

# AtmoSud

Inspirer un air meilleur

A woman with long, curly hair is seen from behind, holding a large, flowing blue fabric that catches the light. The background is a bright blue sky with scattered white clouds. A large, white, geometric shape, resembling a stylized 'M' or a roofline, is positioned on the right side of the image. The overall composition is clean and modern, with a focus on natural elements and light.

## Qualité de l'air intérieur du métro de Marseille

Campagne 2019

# RÉSUMÉ :

## ENCEINTES FERROVIAIRES SOUTERRAINES

### Qualité de l'air intérieur du métro de Marseille

---

#### ► Pourquoi une nouvelle surveillance de la qualité de l'air au sein des enceintes ferroviaires souterraines ?

Les enceintes ferroviaires souterraines sont des environnements clos dans lesquels sont présents les polluants issus, entre autres, du déplacement du matériel roulant : particules fines et métaux traces. L'étude de 2019 a pour but de poursuivre la surveillance de la qualité de l'air du métro de Marseille, par la mise en œuvre d'une campagne de mesure visant à caractériser une nouvelle station de métro et des polluants complémentaires aux PM<sub>10</sub> et aux métaux traces : les particules ultrafines et les composés organiques volatils.

#### ► Respect la valeur guide 2019 dans les EFS malgré une légère augmentation des PM<sub>10</sub>

A la station Saint-Charles, sur la période d'ouverture du métro (5h à 1h), les concentrations horaires en PM<sub>10</sub> ont toujours respecté la valeur guide 2019 dans les enceintes ferroviaires pour une heure d'exposition (556 µg/m<sup>3</sup>). La concentration moyenne pour l'ensemble de la campagne sur les heures d'ouverture est de 105 µg/m<sup>3</sup>, soit une légère augmentation par rapport à la campagne menée en 2016 (96 µg/m<sup>3</sup>). Celle-ci peut être expliquée par une fréquentation plus importante du métro entre 2016 et 2019 (+ 4 %) et la vétusté du matériel roulant.

#### ► Les métaux traces en concentrations similaires à la campagne de 2016

Pour les métaux traces, les résultats confortent ceux de la précédente campagne menée à Saint-Charles en 2016. Parmi les 41 métaux mesurés, les prédominants sont, par ordre décroissant : fer (Fe), cuivre (Cu), calcium (Ca), aluminium (Al), manganèse (Mn), potassium (K). Les quatre métaux réglementés dans l'air ambiant (arsenic (As), cadmium (Cd), nickel (Ni), plomb (Pb)) montrent des concentrations similaires à la campagne de 2016, avec un dépassement des valeurs cibles en air ambiant pour l'arsenic et le nickel.

#### ► Des particules ultrafines qui ne suivent pas toutes l'évolution des PM<sub>10</sub>

La mesure des particules ultrafines montre que les plus nombreuses d'entre-elles sont situées autour de 72 nm de diamètre, plus largement entre 20 et 250 nm. Le nombre des particules de diamètre compris entre 10 et 600 nm ne semble pas en lien avec la fréquence de passage des métros, mais il est impacté par les heures d'ouverture du réseau : augmentation des concentrations à l'ouverture, baisse des concentrations à la fermeture. Il semble également influencé par les concentrations extérieures, avec un pic de concentration entre 21h et 22h, également observé en air ambiant à la station de fond urbain de Marseille Longchamp.

#### ► Des COV majoritaires en concentrations faibles

Les concentrations moyennes des COV majoritaires n'excèdent pas 5 µg/m<sup>3</sup> à l'intérieur du réseau. Seul le benzène montre une concentration légèrement supérieure à la valeur guide en air intérieur de 2 µg/m<sup>3</sup>, tel que cela a été mis en évidence dans la campagne de mesure de 2016. Il n'est pas identifié de COV en concentration significative pouvant être d'origine intérieure au réseau.

#### ► Des résultats à la station Blancarde globalement similaires à ceux de la station Saint-Charles

Malgré des quais plus larges et un volume intérieur plus important, les concentrations en PM<sub>10</sub> et en métaux traces particulières sont similaires entre les stations Saint-Charles et la Blancarde. Dans cette dernière, les particules ultrafines suivent les mêmes évolutions au cours du temps qu'à Saint-Charles, mais avec des niveaux moyens inférieurs de l'ordre de 17 %.

<b>Rédaction :</b>	<b>Revue :</b>	<b>Approbation :</b>
Mathieu Izard mathieu.izard@atmosud.org	Romain Boissat romain.boissat@atmosud.org	Edwige Révélat edwige.revelat@atmosud.org
<b>Contact :</b>	<b>Date de parution :</b>	<b>Références :</b>
Mathieu Izard mathieu.izard@atmosud.org	Janvier 2021	24AI1113 / rapport-01

## **REMERCIEMENTS**

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

## **PARTENAIRES**

Régie des Transports Métropolitains

## **AUTEURS DU DOCUMENT**

Mathieu Izard

Alexandre Gatineau

# SOMMAIRE

<b>1. Contexte et objectif .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Le métro de Marseille .....</b>	<b>7</b>
2.1 Le réseau .....	7
2.2 Matériel roulant.....	8
2.3 Fréquentation et horaires des métros .....	8
2.4 Futur matériel roulant .....	9
<b>3. Campagne de mesures .....</b>	<b>10</b>
3.1 Planification .....	10
3.2 Sites de prélèvements .....	10
3.3 Moyens mis en œuvre .....	11
3.3.1 Analyseur automatique de particules fines.....	12
3.3.2 Préleveur séquentiel de particules fines et de métaux.....	12
3.3.3 Granulomètres .....	13
3.3.4 Prélèvements passifs de COV majoritaires.....	13
3.4 Positionnement sur les quais .....	14
3.4.1 Station Saint-Charles .....	14
3.4.2 Station La Blancarde.....	15
<b>4. Valeurs de référence .....</b>	<b>16</b>
<b>5. Résultats de mesures .....</b>	<b>17</b>
5.1 Concentrations en particules fines à la station Saint-Charles.....	17
5.1.1 Concentrations moyennes en PM <sub>10</sub> .....	17
5.1.2 Étude des valeurs maximales horaires en PM <sub>10</sub> .....	18
5.1.3 Distribution des données horaires en PM <sub>10</sub> .....	19
5.1.4 Profils horaires en PM <sub>10</sub> .....	21
5.1.5 Comparaison des concentrations en PM <sub>10</sub> aux campagnes précédentes et aux autres EFS françaises .....	23
5.1.6 Estimation des concentrations massiques de PM <sub>2,5</sub> .....	24
5.2 Concentrations en particules fines à la station de La Blancarde .....	25
5.2.1 Concentrations moyennes hebdomadaires en PM <sub>10</sub> .....	25
5.2.2 Distribution des données hebdomadaires en PM <sub>10</sub> par mois.....	25
5.2.3 Estimation des concentrations massiques de PM <sub>2,5</sub> au cours du temps .....	26
5.3 Concentration en métaux.....	27
5.3.1 La concentration des métaux dans les PM <sub>10</sub> à Saint-Charles .....	27
5.3.2 La concentration des métaux dans les PM <sub>10</sub> à La Blancarde .....	28
5.3.3 Part des éléments traces métalliques dans les particules PM <sub>10</sub> .....	29
5.3.4 Comparaison aux campagnes précédentes et aux EFS françaises et mondiales .....	30
5.4 Granulométrie des particules.....	31
5.4.1 Granulométrie des particules à Saint-Charles .....	31
5.4.2 Granulométrie des particules à la Blancarde .....	35
5.5 Composés organiques volatils .....	37
5.5.1 Les BTEX (Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylènes) .....	37
5.5.2 Les COV spécifiques : occurrence et concentrations.....	38
<b>6. Conclusion .....</b>	<b>40</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>41</b>
<b>GLOSSAIRE.....</b>	<b>42</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>44</b>

## LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1	Statistiques des résultats de mesures de PM <sub>10</sub> à la station Saint-Charles .....	45
ANNEXE 2	Représentation statistique des données à l'aide de « boxplot » .....	46
ANNEXE 3	Profil moyen journalier en PM <sub>10</sub> : Influence de la saison .....	47
ANNEXE 4	Métaux traces : Concentrations moyennes de l'ensemble des métaux mesurés .....	48
ANNEXE 5	Granulométrie : représentation graphique des données .....	49
ANNEXE 6	Granulométrie : Comparaison des données été/hiver des stations Saint-Charles et Blancarde .....	50
ANNEXE 7	Granulométrie : Comparaison des données à la fréquence de passage des rames à la station Saint-Charles .....	52
ANNEXE 8	Granulométrie : MINI-WRAS à la station Saint-Charles, série temporelle .....	53
ANNEXE 9	Granulométrie : MINI-WRAS à la station Saint-Charles, série temporelle normalisée par le maximum .....	54
ANNEXE 10	Granulométrie : Données en air ambiant du SMPS de la station de fond urbain (Marseille/Longchamp) du 18/12/18 au 14/06/19 .....	55
ANNEXE 11	Concentrations des BTEX et des COV majoritaires .....	56
ANNEXE 12	Sources de pollution, effets sur la santé, réglementation et recommandations OMS .....	59

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Évolution de la fréquentation et de la fréquence de passage des rames du métro par station .....	9
Tableau 2 : Répartition des moyens de mesure aux deux stations de métro échantillonnées .....	11
Tableau 3 : Calcul de la valeur guide C <sub>sout</sub> en fonction des différents scénarii d'exposition des usagers .....	16
Tableau 4 : Concentrations en PM <sub>10</sub> de la station Saint-Charles pour toutes les heures de mesure – analyseur automatique .....	17
Tableau 5 : Concentrations horaires maximales de la période totale (à gauche) et d'ouverture (à droite) .....	18
Tableau 6 : Concentrations moyennes en PM <sub>10</sub> de la station Saint-Charles .....	23
Tableau 7 : Concentrations de PM <sub>10</sub> (par prélèvement) et de métaux à la station Saint-Charles .....	27
Tableau 8 : Concentrations de PM <sub>10</sub> et de métaux à la station La Blancarde .....	28
Tableau 9 : Concentrations moyennes des métaux et PM <sub>10</sub> entre les campagnes 2010, 2016 et 2019 .....	30
Tableau 10 : Concentrations en PM <sub>10</sub> de la station Saint-Charles pour toutes les heures de mesure – analyseur automatique .....	45
Tableau 11 : Concentrations des 41 métaux traces mesurés - station Saint-Charles et Blancarde .....	48
Tableau 12 : Concentrations en COV majoritaires identifiés ponctuellement dans 1 à 2 séries de mesures aux deux stations de Saint-Charles et Blancarde .....	58

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Plan du Réseau de Métro de la ville de Marseille lors de la campagne 2019 (source RTM) .....	7
Figure 2 : Visualisation de l'une des configurations possibles des futures rames de métro (source RTM) .....	9
Figure 3 : Positionnement de la station de mesure sur le plan du quai de la station Saint-Charles (source RTM) .....	14
Figure 4 : Positionnement de la station de mesure sur le plan du quai de la station La Blancarde (source RTM) .....	15
Figure 5 : Box-plot des concentrations horaires par mois en PM <sub>10</sub> et selon le fonctionnement du métro - station Saint-Charles (explication de la représentation en « boxplot » en Annexe 2) .....	19
Figure 6 : Box-plot des concentrations horaires par jour en PM <sub>10</sub> et selon les vacances scolaires - station Saint-Charles .....	20
Figure 7 : Profils moyens horaires des concentrations en PM <sub>10</sub> sur la campagne de mesure – Quai / Gare Saint-Charles .....	21
Figure 8 : Profils moyens horaires des concentrations en PM <sub>10</sub> sur la campagne de mesure selon la présence de vacances scolaires - station Saint-Charles .....	21
Figure 9 : Profils moyens horaires des concentrations en PM <sub>10</sub> et fréquence de passage des métros des périodes - station Saint-Charles .....	22
Figure 10 : Comparaison des profils moyens journaliers des campagnes 2010 à 2019 - périodes de jours ouvrés et week-end – station Saint-Charles .....	24
Figure 11 : Comparaison du profil moyen journalier des PM <sub>2,5</sub> à celui des PM <sub>10</sub> - station Saint-Charles .....	24
Figure 12 : Box-plot des concentrations hebdomadaires en PM <sub>10</sub> - station Blancarde .....	25
Figure 13 : Profils moyens journaliers des PM <sub>2,5</sub> et PM <sub>10</sub> - station Blancarde .....	26
Figure 14 : Contribution relative de l'ensemble des métaux traces mesurés dans les PM <sub>10</sub> .....	29
Figure 15 : Contribution relative de chaque métal trace mesuré dans les PM <sub>10</sub> .....	29

