour les travaux de maintenance. Certaines activités de maintenance sur la voie ou sur les quais influencent donc directement les concentrations en particules.

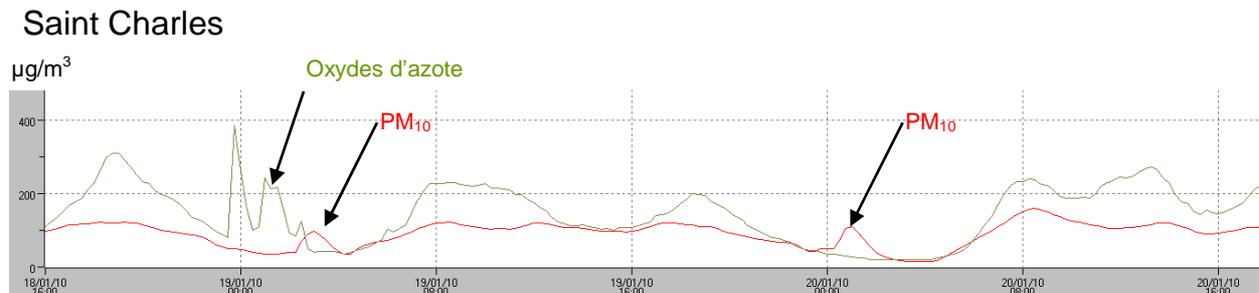


Figure 12 : Évènements atypiques à la station Saint Charles (19/01 -20/01/10)

- Les journées du lundi 01/02 au jeudi 04/02 enregistrent des niveaux élevés en particules dans toutes les stations du métro, cette pollution étant plus marquée sur Saint Charles. Pour la même période, en air extérieur, les journées du 1er au 03/02 enregistrent également des niveaux élevés en particules et en dioxyde d'azote. Pendant cette période, les vents sont faibles et la situation météorologique est stable. Pendant cette période, l'influence de l'air extérieur sur l'air intérieur est clairement mise en évidence.
- Le dimanche 7 février est un soir de match au stade vélodrome :
 - En air intérieur, entre 18h00 et 1h00 du matin, les particules augmentent dans les 2 stations Saint Charles (maximum 90 µg/m³) et Castellane 2 (maximum 160 µg/m³) en raison de leur fréquentation (Figure 13).
 - En air extérieur, aux mêmes instants, le trafic est en hausse, notamment sur le boulevard Rabatau marqué par deux pointes en dioxyde d'azote. Sur la station Timone (Boulevard Sakakini - Jean Moulin) les particules sont en hausse également.

Lors des soirs de match, la fréquentation accrue du métro et le surplus simultané de trafic routier en extérieur expliquent les pics de particules.

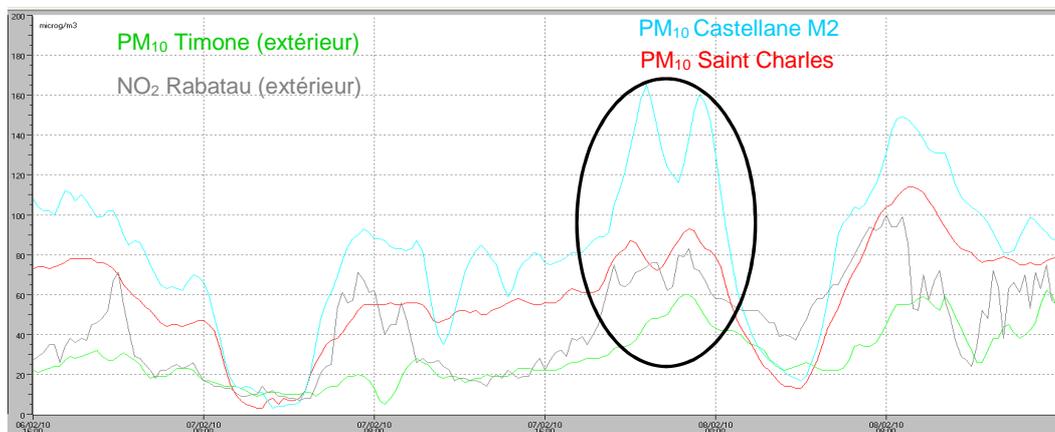


Figure 13: Évènements atypiques à la station de Saint Charles 07/02

LES SCENARIOS DE VENTILATION

Durant la campagne de mesure hivernale, les ventilations des inter-stations (extraction d'air) autour de Saint Charles et Castellane 2 ont été activées. Les créneaux horaires étaient limités pour les tests : plages d'une heure en milieu et en fin de journée. La plage de ventilation est bleutée sur les graphiques suivants (Figure 14 et Figure 15).

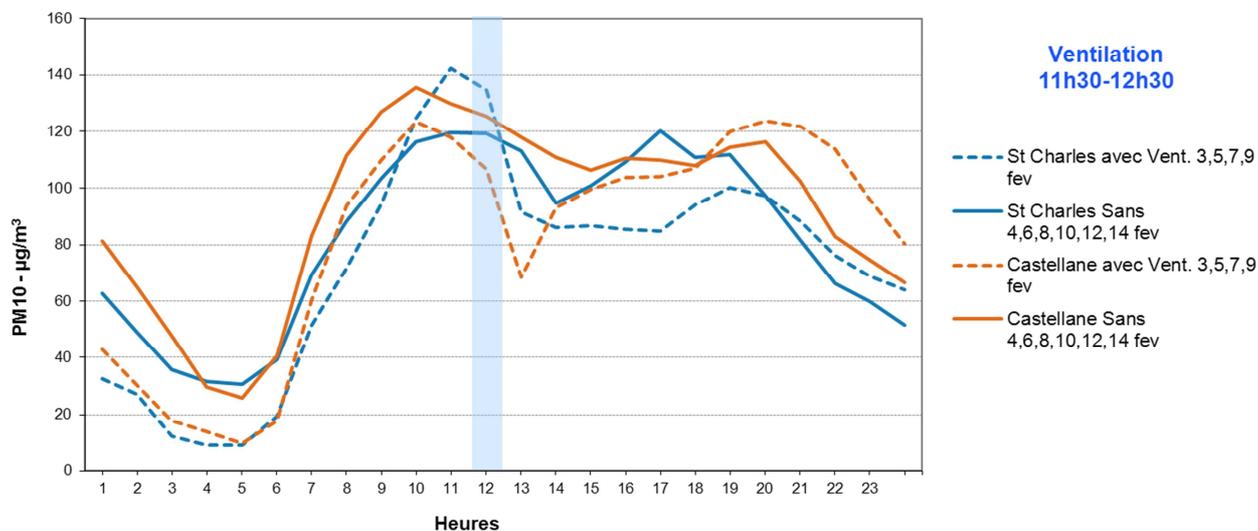


Figure 14 : Profils moyens journaliers des teneurs en PM10 en fonction de la ventilation – fonctionnement de 11h30 à 12h30

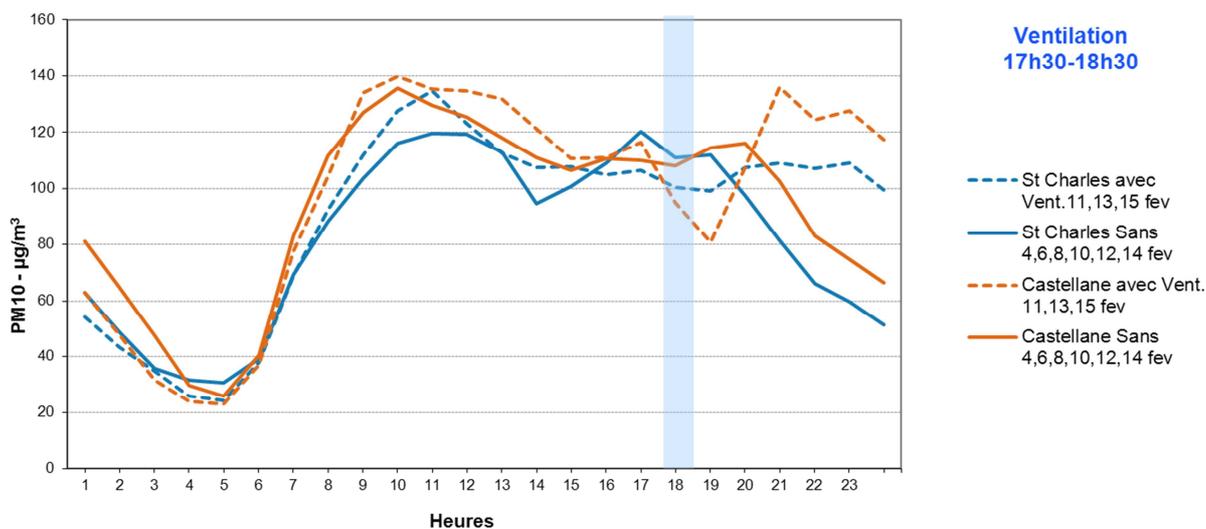


Figure 15 : Profils moyens journaliers des teneurs en PM10 en fonction de la ventilation – fonctionnement de 17h30 à 18h30

Lors du fonctionnement de la **ventilation**, il apparaît une **baisse notable des concentrations en PM10** pour la station de Castellane 2. L'efficacité de la ventilation est **estimée à environ 25 %**. (Annexe VIII : Calcul de l'efficacité de ventilation).

L'effet de la ventilation sur Saint Charles est plus atténué car le nombre d'usagers et le volume à ventiler sont plus importants que dans la station Castellane 2.

Des tests supplémentaires de ventilation seraient nécessaires pour consolider cette première estimation de l'efficacité. L'évaluation de l'efficacité pourrait être réalisée avec une durée de ventilation prolongée.

3.2 HAP – HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES

3.2.1 ORIGINE, DYNAMIQUE ET EFFETS SANITAIRES

Plusieurs centaines de composés sont générés par la combustion des matières fossiles notamment par les moteurs diesel (sous forme gazeuse ou particulaire). Le plus étudié est le benzo(a)pyrène. Le risque de cancer lié aux HAP est l'un des plus anciennement connus.

3.2.2 REGLEMENTATION

La directive européenne fille du 15 décembre 2004 concerne pour partie la stratégie de surveillance de la qualité de l'air au regard de plusieurs composés, dont un en particulier : le **benzo(a)pyrène**. Les autres composés concernés par cette directive (autres HAP et mercure) ont été mesurés ; ils ne font pas l'objet de valeur cible.

Le benzo(a)pyrène est utilisé comme traceur du risque cancérigène lié aux HAP dans l'air ambiant.

NORME EN AIR EXTERIEUR

Tableau 7 : Valeur du Décret du 23 octobre 2010

Polluant	HAP : B(a)P
Valeur cible	Moyenne annuelle : 1 ng/m ³

3.2.3 RESULTATS

Dans cette campagne exploratoire, les HAP sont mesurés à Saint Charles à raison d'un filtre par jour pendant 6 jours en hiver et de deux filtres par jour en été pendant 7 jours. A Marseille, en air extérieur, les HAP sont également mesurés dans la station de Cinq Avenues. Les observations s'effectuent 14% du temps soit 8 semaines également réparties sur l'année, à raison d'un filtre quotidien.

Tableau 8 : Benzo(a)pyrène à Saint Charles et en air extérieur – périodes hiver et été

Marseille	Benzo(a)Pyrène (BaP)	Moyenne ng/m ³	Maximum journalier ng/m ³
Métro station Saint Charles (6 filtres)	Du 20 au 26 janvier 2010	0.52	0.89
Métro station Saint Charles (14 filtres)	Du 16 au 23 juin 2010	0.10	0.66
Station extérieure Cinq Avenues hiver 2009	3 semaines (19/11 au 27/11) (23/01 au 31/01) (26/02 au 05/03)	0.52	2.20
Station extérieure Cinq Avenues été 2009	3 semaines (26/05 au 04/06) (30/07 au 06/08) (27/08 au 03/09)	0.06	0.15
Station extérieure Cinq Avenues hiver 2010	3 semaines : (01/02 au 08/02) (03/11 au 10/11) (30/11 au 08/12)	0.48	1.32
Station extérieure Cinq Avenues été 2010	3 semaines (28/04 au 05/05) (11/08 au 26/08)	0.11	0.29

- Dans le métro à Saint Charles, les moyennes en BaP en hiver (0,52 ng/m³) et en été (0,10 ng/m³) sont **inférieures à la valeur cible annuelle pour l'air extérieur (1 ng/m³)**. Le maximum journalier (0,89 ng/m³) reste lui aussi inférieur à ce seuil annuel.
- Les niveaux dans le métro restent globalement comparables à ceux obtenus en air extérieur à Cinq Avenues, site de référence pour Marseille.

- Les moyennes annuelles sur Cinq Avenues sont de 0,25 ng/m³ en 2009 et 0,26 ng/m³ en 2010, inférieures à la valeur cible de 1 ng/m³ pour le BaP.
- Les différences été/hiver sont bien marquées et liées aux rejets de HAP plus importants en hiver dans une atmosphère plus stable.
- A titre de comparaison, les maxima journaliers enregistrés en air extérieur à Cinq Avenues sont 2,20 ng/m³ pour l'année 2009 (29 janvier) et 1,32 ng/m³ pour l'année 2010 (2 décembre). Cela indique que le seuil de 1 ng/m³ peut être dépassé ponctuellement lors de conditions météorologiques stables, préférentiellement en hiver (Tableau 8).

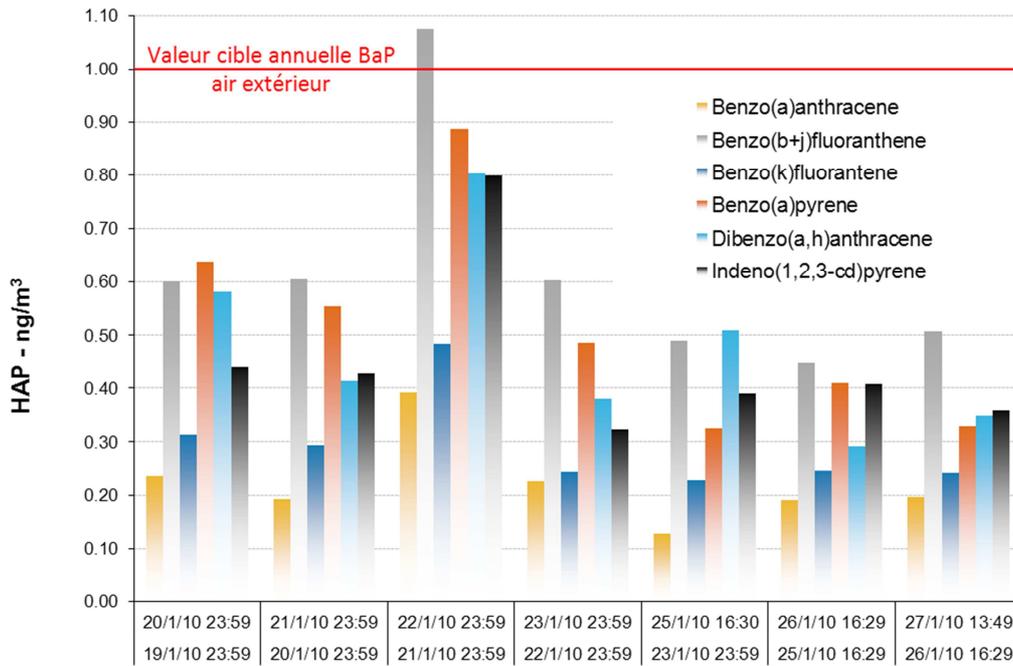


Figure 16 : HAP - station Saint Charles – Hiver

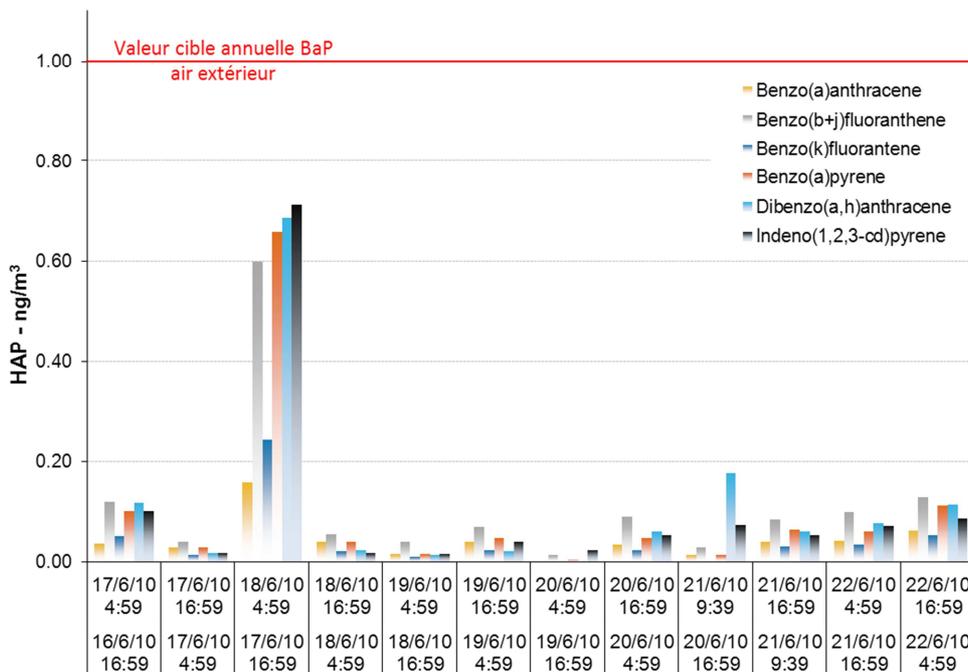


Figure 17 : HAP - station Saint Charles – Été (2 filtres par jour)

Variabilité saisonnière

En air extérieur, les teneurs sont plus importantes en hiver avec davantage d'émissions par les chauffages urbains, ajoutées à celles du trafic. En outre, en hiver, les conditions météorologiques favorisent l'accumulation des polluants avec une fréquence accrue des jours où l'atmosphère est stable. Sur le site de référence de Cinq Avenues, en 2009, la moyenne hivernale est de 0,52 ng/m³ avec une concentration hebdomadaire maximale de 0,75 ng/m³ fin février - début mars, et une moyenne estivale de 0,06 ng/m³.

Les différences saisonnières s'observent également en air intérieur, avec des niveaux de BaP diminués d'un facteur cinq en été sur la station Saint Charles (Tableau 8 et Figure 16 et Figure 17). Pour Saint Charles, la concentration hivernale est comparable à celle de la station en extérieur ; en revanche pour l'été, le BaP dans le métro est légèrement plus élevé.

Différences jour - nuit

Des différences jour - nuit sont constatées sur la période été durant laquelle les filtres sont exposés par demi-journée : nuit (de 17h00 à 5h00 du matin) et jour (de 5h à 17h00). Si l'on fait exception de la nuit du 17 au 18 juin, les teneurs moyennes de jour de 0,06 ng/m³ sont supérieures aux teneurs de nuit, de 0,02 ng/m³. Elles suivent les variations du BaP en air extérieur, rythmé par l'accroissement en journée des combustions dues aux véhicules.

Durant la nuit du 17 au 18 juin, les niveaux de BaP sont de 0,66 ng/m³. Les autres indicateurs : oxydes d'azote et particules montrent également un pic cette nuit-là, à mettre en relation avec le passage d'un train diesel, ou bien à des travaux sur la voie (Figure 17).

Les HAP et le BaP proviennent pour leur majeure partie de l'air extérieur (émissions liées à la combustion, véhicules et chauffages domestiques). Les trains diesels apportent également une contribution interne, mais de façon ponctuelle et exceptionnelle.

3.3 SILICE ET FIBRES

Les analyses de silice et fibres sur les particules ont été confiées au **CEREGE** (Centre Européen de Recherches et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement) – Université Paul Cézanne et CNRS UMR 6635.

La technique d'analyse employée est la diffraction à rayons X ; elle a permis de caractériser qualitativement la fraction minérale. **Il n'a pas été détecté durant ces campagnes de fibre d'amiante ni de silice cristalline.** L'association minéralogique prédominante est composée de calcite essentiellement, avec de la magnétite, wustite et graphite (CEREGE/CNRS, 2010).