Figure 16 : Répartition du nombre de particules/cm <sup>3</sup> des fractions de 250 nm à 1 µm - station Saint-Charles.....	31
Figure 17 : Profil moyen journalier du nombre de particules/cm <sup>3</sup> des fractions de 250 nm à 32 µm normalisé par le maximum de chaque fraction - station Saint-Charles.....	32
Figure 18 : Profil moyen journalier du nombre de particules/cm <sup>3</sup> des fractions de 10 nm à 35 µm – station Saint-Charles.....	33
Figure 19 : Profil moyen journalier du nombre de particules/litre des fractions de 10 nm à 35 µm normalisé par le maximum de chaque fraction - station Saint-Charles.....	34
Figure 20 : Profil moyen journalier du nombre de particules/litre des fractions de 250 nm à 1 µm - station Blancarde.....	35
Figure 21 : Profil moyen journalier du nombre de particules/litre des fractions de 250 nm à 32 µm normalisé par le maximum de chaque fraction - station Blancarde.....	36
Figure 22 : Concentrations mesurées pour les COV mesurés dans chacune des périodes de mesures .....	37
Figure 23 : Schéma explicatif du diagramme en boîte.....	46
Figure 24 : Profils moyens journaliers des concentrations en PM <sub>10</sub> en période froide et chaude - station Saint-Charles .....	47
Figure 25 : Comparaison des profils moyens journaliers du nombre de particules par litre des fractions de 250 nm à 1 µm en période froide (à gauche) et chaude (à droite) - station Saint-Charles .....	50
Figure 26 : Comparaison des profils moyens journaliers du nombre de particules par litre des fractions de 250 nm à 1 µm en période froide (à gauche) et chaude (à droite) - station Blancarde .....	51
Figure 27 : Comparaison du profil moyen journalier du nombre de particules/litre des fractions de 0,8 et 1 µm à la fréquence de passage des rames de métro des jours ouvrés – station Saint-Charles.....	52
Figure 28 : Concentrations des fractions de 10 nm à 35 µm en particules/cm <sup>3</sup> au cours du temps – station Saint-Charles.....	53
Figure 29 : Concentrations des fractions de 10 nm à 35 µm en particules/cm <sup>3</sup> au cours du temps normalisé par le maximum de chaque fraction - station Saint-Charles.....	54
Figure 30 : Profil moyen journalier du nombre de particules du granulomètre SMPS de Marseille/Longchamps du 18 décembre 2018 au 14 juin 2019 .....	55
Figure 31 : Profil moyen journalier du nombre de particules normalisé par le maximum du granulomètre SMPS de Marseille/Longchamps du 18 décembre 2018 au 14 juin 2019.....	55
Figure 32 : Box-plot des concentrations en BTEX et COV majoritaires présents dans toutes les séries de mesures aux deux stations de Saint-Charles et Blancarde .....	56
Figure 33 : Box-plot des concentrations en COV majoritaires présents dans la majorité les séries de mesures aux deux stations de Saint-Charles et Blancarde .....	57
Figure 34 : Box-plot des concentrations en COV majoritaires présents dans la moitié les séries de mesures aux deux stations de Saint-Charles et Blancarde .....	57

## LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photographie 1 : Roue pneumatique doublée d’une roue de sécurité fer avec frein mécanique à sabot en bois (source RTM) .....	8
Photographie 2 : Station Saint-Charles (source AtmoSud) .....	10
Photographie 3 : Station La Blancarde (source AtmoSud).....	11
Photographie 4 : Analyseur automatique des particules fines BAM 1020 (source AtmoSud).....	12
Photographie 5 : Préleveur séquentiel de particules et fines et métaux Leckel (source AtmoSud) .....	12
Photographie 6 : Granulomètres MINI-WRAS et MINI-LAS (source AtmoSud).....	13
Photographie 7 : Tubes à diffusion passive Radiello 145 (source AtmoSud) .....	13
Photographie 8 : Station de mesure positionnée en bout de quai de la station Saint-Charles (source AtmoSud).....	14
Photographie 9 : Station de mesure située vers le milieu du quai de la station La Blancarde (source AtmoSud).....	15

# 1. Contexte et objectif

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

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

Avec cette nouvelle étude, il s'agit de **conforter les résultats de mesures des particules fines et des métaux, en complément de mesures des particules ultrafines (PUF) et des composés organiques volatils majoritaires à la station de mesure historique du réseau, la station Saint-Charles. Ces mêmes polluants sont également investigués dans une station non-échantillonnée jusqu'alors, la station de La Blancarde**. Cette dernière est une station récente du réseau (ouverte en 2010).

## 2. Le métro de Marseille

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

### 2.1 Le réseau

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

- Ligne 1 de La Rose à La Fourragère : cette ligne compte 18 stations dont 4 aériennes,
- Ligne 2 de Bougainville à Sainte-Marguerite Dromel : elle compte 12 stations dont 2 aériennes.

Les stations Castellane et Saint-Charles sont communes aux deux lignes. La station Blancarde est sur la ligne 1.

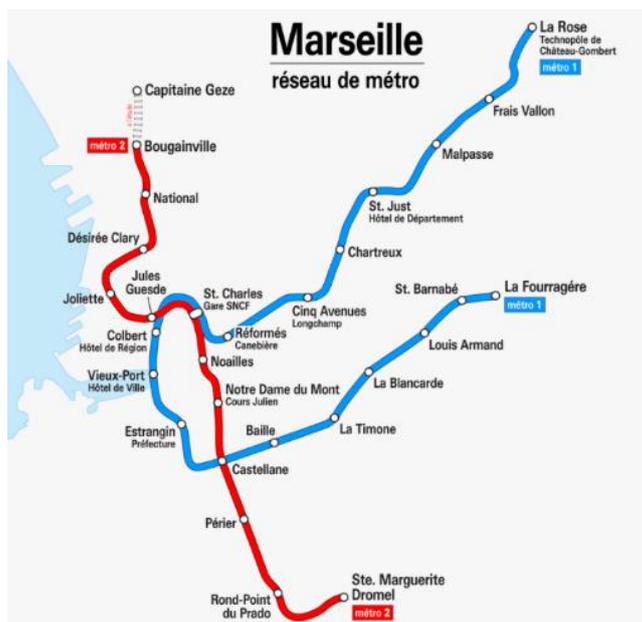
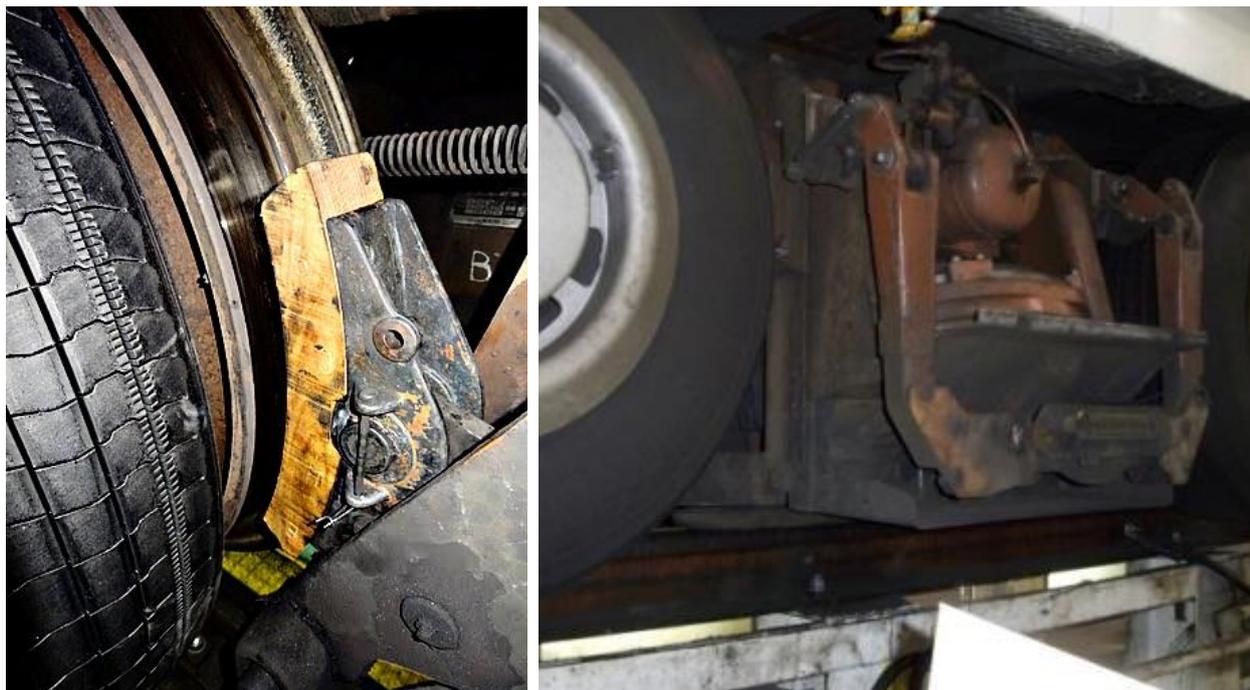


Figure 1 : Plan du Réseau de Métro de la ville de Marseille lors de la campagne 2019 (source RTM)

## 2.2 Matériel roulant actuel

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

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



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

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

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

## 2.3 Fréquentation et horaires des métros

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

A la station Blancarde entre 2016 et 2019, il a été observé une augmentation de la fréquentation de 9%.

Entre 2016 et 2019, les horaires des métros, et donc leur fréquence de passage, ont été identiques.

**Tableau 1 : Évolution de la fréquentation et de la fréquence de passage des rames du métro par station**

Stations de métro	Années	Fréquentation (nombre de passagers annuel)	Fréquences de passage des rames en semaine hors vacances (nombre/jour)
Saint-Charles (M1+M2)	2010	3 843 864	798
	2016	6 213 631	880
	2019	6 458 480	
La Blancarde (M1)	2010 (ouverture de la station en cours d'année)	-	410
	2016	1 311 670	444
	2019	1 431 884	

## 2.4 Futur matériel roulant

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



**Figure 2 : Visualisation de l'une des configurations possibles des futures rames de métro (source RTM)**

### 3. Campagne de mesures

La campagne de mesure de cette étude vise à caractériser la pollution de l'air à l'intérieur de l'enceinte ferroviaire souterraine sur les quais de deux stations de métro, en présence du matériel roulant actuel.

L'évolution des concentrations de polluants d'intérêt est suivie au fil des années dans la station la plus fréquentée (station Saint-Charles) et des mesures sont ponctuellement réalisées dans une station non échantillonnée jusqu'alors (Station Blancarde en 2019).

Cette nouvelle étude s'est centrée sur les polluants d'intérêt les plus présents lors des précédentes campagnes : **particules fines et métaux**. Afin d'élargir le spectre de pollution de ces environnements intérieurs, de nouveaux polluants ont été intégrés à cette étude : le **nombre des particules ultrafines (PUF)** et les **composés organiques volatils majoritaires**.

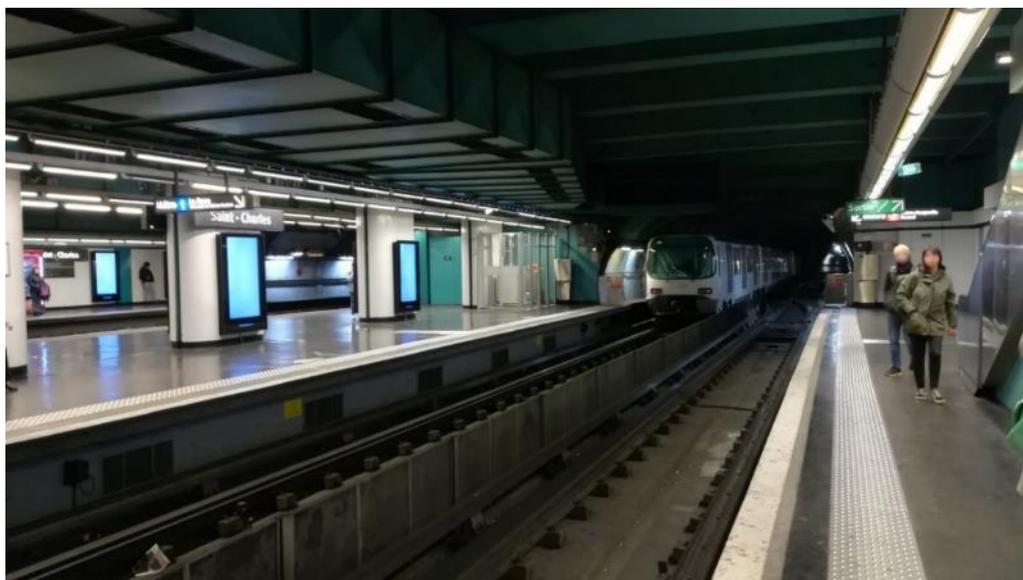
#### 3.1 Planification

La campagne de mesure s'est déroulée de manière **simultanée** dans les deux stations de métro **Saint-Charles** et **la Blancarde**, du 16 janvier au 31 juillet 2019. Cette longue période de mesure permet de prendre en compte l'ensemble des périodes d'utilisation du métro (périodes de pointe, vacances scolaires, jours de festivités...). Elle a permis de couvrir les périodes froide et chaude.