3.4 METAUX LOURDS ET PARTICULES SUR FILTRES

3.4.1 ORIGINE ET DYNAMIQUE

Les métaux analysés dans cette étude sont les 6 métaux cités dans la circulaire du 30 juin 2003 : fer (Fe), nickel (Ni), chrome (Cr), cadmium (Cd), manganèse (Mn), plomb (Pb). D'autres métaux - zinc (Zn), baryum (Ba), cuivre (Cu), calcium (Ca), arsenic (As) - bien que non demandés dans cette circulaire, ont été également analysés à partir des mêmes filtres.

Les métaux proviennent généralement de la combustion des charbons, pétroles, ordures ménagères et de certains procédés industriels particuliers. Ils se retrouvent, le plus souvent, sous forme de particules (sauf le mercure qui est principalement gazeux). La généralisation de l'essence sans plomb a considérablement fait diminuer les concentrations de ce polluant dans l'air. Dans les enceintes ferroviaires, les métaux peuvent être émis lors du freinage de wagons : frottement des pièces du système de freinage, frottement sur les rails etc.

3.4.2 EFFETS SANITAIRES

Les métaux s'accumulent dans l'organisme et provoquent des effets toxiques à court et/ou à long terme. Ils peuvent affecter le système nerveux, les fonctions rénales, hépatiques, respiratoires, ou autres... Les métaux toxiques contaminent les sols et les aliments. Ils s'accumulent dans les organismes vivants et perturbent les équilibres et mécanismes biologiques. Certains lichens ou mousses sont couramment utilisés pour surveiller les métaux dans l'environnement et servent de "bio indicateurs".

3.4.3 REGLEMENTATION

NORME EN AIR EXTERIEUR

Tableau 9 : Valeurs du Décret du 23 octobre 2010

Polluant	Plomb
Objectif de qualité	Moyenne annuelle : 250 ng/m ³
Valeur limite	Moyenne annuelle : 500 ng/m ³

Polluant	Arsenic
Valeur cible	Moyenne annuelle : 6 ng/m ³

Polluant	Cadmium
Valeur cible	Moyenne annuelle : 5 ng/m ³

Polluant	Nickel
Valeur cible	Moyenne annuelle : 20 ng/m ³

Polluant	Manganèse
Valeur guide	Moyenne annuelle : 150 ng/m ³

3.4.4 RESULTATS

ANALYSE QUANTITATIVE

Les analyses de particules ont été confiées au **CEREGE** (Centre Européen de Recherches et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement) – Université Paul Cézanne et CNRS UMR 6635.

La méthode d'analyse choisie est celle employée couramment pour les 6 métaux demandés dans la circulaire (Annexe III : Circulaire n° 2003-314 du 30 juin 2003). Cette démarche exploratoire porte sur un certain nombre de filtres précisé dans le tableau ci-dessous.

Tableau 10 : Résultats des métaux lourds : Moyenne par station et période de prélèvement – Maximum et minimum journaliers pour les éléments présentant des pointes

	µg/m ³		Composés visés par la circulaire en ng/m ³					Autres composés en ng/m ³					
	PM ₁₀	Fe	Ni	Cr	Mn	Pb	Cd	Zn	Ba	Cu	Ca	As	
St Charles 14/01 - 10/02/10 18 Filtres	Moy 63	Moy 14700	Moy 15	Moy 38	Moy 138	Moy 12	Moy 0.2	Moy 688	Moy 46	Moy 2800	Moy 3700	Moy 4	
			Min 2	Min 4								Min 2	
			Max 41	Max 209								Max 26	
Cast. L1 14/01 - 25/01/10 8 Filtres	Moy 66	Moy 18600	Moy 24	Aucune donnée > LD	Moy 112	Moy 14	Moy 0.2	Moy 940	Moy 61	Moy 2300	Moy 2400	Moy 9	
			Min 2									Min 2	Min 2
			Max 81									Max 19	
Cast. L2 28/01 - 10/02/10 9 Filtres	Moy 69	Moy 18600	Moy 66	Moy 37	Moy 181	Moy 17	Moy 0.1	Moy 1526	Moy 89	Moy 4200	Moy 2900	Moy 11	
			Min 2	Min 26								Min 2	
			Max 182	Max 50								Max 17	
St Charles 28/05 - 22/06/10 22 Filtres	Moy 64	Moy 21300	Moy 9	Moy 32	Moy 189	Moy 12	Moy 0.2	Moy 220	Moy 27	Moy 3000	Moy 3100	Moy 6	
			Min 2	Min 19								Min 2	
			Max 27	Max 54								Max 19	
Cast. L1 27/05 - 08/06/10 13 Filtres	Moy 64	Moy 16700	Moy 41	Moy 35	Moy 187	Moy 15	Moy 0.2	Moy 255	Moy 7.4	Moy 2400	Moy 3200	Moy 3	
			Min 17	Min 12								Min 1	
			Max 107	Max 104								Max 12	
Cast. L2 10/06 - 22/06/10 13 Filtres	Moy 79	Moy 23900	Moy 39	Moy 44	Moy 211	Moy 14	Moy 0.4	Moy 291	Moy 6.4	Moy 4500	Moy 2300	Moy 5	
			Min 14	Min 25								Min 1	
			Max 66	Max 60								Max 9	
Marseille 5 Avenues 24/01 - 1/03/11 (projet APICE) ⁴	Moy 27	Moy 480	Moy 2.3	Moy 2.7	Moy 6.6	Moy 11	Moy 0.2	Moy 35	Moy 9.5	Moy 34	Moy 1360	Moy 0.6	
Métro de Rennes Moyenne 08/2004 02/2005		2700 à 19 500	2.8 à 13.7	11 à 118	28 à 188	1.5 à 19	<0.4 seuil quantifi cation						

⁴ <http://www.apice-project.eu/index.php?lang=FRA>

Les concentrations en PM10 mesurées à l'aide des filtres journaliers coïncident avec les concentrations en PM10 obtenues, en continu (§ 3.1.4), avec l'analyseur utilisé dans les stations référence (Annexe I : Descriptif des appareils de mesures : méthodes de mesures et utilisation).

Remarques sur l'analyse des filtres

- Impact du volume de prélèvement

Pour être représentatif, seuls les filtres correspondant à une durée de prélèvement de 18 heures ou plus sur une journée ont été validés.

Plusieurs filtres pendant la campagne hiver sont considérés comme non représentatifs car les travaux et interventions sur les lignes pour le rallongement de la ligne 1 ont perturbé le prélèvement notamment par des coupures électriques. Cela s'est surtout manifesté à St Charles où 8 journées sur 27 ont été considérées comme non valides.

- Impact de la limite de détection

L'appareil de mesure utilisé possède une limite de détection différente pour chaque élément.

Lors de cette première phase exploratoire, pour plusieurs filtres, les teneurs en métaux lourds se sont situées en dessous du seuil de détection ne permettant pas de détecter la présence ou non de l'élément à des teneurs faibles. Dans ce cas, c'est la limite de détection divisée par deux qui a été attribuée en guise de concentration.

Métaux lourds visés par la circulaire du 30 juin 2003 (Tableau 10)

- **Fer**

Il n'existe pas de seuil réglementaire pour le fer. Il sert d'indicateur dans la recherche de sources émettrices.

En air extérieur de fond, les mesures les plus récentes pendant l'hiver 2011 (24/01 au 1/03) donnent une teneur moyenne sur la période de 480 ng/m³ dans la station de Cinq Avenues (APICE, 2011).

Dans le métro, tous sites confondus, les concentrations en fer sont comprises entre 14 700 et 23 900 ng/m³ sur les deux périodes de mesure.

A titre de comparaison, les concentrations moyennes en fer mesurées dans le métro de Rennes – 19500 ng/m³ - se rapprochent de celles mesurées à Marseille (AIR BREIZH, 2005).

Les teneurs en fer dans le métro sont donc 10 à 15 fois plus élevées que celles relevées en air extérieur.

La proportion moyenne de fer dans les particules PM10 du métro marseillais représente 28% (Min. 23% en hiver à St Charles, Max. : 33 % en été à St Charles).

Quelle que soit la station de métro, ou la période considérée, les proportions restent identiques. Près d'un tiers des particules PM10 mesurées dans le métro sont constituées de fer. Compte tenu du ratio intérieur/extérieur, **la source du fer est interne aux enceintes ferroviaires souterraines.**

- **Nickel**

La valeur cible annuelle en air extérieur est de 20 ng/m³. Pour les deux lignes de Castellane 1 et 2, la valeur cible est dépassée en hiver et en été, alors que pour Saint Charles, la valeur cible est toujours respectée.

En hiver, la moyenne de Castellane 1 est de 24 ng/m³. La station Castellane 2 obtient une moyenne de 66 ng/m³, avec une journée à 182 ng/m³ (Figure 18).

En été, les deux moyennes de Castellane 1 et 2 sont deux fois supérieures à la valeur cible avec des valeurs journalières plutôt homogènes (Figure 19).

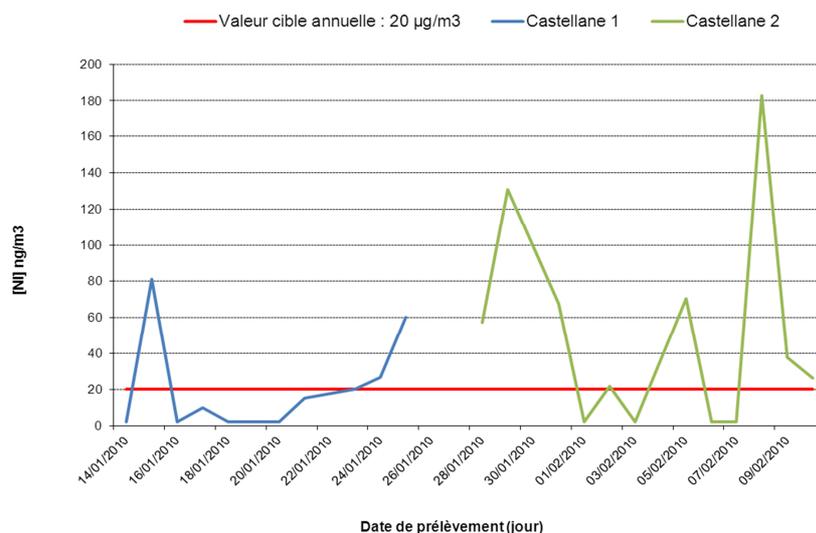


Figure 18 : Concentrations en nickel sur les filtres journaliers – période hiver

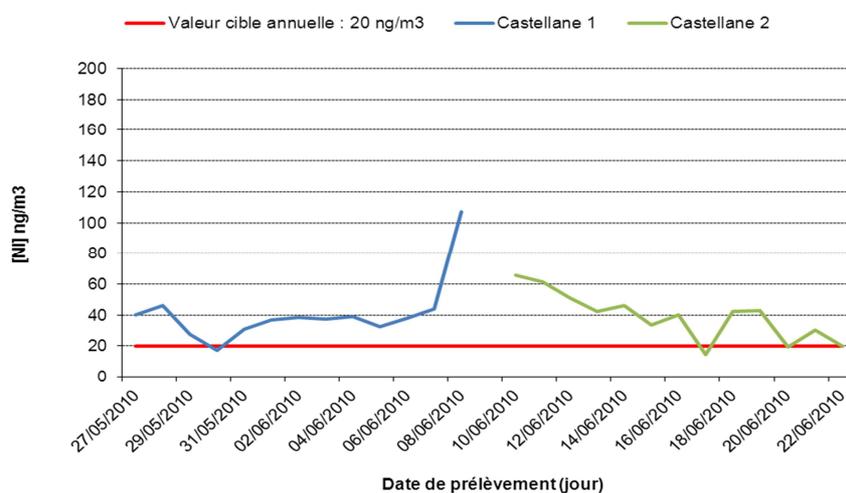


Figure 19 : Concentrations en nickel sur les filtres journaliers – période été

- **Chrome total**

Il n'existe pas de valeurs repères pour le chrome total⁵.

En moyenne sur les trois stations du métro et sur les deux périodes estivale et hivernale, la concentration du chrome total atteint 37 ng/m³.

Sur la station de Castellane 1, aucune trace de chrome n'a pu être détectée en hiver.

Les teneurs moyennes dans le métro sont supérieures à celle mesurées en air extérieur.

En air extérieur de fond, les mesures de chrome total les plus récentes pendant l'hiver 2011 (24/01 au 1/03) donnent une teneur moyenne sur la période de 2,7 ng/m³ dans la station de Cinq Avenues (APICE, 2011).

Des pointes journalières peuvent être observées sporadiquement, comme pour Saint Charles en hiver où la concentration maximale journalière a atteint 209 ng/m³, le vendredi 15 janvier 2010.

Les concentrations en chrome total sont conformes à ce que l'on peut trouver dans un environnement non pollué (5-200 ng/m³) (WHO, 2000).

⁵ Seul le chrome VI possède une valeur guide OMS en terme d'exposition : $4 \times 10^{-2} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$. Une exposition à vie d'une population à une concentration d'1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de chrome VI risque de provoquer une augmentation de 4 cancers pour 100 habitants.

- **Manganèse**

La valeur guide annuelle est de 150 ng/m³.

En été, les concentrations sur les trois stations dépassent la valeur guide annuelle. Le maximum est enregistré pour Castellane 2 : 211 ng/m³ (moyenne sur 13 filtres).

En hiver, seule la station Castellane 2 dépasse la valeur guide avec 181 ng/m³ (moyenne sur 9 filtres).

En air extérieur de fond, les mesures de manganèse les plus récentes pendant l'hiver 2011 (24/01 au 1/03) donnent une teneur moyenne sur la période de 6,6 ng/m³ dans la station de Cinq Avenues (APICE, 2011).

- **Plomb**

Aucune concentration mesurée n'a atteint la valeur limite (500 ng/m³) ni l'objectif de qualité (250 ng/m³). Toutes les teneurs sont comprises entre 12 et 17 ng/m³.

En air extérieur de fond, les mesures de plomb les plus récentes pendant l'hiver 2011 (24/01 au 1/03) annoncent une teneur moyenne sur la période de 11 ng/m³ dans la station de Cinq Avenues (APICE, 2011).

- **Cadmium**

Aucune concentration mesurée n'a atteint la valeur cible de 5 ng/m³ durant les campagnes de mesure. Les stations présentent des teneurs moyennes proches de 0,2 ng/m³ ; de nombreuses données ont été inférieures à la limite de détection pour les deux périodes.

En air extérieur de fond, les mesures de cadmium les plus récentes pendant l'hiver 2011 (24/01 au 1/03) donnent une teneur moyenne sur la période de 0,2 ng/m³ dans la station de Cinq Avenues (APICE, 2011).

Autres métaux analysés : zinc, baryum, cuivre, calcium, arsenic.

Les teneurs sont résumées dans le Tableau 10.

- **Arsenic**

Parmi ce groupe de métaux, seul l'arsenic fait l'objet d'une valeur cible annuelle (6 ng/m³). Il est mentionné dans la directive européenne du 15 décembre 2004, plus récente que la circulaire pour les enceintes ferroviaire de 2003.

Pour plus de la moitié des filtres, la moyenne journalière en arsenic se situe en dessous du seuil de détection de l'analyseur.

Des concentrations pour quelques journées sont supérieures à la valeur cible annuelle (6 ng/m³) détectées pour la plupart en hiver. Cette campagne exploratoire signale donc la présence d'arsenic ; le nombre de données étant limité pour être représentatif, des mesures complémentaires pourraient permettre une caractérisation plus précise.

En air extérieur de fond, les mesures d'arsenic les plus récentes pendant l'hiver 2011 (24/01 au 1/03) donnent une teneur moyenne sur la période de 0,6 ng/m³ dans la station de Cinq Avenues (APICE, 2011).

- **Zinc**

Dans le métro, le zinc a été mesuré dans des teneurs 10 à 40 fois plus importantes qu'en air extérieur : 35 ng/m³ à l'extérieur contre 220 ng/m³ (minimum) mesurée à Saint Charles en été, et 1526 ng/m³, teneur maximale constatée à Castellane 2 en hiver.

• **Cuivre**

En air extérieur de fond, les mesures de cuivre les plus récentes pendant l'hiver 2011 (24/01 au 1/03) donnent une teneur moyenne sur la période de 34 ng/m³ dans la station de Cinq Avenues (APICE, 2011).

Les concentrations sont plus élevées dans le métro, 3200 ng/m³ sont mesurés en moyenne, toutes stations et saisons confondues.

Pour le cuivre, il existe un facteur 100 en moyenne pour le ratio intérieur/extérieur.

• **Calcium**

Dans le métro, les concentrations en calcium sont assez homogènes dans les stations été comme hiver. Elles sont comprises entre 2300 et 3700 ng/m³. Ces teneurs sont en moyenne 2 fois plus fortes que celles de l'extérieur.

En air extérieur de fond, les mesures de calcium les plus récentes pendant l'hiver 2011 (24/01 au 1/03) donnent une teneur moyenne sur la période de 1360 ng/m³ dans la station de Cinq Avenues (APICE, 2011).

• **Baryum**

Dans l'enceinte du métro, les concentrations sont très contrastées selon les périodes pour les deux stations de Castellane : 89 ng/m³ en hiver contre 6,4 ng/m³ en été. Les tendances sont les mêmes pour Saint Charles, mais avec une différence hiver/été beaucoup moins marquée : 46 ng/m³ en hiver et 27 ng/m³ en été.

Les concentrations estivales des stations Castellane 1 et 2 se rapprochent de la valeur extérieure de 9,5 ng/m³.

Bilan intermédiaire

Dans le métro, plusieurs métaux sont observés en quantités bien supérieures à celles en environnement extérieur ; c'est le cas pour le fer, le cuivre, le zinc, le calcium et le manganèse (en ordre décroissant).

Les ratios air intérieur/air extérieur de ces cinq éléments sont :

- 10 à 15, pour le **fer**,
- 100, pour le **cuivre**,
- 10 à 40 pour le **zinc**,
- 2 pour le calcium,
- 25 pour le manganèse.

Les concentrations sommées de ces éléments métalliques représentent en moyenne 38 % des teneurs en PM10 mesurées dans le métro (Figure 20).

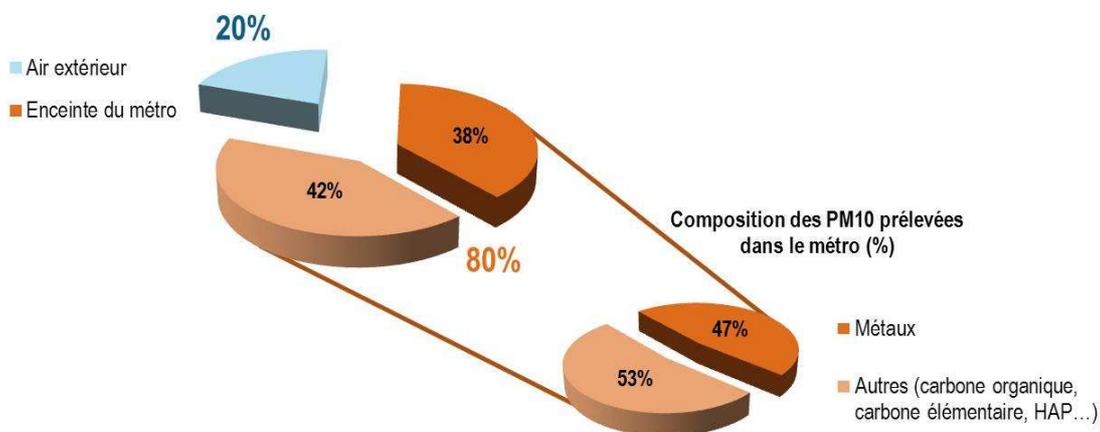


Figure 20 : Contribution des métaux dans les PM10 du métro

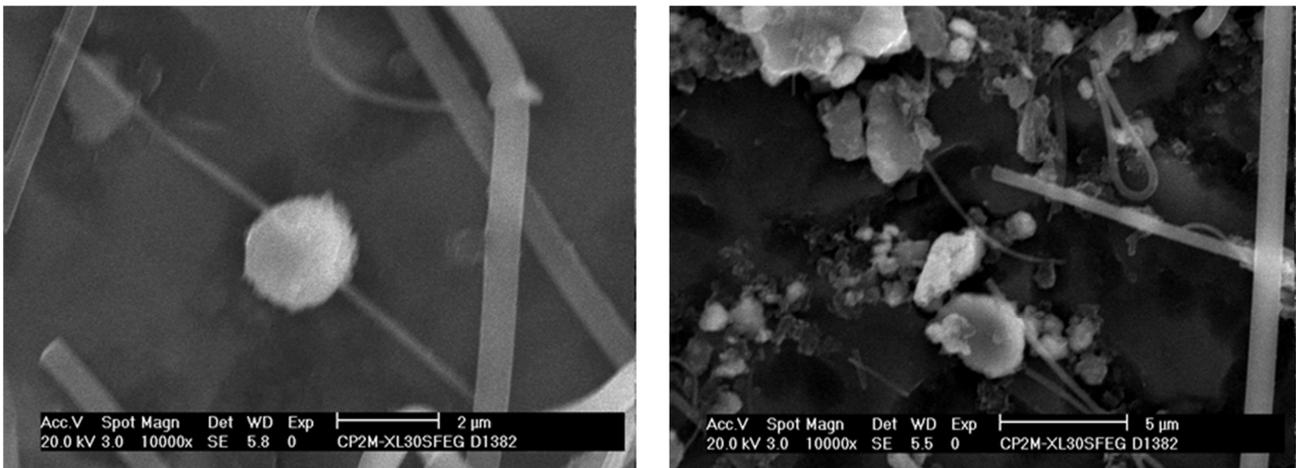
La proportion moyenne de fer dans les particules PM10 du métro marseillais représente 28%.

Quelle que soit la station de métro, ou la période considérée, les proportions restent identiques. Près d'un tiers des particules PM10 mesurées dans le métro sont constituées de fer. Compte tenu du ratio intérieur/extérieur, **la source du fer est interne aux enceintes ferroviaires souterraines.**

ANALYSE QUALITATIVE MONO PARTICULES

Celle-ci a été réalisée par microscopie électronique à balayage (MEB) sur des filtres. Il ne s'agit pas d'une étude statistique bien qu'elle nous donne la tendance de la composition des particules. Il a été retrouvé :

- des particules riches en calcium (carbonate).
- des particules riches en fer, contenant du cuivre en proportion variable, ainsi que des particules riches en cuivre et contenant du fer en proportion variable (Figure 21),
- des éléments comme le manganèse, l'aluminium, le silicium, le soufre ou encore le chlore dans la matière restante à l'état de trace.



Source CEREGE/CNRS, 2010

Figure 21 : Clichés MEB : particules de l'ordre de 2 µm riche en fer (à gauche) et en cuivre (à droite)

Les **particules contenant des métaux sont très majoritairement dans la fraction PM2.5** ; en effet, les particules métalliques sont de tailles inférieures à 3 µm, sans présenter de morphologie vraiment typique.

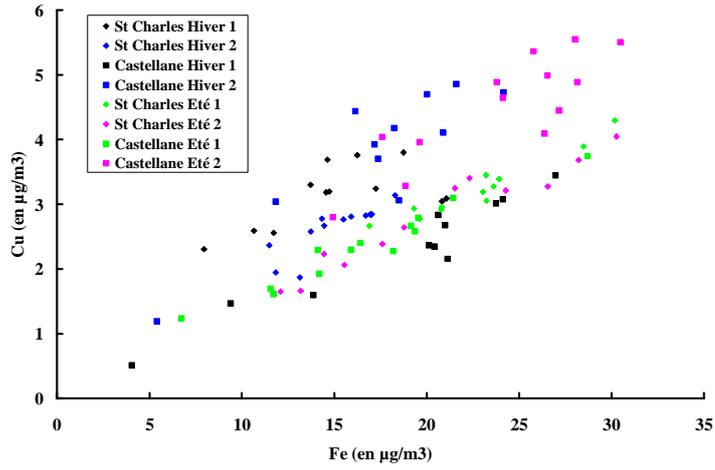
ANALYSE DES SOURCES POTENTIELLES

L'étude statistique (CEREGE/CNRS, 2010) met en évidence **les sources émettrices de quatre métaux ou groupes de métaux : calcium, fer-cuivre-manganèse, zinc, chrome.**

La première source, celle du Calcium est probablement liée à **l'abrasion des quais** par le passage des usagers.

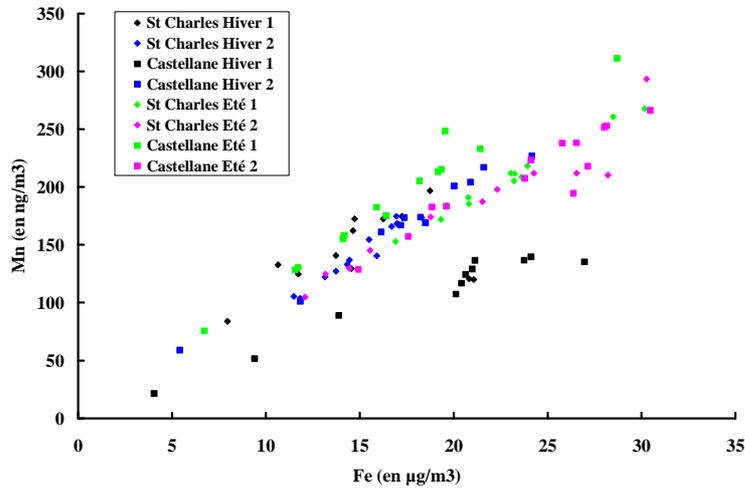
La source Fe-Mn-Cu est plus clairement liée à **l'abrasion par frottement de pièces métalliques conductrices**. De plus, fer, cuivre et manganèse se comportent de façon similaire, notamment sur Castellane : les concentrations journalières de ces métaux varient dans le même sens, ce qui est bien en faveur d'une source combinant ces trois métaux.

A titre d'exemple, les Figure 22 et Figure 23 mettent respectivement en évidence les relations existantes entre le fer et le cuivre et le fer et le manganèse sur les deux stations en fonction des périodes de prélèvement. Ces relations nous indiquent que ces trois métaux proviennent d'un même phénomène, avec ses sources : particules issues de l'usure du rail lors du freinage, celles issues de l'usure de la roue lors du frottement du sabot en bois (Figure 24).



(Source CEREGE/CNRS, 2010)

Figure 22 : Relations Fe-Cu en fonction des périodes de prélèvement



(Source CEREGE/CNRS, 2010)

Figure 23 : Relations Fe-Mn en fonction des périodes de prélèvement



Source Atmo PACA – ateliers techniques de la Rose

Figure 24 : Système de freinage d'une rame

3.5 DIOXYDE D'AZOTE

3.5.1 ORIGINE ET DYNAMIQUE

En air extérieur, le NO₂ (dioxyde d'azote) est un polluant dont l'origine principale est le trafic routier, issu de l'oxydation de l'azote atmosphérique et du carburant lors des combustions à très hautes températures. C'est le NO (monoxyde d'azote) qui est émis à la sortie du pot d'échappement, il est oxydé en quelques minutes en NO₂. La rapidité de cette réaction impose que le NO₂ soit considéré comme un polluant primaire. On le retrouve en quantité relativement plus importante à proximité des axes de forte circulation et dans les centres villes. Il est particulièrement présent lors des conditions de forte stabilité atmosphérique : situations anticycloniques et inversions thermiques en hiver. Les oxydes d'azote sont des précurseurs de la pollution photochimique et de dépôts acides (formation d'acide nitrique).

En air intérieur, s'il n'existe pas de sources spécifiques (combustions), le dioxyde d'azote retrouvé en environnement intérieur provient majoritairement de l'extérieur. Durant le transfert d'un espace à l'autre, les teneurs en NO₂ peuvent diminuer. La molécule comprend deux atomes d'oxygène et un atome d'azote. Les liaisons azote-oxygène sont instables. La molécule a donc tendance à réagir avec les molécules des surfaces rencontrées en air intérieur.

3.5.2 EFFETS SANITAIRES

Ses principaux effets sur la santé occasionnent une altération de la fonction respiratoire chez l'enfant en particulier, une hyper réactivité bronchique chez l'asthmatique et des troubles de l'immunité du système respiratoire.

3.5.3 REGLEMENTATION

NORME EN AIR EXTERIEUR

Tableau 11 : Valeurs du Décret du 23 octobre 2010

Polluant	NO ₂
Valeur limite	Moyenne annuelle : 40 µg/m ³ Moyenne horaire : 200 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 18 heures/an
Seuil d'information	200 µg/m ³ en moyenne sur 1h
Seuil d'alerte	400 µg/m ³ en moyenne sur 1h pendant 3h consécutives

3.5.4 RESULTATS

NIVEAUX MOYENS

Tableau 12 : Résultats en dioxyde d'azote mesuré dans le métro et en air extérieur – périodes hiver et été

Marseille	Période de mesure	Moyenne µg/m ³	Maximum journalier µg/m ³	Maximum horaire µg/m ³
Métro station Saint Charles (mesures automatiques) (environ 5 mois)	Du 13 janvier au 25 juin 2010	36	60 03/02/10	148 05/05 24h
Métro station Castellane Ligne 1 – Quais (4 valeurs hebdomadaires par saison)	Du 19 janvier au 16 février et du 1 juin au 29 juin 2010	37	/	/
Métro station Castellane Ligne 2 – Quais (4 valeurs hebdomadaires par saison)	Du 19 janvier au 16 février et du 1 juin au 29 juin 2010	38	/	/
Site extérieur Cinq Avenues (urbain) (mesures automatiques en continu) 5 mois	Du 13 janvier au 25 juin 2010	30	73 15/02	122 03/02 9h
Site extérieur Timone (trafic) (mesures automatiques en continu) 5 mois	Du 13 janvier au 25 juin 2010	47	94 03/02/10	146 03/02 10h

- Les teneurs en NO₂ sont similaires pour les trois stations de métro, elles sont en moyenne de 37 µg/m³.

- Elles sont inférieures d'environ 30 % à celles de la station Timone, de typologie trafic, et supérieures de 20 à 25% à celles de Cinq Avenues, site urbain.
- Le dioxyde d'azote dans le métro provient de l'air extérieur par les puits de ventilation et les prises d'air en bout de tubes. Les motrices diesel de nuit apportent, probablement à la marge car ponctuelles, des émissions d'oxyde d'azote. Les concentrations horaires les plus importantes en dioxyde d'azote sont relevées la nuit au passage des trains de travaux.

REPRESENTATION EN DIAGRAMMES EN BOITE

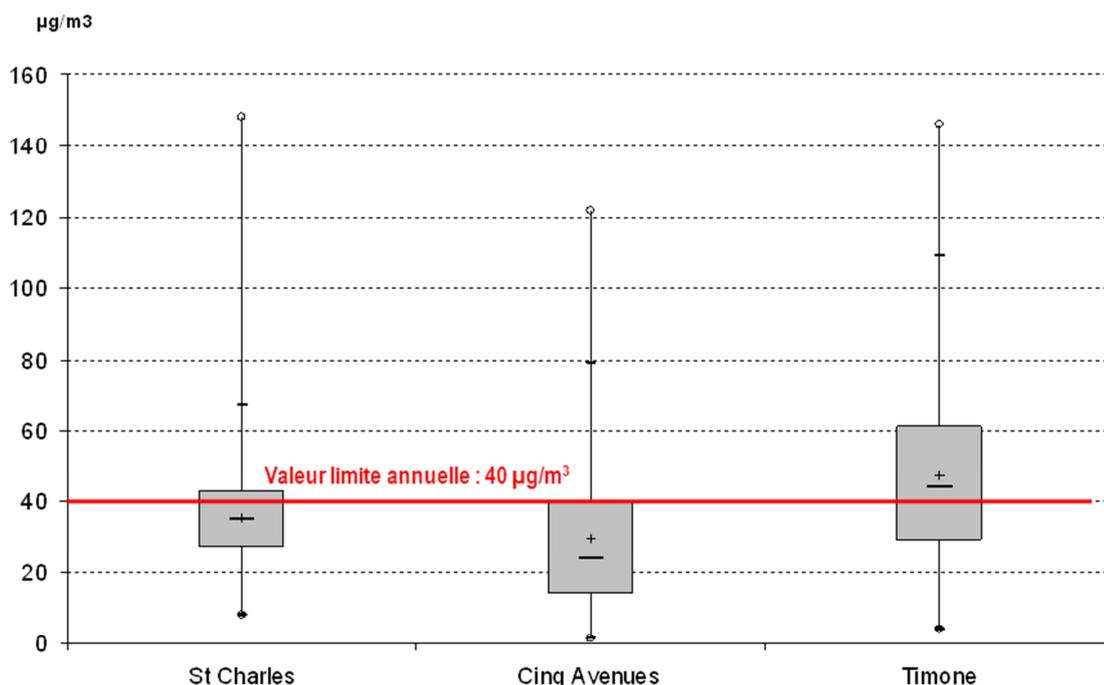


Figure 25 : Distribution des concentrations en dioxyde d'azote durant toute la période de mesure (hiver – été)

La concentration moyenne en NO_2 de Saint Charles est de $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A titre informatif, elle reste donc inférieure à la valeur limite en air extérieur ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Cette teneur moyenne en NO_2 dans le métro se situe entre les deux types de stations extérieures (Figure 25) : $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le site urbain de Cinq Avenues et $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le site trafic de la Timone.

Les valeurs de Saint Charles sont plus rapprochées que celles des stations extérieures, 50% des valeurs se répartissant sur une plage de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, contre 25 et $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Cinq Avenues et Timone. Pour Saint Charles, la moyenne et la médiane sont confondues, indiquant une répartition symétrique des valeurs, avec une valeur extrême. Il s'agit des $148 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mesurés le 5/05 à minuit. Elle correspond au passage d'une locomotive diesel (travaux de maintenance).

NIVEAUX DANS LES DIFFERENTS LIEUX ECHANTILLONNES

Tableau 13 : Résultats en dioxyde d'azote sur l'ensemble des lieux du métro échantillonnés

NO ₂ µg/m ³	Hiver 19/01 16/02	Été 01/06 29/06	Moyenne
Cast extérieur (trafic)	58	42	50
Cast Tourniquets	43	41	42
Cast boutiques	39	36	37
Cast M2 Quais	44	33	38
Cast M1 Quais	40	33	37
St Charles extérieur (trafic)	54	64	59
St Charles - Tourniquets	40	30	35
St Charles Quais	43	30	36
Saint Charles fin de quai	42	29	36
Analyseur saint Charles	41	30	36

Les teneurs en dioxyde d'azote dans le métro diminuent en fonction de la profondeur. Plus le capteur est éloigné de la surface, plus il est éloigné des sources dues au trafic routier, plus les teneurs sont faibles.

En moyenne, les concentrations baissent de 25 % de l'extérieur au plus profond de la station Castellane. Cette même diminution est estimée à 40% pour la station Saint Charles (Tableau 13).

Ce gradient s'explique par le phénomène de « dépôt sec » du dioxyde d'azote. Il est souvent retrouvé entre la rue et l'intérieur des habitats ou espaces clos : la molécule de dioxyde d'azote réagit avec les supports (murs, surfaces, etc.) de fait, la concentration intérieure diminue.

Sur tous les lieux échantillonnés dans le métro, les concentrations moyennes en dioxyde d'azote sur les deux périodes varient de 35 à 42 µg/m³. Le maximum de 42 µg/m³ correspond au niveau tourniquet de Castellane qui est proche de la surface et très influencé par les teneurs extérieures plus élevées.

Ce point soulève la question du lieu de prise d'air pour la ventilation des stations du métro. Par exemple, à Castellane, la ventilation du souterrain est faite à l'aplomb de la station de métro, c'est-à-dire sur la place Castellane. Cette place est en situation de trafic et de « dépassement » de la valeur limite pour l'air extérieur (40 µg/m³ à l'année).

De même, les sorties du métro Saint Charles sont en prise avec des voies de trafic également très empruntées.

Variation saisonnière

Dans le métro, les concentrations en dioxyde d'azote sont plus élevées en hiver et diminuent en été avec un écart d'environ 10 µg/m³ entre les deux saisons (Figure 26). Les conditions météorologiques estivales sont plus favorables à une meilleure dispersion des polluants (§ 3.1.4)

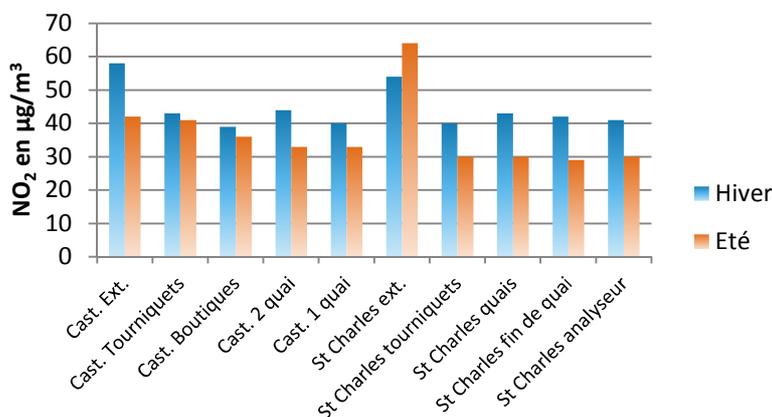


Figure 26 : Résultats en dioxyde d'azote par saison sur l'ensemble des lieux du métro échantillonnés

3.6 MESURES DE BENZENE, TOLUENE ET XYLENES DANS LE METRO

3.6.1 ORIGINE, DYNAMIQUE ET EFFETS SANITAIRES

Le benzène, le toluène et les différentes formes du xylène (BTX) sont caractéristiques de la pollution automobile. Ces substances sont retenues pour leur effet sanitaire et leur participation comme précurseurs de la pollution photochimique.

BENZENE

Le benzène est un polluant majoritairement issu, en milieu urbain, de la pollution par les transports. Il est particulièrement présent sur les axes encombrés, où les véhicules circulent à petite vitesse et sont amenés à faire de fréquents changements de régime.

Le benzène est un hydrocarbure aromatique monocyclique (HAM). Il est produit naturellement par les combustibles fossiles (évaporation) et les activités humaines qui impliquent une combustion de matière organique, telle que le bois, le charbon, et des produits pétroliers.

Les émissions des véhicules à essence sont les sources les plus importantes du benzène dans l'environnement, bien que les industries de raffinage puissent également contribuer aux niveaux globaux.

La communauté internationale porte un intérêt tout particulier aux concentrations de benzène dans l'atmosphère. En France, il est réglementé depuis le 15 février 2002 par le décret n° 2002-213 : un objectif de qualité de 2 µg/m³ en moyenne annuelle a été fixé par ce décret. La valeur limite annuelle est de 5 µg/m³.

Le benzène est un toxique, et un cancérogène classé dans le premier groupe par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Elle estime que le risque est de 6.10⁻⁶ par µg/m³ pour une exposition continue à vie. Son impact sur la santé peut se faire soit par exposition brève à des doses fortes, soit par exposition chronique à des doses relativement faibles.

En air intérieur, s'il n'existe pas de sources spécifiques (combustions), le benzène retrouvé en environnement intérieur provient majoritairement de l'extérieur. Durant le transfert d'un espace à l'autre, les teneurs en benzène restent stables. La molécule comprend six atomes de carbone et six atomes d'hydrogène. Ces derniers partagent leurs électrons et renforcent la cohésion des liaisons. La molécule est stable et ne réagit que très peu avec les surfaces des milieux clos qu'elle rencontre, contrairement au dioxyde d'azote (§ 3.5.1).

TOLUENE

Le toluène est produit par la combustion de la matière organique telle que les produits pétroliers, bois, et charbon. Les émissions de véhicule à moteur sont la source prédominante du toluène. Les peintures, diluants, adhésifs et la fumée de cigarette en contiennent (ces dernières sources se retrouvent plutôt en air intérieur).

Les effets sanitaires du toluène se manifestent par des difficultés respiratoires principalement dues à des irritations.

L'OMS fixe une valeur guide est de 260 µg/m³ pour une semaine d'exposition.