#### 3.2 Sites de prélèvements

Le choix des deux stations de métro retenues s'est orienté vers :

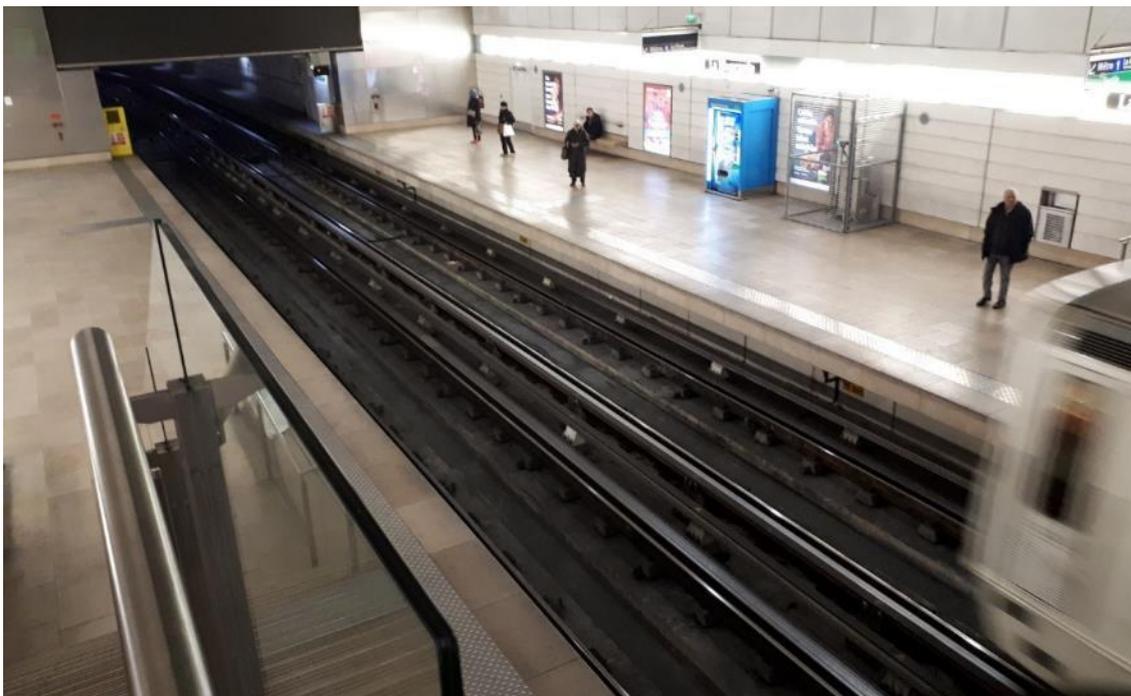
- La station Saint-Charles : C'est la station la plus fréquentée du réseau. Les deux lignes de métro s'y croisent dans un même espace clos. Les quais sont étroits et le volume de l'espace clos est relativement faible pour 4 voies de passage. S'agissant d'une station historique, l'encrassement visible des tunnels adjacents résulte de l'exploitation du métro depuis plus de 40 ans.



*Photographie 2 : Station Saint-Charles (source AtmoSud)*

Sur cette station, il y a le plus grand historique de données de qualité de l'air (campagnes 2010 et 2016).

- **La station de La Blancarde** : Cette station est plus récente. Elle fait partie de l'extension du métro ouverte en 2010. L'encrassement des tunnels adjacents ne date que de 9 ans. Les quais sont larges et le volume de la gare est plus important que celui de la station Saint-Charles.



*Photographie 3 : Station La Blancarde (source AtmoSud)*

### 3.3 Moyens mis en œuvre

Pour chacune des deux stations de métro échantillonnées, l'ensemble des appareils de mesure sont entreposés sur les quais dans une cage métallique permettant de limiter les dégradations de matériel.

Les dispositifs de mesure sont répartis dans les deux stations de métro échantillonnées de la manière suivante :

**Tableau 2 : Répartition des moyens de mesure aux deux stations de métro échantillonnées**

Dispositif de mesure	Saint-Charles	La Blancarde
Analyseur automatique (Particules PM10)	X	-
Préleveur séquentiel (Particules PM10 + 41 métaux)	X	X
Granulomètre MINI-LAS (Particules fines de diamètre compris entre 250 et 32 000 nm, Particules PM10 et PM2,5)	X	X
Granulomètre MINI-WRAS (Particules ultrafines de diamètre compris entre 10 à 35 000 nm)	X	-
Tubes passifs Rad. 145 (composés organiques volatils COV majoritaires)	X	X

### 3.3.1 Analyseur automatique de particules fines

Afin de suivre l'évolution précise des concentrations au cours du temps, un analyseur de référence de type jauges radiométriques, par atténuation de rayonnement Bêta, est mis en place à la station Saint-Charles : le BAM 1020 (appareil équivalent à la norme NF EN 12341). Il permet d'obtenir une concentration moyenne horaire en  $PM_{10}$  sur l'ensemble de la période de mesure.



*Photographie 4 : Analyseur automatique des particules fines BAM 1020 (source AtmoSud)*

### 3.3.2 Préleveur séquentiel de particules fines et de métaux

Pour les deux stations de métro échantillonnées, un appareil de type Leckel prélève sur filtres les métaux dans la fraction de particules fines  $PM_{10}$ . Les prélèvements sont réalisés de manière hebdomadaire tout au long de la période de mesure à un débit de  $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$ . Les analyses des filtres permettent d'obtenir **la concentration de  $PM_{10}$  et de 41 métaux** pour chaque semaine de mesure (norme NF EN 14902).



*Photographie 5 : Préleveur séquentiel de particules et fines et métaux Leckel (source AtmoSud)*

### 3.3.3 Granulomètres

Les granulomètres mis en œuvre sont des analyseurs optiques permettant l'étude de la distribution statistique des tailles de particules et l'estimation des concentrations en masse des particules fines. Deux modèles de granulomètres différents sont utilisés :

- Dans les deux stations échantillonnées : Le **MINI-LAS** permet d'obtenir la **distribution statistique des tailles de particules dans 31 fractions de 250 nm à 32 µm** et une estimation des concentrations massiques en  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5}$  avec un pas de temps d'une heure. Il est mis en place pendant toute la période de mesure.
- Dans la station Saint-Charles uniquement : le **MINI-WRAS** permet d'obtenir la **distribution statistique des tailles de particules de 41 fractions de 10 nm à 35 µm** sur un pas de temps d'une minute. Il est mis en place pendant une période d'un mois.



Photographie 6 : Granulomètres MINI-WRAS et MINI-LAS (source AtmoSud)

### 3.3.4 Prélèvements passifs de COV majoritaires

Les prélèvements passifs hebdomadaires des COV majoritaires sont réalisés à l'aide de tubes à diffusion passive de type Radiello 145 et analysés en laboratoire (norme NF EN 14662).

Les polluants quantifiés sont les 20 molécules majoritaires détectées et les BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes).



Photographie 7 : Tubes à diffusion passive Radiello 145 (source AtmoSud)

## 3.4 Positionnement sur les quais

### 3.4.1 Station Saint-Charles

Les quais de la station Saint-Charles sont trop restreints pour permettre un positionnement des dispositifs de mesures au niveau central. Pour des raisons de sécurité, la station de mesure est positionnée à l'extrémité du quai, direction « La Rose » (Métro 1) et « Sainte-Marguerite » (Métro 2). Il s'agit du même emplacement que lors des campagnes de mesures précédentes (2010 et 2016).

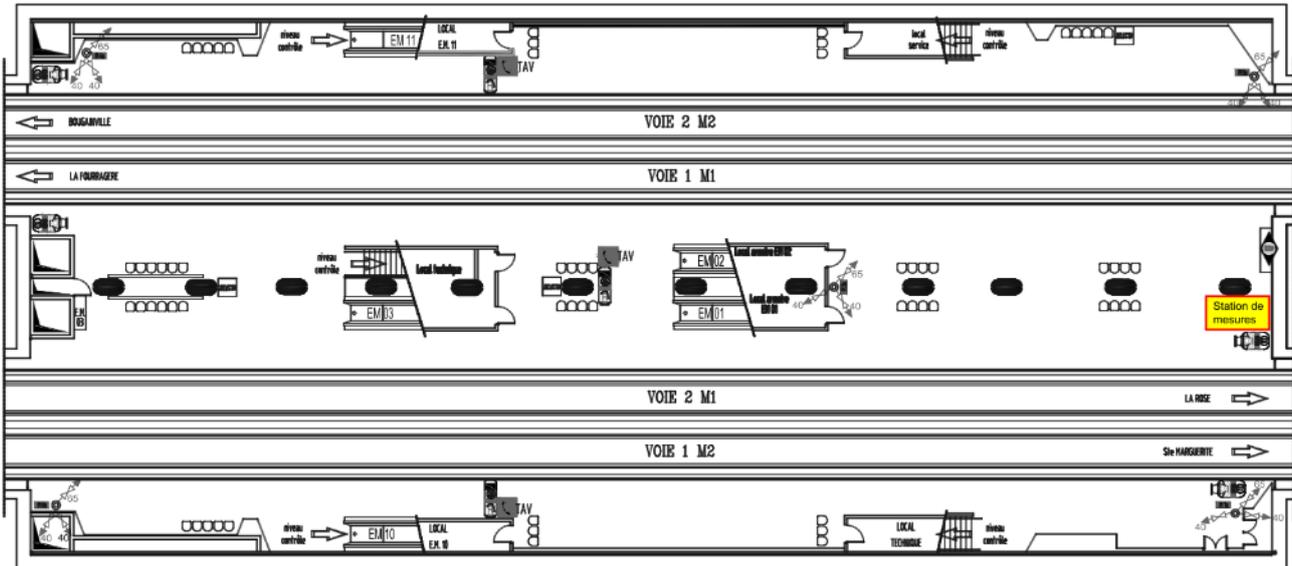


Figure 3 : Positionnement de la station de mesure sur le plan du quai de la station Saint-Charles (source RTM)



Photographie 8 : Station de mesure positionnée en bout de quai de la station Saint-Charles (source AtmoSud)

### 3.4.2 Station La Blencarde

Les quais de la station de La Blencarde sont plus espacés que ceux de Saint-Charles, il a donc été possible de positionner la station de mesure de manière plus centrale, sur le quai en direction de La Rose.

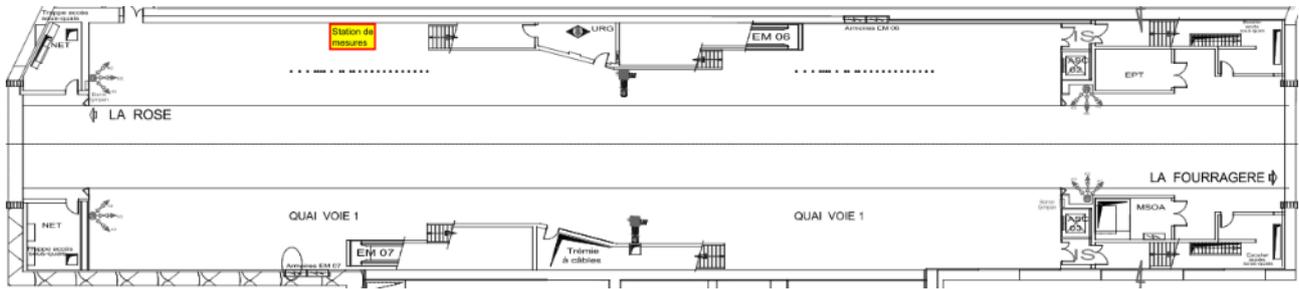


Figure 4 : Positionnement de la station de mesure sur le plan du quai de la station La Blencarde (source RTM)



Photographie 9 : Station de mesure située vers le milieu du quai de la station La Blencarde (source AtmoSud)

## 4. Valeurs de référence

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

Seule une valeur guide existe dans les EFS pour les PM<sub>10</sub> (Circulaire DGS/SD n°2003-314 du 30 juin 2003)<sup>1</sup>. Cette valeur, (C<sub>sout</sub>) est calculée en fonction de la concentration extérieure annuelle locale (C<sub>ext</sub>) et de la valeur limite de la directive air ambiant<sup>2</sup> (C<sub>limite</sub> = 50 µg/m<sup>3</sup>) selon la formule suivante :

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

où P90<sub>ext</sub> est le percentile 90 des concentrations journalières de PM<sub>10</sub> mesurées en air extérieur sur une année (c'est-à-dire que 90 % des valeurs observées sont inférieures à cette valeur).

Pour l'année 2019, sur la base de la concentration annuelle de la station de fond urbain de la ville de Marseille (station Longchamp), la valeur du percentile 90 en air extérieur est de 28 µg/m<sup>3</sup>.

Les concentrations C<sub>sout</sub> à ne pas dépasser pour les différents scénarii d'exposition sont les suivantes :

**Tableau 3 : Calcul de la valeur guide C<sub>sout</sub> en fonction des différents scénarii d'exposition des usagers**

Temps d'exposition des usagers dans le métro	Concentration C <sub>sout</sub> à ne pas dépasser (µg/m <sup>3</sup> ) en 2019
15 min	2 142
30 min	1 085
<b>1h</b>	<b>556</b>
1h30	380
2h	292

Le temps moyen des passagers du métro Marseillais étant inférieur à une heure, **la valeur de C<sub>sout</sub> retenue est celle correspondant à 1h d'exposition, soit 556 µg/m<sup>3</sup>.**

<sup>1</sup> Annexe II de la Circulaire DGS/SD 7 B n° 2003-314 du 30 juin 2003 relative à la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines

<sup>2</sup> Directive 2008/50/CE

## 5. Résultats de mesures

### 5.1 Concentrations en particules fines à la station Saint-Charles

#### 5.1.1 Concentrations moyennes en PM<sub>10</sub>

Sur la période de mesure 24h/24, la concentration moyenne de PM<sub>10</sub> est de 94 µg/m<sup>3</sup>. Les jours en semaine montrent une concentration moyenne légèrement plus importante que le samedi, et bien plus que le dimanche.