XYLENES

Dans le présent document, le terme « xylène » désigne la somme de quatre substances : éthylbenzène, ortho, méta et para -xylène.

Les émissions des véhicules et les combustions de matières organiques sont les sources principales des xylènes dans l'environnement urbain. Le xylène est un hydrocarbure pouvant être émis également par évaporation de l'essence, et par l'utilisation de produits contenant les dissolvants et les diluants.

Ces composés ne possèdent pas de valeur guide concernant les recommandations de l'OMS, mais ils jouent un rôle important en tant que précurseurs de la pollution photochimique.

3.6.2 REGLEMENTATION

NORME EN AIR INTERIEUR

Tableau 14 : Valeurs de l'HCSP (Haut Conseil de Santé Publique)

Polluant	Benzène
Valeur cible	Moyenne annuelle : 2 µg/m ³
Valeur repère	Moyenne annuelle : 5 µg/m ³
Valeur d'action rapide	Moyenne annuelle : 10 µg/m ³

NORME EN AIR EXTERIEUR

En air ambiant, seul le benzène fait l'objet de seuil à ne pas dépasser.

Tableau 15 : Valeurs du Décret du 23 octobre 2010

Polluant	Benzène
Objectif de qualité	Moyenne annuelle : 2 µg/m ³ (France uniquement)
Valeur Limite	Moyenne annuelle : 5 µg/m ³

Concernant le toluène, l'OMS propose des valeurs guides.

Tableau 16 : Valeurs de l'OMS (publiée en 1999 pour l'Europe)

Polluant	Toluène
Valeur guide	Moyenne hebdomadaire : 260 µg/m ³

3.6.3 RESULTATS

Les mesures de benzène, toluène et xylène sont effectuées à l'aide d'échantillonneurs passifs. Ces « tubes » sont exposés pendant 7 jours, 4 semaines consécutives en hiver, puis en été sur des périodes respectives allant du 19 janvier au 16 février puis du 1^{er} juin au 29 juin 2010.

Tableau 17 : Résultats en BTEX dans le métro et en air extérieur – périodes hiver et été

Périodes : 19/01 au 16/02/10 Et 01/06 au 29/06/10 Moyenne des 2 périodes, en µg/m ³	Benzène	Toluène	Ethylbenzène	m+p xylènes	o-xylènes	Rapport T/B
Métro Castellane Ligne 1 – quai (milieu et fin)	3.5	13.1	3.3	10.8	4.4	3.7
Métro Castellane Ligne 2 – quai (milieu et fin)	3.3	10.0	2.8	9.3	3.1	3.0
Métro Castellane – niveau Boutiques	3.5	13.6	3.5	11.2	4.6	3.9
Métro Castellane – Niveau Tourniquets	3.7	17.2	3.9	13.0	4.9	4.6
Place Castellane extérieur (trafic)	2.9	9.8	2.1	6.7	2.4	3.3
Métro Saint-Charles – quai (milieu et fin)	2.6	8.4	2.1	6.7	2.9	3.3
Métro Saint-Charles – Niveau Tourniquets	2.8	9.2	2.3	7.3	3.1	3.3
Place des marseillaises, extérieur Saint Charles (observation)	2.4	7.7	1.8	5.7	2.3	3.2
Station extérieure Timone (Trafic)	4.4	16.6	3.7	12.2	4.6	3.8
Station extérieure Cinq Avenues (Urbain)	1.8	4.0	0.9	2.5	1.0	2.3

- **Les teneurs moyennes en benzène, aux stations de métro** Saint Charles et Castellane, varient de 2,6 à 3,7 µg/m³, **dépassant la valeur cible pour l'air intérieur de 2 µg/m³/an. Elles respectent la valeur repère de 5 µg/m³/an.** Le rapport Toluène sur Benzène est compris entre 3 et 4,6 dans le métro tout comme pour les stations extérieures de type trafic, ce qui corrobore la source externe « trafic » du benzène.

- Les concentrations en benzène dans le métro sont équivalentes à celles constatées en situation **de trafic à l'extérieur, voire légèrement plus élevées** : le benzène, en provenance des émissions du trafic routier pénètre de l'extérieur vers l'intérieur, puis, a tendance à se concentrer dans les espaces clos, peu aérés.

Au niveau du métro, la seule source de benzène, intervenant probablement à la marge sur les concentrations moyennes, est celle des émissions des combustions des trains diesels circulant la nuit.

- Dans le métro, les concentrations en toluène apparaissent un peu plus élevées qu'en air extérieur urbain. Les valeurs vont de 9,2 µg/m³ pour Saint Charles au niveau des tourniquets à 13,1 µg/m³ pour le quai de Castellane 1. La teneur en toluène à Castellane tourniquets est plus importante – 17,2 µg/m³ - et supérieure à celle de la station trafic de la Timone. L'extraction d'air du parking souterrain de Castellane dans l'espace tourniquets du métro pourrait justifier ce résultat.
- Le benzène est une molécule relativement stable qui réagit peu avec les surfaces des espaces clos qu'il peut rencontrer. Il existe généralement peu de différence entre les concentrations en benzène relevées en air extérieur et celles mesurées en air intérieur.
- L'influence saisonnière est sensible sur le benzène : les concentrations sont plus élevées en hiver en air ambiant et par conséquent dans le métro, en raison de conditions météorologiques plus stables. Elles diminuent en été, avec un brassage de l'atmosphère plus important et une volatilité plus accentuée (Annexe VI : Résultats en BTEX dans le métro et en air extérieur par saison).

3.7 MONOXYDE DE CARBONE (CO)

3.7.1 ORIGINE ET DYNAMIQUE

Le CO (monoxyde de carbone) est un polluant issu de combustions incomplètes.

En air extérieur, il est principalement émis par l'automobile (à faible vitesse : ralentissements, bouchons), mais aussi par les chauffages domestiques. On le retrouve surtout à proximité des axes à fort trafic et en milieu confiné.

En air intérieur, le CO peut bien sûr provenir de l'air extérieur, mais également de mauvaises combustions internes de chauffage domestique, du fonctionnement d'un groupe électrogène etc. Dans le métro, le monoxyde de carbone provient essentiellement de l'environnement extérieur. Les locomotives diesels représentent aussi une source ponctuelle potentielle.

3.7.2 EFFETS SANITAIRES

Il provoque une baisse de l'oxygénation du sang (hypoxie) en se fixant à la place de l'oxygène sur l'hémoglobine. C'est aussi un neurotoxique (céphalées, troubles du comportement, vomissements) et un myocardiotoxique. Il provoque également des troubles sensoriels (vertiges).

3.7.3 REGLEMENTATION

NORME EN AIR EXTERIEUR

Tableau 18: Valeur du Décret du 23 octobre 2010

	Monoxyde de carbone (CO)
Valeur limite pour la protection de la santé humaine	10 mg/m ³ pour le maximum journalier de la moyenne glissante sur 8 heures

3.7.4 RESULTATS

Les mesures ont été réalisées à la station Saint Charles, sur une période de quatre mois.

Tableau 19 : Résultats en monoxyde de carbone dans le métro – mesure de l'hiver à l'été

Marseille	Monoxyde de carbone	Moyenne mg/m ³	Maximum horaire mg/m ³	Maximum sur 8 h mg/m ³
Métro station Saint Charles (mesures automatiques)	Du 13/01 au 25/06/10	0.4	9.9 09/06/10 – 1h	1.9
Station Cinq Avenues (urbain)	Moyenne annuelle 2009	0.2	2	1.3
Station extérieure Plombières (trafic)	Moyenne annuelle 2010	0.7	7.2	4.1

- La **concentration moyenne de CO dans le métro est de 0,4 mg/m³**, comparable à celle de **l'atmosphère urbaine du centre-ville**, et deux fois moins importante que celle des sites dit de trafic automobile dans Marseille.
- Sur la station de Métro Saint Charles, **la valeur limite annuelle de 10 mg/m³ sur 8 heures édictée pour l'air extérieur n'est pas dépassée**.
- Sur Saint Charles, **les variations horaires en monoxyde de carbone** sont dictées par la circulation automobile, et autres activités en surface et **suivent celles du dioxyde d'azote**. Ces deux polluants sont rejetés par les combustions automobiles. **Dans le métro, ils sont importés de l'extérieur**.
- **Les quelques pics de CO** observés dans le métro sont à relier aux combustions des trains diesels de nuit (Figure 27). **La source est interne, mais très ponctuelle ; elle n'influe pas sur la concentration moyenne**.

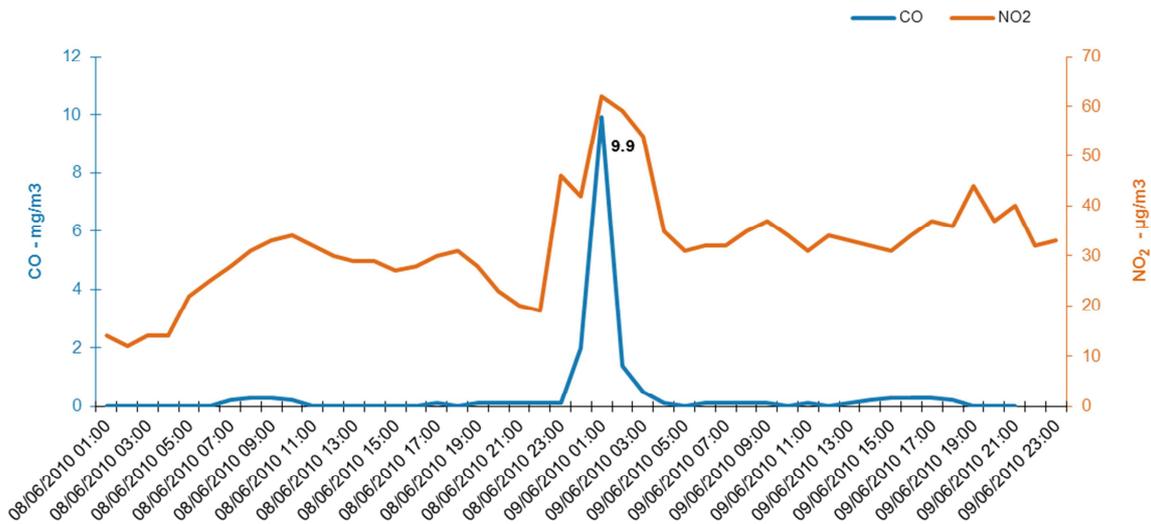


Figure 27 : Pics simultanés de NO₂ et de CO le 9/06/10 à 1h du matin lors du passage du train diesel

4 RESULTATS DES CONCENTRATIONS DANS LES RAMES

4.1 DIOXYDE DE CARBONE (CO₂)

4.1.1 ORIGINE

Le CO₂ est évalué en tant que « paramètre de confort », au même titre que l'humidité et l'hygrométrie (Annexe I : Descriptif des appareils de mesures : méthodes de mesures et utilisation). Il est indicatif du bon renouvellement de l'air dans les locaux. Il est émis essentiellement par la respiration et le chauffage en air intérieur, sinon en air extérieur, par les véhicules, unités d'incinération, et différents types de combustions ou de fermentations.

4.1.2 EFFETS SANITAIRES

Le CO₂ est un gaz habituellement suivi en tant que gaz à effet de serre. Il peut être considéré comme néfaste : en effet, au-delà d'une concentration de 1000 ppm (0,1 %), le CO₂ est un facteur déclenchant de l'asthme ou du syndrome des bâtiments humides. Mais c'est surtout à partir du seuil de 0,5 % que le CO₂ devient réellement dangereux, accompagné de symptômes spécifiques comme l'indique l'INRS (INRS, 1999).

4.1.3 RECOMMANDATION

Tableau 20 : Valeurs de référence préconisée par la norme NF EN 13779

Polluant	Dioxyde de carbone (CO ₂)
Concentration moyenne en air ambiant	390 ppm (0,039%)
Valeur de qualité de l'air modérée en air intérieur	Aération des locaux à 1000 ppm (0,1%)

4.1.4 RESULTATS

Les teneurs de CO₂ sont données en ppm, parties par million, correspondant à un pourcentage de gaz dans l'atmosphère (1000 ppm correspondent à 0.1 %).

Tableau 21 : Résultats en dioxyde de carbone dans les rames et en extérieur – été et automne

CO ₂ en ppm Moyennes sur la base de 5 trajets dans les rames sur les lignes 1 et 2, en août et en octobre 2010.	Rames lors de leur passage dans les stations du centre-ville	Rames aux terminus des lignes	Extérieur Place Castellane et rues du centre-ville	Hall de la gare Saint Charles et Hall du Noilly Paradis (Immeuble de bureaux)
Variations en ppm	400 à 800 ppm	300 à 500 ppm	300 à 400 ppm	400 à 600 ppm
	Exceptionnellement pics à 1300 et 900 ppm (lié à l'affluence dans la rame)			

- Les teneurs moyennes en CO₂ dans des rames circulantes du métro varient entre 300 et 800 ppm et se situent en dessous des 1000 ppm. Des pics se produisent sur quelques minutes, jusqu'à 1300 ppm mesurés, à mettre en relation avec une affluence accrue de passagers dans la rame aux mêmes instants.
- Les deux facteurs intervenant dans le sens de l'augmentation des teneurs de CO₂ sont le confinement et le taux de remplissage de l'espace ; ce dernier est prépondérant.

- Les teneurs moyennes des rames dans les stations du centre-ville sont plus élevées, de l'ordre de 400 à 800 ppm, car le confinement est plus important que dans les stations aériennes des terminus des lignes, mais également à cause de la fréquentation accrue de ces stations par les usagers. Aux terminus des lignes, les rames sont moins remplies, les teneurs en CO₂ sont inférieures à 500 ppm.

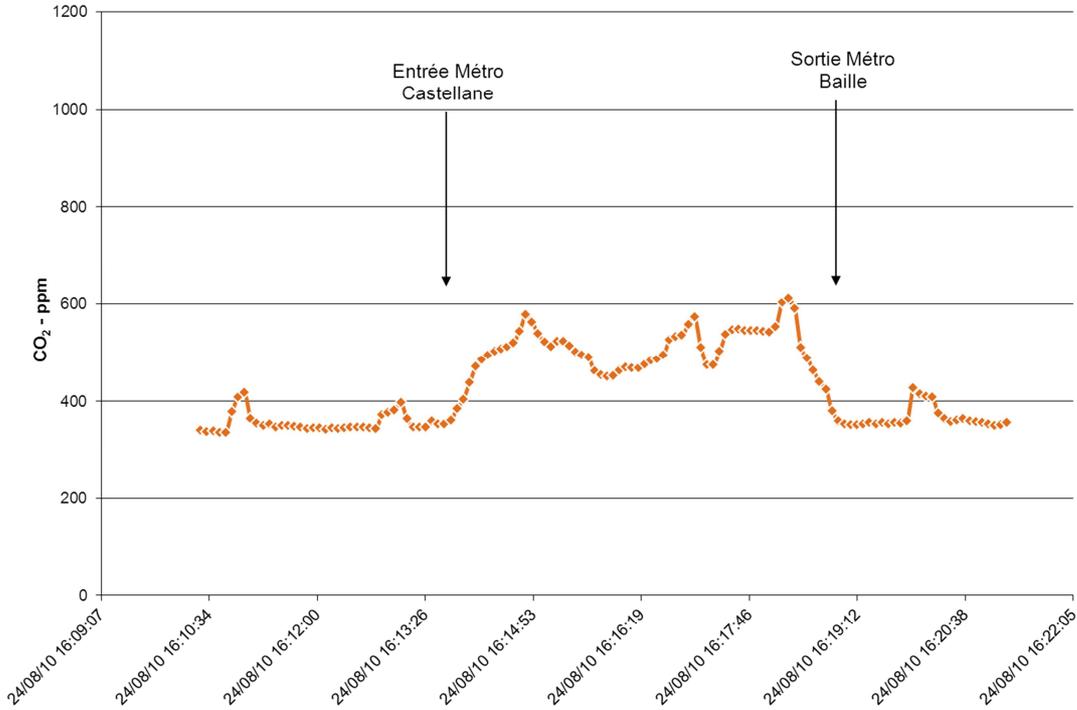


Figure 28 : Dioxyde de carbone – Ligne 1, arrêt et remplissage entre deux stations consécutives - 24/08/10

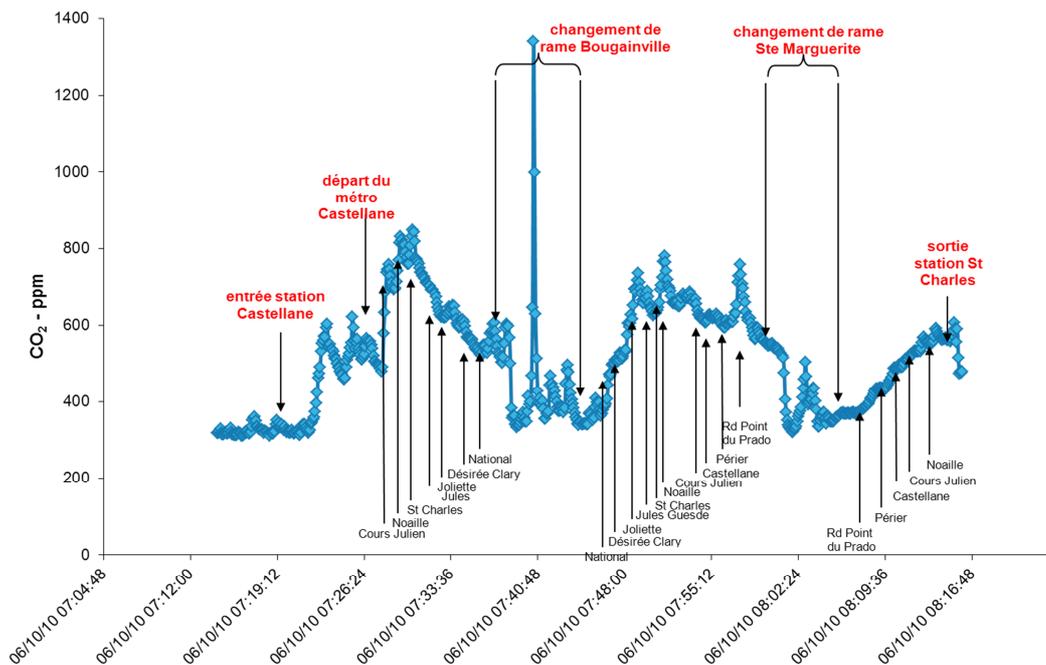


Figure 29 : Dioxyde de carbone - Ligne 2 - 06/10/2010

En air extérieur, au niveau de la Place Castellane, les teneurs en CO₂ sont autour de 300 ppm. Elles augmentent à partir du moment où nous sommes en air intérieur dans des espaces réduits et fréquentés. Ceci est constaté dans le hall de la gare Saint Charles, dans l'immeuble du Noilly Paradis (lieu des locaux d'Atmo PACA) et dans les rames sillonnant les stations de métro : les teneurs varient au-delà de 300 à 400 ppm et peuvent atteindre 1200 ppm.

Le confinement est un paramètre sensible ; l'affluence des usagers semble néanmoins être le paramètre prépondérant (Figure 28). Les teneurs en CO₂ augmentent significativement dans une rame bondée et sont moins importantes lorsque la rame est vide.

Généralement les rames étant mieux remplies dans les stations du centre-ville : les teneurs y sont les plus élevées. Aux terminus : Bougainville - Sainte Marguerite (Figure 29) et La Rose - La Fourragère, les teneurs en CO₂ diminuent.

4.2 MESURES DES PARTICULES (PM10)

4.2.1 INTRODUCTION

Pour mesurer la qualité de l'air dans les rames, des appareils portables dits PDR (Annexe I : Descriptif des appareils de mesures : méthodes de mesures et utilisation) sont utilisés ; ils livrent des concentrations en PM10 et PM2,5.

Les PDR ne nous renseignent pas sur la quantité exacte présente dans l'air mais donnent des informations sur les comportements tendanciels des poussières (en fonction de la granulométrie, de l'environnement etc.).

Les mesures ont été réalisées sur les deux lignes de métro et réparties sur 6 journées, soit 3 en hiver et 3 en été.

4.2.2 RESULTATS

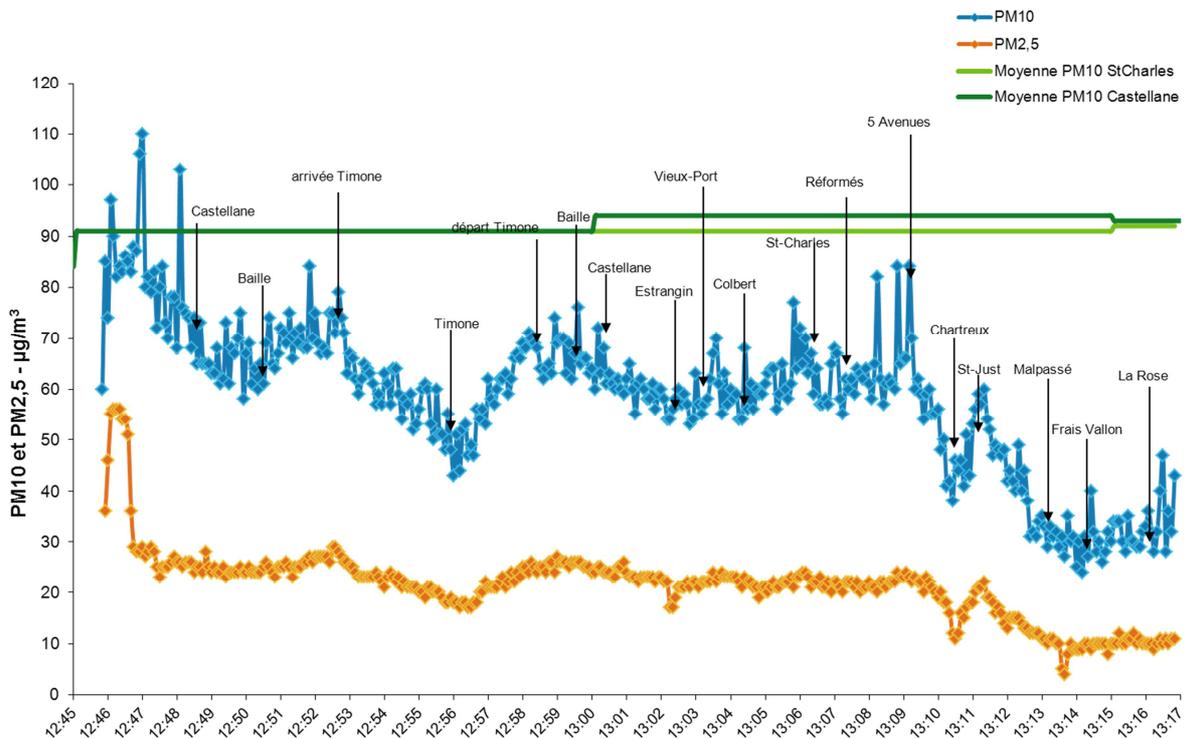


Figure 30 : Trajet du 9/02/10 sur la ligne 1

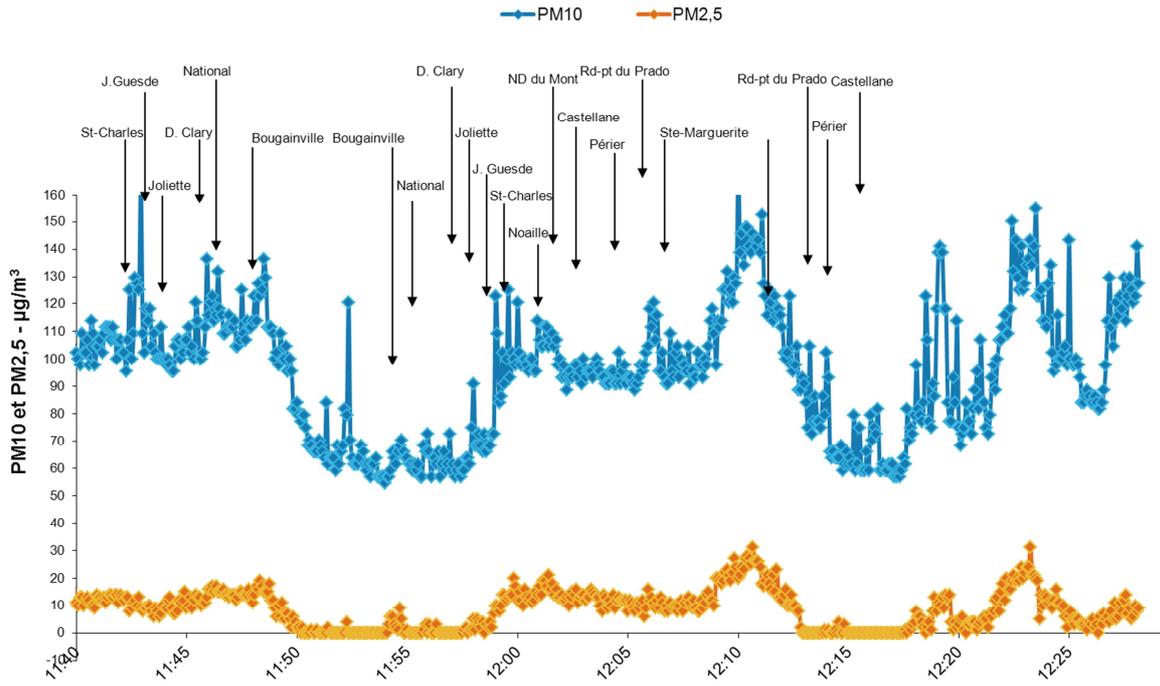


Figure 31 : Trajet du 18/06/10 sur la ligne 2

En hiver comme en été, les particules dans les rames suivent le même comportement (Figure 30 et Figure 31) :

- lorsque le métro est aérien (de Saint Just à La Rose pour la ligne 1, de Bougainville à National et du Prado à Sainte Marguerite Dromel pour la ligne 2), les concentrations sont du même ordre de grandeur que celles relevées par les stations d'Atmo PACA en air extérieur,
- dès que les rames s'engouffrent dans les tunnels, les concentrations doublent, voire triplent pour les stations de métro en centre-ville.

Lorsque le métro est aérien, c'est l'air ambiant extérieur qui renouvelle l'air dans la rame, lorsque le métro est souterrain, c'est l'air du tube, plus chargé en poussières, qui influence l'air de la rame.

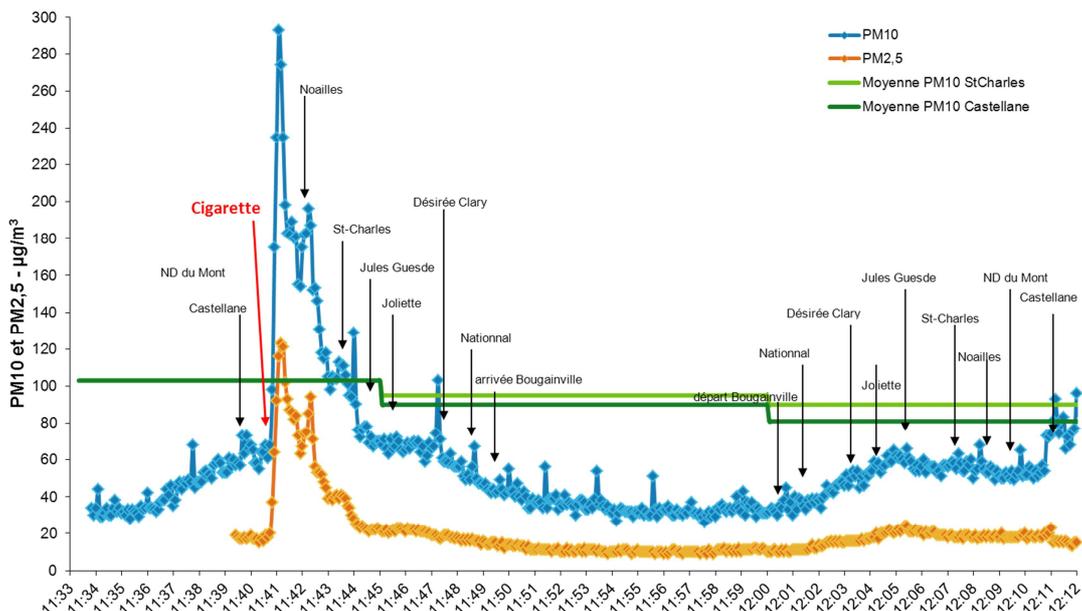


Figure 32 : Trajet du 9/02/10 sur la ligne 2

Les Figure 30, Figure 31 et Figure 32 rendent également compte de l'évolution simultanée des PM10 et des PM2,5 et de la part des PM2,5 dans les PM10.

Ces évolutions parallèles prouveraient que les sources des PM10 et PM2,5 sont les mêmes : usure des pneumatiques, frottement sur les rails, re-soulèvement pour les tronçons souterrains et apport extérieur.

La Figure 32 illustre le phénomène caractéristique de la fumée de cigarette : lorsqu'une personne monte dans la rame en recrachant sa dernière aspiration, les concentrations en PM10 et PM2,5 augmentent en flèche. Le niveau de fond dans la rame n'est retrouvé qu'au bout de trois stations.

4.3 DIOXYDE D'AZOTE (NO₂)

Les mesures ont été réalisées sur 4 semaines consécutives en hiver et en été par tubes passifs.

Les concentrations en dioxyde d'azote dans les rames pour les deux lignes sont de l'ordre de 34 µg/m³ en moyenne pour les deux saisons. Pour les deux lignes, les teneurs sont plus élevées en hiver qu'en été : 39 µg/m³ contre 29 µg/m³ (Figure 33).

Dans les rames, les concentrations restent toujours inférieures à celles des stations de métro. Les rames renouvellent mieux l'air notamment sur les parties aériennes et aux terminus.

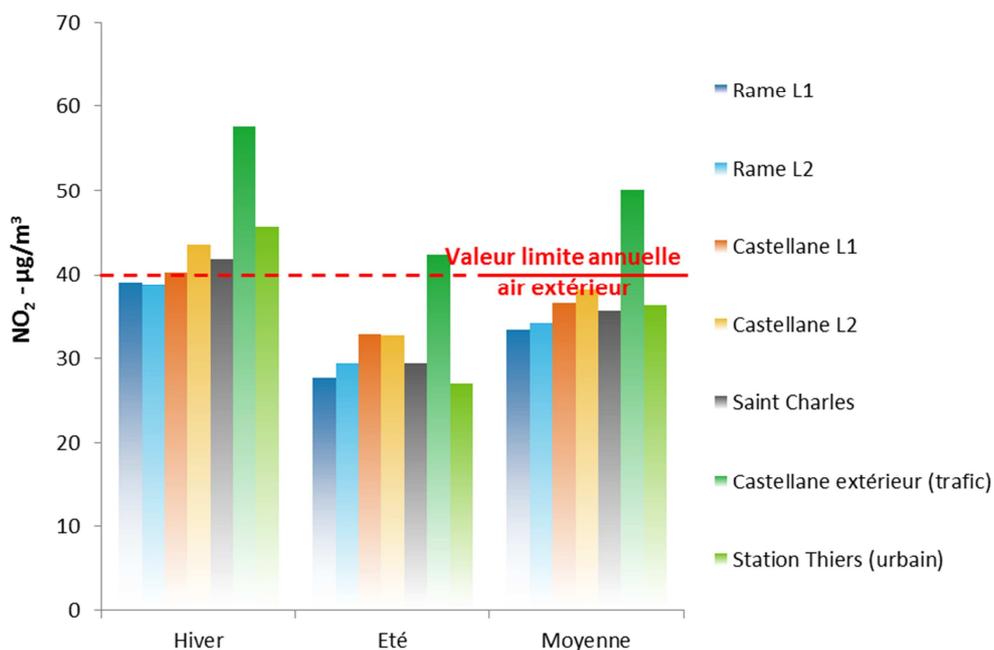


Figure 33 : Concentrations en NO₂ prélevé par tube passif, hiver, été, moyenne des deux périodes

4.4 MESURE DU BENZENE (C₆H₆)

Les mesures ont été réalisées sur 4 semaines consécutives en hiver et en été par tubes passifs.

En air intérieur, la valeur cible est de 2 µg/m³ en moyenne annuelle. La valeur repère est de 5 µg/m³ et la valeur d'action rapide ; 10 µg/m³.

Les concentrations en benzène dans les rames atteignent la valeur cible. Pour les deux lignes elles sont de l'ordre de 2,2 µg/m³ en moyenne pour les deux saisons (Figure 34). Les teneurs sont plus élevées en hiver qu'en été : 2,8 µg/m³ contre 1,6 µg/m³.

Dans les rames, les concentrations restent inférieures à celles des stations de métro. Les rames renouvellent mieux l'air sur les parties aériennes des lignes et aux terminus. En été, les concentrations dans les rames sont supérieures à la station en air extérieur de Cinq Avenues pour laquelle les teneurs sont particulièrement faibles. Cette dernière n'est que peu soumise à une source de benzène en proximité directe ; d'autre part, le benzène étant un COV, il se volatilise plus rapidement en été (§ 3.6.3).

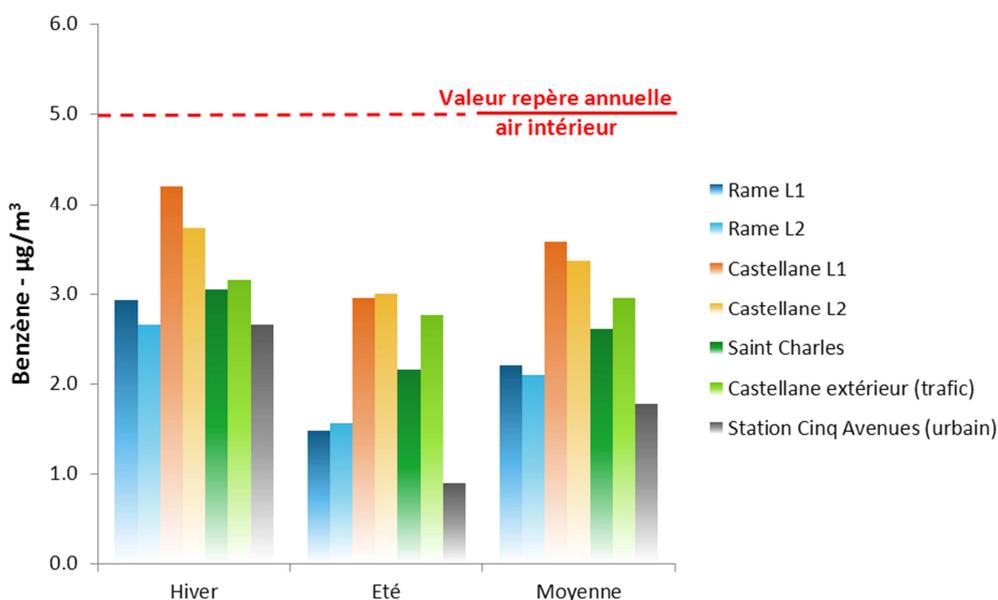


Figure 34 : Concentrations en C₆H₆ prélevé par tube passif, période hiver, été, moyenne des deux périodes

5 CONCLUSION

En vertu de la circulaire DGS/SD7-E n°2003-314 du 30 juin 2003 du Ministère de la Santé, cette première collaboration entre la RTM et Atmo PACA est consacrée à une évaluation de la qualité de l'air dans trois stations du métro (St Charles, Castellane ligne 1 et Castellane ligne 2). Deux campagnes de mesure en 2010 (hiver et été) ont été réalisées.

L'étude a été menée entre le 14 janvier et le 13 juillet 2010 ; elle a fait appel à un dispositif important pour mesurer en parallèle plusieurs polluants sur les quais, dans les rames, et en air extérieur près des stations St Charles et Castellane.

Cette surveillance a pour but d'évaluer l'exposition des usagers aux différents polluants en lien avec les normes existantes.

PARTICULES

Seules les particules font l'objet d'un calcul spécifique d'une valeur de référence en enceinte souterraine (circulaire du 30 juin 2003).

- Les valeurs de référence pour les particules sont différentes en milieu extérieur et en milieu clos.
- **La valeur de référence 2009** de la qualité de l'air pour le métro de Marseille pour **un temps de résidence de 30 min est de 332 µg/m³**. **Pour un temps de résidence au quart d'heure, la même valeur passe à 620 µg/m³**. **Pour l'année 2010, elles sont respectivement de 567 µg/m³ et 1095 µg/m³**.

Dans le métro de Marseille, les valeurs de référence 2009 et 2010 pour les usagers, calculées conformément à la circulaire du 30 juin 2003 sont respectées sur les quais des trois stations.

- Les concentrations moyennes hivernales et estivales dans le métro marseillais au niveau des stations Saint Charles et Castellane sont comprises entre 74 à 90 µg/m³. La station Castellane 2 relève les concentrations les plus élevées (90 µg/m³) ; Saint Charles et Castellane 1 obtiennent des moyennes équivalentes (resp. 78 et 74 µg/m³) Le prélèvement de particules de Castellane 2 en milieu de quai est sujet aux soulèvements de poussières par les rames et les usagers, alors que les prélèvements de Saint Charles et Castellane 1 doivent l'être un peu moins en raison de leur position en bout de quai.
- Pour les trois stations, les **concentrations en PM10 dans le métro marseillais** sont **comparables** à celles mesurées dans d'autres enceintes souterraines ou **métros de France**.
- **Les concentrations en air extérieur pendant la journée contribuent, en moyenne, à hauteur de 20% aux concentrations mesurées dans l'enceinte du métro.**
- Dans le métro, certains métaux sont observés en quantités bien supérieures à celles en environnement extérieur ; c'est le cas pour le **fer**, le **cuivre**, le zinc, le calcium et le manganèse (en ordre décroissant).

Les concentrations sommées de **ces éléments métalliques représentent en moyenne 38 % des teneurs en PM10 mesurées dans le métro.**

- **La proportion moyenne de fer dans les particules PM10 du métro marseillais représente 28%.**
Quelle que soit la station de métro, ou la période considérée, les proportions restent identiques. **Près d'un tiers des particules PM10 mesurées dans le métro sont constituées de fer.** Compte tenu du ratio extérieur/intérieur, **la source du fer est interne aux enceintes ferroviaires souterraines.**
- **Il n'a pas été détecté durant ces campagnes de fibre d'amiante ni de silice cristalline.**
- Les particules relevées dans l'enceinte du métro de Marseille proviennent majoritairement de **sources internes** : roulement des rames en circulation, usure des freins, usure des frotteurs, des pneumatiques, etc. Dans l'air du métro se retrouvent également des **particules en provenance de l'extérieur** importées par le biais de la ventilation. Les poussières sont aussi **remises en suspension** par le passage des usagers et des rames.
- Pendant la journée, les augmentations de concentrations en particules se discernent bien en matinée, parfois entre midi et deux, puis en soirée, en **relation avec la fréquentation du métro**. Enfin, les différences jour/nuit sont partout bien marquées. Aussi bien en hiver qu'en été, les variations horaires des teneurs dans les trois stations du métro coïncident avec celles des stations extérieures.

TEST DE VENTILATION

Lors du fonctionnement de la **ventilation**, il apparaît une **baisse notable des concentrations en PM10** pour la station de Castellane 2, l'effet étant plus atténué sur Saint Charles ; la diminution est **estimée à environ 25 %** lors de la mise en service du système à midi et en fin d'après-midi.

HAP

Les analyses de HAP sur St Charles indiquent des moyennes en **Benzo(a)Pyrène** en hiver et en été de 0,52 et 0,10 ng/m³ **inférieures à la valeur cible annuelle pour l'air extérieur (1 ng/m³)**. Le maximum journalier (0,89 ng/m³) reste lui aussi inférieur à ce seuil annuel. Les niveaux dans le métro restent comparables à ceux de Cinq Avenues, site de référence pour Marseille en air extérieur.

DIOXYDE D'AZOTE

Les concentrations dans le métro en dioxyde d'azote sont inférieures d'environ 30 % à celles de Timone, station de type trafic. Les teneurs dans le métro restent supérieures de 20 à 25% à celles de Cinq Avenues, site urbain plus éloigné du trafic.