Sur la période d'ouverture du métro (5h-1h), la concentration moyenne est plus importante : 105 µg/m<sup>3</sup>.

Il n'est pas observé de différence significative entre la période « froide » (du 19 janvier au 31 mars) et la période « chaude » (1<sup>er</sup> avril au 31 juillet).

**Tableau 4 : Concentrations en PM<sub>10</sub> de la station Saint-Charles pour toutes les heures de mesure – analyseur automatique**

PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Période totale	Jours ouvrés	Samedi	Dimanche	Période froide	Période chaude
Moyenne 24h/24h	94.1	99.3	91.5	70.6	93.8	94.3
Maximum horaire 24h/24h	985.0	985.0	275.2	137.7	985.0	649.9
Moyenne période d'ouverture (5h-1h)	104.8	110.3	101.8	80.1	103.9	105.4
Maximum horaire (5h-1h)	272.8	272.8	149.0	185.8	187.0	272.8

Le détail des statistiques des concentrations en PM<sub>10</sub> à la station Saint-Charles est présenté en annexe 1.

Sur la période complète (24h/24), la concentration moyenne est de 94 µg/m<sup>3</sup> alors qu'elle est de 105 µg/m<sup>3</sup> sur la période d'ouverture.

La concentration horaire maximale observée est de 985 µg/m<sup>3</sup>, et correspond à la limite de quantification de l'appareil. Elle est significativement supérieure à la concentration à ne pas dépasser (Csout) en 2019 pour une exposition d'une heure de 556 µg/m<sup>3</sup>. **Néanmoins, elle est observée en période de fermeture du réseau, elle n'est donc pas représentative de l'exposition des usagers.**

**La concentration horaire maximale observée sur la période d'ouverture (5h-1h) est de 273 µg/m<sup>3</sup>. Elle est significativement inférieure à la concentration à ne pas dépasser (Csout) en 2019 pour une exposition d'une heure de 556 µg/m<sup>3</sup>.**

*NB : à titre informatif, le préleveur séquentiel installé à Saint-Charles pour la mesure des métaux a également permis de déterminer une concentration moyenne à partir des prélèvements hebdomadaires, qui s'élève à 85 µg/m<sup>3</sup>, soit une valeur proche de celle déterminée par l'analyseur automatique (94 µg/m<sup>3</sup>) et conforme aux exigences spécifiques pour ce type de matériel de référence.*

## 5.1.2 Étude des valeurs maximales horaires en PM<sub>10</sub>

L'ensemble des 5 maximums horaires de la période de mesure sont observés en période de **fermeture du réseau** et sont liés à des périodes d'entretien nocturnes.

Parmi les 5 maximums horaires en période d'ouverture :

- 2 concernent la matinée du 7 février, et sont associées à des concentrations nocturnes importantes. Elles peuvent ainsi être liées à la réalisation de l'entretien des réseaux pendant la nuit
- 1 concerne la soirée du 14 au 15 juillet, juste après le tir du feu d'artifice, et peut être influencée par un apport extérieur et potentiellement une prolongation ponctuelle de l'utilisation du métro.
- 2 concernent des valeurs ponctuelles sans lien avec une activité nocturne ou un mode de fonctionnement spécifique connu.

**Tableau 5 : Concentrations horaires maximales de la période totale (à gauche) et d'ouverture (à droite)**

Date et heure locale	Maximum horaire 24h/24	Date et heure locale	Maximum horaire sur la période d'ouverture (5h à 1h)
13/02/2019 02:00	985.0	15/07/2019 00:00	272.8
08/02/2019 02:00	668.0	24/07/2019 06:00	219.2
25/06/2019 03:00	649.9	05/04/2019 12:00	191.1
07/02/2019 02:00	523.0	07/02/2019 08:00	187.0
25/01/2019 02:00	384.0	14/07/2019 23:00	185.8

### 5.1.3 Distribution des données horaires en PM<sub>10</sub>

#### ► Par mois et selon le fonctionnement du métro

La représentation de la distribution des concentrations horaires en PM<sub>10</sub> par mois et selon le fonctionnement du métro montre que les concentrations sont, à première vue, stables d'un mois à l'autre lorsque le métro est en fonctionnement (7j/7 de 5h à 1h), aussi bien en moyenne qu'en maximum.

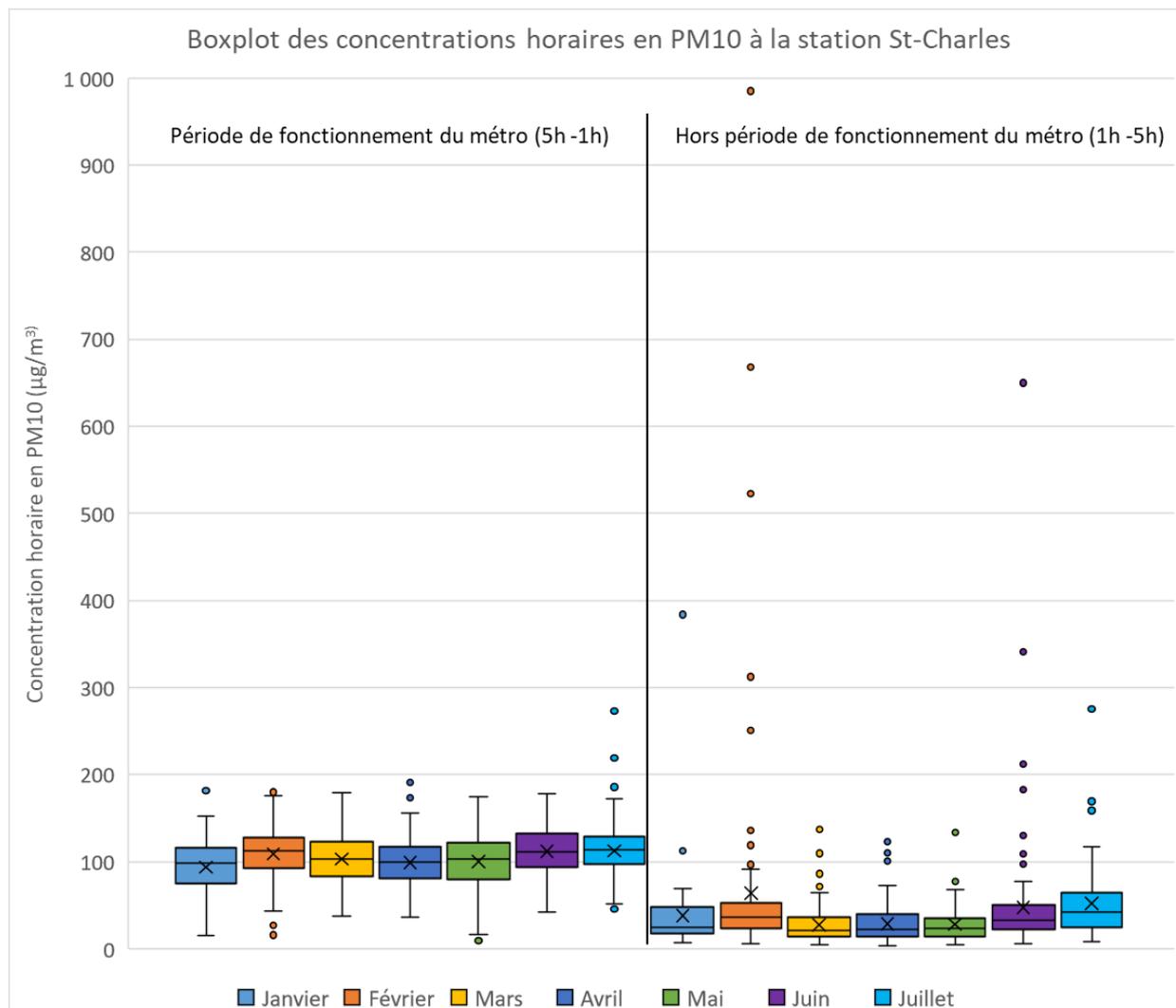


Figure 5 : Box-plot des concentrations horaires par mois en PM<sub>10</sub> et selon le fonctionnement du métro - station Saint-Charles (explication de la représentation en « boxplot » en Annexe 2)

La distribution des concentrations horaires par mois indique que les valeurs mesurées sont relativement stables sur la période d'ouverture du métro, quel que soit le mois retenu (été ou hiver), en moyenne aux alentours de 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Quelques niveaux ponctuellement supérieurs à 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  peuvent être observés, en lien comme mentionné précédemment, avec des événements spécifiques.

Les périodes hors fonctionnement montrent des concentrations moyennes mensuelles significativement plus faibles mais avec des concentrations ponctuelles plus importantes, en lien avec les travaux réalisés de nuit.

### ► Par jour et selon les vacances scolaires

La représentation de la distribution des concentrations horaires en PM<sub>10</sub> par jour et selon la présence ou non de vacances scolaires montre que :

- Dans tous les cas, les concentrations observées le dimanche sont bien inférieures aux autres jours de la semaine,
- La différence entre les concentrations hors et en période de vacances scolaires est peu significative,
- Hors période de vacances scolaires, les niveaux observés du lundi au vendredi sont comparables, et ceux du samedi, ce qui n'est pas le cas lors des vacances scolaires (où les valeurs mesurées le samedi sont comparables à celles en semaine)

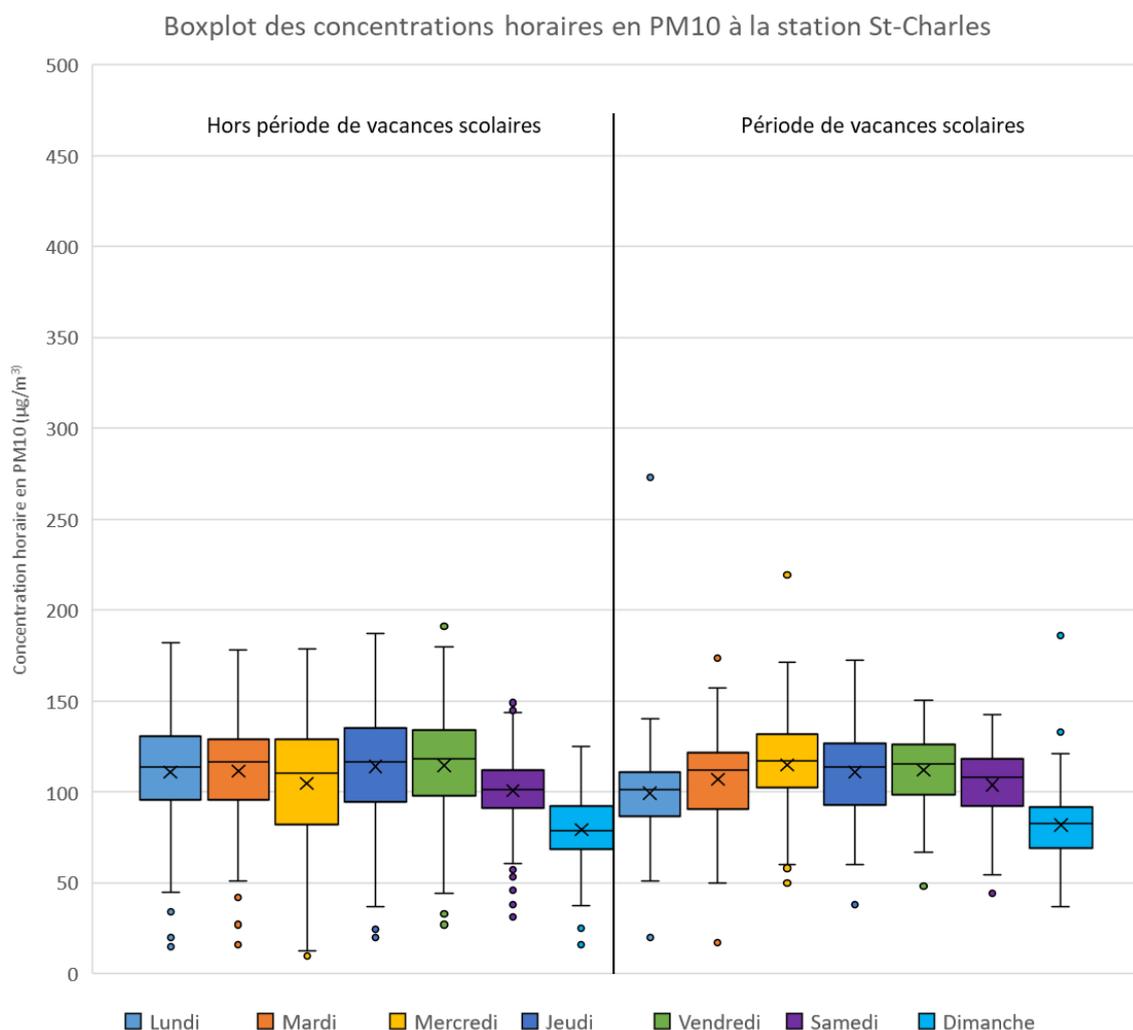


Figure 6 : Box-plot des concentrations horaires par jour en PM<sub>10</sub> et selon les vacances scolaires - station Saint-Charles

La distribution des concentrations horaires par jour indique que les valeurs mesurées sont relativement stables du lundi au vendredi, aux alentours de 110 µg/m<sup>3</sup>.

En revanche, le dimanche, ces niveaux sont plus faibles (moins de 80 µg/m<sup>3</sup>).

L'influence des vacances scolaires n'est que peu visible sur les concentrations horaires mesurées.

## 5.1.4 Profils horaires en PM<sub>10</sub>

Le profil horaire de l'ensemble de la période de mesure (6 mois) montre qu'à partir de 5 heures du matin, heure d'ouverture du métro, une augmentation significative des concentrations en PM<sub>10</sub> à la station ferroviaire Saint-Charles est observée. Deux principaux pics de concentrations sont relevés, autour de 9 heures et de 18 heures, correspondant aux heures de forte affluence (trajet domicile/travail ou domicile/école).

Les profils moyens journaliers des concentrations en PM<sub>10</sub> sur le quai de la station Saint-Charles montrent que les niveaux sont plus importants qu'aux stations de mesures extérieures de Marseille pendant la période d'activité du métro.

Après la fermeture du réseau, à 1h du matin, les concentrations chutent progressivement pour se rapprocher des celles de la station trafic de Rabatau en toute fin de nuit, avant réouverture.

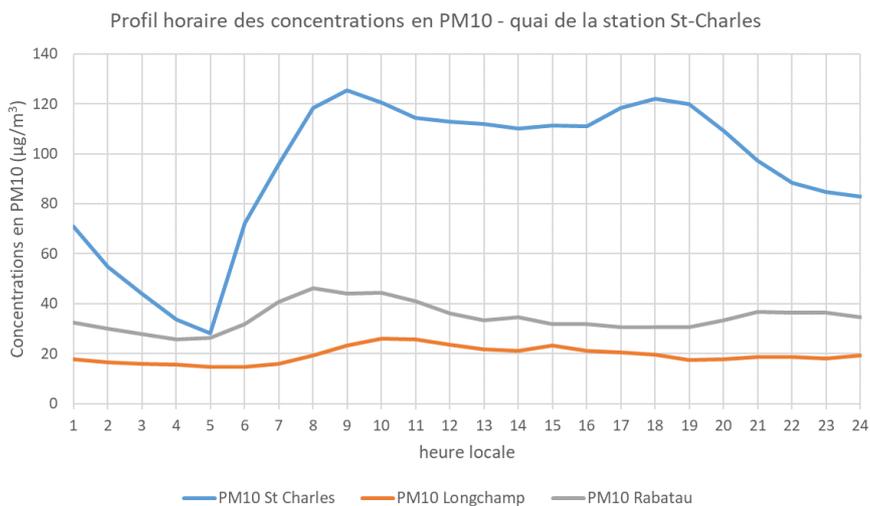


Figure 7 : Profils moyens horaires des concentrations en PM<sub>10</sub> sur la campagne de mesure – Quai / Gare Saint-Charles

### ► Influence des périodes de vacances scolaires

Les périodes de vacances scolaires ne semblent pas influencer fortement les niveaux observés dans la station de Saint-Charles. Le graphique ci-dessous confirme cette observation, et met en évidence que les heures d'observation des valeurs les plus importantes sont similaires. Seules les valeurs observées à 8 et 9 heures du matin semblent légèrement inférieures (d'environ 10%) pendant les vacances à ce qui est observé hors période de vacances.

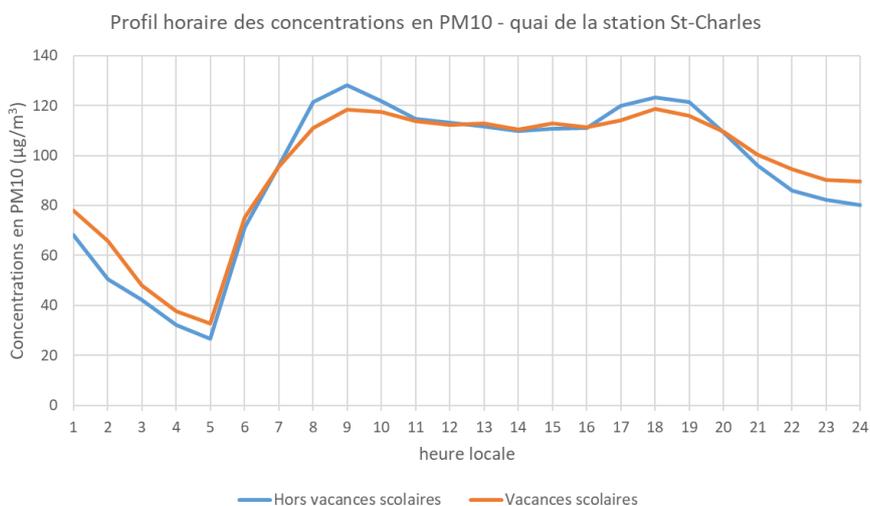
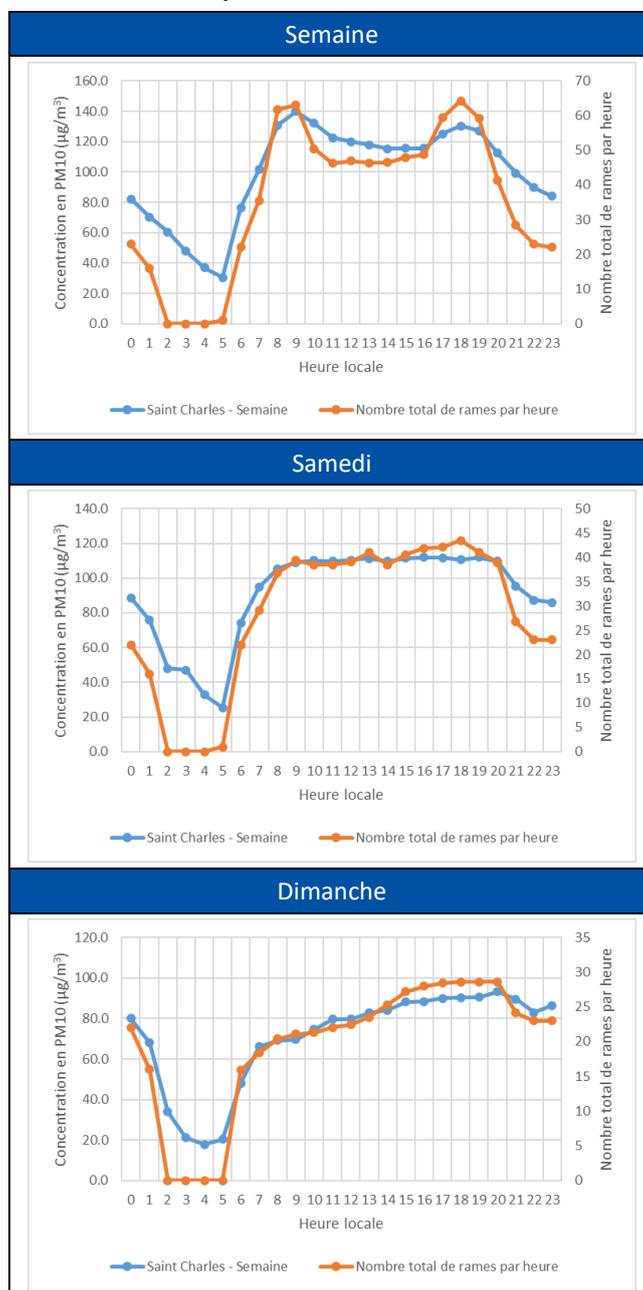


Figure 8 : Profils moyens horaires des concentrations en PM<sub>10</sub> sur la campagne de mesure selon la présence de vacances scolaires - station Saint-Charles

### ► Des niveaux de PM<sub>10</sub> en lien avec la fréquence des rames dans le métro

En mettant en relation les profils horaires des concentrations obtenues avec la fréquence des rames (semaine, samedi, dimanche), il apparaît une très bonne corrélation entre :

- L'ouverture du métro et l'augmentation des concentrations
- La fréquence horaire maximale de rames et les valeurs maximales des concentrations
- La diminution des concentrations en fin de journée au moment de la baisse de la fréquence des rames



**Figure 9 : Profils moyens horaires des concentrations en PM<sub>10</sub> et fréquence de passage des métros des périodes - station Saint-Charles**

Les profils moyens journaliers en PM<sub>10</sub> montrent une évolution des concentrations fortement liée à la fréquence de passage des rames de métro.

## 5.1.5 Comparaison des concentrations en PM<sub>10</sub> aux campagnes précédentes et aux autres EFS françaises

### ► Valeurs générales

Pour les 3 campagnes de mesures réalisées en 2010, 2016 et 2019, les concentrations en PM<sub>10</sub> à la station Saint-Charles sont significativement plus importantes que celles observées sur la même période aux stations de mesure de référence d'air ambiant de Marseille, quelle qu'en soit la typologie.

Dans le métro, station Saint-Charles, les concentrations moyennes de PM<sub>10</sub> observées en 2019 sont légèrement plus importantes que celles observées en 2010 et 2016 : sur toute la période (24h/24h) ou sur les seules heures d'ouverture du métro (5h-1h). Sur la même période, les concentrations moyennes en air extérieur ont diminué.

**Tableau 6 : Concentrations moyennes en PM<sub>10</sub> de la station Saint-Charles**

Concentrations moyennes	2019	2016	2010
Dans le métro de Marseille			
Quai – Station Saint-Charles (périodes d'ouverture)	105	96	93
Quai – Station Saint-Charles (24h/24h)	94	89	78
En air ambiant			
Station trafic (Marseille/Rabatau)	35	38	Données manquantes
Station de fond urbain (Marseille/Longchamp)	19	28	26

*Nb : A titre de comparaison, le guide de recommandations pour les enceintes ferroviaires souterraines de l'INERIS<sup>3</sup> fait état de concentrations en PM<sub>10</sub> comprises entre 13 à 1 284 µg/m<sup>3</sup> au niveau des quais (toutes mesures confondues sur des pas de temps différents). Les études de mesures dans les enceintes ferroviaires souterraines françaises<sup>4</sup> présentent des concentrations moyennes 24/24h en PM<sub>10</sub> par analyseur de référence de 23 à 208 µg/m<sup>3</sup>.*

Les concentrations en PM<sub>10</sub> à l'intérieur de la station Saint-Charles sont significativement supérieures à celles des stations d'air ambiant de Marseille. La concentration moyenne de 2019 est légèrement plus importante que celles de 2016 et 2010.

### ► Etude des profils horaires

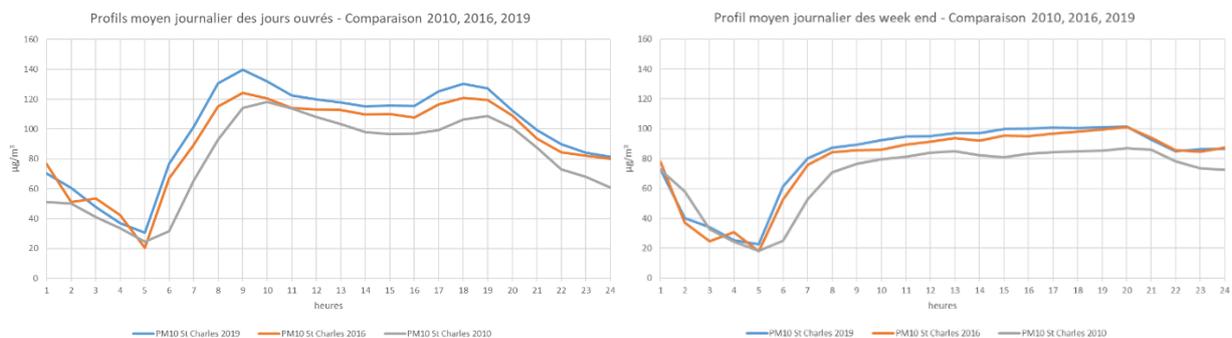
Les profils horaires des années 2010, 2016 et 2019 suivent une évolution temporelle similaire. Quelles que soient la période et l'année, les concentrations commencent à augmenter à partir de 5 heures du matin, heure d'ouverture du réseau.

Pour les jours ouvrés, un profil avec deux pics de concentration est observé : l'un matinal (de 8h à 9h) et l'autre en fin d'après-midi (de 17h à 18h). Les profils de 2016 et 2019 sont parfaitement synchrones dans leur évolution au cours du temps, les horaires de passage des métros sur ces deux années étaient identiques. L'année 2010 présente une évolution en léger décalage, qui peut être liée aux horaires de métro différentes à cette époque.

Pour les week-ends, quelle que soit l'année, les concentrations augmentent graduellement au cours de la journée avec une diminution en soirée.