Le dioxyde d'azote dans le métro provient de l'air extérieur par les puits de ventilations et les prises d'air en bout de tubes.

Sur tous les lieux échantillonnés dans le métro, les concentrations moyennes en dioxyde d'azote sur les deux périodes varient de 35 à 42 µg/m³. **Les teneurs sont proches de la valeur limite pour l'air extérieur (40 µg/m³)**. Le maximum de 42 µg/m³ correspond au niveau tourniquet de Castellane qui est proche de la surface et très influencé par les teneurs extérieures plus élevées.

Ce point soulève la question du **lieu de prise d'air** pour la ventilation des stations du métro.

BENZENE – TOLUENE – XYLENE

Les concentrations en benzène dans le métro sont équivalentes à celles constatées en situation de trafic à l'extérieur. Le benzène, en provenance des émissions du trafic automobile, pénètre, puis a tendance à se concentrer dans les espaces clos, peu aérés.

Les teneurs moyennes en **benzène**, aux stations de métro Saint Charles et Castellane, varient de 2,6 à 3,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dépassent la valeur cible annuelle fixée pour l'air intérieur de 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{an}$. **Elles respectent la valeur repère de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{an}$.**

MONOXYDE DE CARBONE

La concentration moyenne de CO mesurée à St Charles est de 0,4 mg/m^3 , comparable à celle de l'atmosphère urbaine du centre-ville, et deux fois moins importante que celle des sites dit de trafic automobile dans Marseille. **La valeur limite annuelle de 10 mg/m^3 sur 8 heures édictée pour l'air extérieur n'est pas dépassée.**

DANS LES RAMES

Les teneurs moyennes en **CO₂** dans des rames circulantes du métro varient entre 300 et 800 ppm et se situent en dessous des 1000 ppm. Les deux facteurs intervenant dans le sens de l'augmentation des teneurs de CO₂ sont le **confinement** et le **taux de remplissage** de l'espace ; ce dernier est prépondérant.

Lorsque le métro est aérien, les concentrations en **particules** sont du même ordre de grandeur que celles relevées par les stations d'Atmo PACA en extérieur. Dès que les rames s'engouffrent dans les tunnels, les concentrations doublent, voire triplent pour les stations de métro en centre-ville.

En effet, lorsque le métro est aérien, l'air ambiant extérieur renouvelle l'air dans la rame, lorsque le métro est souterrain, c'est l'air du tube qui est plus chargé en poussières.

L'évolution parallèle des PM10 et des PM2,5 prouverait que les sources des PM10 et PM2,5 sont les mêmes : usure des pneumatiques, frottement sur les rails, re-soulèvement par passage pour les tronçons souterrains, et apport extérieur.

Dans les rames, les concentrations en dioxyde d'azote et en benzène restent toujours inférieures à celles dans les stations de métro. Les rames renouvellent mieux l'air notamment sur les parties aériennes des lignes et aux terminus.

6 PERSPECTIVES

6.1 PROPOSITION DE SUIVI DE LA QUALITE DE L'AIR DANS LE METRO

La pollution principale relevée lors de cette campagne concerne les particules. Les autres polluants détectés, très liés aux concentrations en air extérieur, ne nécessitent pas un suivi régulier.

SURVEILLANCE REGULIERE DES PARTICULES

Une surveillance régulière de la pollution particulaire permettrait d'évaluer le respect chaque année de la valeur de la concentration de référence définie pour les enceintes ferroviaires en fonction du temps de résidence des usagers (conforme au calcul donné par la circulaire du 30 juin 2003) selon un protocole permettant d'échantillonner chaque année deux ou trois stations différentes.

Le suivi des concentrations en PM_{2,5} est important car il apparaît que les métaux lourds font plutôt partie de cette fraction fine (CEREGE/CNRS, 2010).

SURVEILLANCE TEMPORAIRE DES METAUX LOURDS

La surveillance régulière des particules pourrait être complétée d'une surveillance intermittente des métaux lourds au sein de ces particules. En air extérieur, il est tenu de surveiller les métaux lourds (directive n°2004/107/CE du 15/12/2004) sur un site défini pendant 14 % du temps également réparti dans l'année (4 fois 15 jours). Dans le métro, un protocole semblable pourrait être retenu.

6.2 PISTES D'AMELIORATION DE LA QUALITE DE L'AIR POUR LE METRO DE MARSEILLE

- Le rapport N° 176 du Sénat⁶, enregistré à la présidence de l'assemblée nationale du 23 janvier 2008, porte sur les risques chimiques au quotidien, éthers de glycols et polluants de l'air intérieur. Il énonce des conclusions quant aux sources polluantes et réductions possibles pour les transports en commun type métro et trains.

Les constats d'Atmo PACA concernant le métro de Marseille sont conformes à ceux synthétisés par le Sénat à partir d'analyses réalisées dans d'autres métros français :

Les principales sources de particules proviennent du matériel roulant :

- **systèmes de freinage avec usure des matériaux de freinage, usure des roues par abrasion mécanique** : émissions de poussières fines, dont les métaux lourds (le fer est l'élément prédominant).
- dans une certaine mesure probablement des phénomènes s'apparentant à de la **combustion** puisque les échauffements produisent de la chaleur.

Pour réduire ces pollutions, les actions potentielles pour le métro de Marseille pourraient s'appuyer sur celles décrites dans le rapport du Sénat (dont certaines ont été expérimentées par la RATP).

L'efficacité de certaines actions testées (train aspirateur, train laveur et nettoyage des tunnels) se pose : les gains sur les teneurs en particules sont-ils significatifs?

A l'inverse, l'amélioration de la ventilation (choix de l'emplacement des prises d'air extérieur et mise en œuvre d'une ventilation plus fréquente dans les stations et les trains) **peut réduire de façon significative les teneurs en particules**. Ce volet pourrait être exploré en priorité par la RTM.

Notons que la qualité de l'air extérieur est déterminante pour celle de l'air du métro. La réduction des émissions à l'extérieur (trafic routier) dans Marseille serait un élément positif pour l'air du métro.

⁶ <http://www.senat.fr/rap/r07-176-1/r07-176-1.html> - Troisième partie : les polluants de l'air intérieur – Chapitre II : les boîtes à voyager.

7 REFERENCES

- AIR BREIZH, 2005 : « Etude de la qualité de l'air dans le métro rennais », Air Breizh, Septembre 2005 (http://www.airbreizh.asso.fr/uploads/media/rapport_Rennes_Metro_V4.pdf)
- AIRPARIF, 2009 : « Campagne de mesure à la station de métro Faidherbe-Chaligny », partenariat AIRPARIF/RATP, (http://www.airparif.asso.fr/airparif/pdf/Rratp_20090701.pdf).
- APICE, 2011 : Common Mediterranean strategy and local practical Actions for the mitigation of Port, Industries and Cities Emissions : <http://www.apice-project.eu/index.php?lang=FRA>.
- ASPA, 2008 : « Campagne de mesure de la qualité de l'air sous la verrière de la gare de Strasbourg, du 10 au 20 avril 2008 », (www.atmo-alsace.net).
- ATMO NPC, 2009 : « Evaluation de la qualité de l'air dans les stations du métro Lillois – 2007-2008 » (http://www.atmo-npdc.fr/admin/mediatheque/SYNTHESE-FINALE_AtmoTranspole.pdf).
- CAFE, 2001 : “Clean Air For Europe” program : <http://ec.europa.eu/environment/archives/cape/index.htm>
- CEREGE/CNRS, 2010 : Etudes des particules PM10 dans le métro de Marseille.
- COPARLY, 2002 : Etude préliminaire de la qualité de l'air dans le métro Lyonnais (21 octobre - 6 novembre 2002). Disponible sur demande auprès d'Atmo Rhône Alpes.
- INRS, 1999 : Fiche toxicologique, FT 238 : dioxyde de carbone : [http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01_ftox_view/52464DFF29D88001C1256CE8005AE25F/\\$File/ft238.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01_ftox_view/52464DFF29D88001C1256CE8005AE25F/$File/ft238.pdf).
- INRS, 2009 : « Nickel et composés minéraux, Fiche toxicologique FT 68 », ([http://www.inrs.fr/INRS-PUB/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/FT+68/\\$File/visu.html](http://www.inrs.fr/INRS-PUB/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/FT+68/$File/visu.html))
- INRS, 2007 : « Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France », – ED984 aide-mémoire technique : (http://www.inrs.fr/htm/valeurs_limites_exposition_professionnelle_agents.html).
- INRS, 2006 : « Plomb, Fiche toxicologique FT 59 », ([http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/FT%2059/\\$FILE/Visu.html](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/FT%2059/$FILE/Visu.html)).
- INRS, 2002 : « Zinc et composés minéraux, Fiche toxicologique FT 75 », (http://www.inrs.fr/htm/zinc_et_composes_mineraux.html).
- INRS, 1997 : « Cadmium et composés minéraux, Fiche toxicologique FT 60 », (http://www.inrs.fr/htm/cadmium_et_composes_mineraux.html).
- ORAMIP, 2006 : « Toulouse - Mesure de qualité de l'air dans le métro - Campagnes de mesure 2005-2006. », (<http://www.oramip.org/backoffice/classeur/showCarte.php?id=204&bugMoz=0>).
- SEATON et al. , 2005 : « The London Underground : dust and hazards to health”, A. Seaton, J. Cherrie, M. Dennekamp, K. Donaldson, J.F. Hurley and C.L. Tran ; Occupational and Environmental Medicine ; 2005 ; 62 ; 355-362.
- World Health Organization Regional Office for Europe, Air Quality Guidelines for Europe, second Edition, European Series, N°91, 2000.

8 TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX

FIGURES

Figure 1: Plan de la station de métro Saint Charles avec la station de mesure (en rouge).....	6
Figure 2 : Equipement de la station Saint Charles	6
Figure 3 : Plan de la station de métro Castellane ligne 1 avec la station de mesure (en rouge).....	7
Figure 4 : Plan de la station de métro Castellane ligne 2 avec la station de mesure (en rouge).....	7
Figure 5 : Equipement de la station de métro de Castellane rames 1 et 2.....	7
Figure 6 : PM10 - Comparaison avec d'autres études similaires dans des enceintes souterraines françaises.....	13
Figure 7 : Distribution des concentrations en PM10 sur toute la période (hiver – été)	13
Figure 8 : Profil journalier moyen en particules PM10 : période estivale : du 9/06 au 13/07/10	14
Figure 9 : Comparaison hiver – été des stations Saint Charles – Cinq Avenues : Profils moyens journaliers et ratio Cinq Avenues/Saint Charles.....	15
Figure 10 : Exemple de corrélation horaire en PM10 entre les stations Saint Charles et Castellane 1 (période 12 jours)	16
Figure 11 : Exemple de corrélation horaire en PM10 entre les stations saint Charles et Castellane 2 (période 20 jours)	16
Figure 12 : Évènements atypiques à la station Saint Charles (19/01 -20/01/10).....	17
Figure 13: Evènements atypiques à la station de Saint Charles 07/02	17
Figure 14 : Profils moyens journaliers des teneurs en PM10 en fonction de la ventilation – fonctionnement de 11h30	18
Figure 15 : Profils moyens journaliers des teneurs en PM10 en fonction de la ventilation – fonctionnement de 17h30 à 18h30	18
Figure 16 : HAP - station Saint Charles – Hiver	20
Figure 17 : HAP - station Saint Charles – Été (2 filtres par jour)	20
Figure 18 : Concentrations en nickel sur les filtres journaliers – période hiver.....	25
Figure 19 : Concentrations en nickel sur les filtres journaliers – période été.....	25
Figure 20 : Contribution des métaux dans les PM10 du métro.....	27
Figure 21 : Clichés MEB : particules de l'ordre de 2 µm riche en fer (à gauche) et en cuivre (à droite)	28
Figure 22 : Relations Fe-Cu en fonction des périodes de prélèvement.....	29
Figure 23 : Relations Fe-Mn en fonction des périodes de prélèvement	29
Figure 24 : Système de freinage d'une rame.....	29
Figure 25 : Distribution des concentrations en dioxyde d'azote durant toute la période de mesure (hiver – été)..	31
Figure 26 : Résultats en dioxyde d'azote par saison sur l'ensemble des lieux du métro échantillonnés.....	32
Figure 27 : Pics simultanés de NO ₂ et de CO le 9/06/10 à 1h du matin lors du passage du train diesel.....	37
Figure 28 : Dioxyde de carbone – Ligne 1, arrêt et remplissage entre deux stations consécutives - 24/08/10	39
Figure 29 : Dioxyde de carbone - Ligne 2 - 06/10/2010	39
Figure 30 : Trajet du 9/02/10 sur la ligne 1.....	40
Figure 31 : Trajet du 18/06/10 sur la ligne 2.....	41
Figure 32 : Trajet du 9/02/10 sur la ligne 2.....	41
Figure 33 : Concentrations en NO ₂ prélevé par tube passif, hiver, été, moyenne des deux périodes.....	42
Figure 34 : Concentrations en C ₆ H ₆ prélevé par tube passif, période hiver, été, moyenne des deux périodes.....	43

TABLEAUX

Tableau 1 : Equipement des stations et durée de prélèvement	5
Tableau 2 : PM10 – Valeurs de référence à Marseille (2009) et à Paris	10
Tableau 3 : PM10 – Valeurs de référence à Marseille en 2010.....	10
Tableau 4 : PM10 - Valeurs du décret du 23 octobre 2010	11
Tableau 5 : Teneurs en PM10 - Stations de métro et stations permanentes en air ambiant.....	11
Tableau 6 : PM10 – Niveaux observés dans des enceintes souterraines en France et à Londres.	12
Tableau 7 : Valeur du Décret du 23 octobre 2010.....	19
Tableau 8 : Benzo(a)pyrène à Saint Charles et en air extérieur – périodes hiver et été	19
Tableau 9 : Valeurs du Décret du 23 octobre 2010.....	22
Tableau 10 : Résultats des métaux lourds : Moyenne par station et période de prélèvement – Maximum et minimum journaliers pour les éléments présentant des pointes	23
Tableau 11 : Valeurs du Décret du 23 octobre 2010.....	30
Tableau 12 : Résultats en dioxyde d'azote mesuré dans le métro et en air extérieur – périodes hiver et été.....	30
Tableau 13 : Résultats en dioxyde d'azote sur l'ensemble des lieux du métro échantillonnés.....	32
Tableau 14 : Valeurs de l'HCSP (Haut Conseil de Santé Publique).....	34
Tableau 15 : Valeurs du Décret du 23 octobre 2010.....	34
Tableau 16 : Valeurs de l'OMS (publiée en 1999 pour l'Europe)	34
Tableau 17 : Résultats en BTEX dans le métro et en air extérieur – périodes hiver et été	35
Tableau 18 : Valeur du Décret du 23 octobre 2010.....	36
Tableau 19 : Résultats en monoxyde de carbone dans le métro – mesure de l'hiver à l'été.....	36
Tableau 20 : Valeurs de référence préconisée par la norme NF EN 13779	38
Tableau 21 : Résultats en dioxyde de carbone dans les rames et en extérieur – été et automne	38

9 ANNEXES

9.1 ANNEXE I : DESCRIPTIF DES APPAREILS DE MESURES : METHODES DE MESURES ET UTILISATION

Analyseur de monoxyde de carbone : appareil automatique ; mesures en continu au pas de temps minimal quart horaire. Principe de mesure : absorption dans l'infrarouge

Analyseur d'oxydes d'azote : appareil automatique ; mesures en continu au pas de temps minimal quart horaire. Principe de mesure : chimiluminescence

Préleveur bas volume 1 m³/h (marque **Partisol**) : appareil semi-automatique avec passeur de filtres – prélèvement des particules sur filtre de 24heures pour analyse des métaux lourds.

Préleveur portatif à comptage optique de particules (**PDR**), appareil automatique ; mesures en continu au pas de temps quart horaire (paramétrable à partir de la minute). Principe de mesure : néphélométrie.

Microbalance à quartz (marque **TEOM**), appareil automatique ; mesures en continu au pas de temps minimal quart horaire. Principe : les particules en suspension contenues dans l'échantillon d'air se déposent sur un filtre de collection, lui-même posé sur un cristal de quartz vibrant à une fréquence de 200 Hz.

Préleveur haut débit 30 m³/h (marque **DA80**) : appareil semi-automatique avec passeur de filtres – prélèvement des particules sur filtre de 24 heures pour analyse HAP.

Préleveur portatif de CO/CO₂ température et hygrométrie, appareil automatique ; mesures en continu au pas de temps quart horaire (paramétrable à partir de la minute).

Echantillonneur passifs pour le NO₂ (ou tubes NO₂) de marque PASSAM : exposition de 7 jours puis analyse en laboratoire. Pour les tubes « short term », l'exposition minimale est de 8h.

Echantillonneur passif pour le benzène, toluène et xylènes (ou tubes BTX) de marque Radiello (code 145) : exposition possible de 8h à 7 jours.

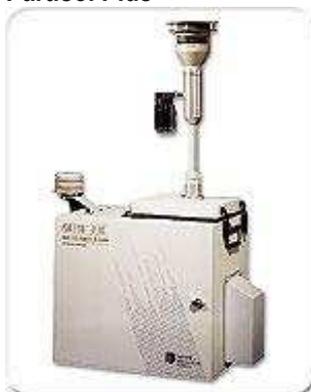
PDR



Echantillonneurs passifs



Partisol Plus



TEOM



Préleveur haut débit (DA 80)



9.2 ANNEXE II : EQUIPEMENTS DES ESPACES ECHANTILLONNES

Station 1 - Saint Charles			
milieu station	Analyseur de CO	1/4h	1 mois
	Analyseur de NO ₂	1/4h	1 mois
	TEOM PM 10	1/4h	
	Partisol (masse particules + métaux)	30 filtres journaliers (24h) + 4 blancs	1 mois
	Préleveur portatif horaire (PM10)	1/4h avec intégration horaire	1 mois
	DA80 HAP+ silice et étude minéralogique et morphologique	HAP : 7 filtres journaliers + 1 blanc Silice : 7 filtres journaliers + 1 blanc	7 jours 7 jours
	3 tubes NO ₂ + 1 blanc	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
	1 tube BTX + 1 blanc	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
station vers embouchure tunnel	1 tube NO ₂	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
	1 tube BTX	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
métro niveau tourniquets	1 tube NO ₂	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
	1 tube BTX	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
prélèvement air en surface	1 tube NO ₂	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
	1 tube BTX	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
Station 2 – Castellane M1			
milieu station	TEOM PM 10	1/4h	
	Partisol (masse particules + métaux)	14 filtres journaliers (24h) + 2 blancs	15 jours
	1 tube NO ₂	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
	1 tube BTX	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
station vers embouchure tunnel	1 tube NO ₂	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
	1 tube BTX	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
Station 3 – Castellane M2			
milieu station	TEOM PM 10	1/4h	
	Partisol (masse particules + métaux)	14 filtres journaliers (24h) + 2 blancs	15 jours
	1 tube NO ₂	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
	1 tube BTX	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
station vers embouchure tunnel	1 tube NO ₂	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
	1 tube BTX	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
Castellane Niveau intermédiaire	1 tube NO ₂	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
	1 tube BTX	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
Castellane Niveau tourniquets	1 tube NO ₂	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
	1 tube BTX	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
Prélèvement en surface rond point	1 tube NO ₂	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
	1 tube BTX	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
Rame 1 - du métro 1			
Début de rame	Préleveur portatif horaire (PM10)	5 s avec intégration horaire	3 A/R
	1 tube NO ₂	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
	1 tube BTX	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
Fin de rame	1 tube NO ₂	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
	1 tube BTX	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
Rame 2 - du métro 2			
Début de rame	Préleveur portatif horaire (PM10)	5 s avec intégration horaire	3 A/R
	1 tube NO ₂	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
	1 tube BTX	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
Fin de rame	1 tube NO ₂	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
	1 tube BTX	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours
Correction tubes NO ₂ avec station extérieure Thiers	3 tubes NO ₂	tubes passifs sur période de 7j	4 fois 7 jours

9.3 ANNEXE III : CIRCULAIRE N° 2003-314 DU 30 JUIN 2003

MINISTÈRE DE LA SANTÉ, DE LA FAMILLE
ET DES PERSONNES HANDICAPÉES
Direction générale de la santé
Sous direction de la gestion
des risques des milieux
Bureau de l'air, des sols et des déchets

**Circulaire DGS/SD 7 B n° 2003-314 du 30 juin 2003 relative
à la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines
NOR: SANP0330421C**

Bulletin officiel n° 2003-38

Date d'application : immédiate.