<sup>3</sup> Guide de recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines – INERIS 2020

<sup>4</sup> Qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines (EFS) en France – AtmoSud 2021



**Figure 10 : Comparaison des profils moyens journaliers des campagnes 2010 à 2019 - périodes de jours ouvrés et week-end – station Saint-Charles**

Les profils d'évolution des concentrations entre 2010, 2016 et 2019 sont similaires. Les niveaux rencontrés en 2019 sont cependant légèrement supérieurs à ceux de l'année 2016, malgré un programme de passage des métros identique entre les deux périodes.

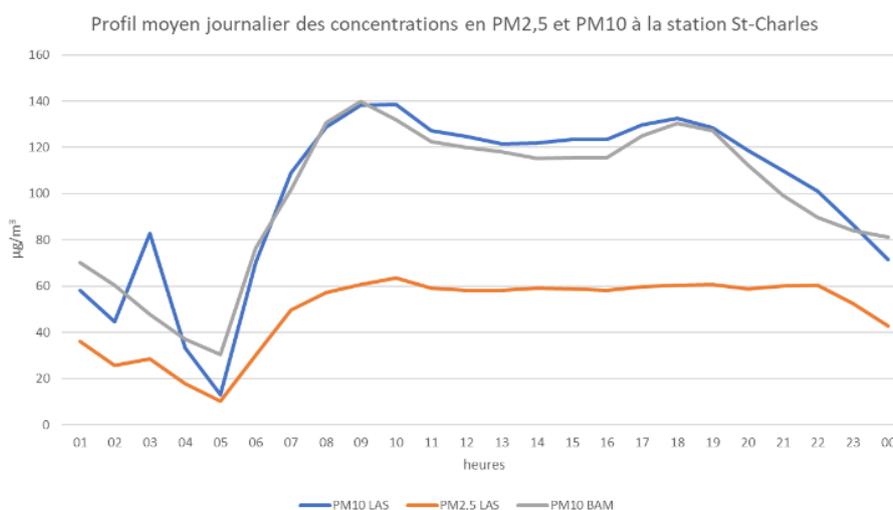
### 5.1.6 Estimation des concentrations massiques de PM<sub>2,5</sub>

Sur la base de l'estimation des concentrations par le granulomètre MINI-LAS, le profil moyen des fractions PM<sub>2,5</sub> montre une dynamique différente de celle des PM<sub>10</sub> :

- Les concentrations augmentent à partir de 5h, avec des niveaux légèrement plus importants entre 9h et 10h puis une stabilisation des concentrations jusqu'à 22h.
- S'en suit une décroissance des concentrations pendant la nuit jusqu'à l'ouverture du réseau.

Il n'est pas observé d'impact significatif des pics de fréquences de métro sur les concentrations en PM<sub>2,5</sub>, car ce qui est remis en suspension par le passage des rames correspond à des particules plutôt grossières. La proportion moyenne des PM<sub>2,5</sub> dans les PM<sub>10</sub> est de 49 %.

*Nb : Au cours de la campagne de mesure 2016, pour les prélèvements sur filtres à la gare Saint-Charles, la pesée moyenne des PM<sub>2,5</sub> représentait 47 % des PM<sub>10</sub>.*



**Figure 11 : Comparaison du profil moyen journalier des PM<sub>2,5</sub> à celui des PM<sub>10</sub> - station Saint-Charles**

## 5.2 Concentrations en particules fines à la station de La Blancarde

### 5.2.1 Concentrations moyennes hebdomadaires en PM<sub>10</sub>

Les mesures de PM<sub>10</sub> à la Blancarde ont été réalisées par des prélèvements hebdomadaires sur filtre. La concentration moyenne sur l'ensemble de la période de mesure (du 16 janvier au 24 juillet) est de **84 µg/m<sup>3</sup>**. Pour rappel, la concentration en PM<sub>10</sub> par prélèvement hebdomadaire sur filtre à la station Saint-Charles sur la même période est de 85 µg/m<sup>3</sup>.

La concentration en PM<sub>10</sub> à la station de la Blancarde est similaire à celle de la station Saint-Charles.

### 5.2.2 Distribution des données hebdomadaires en PM<sub>10</sub> par mois

La représentation de la distribution des concentrations hebdomadaires en PM<sub>10</sub> montre une variabilité mensuelle à la station Blancarde similaire à celle de la station Saint-Charles, avec des mois de février, juin et juillet présentant des concentrations légèrement supérieures aux autres mois.

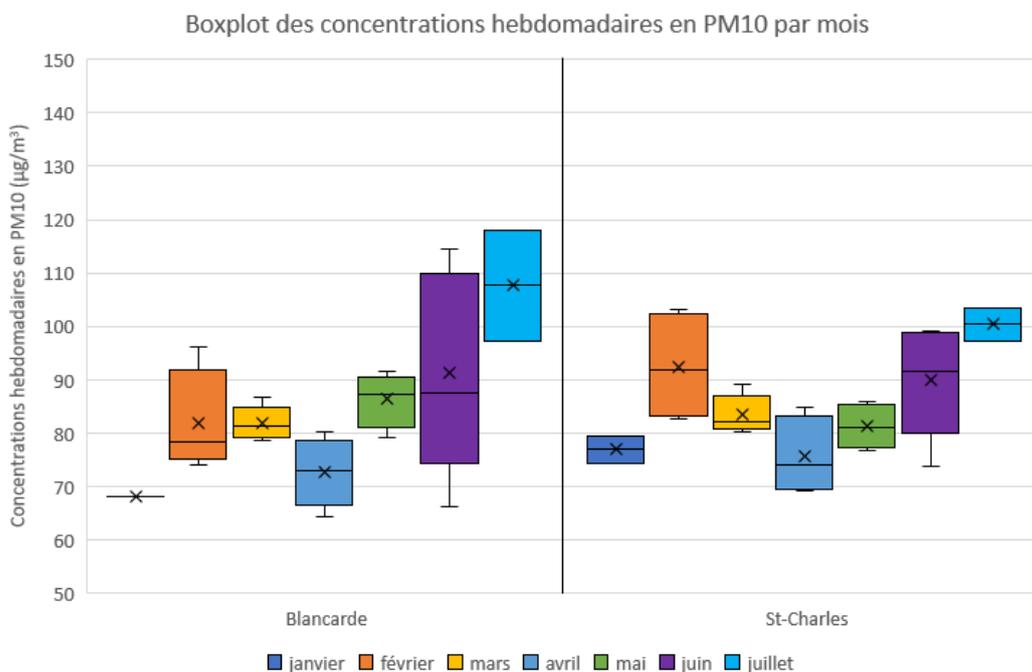


Figure 12 : Box-plot des concentrations hebdomadaires en PM<sub>10</sub> - station Blancarde

L'évolution mensuelle des concentrations à la station Blancarde est comparable à celle observée à la station Saint-Charles.

### 5.2.3 Estimation des concentrations massiques de PM<sub>2,5</sub> au cours du temps

Sur la base de l'estimation des concentrations par le granulomètre MINI-LAS à la station Blancarde, le profil moyen journalier montre une évolution des concentrations en PM<sub>10</sub> similaire à celle de la station Saint-Charles, avec une augmentation des concentrations à partir de 6h, un pic matinal entre 9h et 10h et un pic en fin d'après-midi autour de 18h, suivi d'une décroissance progressive des concentrations au cours de la soirée.

Comme à la station Saint-Charles, le profil moyen des fractions PM<sub>2,5</sub> montre une dynamique différente de celle des PM<sub>10</sub>. Les concentrations augmentent à partir de 5h à 6h, avec des niveaux légèrement plus importants entre 9h et 10h puis une stabilisation des concentrations jusqu'à 20h. S'en suit une décroissance des concentrations pendant la nuit jusqu'à l'ouverture du réseau.

Il n'est pas observé d'impact significatif des pics de fréquences de métro sur les concentrations en PM<sub>2,5</sub>. La proportion moyenne estimée des PM<sub>2,5</sub> dans les PM<sub>10</sub> à la station Blancarde est de 50 %.

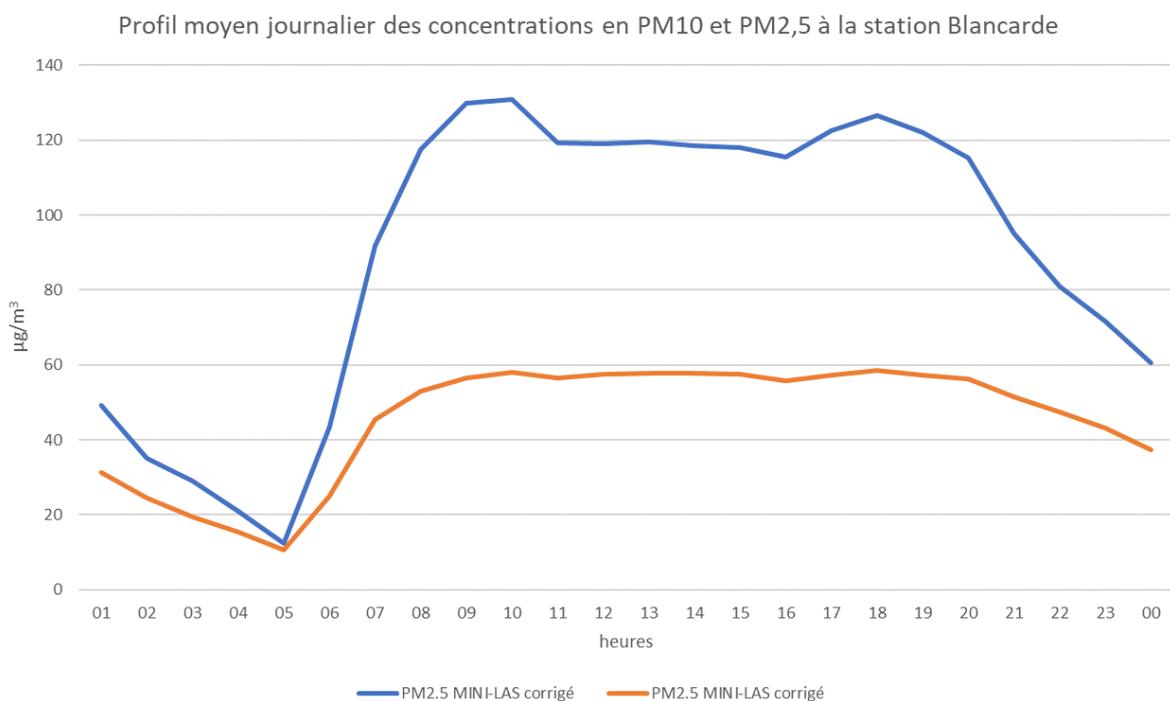


Figure 13 : Profils moyens journaliers des PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> - station Blancarde

## 5.3 Concentration en métaux

Dans le cadre de cette campagne de mesure, le préleveur de particules a été équipé pour prélever la masse et les métaux de la fraction PM<sub>10</sub>, ce qui permet d'obtenir la concentration des PM<sub>10</sub> et des 41 métaux analysés. Les résultats des concentrations de l'ensemble des métaux sont disponibles en annexe 4. Dans le corps du rapport, seuls sont présentés les métaux réglementés en air ambiant (extérieur) et les métaux connus pour provenir de l'usure des quais et de l'abrasion des pièces métalliques.

### 5.3.1 La concentration des métaux dans les PM<sub>10</sub> à Saint-Charles

A la station Saint-Charles, sur l'ensemble de la période de mesure, la concentration en PM<sub>10</sub>, obtenue à partir de la pesée des filtres prélevés, est de 85 µg/m<sup>3</sup>, contre 94 µg/m<sup>3</sup> pour l'analyseur automatique sur la même période. Cette différence de concentration entre ces deux analyseurs de référence est conforme à l'incertitude de mesure exigée pour ce type de matériel (25 % à 50 µg/m<sup>3</sup> en moyenne journalière). C'est à partir de ces échantillons qu'est estimée la part des métaux dans les PM<sub>10</sub>.

#### ► Les métaux dans les PM<sub>10</sub>

Parmi l'ensemble des métaux, le fer (Fe) est l'élément trace métallique le plus présent.

Parmi les métaux réglementés en air ambiant, le cadmium (Cd) et le plomb (Pb) présentent des concentrations significativement inférieures aux seuils réglementaires en air ambiant (valeur cible pour le cadmium : 5 ng/m<sup>3</sup>, valeur limite pour le plomb : 500 ng/m<sup>3</sup>). Les concentrations en arsenic (As) et nickel (Ni) sont supérieures à la valeur cible en air ambiant (respectivement 6 et 20 ng/m<sup>3</sup>). Parmi les métaux traces en quantité significative, figurent deux espèces de la liste des polluants d'intérêt prioritaires de l'ANSES<sup>5</sup> : le cuivre (Cu) et le manganèse (Mn).