Références :

Loi n° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie ;
Décret n° 2002-213 du 15 février 2002 portant transposition des directives 1999/30/CE et 2000/69/CE.
Textes abrogés ou modifiés : néant.

Le ministre de la santé, de la famille et des personnes handicapées à Mesdames et Messieurs les préfets de région (directions régionales des affaires sanitaires et sociales [pour attribution]) ; Mesdames et Messieurs les préfets de département (directions départementales des affaires sanitaires et sociales [pour attribution]) Le Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPPF) a réalisé en 2001 un rapport sur la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines, disponible sur Intranet (RESE) et a adopté le 5 avril et le 5 mai 2001 deux avis que vous trouverez en annexe :

- l'avis du 5 avril 2001 recommande de développer la surveillance de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines des agglomérations concernées et de présenter les résultats obtenus au CSHPF dans un rapport annuel public ;
- l'avis du 5 mai 2001 recommande un niveau d'exposition journalier moyen des citadins aux PM10 (particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 10 µm) inférieur à la valeur limite journalière fixée dans l'air ambiant par la directive européenne 1999/30/CE du 22 avril 1999, transposée par le décret n° 2002-213 du 15 février 2002.

Je vous demande de transmettre ces deux avis aux exploitants de transports collectifs ferroviaires souterrains de votre région et de faire appliquer ces recommandations. Cela concerne les métros de Paris, Lyon, Marseille, Toulouse, Lille, Rennes, Rouen et bientôt Clermont-Ferrand ainsi que les enceintes ferroviaires souterraines dépendant de la SNCF où les voyageurs séjournent (gares souterraines, parties de réseau souterraines).

Je souhaite que les exploitants concernés mènent les actions suivantes :

- définition d'un plan de surveillance de la qualité de l'air visant à connaître l'exposition aux polluants atmosphériques des usagers. Seront en particulier mesurées les concentrations massiques en PM 10 (le dispositif devant permettre d'apprécier les concentrations horaires), les concentrations en hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) et en dioxyde d'azote (NO₂). Concernant les PM 10, leur nature chimique sera caractérisée en déterminant leur teneur en métaux (fer, nickel, chrome, manganèse, plomb, cadmium), en silice cristalline, en fibres et en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ;
- identification des sources de polluants et définition d'une stratégie de réduction des émissions.

L'ensemble de ces plans et résultats sera soumis au CSHPF.

Afin de guider l'action des exploitants concernant les concentrations en PM 10 et en l'état actuel des connaissances, ces derniers pourront se reporter aux valeurs de référence établies par le CSHPF.

Je vous demande de me faire part, sous le présent timbre, des difficultés que vous rencontrerez dans la mise en œuvre de la présente circulaire.

Le directeur général de la santé,

Professeur L. Abenhaim
ANNEXE I
Direction générale de la santé
Bureau air, sols, déchets

Avis du conseil supérieur d'hygiène publique de France relatif à la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines ; section des milieux de vie, séance du 5 avril 2001

NOR : MESP0130150V

(Texte paru au Bulletin officiel n° 2001-16)

Considérant que les concentrations de particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 10 µm (PM10) mesurées par microbalance à élément oscillant (TEOM) sur les deux stations fixes du réseau SQUALES (Châtelet et Franklin-Roosevelt) situées sur deux lignes de type pneumatique sont élevées, 4 à 7 fois supérieures, en moyenne, aux concentrations fournies par les stations de fond du réseau francilien de surveillance de qualité de l'air AIRPARIF et 2 à 3 fois supérieures aux valeurs des stations de proximité du trafic automobile ;

Considérant que les teneurs horaires de PM10 présentent un profil journalier caractérisé par des valeurs maximales aux heures de pointes de fréquentation (entre 8 et 10 heures et 16 et 18 heures) et nettement diminuées au milieu de la nuit ;

Considérant que les campagnes de mesurages, isolées ou répétées, menées dans des stations situées sur des lignes de type « fer » (Bréguet-Sabin, ligne 5, Pont-Marie, ligne 7, Charonne, ligne 9) et sur une ligne de type pneumatique (Saint-Sulpice, ligne 4) révèlent des disparités importantes de concentrations massiques de PM10, allant de 60 à plus de 500 µg/m³ ;

Considérant que la cartographie de l'empoussièrement du métro parisien, réalisée à partir de prélèvements ponctuels à l'aide d'un appareil portable photométrique (DUST TRAK), confirme des niveaux élevés de PM10, disparates selon les lignes, voire selon les stations d'une même ligne ;

Considérant que les études sur bancs d'essais des poussières issues des matériaux de freinage et l'analyse chimique sans spéciation des particules recueillies dans quelques stations du métropolitain ne permettent pas actuellement d'attribuer aux poussières du réseau ferré souterrain une toxicité différente de celles présentes dans l'air extérieur ;

Considérant que les premiers résultats des campagnes de mesurages effectuées dans différentes gares souterraines de la SNCF mettent en évidence des teneurs de PM10 comprises entre 60 et 250 µg/m³.

Considérant les nombreuses données épidémiologiques et expérimentales faisant état des effets biologiques et sanitaires à court terme, associés aux teneurs journalières en PM10, ainsi que les travaux épidémiologiques plus récents sur les effets à long terme ;

Considérant la saisine de l'Institut de veille sanitaire par la direction générale de la santé sur l'opportunité et la faisabilité d'une étude épidémiologique auprès des personnels travaillant dans les enceintes ferroviaires souterraines ;

Considérant que les concentrations de dioxyde d'azote mesurées sur les deux stations du réseau SQUALES sont intermédiaires entre les valeurs observées par les stations de fond et celles relevées par les stations de proximité automobile du réseau AIRPARIF ;

Considérant que les mesurages d'hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) à la station Pont-Marie conduisent à des valeurs supérieures à celles enregistrées simultanément à l'extérieur (dans un rapport de 1,5 à 3,5) mais que ces résultats méritent confirmation, en raison du faible nombre de prélèvements ;

Considérant la configuration du réseau ferré parisien ainsi que les résultats de l'enquête globale des transports (EGT) et de l'enquête relative au trafic journalier du réseau ferré (TJRF) conduite par la RATP en 1997 ;

Le conseil formule des recommandations visant à améliorer la connaissance de l'exposition aux polluants atmosphériques des usagers des enceintes ferroviaires souterraines ; ces recommandations concernent, sur l'ensemble du territoire, les stations, les quais et les rames dans le cas des métros, et surtout les gares pour la SNCF, les parcours souterrains y étant beaucoup plus limités.

Ainsi, le conseil :

- estime qu'il est nécessaire de mieux connaître les habitudes de fréquentation des enceintes ferroviaires souterraines, notamment la distribution des temps journaliers de déplacement en fonction des caractéristiques sociodémographiques des citadins et recommande, à cette fin, d'exploiter au mieux les réponses issues de l'enquête TJRF de 1997 et de mener des enquêtes complémentaires auprès des usagers ;
- juge indispensable que soit étendue la surveillance des concentrations massiques de PM10 dans les enceintes ferroviaires souterraines et préconise la mise en place d'un dispositif de surveillance permettant d'apprécier les concentrations horaires de PM10 auxquelles sont exposés les usagers, tant au cours de leurs trajets que de leurs passages dans les couloirs et sur les quais, tout particulièrement dans les gares souterraines, les mesures de PM10 devant être obtenues par méthode gravimétrique ou par toute autre méthode équivalente ;

En préalable à la définition de la stratégie de surveillance, recommande :

- de tester la faisabilité de mesurages des concentrations massiques de PM10 dans le matériel roulant ;
- de dresser une typologie des lignes et des stations en fonction des sources potentielles de particules (nature des matériaux de roulement, des systèmes de freinage et de guidage, du ballast) et des facteurs susceptibles d'influencer les concentrations particulières (configuration des stations, notamment profondeur, pente et existence de correspondances, modalités d'aération et de ventilation, nombre de voyageurs) ; l'exploitation des données existantes, par des méthodes d'analyses statistiques variées, est susceptible d'aider à déterminer l'importance relative des sources et des différents paramètres contributifs évoqués ci-dessus ;
- propose que l'exposition des usagers au cours de divers trajets sur l'ensemble du réseau soit aussi évaluée par des mesurages individuels, grâce à des dispositifs portables ;
- désire que soient réalisées des études complémentaires dans le but de mieux caractériser la nature chimique des particules PM10, en déterminant leur teneur en métaux (fer, nickel, chrome, manganèse, plomb, cadmium), en silice cristalline, en fibres et en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ; pour ces derniers, il est conseillé de rechercher les neuf composés faisant déjà l'objet de mesurages dans l'atmosphère urbaine ;
- demande également que dans les enceintes ferroviaires souterraines, soient évaluées les concentrations en hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) et en dioxyde d'azote (NO₂) ; dans ce but, suggère d'effectuer une cartographie de ces aéro-contaminants au sein du réseau, en utilisant des capteurs passifs dans les rames et dans les stations (quais et couloirs) ; dans une phase pilote, ces mesurages pourront concerner un échantillon représentatif des rames et des stations ; leurs résultats indiqueront si ce programme doit être étendu, voire complété par des mesurages effectués grâce à des analyseurs automatiques ;
- souhaite que des études et des stratégies de surveillance de la qualité de l'air soient développées dans les enceintes ferroviaires souterraines de toutes les agglomérations françaises concernées ; les résultats obtenus devraient faire l'objet d'un rapport annuel présenté au conseil supérieur d'hygiène publique de France, puis rendu public.

ANNEXE II
Direction générale de la santé
Bureau SD 7 B

Avis du 5 mai 2001 du conseil supérieur d'hygiène publique de France, section des milieux de vie, relatif à l'élaboration de valeurs guides de qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines

NOR : MESP0130150V
(Texte paru au Bulletin officiel n° 2001-20)

Considérant les avis du conseil supérieur d'hygiène publique de France relatifs à la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines, avis rendus le 10 octobre 2000 et le 5 avril 2001 ;

Considérant les études menées en Ile-de-France par la RATP et la SNCF qui montrent que les particules constituent un polluant majeur des réseaux ferrés souterrains ;

Considérant que dans les réseaux ferrés souterrains franciliens, les teneurs horaires de particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 10 μm (PM10), très disparates selon les lignes, présentent un profil journalier caractérisé par des valeurs maximales pouvant atteindre, aux heures de pointes de fréquentation, 1 000 $\mu\text{g.m}^3$;

Considérant les nombreuses données épidémiologiques et expérimentales faisant état des effets biologiques et sanitaires à court terme associés aux concentrations journalières de PM10 dans l'air ambiant et considérant les travaux épidémiologiques plus récents sur les effets à long terme ;

Considérant le caractère cumulatif de l'exposition aux particules et des risques qui lui sont associés, tant à court terme qu'à long terme ;

Considérant que la directive 1999/30/CE du conseil du 22 avril 1999 établit, pour les concentrations de PM10 dans l'air ambiant, une valeur limite journalière pour la protection de la santé humaine à ne pas dépasser plus de 35 fois par année civile, en 2005 ; considérant que, compte tenu de la marge de dépassement provisoirement autorisée, cette valeur limite journalière est fixée à 70 $\mu\text{g.m}^3$ à partir du 1er janvier 2001, mais doit atteindre 50 $\mu\text{g.m}^3$ au 1er janvier 2005 ;

Considérant la configuration du réseau ferré parisien ainsi que les résultats de l'enquête globale des transports (EGT) et de l'enquête relative au trafic journalier du réseau ferré (TJRF) conduite par la RATP en 1997, d'où il ressort que certains usagers peuvent passer plus de deux heures par jour dans le réseau ferré souterrain francilien ;

Considérant la saisine du conseil supérieur d'hygiène publique de France par la direction générale de la santé sur la possibilité de fixer des valeurs guides de qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines,

Le conseil :

Juge qu'il est possible et souhaitable de déterminer, dans les enceintes ferroviaires souterraines, des valeurs de référence de qualité de l'air qui permettent de guider l'action des exploitants, dans le but d'assurer la protection de la santé de l'ensemble des usagers, y compris des plus sensibles d'entre eux ;

Recommande qu'en l'état actuel des connaissances, ces valeurs portent sur les teneurs massiques de PM10 mesurées par méthode gravimétrique ou par toute autre méthode équivalente, dans le cadre du dispositif de surveillance dont la mise en place a été préconisée par le conseil supérieur d'hygiène publique de France (avis en date du 5 avril 2001), afin d'apprécier les concentrations de PM10 auxquelles sont exposés les usagers, tant au cours de leurs trajets que de leurs passages dans les couloirs et sur les quais ;

Estime que la valeur limite journalière de PM10 fixée dans l'air ambiant par la directive européenne 1999/30/CE n'est pas directement applicable aux enceintes ferroviaires souterraines dans lesquelles le temps passé par un citoyen ne représente qu'une fraction de sa journée, mais peut servir de référence à visée sanitaire pour une exposition journalière ;

Préconise, afin de tenir compte de ce temps de séjour, de déterminer pour ces enceintes, des valeurs, dénommées « valeurs de référence », exprimées sur un pas de temps horaire, tout en s'appuyant sur la valeur limite journalière de la directive européenne 1999/30/CE ;

Adopte, pour établir ces valeurs de référence, une démarche basée sur la notion d'exposition cumulée des usagers qui pondère les teneurs atmosphériques particulières subies dans les différents environnements fréquentés, par le temps passé dans ces environnements au cours d'une journée ;

Prend acte, dans l'attente de données plus précises, de ce que les concentrations particulières dans les milieux intérieurs autres que les enceintes ferroviaires souterraines sont, en l'absence de sources spécifiques, du même ordre de grandeur que les concentrations ambiantes ;

Rappelle que les sources spécifiques intérieures sont dominées par le tabagisme qui lui, relève, en grande partie, de la responsabilité individuelle et que les expositions professionnelles n'entrent pas dans le champ du présent avis,

Considère :

- que le citoyen ne doit pas être exposé à une concentration de PM₁₀ moyennée sur la journée, supérieure à la valeur limite journalière fixée dans l'air ambiant par la directive européenne 1999/30/CE ;
- que le séjour de l'usager dans les enceintes ferroviaires souterraines ne doit pas occasionner pour lui une surexposition susceptible d'entraîner un dépassement de la valeur limite journalière de la directive européenne 1999/30/CE, même les jours où les concentrations particulières sont élevées dans l'air extérieur ;
- évalue, en conséquence, selon le mode de calcul exposé en annexe, la contribution maximale de ces enceintes souterraines à l'exposition personnelle qui soit tolérable, par référence à la valeur limite journalière de la directive européenne 1999/30/CE ;
- applique cette démarche aux enceintes ferroviaires souterraines franciliennes, en envisageant différents scénarios (présentés en annexe), selon les estimations du temps de séjour de l'usager dans ces enceintes ;
- estime que, compte tenu des connaissances et des données disponibles, le choix d'une durée de deux heures correspondant au percentile 90 des temps cumulés de déplacement aux heures de pointe du matin et du soir sur le réseau ferré francilien (parcours souterrains et aériens confondus) conduit à une valeur de référence de la qualité de l'air permettant de protéger au moins 90 % des usagers ;
- souligne que les valeurs résultant de ce mode de calcul sont susceptibles d'être reconsidérées à la lumière de nouvelles données sur la toxicité des particules, sur les niveaux d'exposition des citoyens, à l'extérieur et dans d'autres micro-environnements, ainsi que sur les durées de trajet dans les enceintes ferroviaires souterraines ;
- précise que cette démarche est transposable aux enceintes ferroviaires souterraines autres que franciliennes en prenant en compte les particularités de celles-ci.

Le conseil recommande aux exploitants ferroviaires, pour atteindre les objectifs énoncés ci-dessus, d'intensifier, dès à présent, les actions d'identification des sources et de réduction des niveaux d'aéro-contamination particulière dans les enceintes ferroviaires souterraines ; il leur suggère de se rapprocher de leurs homologues étrangers. Il attire également l'attention des exploitants sur la nécessité de faire respecter l'interdiction du tabagisme.

Enfin le conseil leur demande d'établir un plan pluriannuel de réduction de la pollution particulière dans les enceintes ferroviaires souterraines en complément des plans régionaux pour la qualité de l'air (PRQA) et en cohérence avec les plans de déplacements urbains (PDU).

MODALITÉS DE CALCUL DES VALEURS DE RÉFÉRENCE DE QUALITÉ DE L'AIR DANS LES ENCEINTES FERROVIAIRES SOUTERRAINES ET APPLICATION À LA SITUATION FRANCILIENNE

L'exposition atmosphérique aux PM10 d'un individu qui passe un temps T dans un environnement caractérisé par une teneur ambiante C de PM10 se définit par le produit (C*T). Son exposition atmosphérique E cumulée sur la journée correspond à la somme des expositions qu'il subit dans les différents environnements N qu'il fréquente.

$$E_{\text{jour}} = E_{\text{env1}} + E_{\text{env2}} + \dots + E_{\text{envN}}$$

En individualisant les enceintes ferroviaires souterraines (sout) au sein des autres environnements fréquentés par le citadin, environnements dont les teneurs particulières sont assimilées à celles issues des stations de mesure de la pollution urbaine de fond (ext), il vient :

$$E_{\text{jour}} = E_{\text{sout}} + E_{\text{ext}}$$

$$E_{\text{jour}} = (C_{\text{sout}} * T_{\text{sout}}) + (C_{\text{ext}} * T_{\text{ext}})$$

avec $T_{\text{sout}} + T_{\text{ext}} = 24$ heures

Si l'on considère qu'au cours de sa journée, le citadin ne doit pas être exposé globalement à une teneur moyenne qui excède la valeur limite journalière CLim de la directive européenne, son exposition atmosphérique E cumulée sur 24 heures doit rester inférieure à la valeur (CLim* 24). μg a donc :

$$E_{\text{jour}} < C_{\text{Lim}} * 24$$

Cette valeur CLim doit être respectée, y compris les jours où les concentrations extérieures particulières sont élevées. Sachant que la directive européenne autorise, pour la période 2000-2005, trente-cinq dépassements par an de la valeur CLim, soit environ 10 % des jours de l'année, la valeur ambiante Cext choisie correspondra au percentile 90 (P90ext) de la distribution des teneurs ambiantes journalières de PM10 [moyenne des percentiles 90 des valeurs journalières de PM10 issues des stations urbaines de fond du réseau francilien de surveillance de la qualité de l'air (Airparif)].

La valeur Csout à préconiser dans les enceintes ferroviaires souterraines doit alors satisfaire à l'équation suivante :

$$(C_{\text{sout}} * T_{\text{sout}}) + [P90_{\text{ext}} * (24 - T_{\text{sout}})] < C_{\text{Lim}} * 24$$

Le tableau suivant présente les valeurs calculées pour huit scénarios correspondant à quatre durées quotidiennes de séjour dans les enceintes ferroviaires souterraines (durées variant de 1 h 30 à 2 h 15) et à deux périodes distinctes, l'année en cours et l'année 2005, date d'application de la valeur CLim dans l'Union européenne.

	2001	2005
	CLim = 50 + 40 %, soit 70 $\mu\text{g.m}^{-3}$	CLim = 50 $\mu\text{g.m}^{-3}$
	P90ext = 33 $\mu\text{g.m}^{-3}$	P90ext* = 23 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Tsout = 1 h 30	Csout < 625 $\mu\text{g.m}^{-3}$	Csout < 455 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Tsout = 1 h 45	Csout < 540 $\mu\text{g.m}^{-3}$	Csout < 393 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Tsout = 2 heures	Csout < 477 $\mu\text{g.m}^{-3}$	Csout < 347 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Tsout = 2 h 15	Csout < 428 $\mu\text{g.m}^{-3}$	Csout < 311 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Estimation adoptée par le groupe de travail « Qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines » à partir des prévisions d'Airparif.		