**Tableau 7 : Concentrations de PM<sub>10</sub> (par prélèvement) et de métaux à la station Saint-Charles**

Paramètre	Particules fines	Métaux réglementés en air ambiant				Usure des quais
	PM10 (µg/m <sup>3</sup> )	As (ng/m <sup>3</sup> )	Cd (ng/m <sup>3</sup> )	Ni (ng/m <sup>3</sup> )	Pb (ng/m <sup>3</sup> )	Ca (ng/m <sup>3</sup> )
Nombre de valeurs	26	26	26	26	26	18
Moyenne	<b>85</b>	<b>14,3</b>	<b>0,36</b>	<b>78</b>	<b>8,4</b>	<b>1 234</b>
Médiane	84	14,5	0,34	76	6,1	1 394
P10 – P90	74 - 99	11,8 - 16,4	0,26 - 0,46	60 - 97	4,3 - 10	227 – 1 961
(Min - Max)	69 - 103	10,6 - 17,7	0,21 - 0,81	53 - 128	3,8 - 58,1	71 - 2 159
Paramètre	Abrasion des pièces métalliques du matériel roulant					
	Ba (ng/m <sup>3</sup> )	Cr (ng/m <sup>3</sup> )	Cu (ng/m <sup>3</sup> )	Fe (ng/m <sup>3</sup> )	Mn (ng/m <sup>3</sup> )	Zn (ng/m <sup>3</sup> )
Nombre de valeurs	24	26	26	26	26	26
Moyenne	<b>11,1</b>	<b>22,6</b>	<b>2 702</b>	<b>28 891</b>	<b>262</b>	<b>76</b>
Médiane	10,3	24,2	2 672	28 794	288	67
P10 – P90	3,2 - 58,4	11,6 - 32,5	1 538 - 3 728	19 439 - 36 510	125 - 353	38 - 93
(Min - Max)	4,1 - 14,4	9,9 - 40,1	1 307 - 4 683	15 283 - 39 126	103 - 386	31 – 295

<sup>5</sup> Polluants « émergents » dans l'air ambiant - Identification, catégorisation et hiérarchisation de polluants actuellement non réglementés pour la surveillance de la qualité de l'air – ANSES 2018

### 5.3.2 La concentration des métaux dans les PM<sub>10</sub> à La Blancarde

A la station de La Blancarde, la concentration en PM<sub>10</sub>, obtenue à partir de la pesée des filtres prélevés, sur l'ensemble de la période est de 84 µg/m<sup>3</sup>, soit une concentration quasiment identique à celle de la station Saint-Charles (85 µg/m<sup>3</sup>). Le caractère plus récent de la station Blancarde (tunnels avec une moindre accumulation de particules) ainsi que le volume intérieur beaucoup plus important ne semblent pas influencer les concentrations en PM<sub>10</sub>.

#### ► Les métaux dans les PM<sub>10</sub>

Les concentrations observées des métaux traces à la station La Blancarde sont du même ordre de grandeur que celles de la station Saint-Charles. Ces concentrations similaires en métaux et PM<sub>10</sub> entre les stations Saint-Charles et Blancarde semblent montrer que la configuration spatiale d'une station, notamment la profondeur des quais et le volume intérieur, ainsi que caractère plus récent d'une station et de ses tunnels adjacents, n'ont que peu d'influence sur les concentrations observées sur les quais.

**Parmi l'ensemble des métaux, le fer (Fe) est également l'élément trace métallique le plus présent.**

Parmi les métaux réglementés en air ambiant, le cadmium (Cd) et le plomb (Pb) présentent des concentrations significativement inférieures aux seuils réglementaires en air ambiant. Les concentrations en Arsenic (As) et nickel (Ni) sont supérieures à la valeur cible en air ambiant. Les deux métaux identifiés par l'ANSES comme polluants d'intérêt prioritaires (Cu, Mn) présentent des concentrations similaires à la station Saint-Charles.

**Tableau 8 : Concentrations de PM<sub>10</sub> et de métaux à la station La Blancarde**

Paramètre	Particules fines	Métaux réglementés en air ambiant				Usure des quais
	PM10 (µg/m <sup>3</sup> )	As (ng/m <sup>3</sup> )	Cd (ng/m <sup>3</sup> )	Ni (ng/m <sup>3</sup> )	Pb (ng/m <sup>3</sup> )	Ca (ng/m <sup>3</sup> )
Nombre de valeurs	27	27	27	27	27	25
<b>Moyenne</b>	<b>84</b>	<b>10,8</b>	<b>0,35</b>	<b>86</b>	<b>6,8</b>	<b>953</b>
Médiane	81	10,6	0,32	83	5,7	1 097
P10 – P90	68 - 101	8,3 - 13,6	0,25 - 0,47	59 - 122	4,1 - 8,6	38 - 1 403
(Min - Max)	64 - 118	6,8 - 14,6	0,22 - 0,75	56 - 140	3,1 - 24,1	13 - 1 945
Paramètre	Abrasion des pièces métalliques du matériel roulant					
	Ba (ng/m <sup>3</sup> )	Cr (ng/m <sup>3</sup> )	Cu (ng/m <sup>3</sup> )	Fe (ng/m <sup>3</sup> )	Mn (ng/m <sup>3</sup> )	Zn (ng/m <sup>3</sup> )
Nombre de valeurs	25	27	27	27	27	27
<b>Moyenne</b>	<b>9,7</b>	<b>25,7</b>	<b>3 153</b>	<b>32 416</b>	<b>301</b>	<b>71</b>
Médiane	10,2	23,9	2 831	28 592	297	71
P10 – P90	4 - 14,2	10,2 - 42,4	1 451 - 4 879	19 801 - 45 938	117 - 463	37 - 96
(Min - Max)	2,1 - 18,3	8,5 - 55,7	1 822 - 4 635	17 794 - 58 407	111 - 515	34 - 196

### 5.3.3 Part des éléments traces métalliques dans les particules PM<sub>10</sub>

La somme des métaux mesurés représente 45 % de la masse des PM<sub>10</sub> à la station Saint-Charles et 40 % à la station Blancarde. Cette proportion est significativement plus importante qu'en air ambiant (en général inférieur à 10%). La part restante des PM<sub>10</sub> peut être composée de matières organiques, de carbone élémentaire ou d'ions.

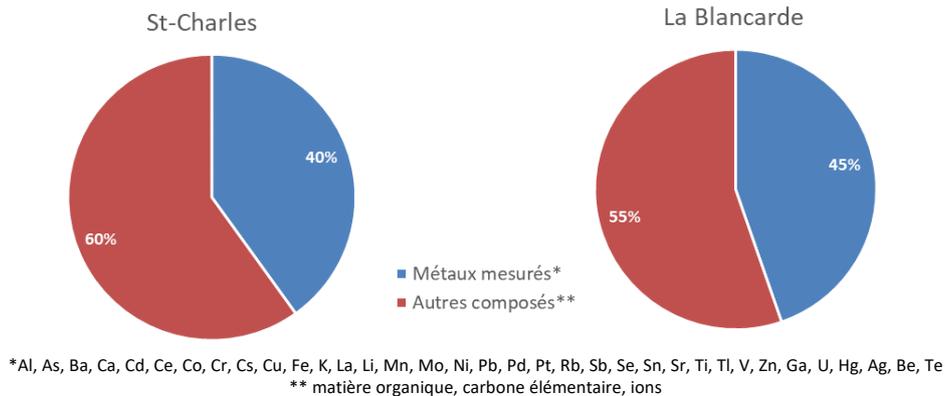


Figure 14 : Contribution relative de l'ensemble des métaux traces mesurés dans les PM<sub>10</sub>

La contribution relative de chaque espèce montre que le fer (Fe) est l'élément le plus représenté (en masse) :

- 84% des métaux et 34% de la masse des PM<sub>10</sub> à la station Saint-Charles
- 86% des métaux et 38% de la masse des PM<sub>10</sub> à la station de La Blancarde

Viennent ensuite le cuivre (8% des métaux), le calcium (3%), l'aluminium (2%), le manganèse (1%) et le potassium (0,5%). La somme des métaux restants représente 0,5% des métaux.

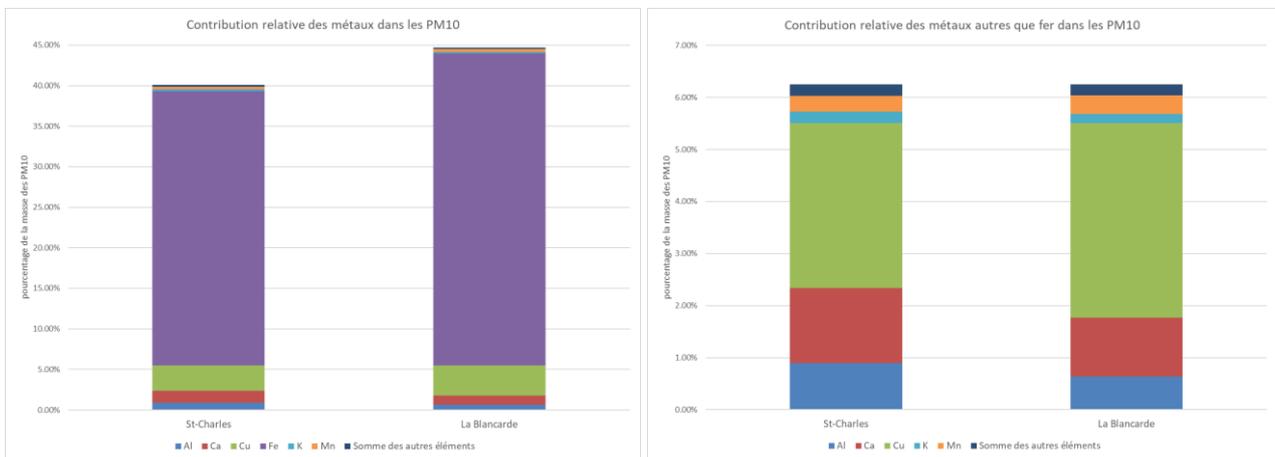


Figure 15 : Contribution relative de chaque métal trace mesuré dans les PM<sub>10</sub>

Les métaux représentent entre 40 et 45 % de la masse des PM<sub>10</sub> aux stations Saint-Charles et Blancarde. Les métaux les plus représentés sont principalement le fer, suivi du cuivre, du calcium, de l'aluminium, du manganèse et du potassium.

### 5.3.4 Comparaison aux campagnes précédentes et aux EFS françaises et mondiales

Entre 2010 et 2016 à la station Saint-Charles, les concentrations moyennes des métaux réglementés en air ambiant ou en lien avec l'abrasion des pièces métalliques ou l'usure des quais avaient montré des différences significatives. Les prélèvements de 2010, 2016 et 2019 n'ont pas été réalisés selon les mêmes modalités de fréquence et de durée :

- 2010 : prélèvements journaliers : 44 filtres de 24 heures de prélèvement, répartis en hiver et en été,
- 2016 : prélèvements hebdomadaires : 12 filtres de 7 jours de prélèvement, répartis sur 6 mois,
- 2019 : prélèvements hebdomadaires, toutes les semaines : 27 filtres de 7 jours de prélèvement pour l'ensemble des 27 semaines de la période de 6 mois.

Entre 2016 et 2019, les concentrations moyennes de ces métaux sont comparables sur le site de Saint-Charles.

Avec des modalités de prélèvement similaires, les concentrations moyennes en métaux à la station Saint-Charles sont relativement stables entre 2016 et 2019.

La contribution relative des espèces de métaux dans les PM<sub>10</sub> dans le métro de Marseille est cohérente à ce qu'indique le rapport d'expertise de l'ANSES dans les enceintes ferroviaires souterraines de 2015<sup>6</sup> : la masse des particules PM<sub>10</sub> est composée de fer, de carbone organique et de carbone élémentaire principalement, ainsi que de cuivre, de baryum et d'autres éléments métalliques (chrome, nickel, manganèse, etc.) et minéraux (Si, Ca, etc.) ».

**Tableau 9 : Concentrations moyennes des métaux et PM<sub>10</sub> entre les campagnes 2010, 2016 et 2019**

	Concentrations moyennes	Saint-Charles 2010*	Saint-Charles 2016	Saint-Charles 2019	La Blancarde 2019	Autres EFS françaises <sup>7</sup> (min - max)
	Prélèvement	Journalier	Hebdomadaire (1 semaine sur 2)	Hebdomadaire	Hebdomadaire	
Métaux réglementés en air ambiant (extérieur)	As (ng/m <sup>3</sup> )	4	16,7	14,3	10,8	0,4 - 16,7
	Cd (ng/m <sup>3</sup> )	0,2	1,7	0,4	0,3	0,3 - 3,9
	Ni (ng/m <sup>3</sup> )	15	91,6	78	86	5 - 91,6
	Pb (ng/m <sup>3</sup> )	12	7,5	8,4	6,8	6 - 120
Usure des quais	Ca (ng/m <sup>3</sup> )	3 700	1 196	1 234	953	1 196 - 2 854
Abrasion des pièces métalliques du matériel roulant	Ba (µg/m <sup>3</sup> )	46	10,1	11,1	9,7	10,1 - 336
	Cr (µg/m <sup>3</sup> )	38	27,5	22,6	25,7	27,5 - 204
	Cu (µg/m <sup>3</sup> )	2 800	3 475	2 702	3 153	165 - 5443
	Fe (µg/m <sup>3</sup> )	14 700	27 753	28 891	32 416	2 296 - 70 678
	Mn (µg/m <sup>3</sup> )	138	288	262	301	25 - 442
	Zn (µg/m <sup>3</sup> )	688	116	76	71	47,5 - 2 028
Particules fines	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	<b>64**</b>	<b>78*</b>	<b>85</b>	<b>84</b>	-

\*prélèvements hebdomadaires en alternance PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> (6 mois)

\*\*deux périodes de prélèvement de 4 semaines (périodes chaude et froide)

**Le fer (Fe) est l'élément métallique le plus représenté dans les PM<sub>10</sub> dans les enceintes ferroviaires souterraines françaises et au niveau mondial, avec une proportion de la masse des PM<sub>10</sub> de 9 à 53%, contre 34 et 38 % pour cette campagne de mesure de 2019 dans le métro de Marseille.**

**Les concentrations en métaux sont du même ordre de grandeur de celles observées dans les autres enceintes ferroviaires souterraines, sauf pour l'arsenic (As) et le nickel (Ni) où les concentrations sont parmi les plus importantes.**

<sup>6</sup> Pollution chimique de l'air des enceintes de transports ferroviaires souterrains et risques sanitaires associés chez les travailleurs - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective - Septembre 2015

<sup>7</sup> Qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines (EFS) en France – AtmoSud 2020

## 5.4 Granulométrie des particules

Une explication permettant la lecture des différents graphiques relatifs à la granulométrie est proposée en ANNEXE 5.