9.4 ANNEXE IV : DEFINITION DES TERMES REGLEMENTAIRES

- Objectif de qualité ; un niveau à atteindre à long terme et à maintenir, 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 dans son ensemble.
- Valeur cible ; un niveau à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné, et fixé afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou l'environnement dans son ensemble.
- Valeur limite ; un niveau à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser, et fixé sur la base des connaissances scientifiques afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble.
- Marge de dépassement ; l'excédent par rapport à la valeur limite qui peut être admis dans les conditions fixées par le présent code.
- Niveau critique ; un niveau fixé sur la base des connaissances scientifiques, au-delà duquel des effets nocifs directs peuvent se produire sur certains récepteurs, tels que les arbres, les autres plantes ou écosystèmes naturels, à l'exclusion des êtres humains.
- Seuil d'information et de recommandation ; un niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine de groupes particulièrement sensibles au sein de la population et qui rend nécessaires l'émission d'informations immédiates et adéquates à destination de ces groupes et des recommandations pour réduire certaines émissions.
- Seuil d'alerte ; un niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé de l'ensemble de la population ou de dégradation de l'environnement, justifiant l'intervention de mesures d'urgence.

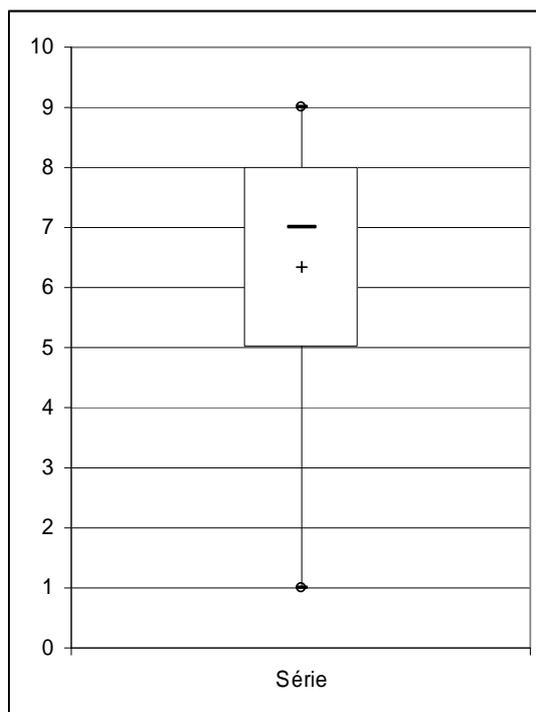
Source : Code de l'environnement, article R221-1

9.5 ANNEXE V : DIAGRAMME EN BOÎTE

La boîte à « moustache » ou « diagramme de Tuckey » est une représentation statistique d'un échantillon de données pour un même critère. Cette représentation comprend la médiane, la moyenne, le premier et troisième quartile, le premier et le neuvième décile et les valeurs aberrantes.

Lecture et interprétation d'une boîte à moustaches :

Soit une série de données : 1, 5, 9, 8, 6, 7, 5, 8, 8, 9, 6, 8, 4, 7, 2, 6, 9, et la boîte à moustache associée :



Caractéristiques

La croix au milieu de la boîte représente la moyenne, le tiret dans la boîte la médiane, le côté du bas de la boîte le 1^{er} quartile et le côté du haut le 3^{ème} quartile, l'extrémité en bas du segment le 1^{er} décile et l'extrémité en haut le 9^{ème} décile. L'utilisation des 1^{er} et 9^{ème} déciles permet souvent de s'affranchir des valeurs aberrantes (extrêmement faibles ou élevées) souvent représentées par des points dans la continuité de l'axe vertical.

Interprétation

Le diagramme nous permet d'affirmer que 80% des données sont comprises entre 1 et 9 (grâce aux 1^{er} et 9^{ème} déciles).

Un bon nombre de données se concentre davantage vers des valeurs élevées.

- 50% des données sont comprises entre 5 et 8 (grâce aux 1^{er} et 3^{ème} quartiles),
- 50% des données sont égales et/ou supérieures à 7 (médiane).

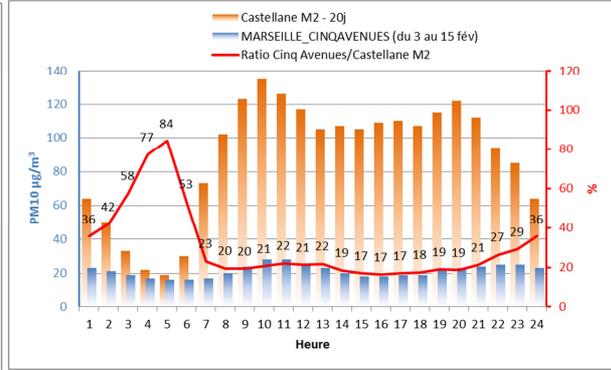
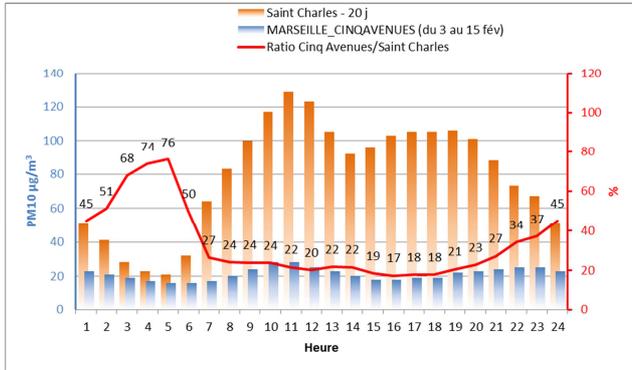
De plus, le diagramme nous indique la position de la moyenne par rapport à la médiane : dans notre cas, la moyenne est inférieure à la médiane, ce qui signifie que les valeurs faibles sont rares en termes d'effectif, mais aussi qu'elles sont très faibles en termes de chiffre.

9.6 ANNEXE VI : RESULTATS EN BTEX DANS LE METRO ET EN AIR EXTERIEUR PAR SAISON

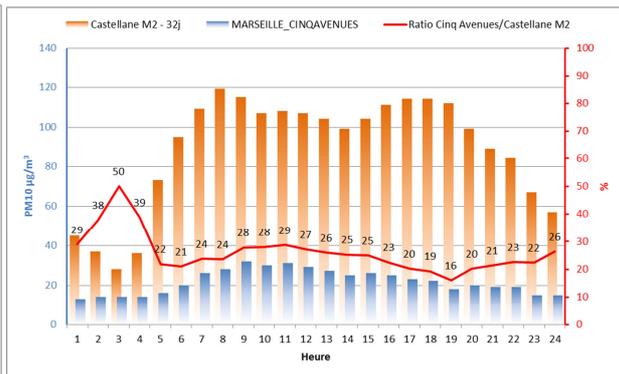
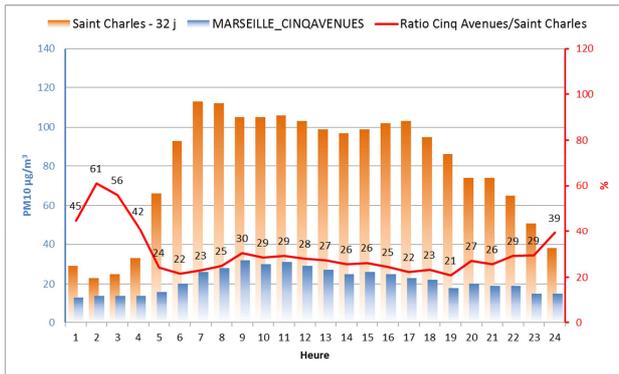
en µg/m ³	site	HIVER du 19/01/10 au 16/02/10						ETE du 01/06/10 au 29/06/10						Moyenne des 2 périodes					
		Benzène	Toluène	Ethyl- benzène	m+p- xylène	o- xylène	site	Benzène	Toluène	Ethyl- benzène	m+p- xylène	o- xylène	Benzène	Toluène	Ethyl- benzène	m+p- xylène	o- xylène	rapport T/B	
																			Benzène
	M1 Castellane milieu de quai	4.0	13.1	3.9	11.6	4.7	M1 Castellane milieu de quai	3.1	13.4	2.9	10.6	4.1	3.6	13.2	3.4	11.1	4.4	3.7	
	M1 Castellane fin de quai	4.3	15.5	4.3	12.8	5.7	M1 Castellane fin de quai	2.7	10.6	2.2	8.3	3.2	3.5	13.1	3.2	10.5	4.5	3.7	
	M2 Castellane milieu de quai	3.7	9.1	3.2	9.7	3.0	M2 Castellane milieu de quai	3.0	9.7	2.3	8.1	2.9	3.3	9.4	2.7	8.9	3.0	2.8	
	M2 Castellane fin de quai	3.7	10.2	3.4	10.2	3.3	M2 Castellane fin de quai	3.0	11.0	2.5	9.0	3.3	3.4	10.6	2.9	9.6	3.3	3.1	
	Castellane Boutiques	3.8	12.4	3.7	10.7	4.8	Castellane Boutiques	3.1	14.8	3.2	11.8	4.4	3.5	13.6	3.5	11.2	4.6	3.9	
	Castellane - Tourniquets	3.9	15.7	4.0	12.0	4.7	Castellane - Tourniquets	3.6	18.6	3.8	13.9	5.1	3.7	17.2	3.9	13.0	4.9	4.6	
	Castellane extérieur	3.1	8.6	2.1	6.1	2.1	Castellane extérieur	2.7	11.0	2.0	7.2	2.7	2.9	9.8	2.1	6.7	2.4	3.3	
	Saint-Charles milieu de quai	3.1	8.9	2.7	7.6	3.5	Saint-Charles milieu de quai	2.1	7.7	1.6	6.0	2.3	2.6	8.3	2.1	6.8	2.9	3.2	
	Saint-Charles fin de quai	2.9	8.0	2.3	6.5	3.1	Saint-Charles fin de quai	2.2	8.8	1.8	6.8	2.7	2.5	8.4	2.1	6.7	2.9	3.3	
	Saint-Charles - Tourniquets	3.4	9.5	2.8	7.7	3.5	Saint-Charles - Tourniquets	2.2	8.9	1.6	6.8	2.7	2.8	9.2	2.3	7.3	3.1	3.3	
	Saint-Charles extérieur	2.9	7.5	2.1	6.0	2.4	Saint-Charles extérieur	2.0	7.8	1.5	5.4	2.1	2.4	7.7	1.8	5.7	2.3	3.2	
	Station extérieure Timone	5.9	16.9	4.2	12.3	4.5	Station extérieure Timone	2.8	16.3	3.1	12.0	4.6	4.4	16.6	3.7	12.2	4.6	3.8	
	Station extérieure Plombières	4.5	14.8	2.9	7.6	3.0	Station extérieure Plombières	1.7	9.5	1.6	5.7	2.2	3.1	12.2	2.3	6.7	2.6	4.0	
	Station extérieure Saint Louis	2.2	3.4	0.6	1.6	0.6	Station extérieure Saint Louis	0.8	3.5	0.7	2.1	0.9	1.5	3.5	0.7	1.9	0.8	2.3	
	Station extérieure Rabatau	4.7	19.3	3.4	9.6	3.3	Station extérieure Rabatau	2.2	12.5	1.9	6.9	2.6	3.4	15.9	2.7	8.3	3.0	4.6	
	Station extérieure Cinq Avenues	2.7	4.9	1.1	2.8	1.1	Station extérieure Cinq Avenues	0.9	3.2	0.7	2.2	0.9	1.8	4.0	0.9	2.5	1.0	2.3	

9.7 ANNEXE VII: RATIOS AIR EXTERIEUR VERSUS AIR INTERIEUR

HIVER



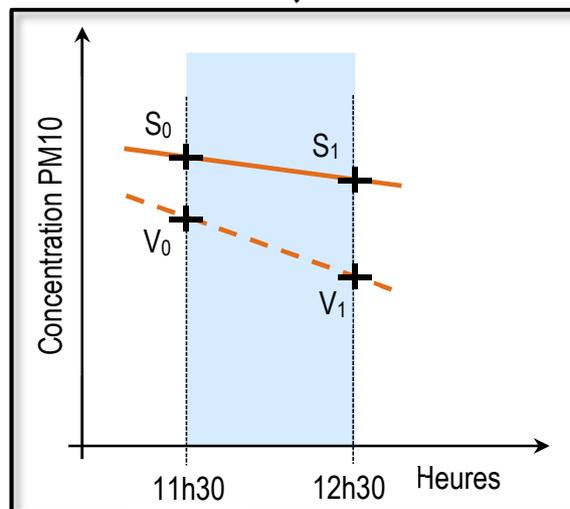
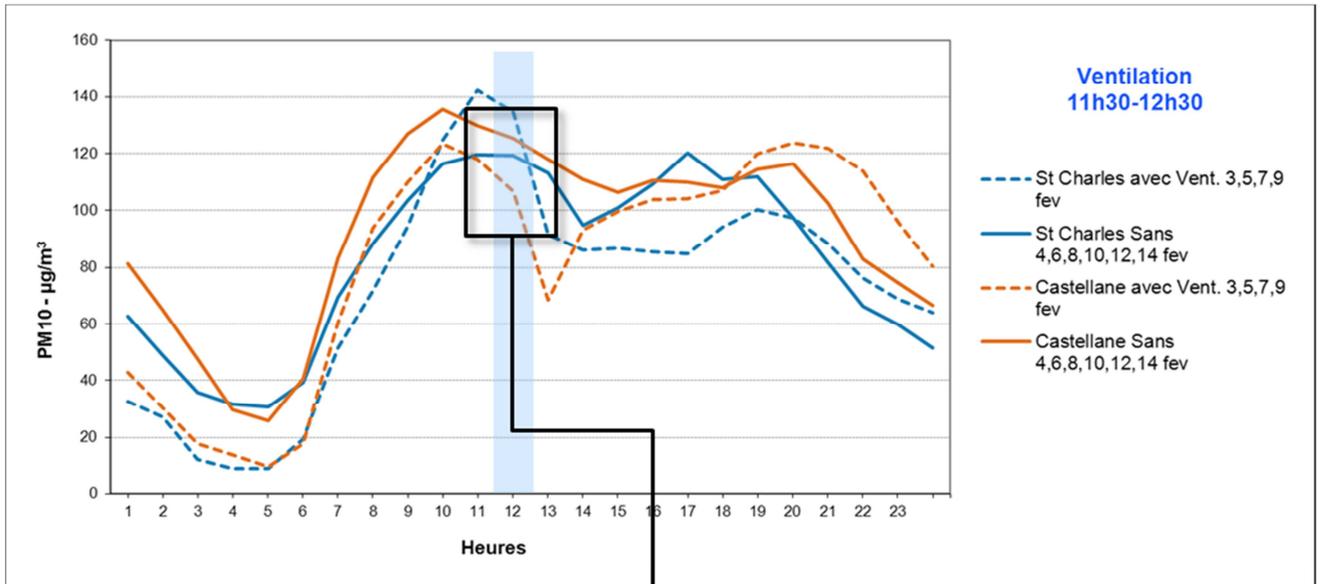
ETE



9.8 ANNEXE VIII : CALCUL DE L'EFFICACITE DE VENTILATION

Méthode 1 basée sur le calcul des variations des concentrations intérieures

L'impact de la ventilation sur les teneurs en PM10 dans le métro est déterminé en calculant l'écart en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre deux types de profils : un premier avec scénario de ventilation pendant 1 heure et un second sans ventilation.



Formule d'efficacité :

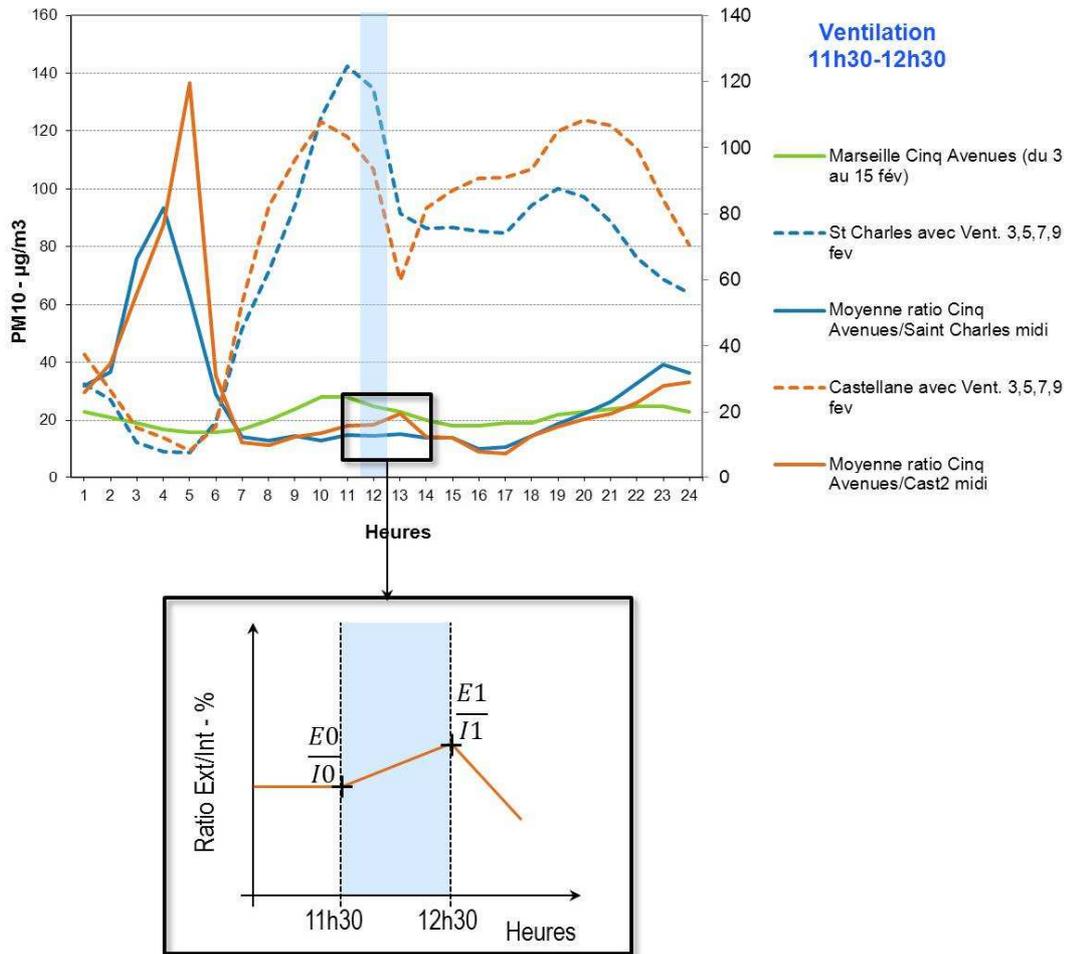
$$\text{Efficacité (\%)} = \frac{(S_1 - V_1) - (S_0 - V_0)}{S_1} \times 100$$

Avec :

- Journée avec ventilation pendant une heure
 - V_0 : concentration en PM10 avant l'épisode de ventilation
 - V_1 : concentration en PM10 après l'épisode de ventilation
- Journée sans ventilation
 - S_0 : concentration en PM10 au même instant que V_0
 - S_1 : concentration en PM10 au même instant que V_1

Méthode 2 basée sur le calcul des variations du ratio « extérieur/intérieur »

Cette seconde méthode consiste à déterminer l'écart du ratio « concentration extérieure/concentration intérieure ». lors de la mise en fonctionnement de la ventilation.



Formule d'efficacité :

$$Efficacité (\%) = \left[\left| \frac{E_1}{I_1} - \frac{E_0}{I_0} \right| \times \frac{I_0}{E_0} \right] \times 100$$

Avec :

- E_0 , la concentration en PM10 en air extérieur juste avant la mise en marche de la ventilation,
- E_1 , la concentration en PM10 en air extérieur juste après l'arrêt de la ventilation,
- I_0 , la concentration en PM10 en air intérieur à la station de métro juste avant la mise en marche de la ventilation,
- I_1 , la concentration en PM10 de l'air intérieur à la station de métro juste après l'arrêt de la ventilation.