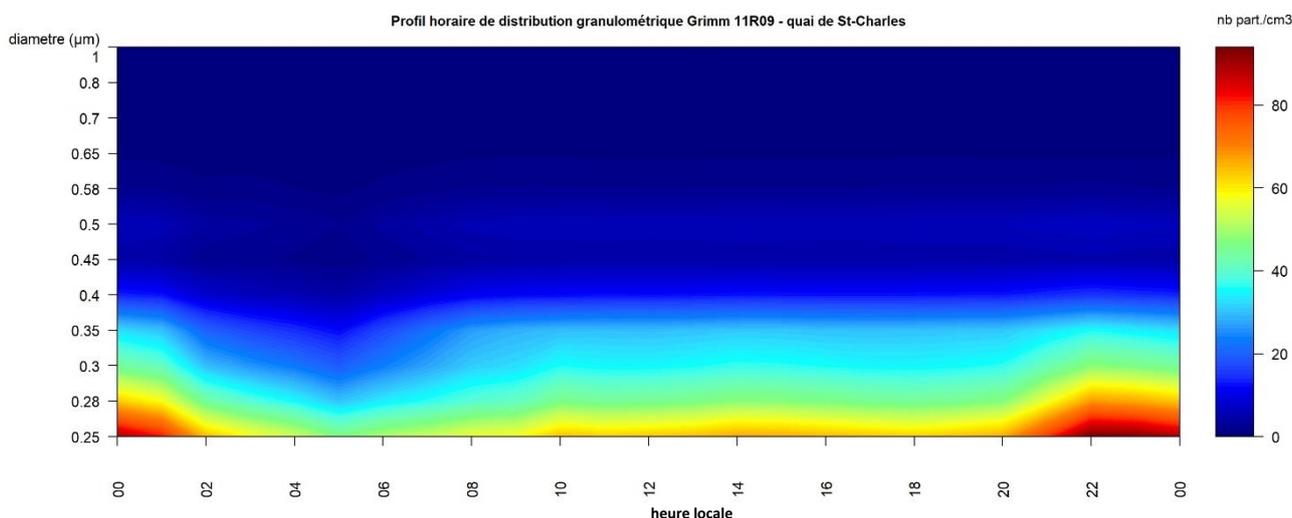
### 5.4.1 Granulométrie des particules à Saint-Charles

#### 5.4.1.1 Distribution granulométrique des PUF

Le granulomètre MINI-LAS permettant la mesure des fractions de 250 nm à 32 µm a été installé à la station Saint-Charles pendant toute la période de la campagne de mesure.

##### ► Les particules les plus nombreuses

Sur l'ensemble de la gamme de mesure du granulomètre de 250 nm à 32 µm, ce sont **les particules les plus petites (comprises entre 250 nm et 300 nm) qui sont les plus nombreuses**. 95% des particules comptées ont une taille comprise entre 250 et moins de 500 nm. Le profil horaire de distribution granulométrique ci-après, qui intègre l'ensemble de la période de mesure, illustre l'évolution de la répartition granulométrique des particules de diamètre compris entre 250 nm et 1 µm. Le nombre des particules les plus fines est plus important de 21h à 1h, moyen pendant la journée et plus faible pendant la période de fermeture du réseau (1h-5h).



**Figure 16 : Répartition du nombre de particules/cm<sup>3</sup> des fractions de 250 nm à 1 µm - station Saint-Charles**

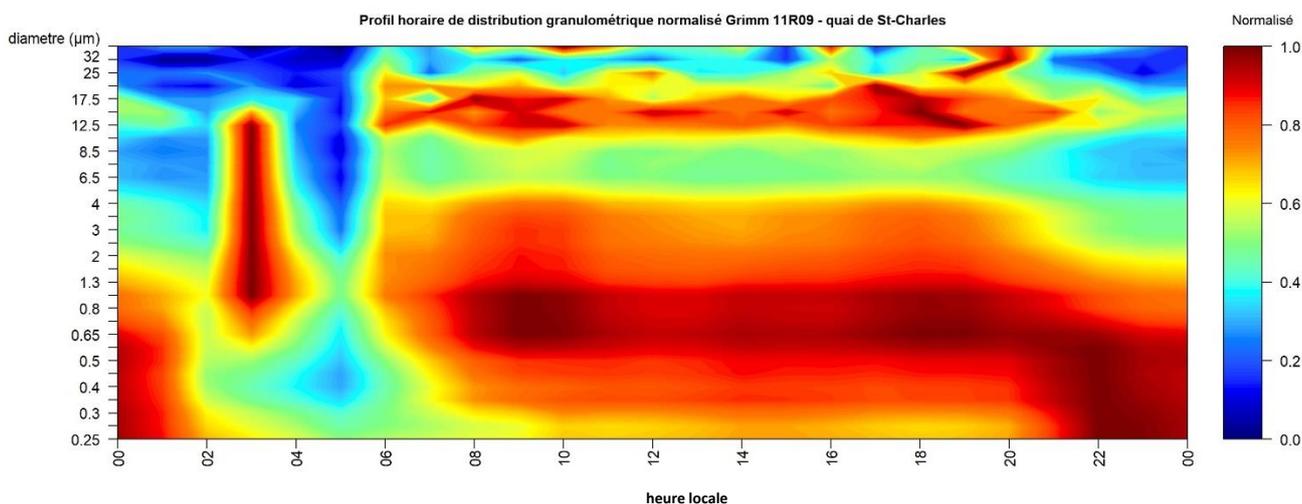
Sur l'ensemble de la gamme de mesure du granulomètre, les particules les plus nombreuses sont les plus petites mesurées : autour de 250 nm. Ces particules les plus nombreuses présentent des concentrations plus importantes en soirée que le reste de la journée, avec un minimum en pleine nuit jusqu'à l'ouverture du réseau.

## ► Évolution temporelle

La normalisation des données du profil moyen journalier par le maximum permet d'identifier les périodes auxquelles chacune des fractions est la plus nombreuse. Cela permet d'observer que :

- L'ensemble des particules est influencé par la période d'ouverture du métro (5h – 1h) avec une augmentation à l'ouverture et une diminution à la fermeture,
- Pendant la journée, les particules de 250 à 600 nm ne semblent pas significativement influencées par le passage des métros (concentrations stagnantes), mais elles augmentent à partir de 20h pour un maximum observé entre 22 heures et minuit. Elles semblent influencées par un apport plutôt extérieur,
- Les particules supérieures à 600 nm semblent influencées par la fréquence de passage des métros, avec des pics à 9h et 18h (cf. annexe 7), puis elles montrent une diminution à partir de 20h,
- En période nocturne, les particules plus grossières, supérieures à 800 nm, présentent des niveaux importants autour de 3h du matin. Ces maximums sont la résultante de 5 épisodes nocturnes sur les 6 mois (21 janvier, 7, 8, 13 et 28 février), tous associés à des concentrations importantes en PM<sub>10</sub> (de 312 à 985 µg/m<sup>3</sup>) et correspondant à des périodes d'entretien/maintenance nocturnes.

Les profils moyens journaliers sont similaires en période froide et période chaude, à la différence près que les particules les plus fines sont légèrement plus nombreuses en période chaude (cf. annexe 6).



**Figure 17 : Profil moyen journalier du nombre de particules/cm<sup>3</sup> des fractions de 250 nm à 32 µm normalisé par le maximum de chaque fraction - station Saint-Charles**

L'évolution de nombre total de particules (influencé principalement par les particules les plus fines) diffère de l'évolution des concentrations massiques en PM<sub>10</sub>, avec une augmentation des concentrations à l'ouverture du réseau (un peu avant 6 heures), une certaine stabilisation dans la journée et une augmentation en soirée vraisemblablement liée à un apport extérieur. Ces particules les plus fines ne semblent pas influencées par la fréquence de passage des rames, au contraire des plus grossières (> 600 nm).

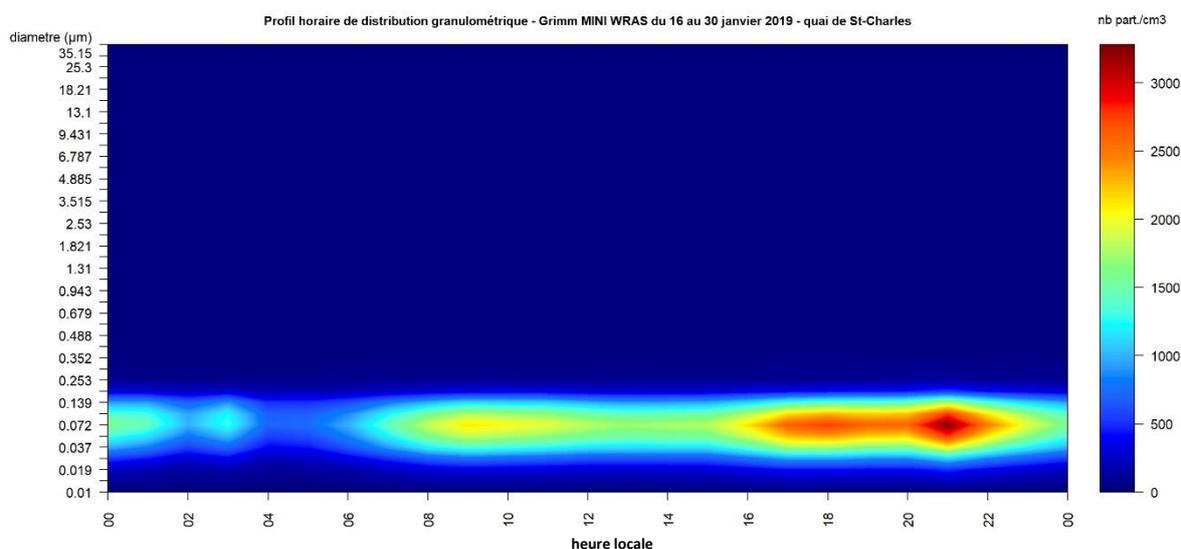
Les périodes d'entretien nocturnes semblent impacter principalement les fractions de 600 nm à 14 µm (entre 2 et 4 heures du matin).

### 5.4.1.2 Distribution granulométrique de 10 nm à 35 µm à Saint-Charles

Afin d'obtenir des données de distribution granulométrique des particules de diamètre inférieur à 250 nm, un granulomètre complémentaire permettant la mesure des fractions de 10 nm à 35 µm a été installé en parallèle à la station Saint-Charles pendant une période plus courte d'un mois, courant janvier 2019. Un dysfonctionnement sur site a occasionné la perte des données d'un certain nombre de jours, limitant la période de mesure du 16 au 30 janvier 2019.

#### ► Fractions de particules les plus nombreuses

Les données de la période de mesure de 15 jours montrent que **les fractions de particules les plus nombreuses sont centrées autour de la fraction 72 nm, plus largement entre 20 et 250 nm** (cf. série de mesure disponible en annexe 8). Ces données sont cohérentes avec le rapport d'expertise de l'ANSES<sup>8</sup> qui indique que « la large majorité des particules en suspension dans les EFS est submicronique, les particules d'environ 30-40 nm de diamètre étant les plus nombreuses d'après quelques études ».



**Figure 18 : Profil moyen journalier du nombre de particules/cm<sup>3</sup> des fractions de 10 nm à 35 µm – station Saint-Charles**

Ces mesures complémentaires de distribution granulométrique, qui permettent la mesure des particules de diamètres inférieurs à 250 nm (de 10 nm à 35 µm), mettent en évidence que ce sont les particules comprises entre 20 et 250 nm de diamètre qui sont les plus nombreuses, dont une gamme notable autour de 72 nm de diamètre.

*Nb : La normalisation de la série de données par le maximum de chaque classe de fraction, présenté en **annexe 9**, permet de visualiser les évolutions de chaque fraction au cours du temps. Le 5<sup>ème</sup> maximum horaire le plus important en PM<sub>10</sub> de la campagne de mesure (25/01/2019 à 2h du matin avec 384 µg/m<sup>3</sup> en PM<sub>10</sub>) est visible dans ces données, il est associé à une augmentation de concentrations de particules de 350 nm à 18 µm.*

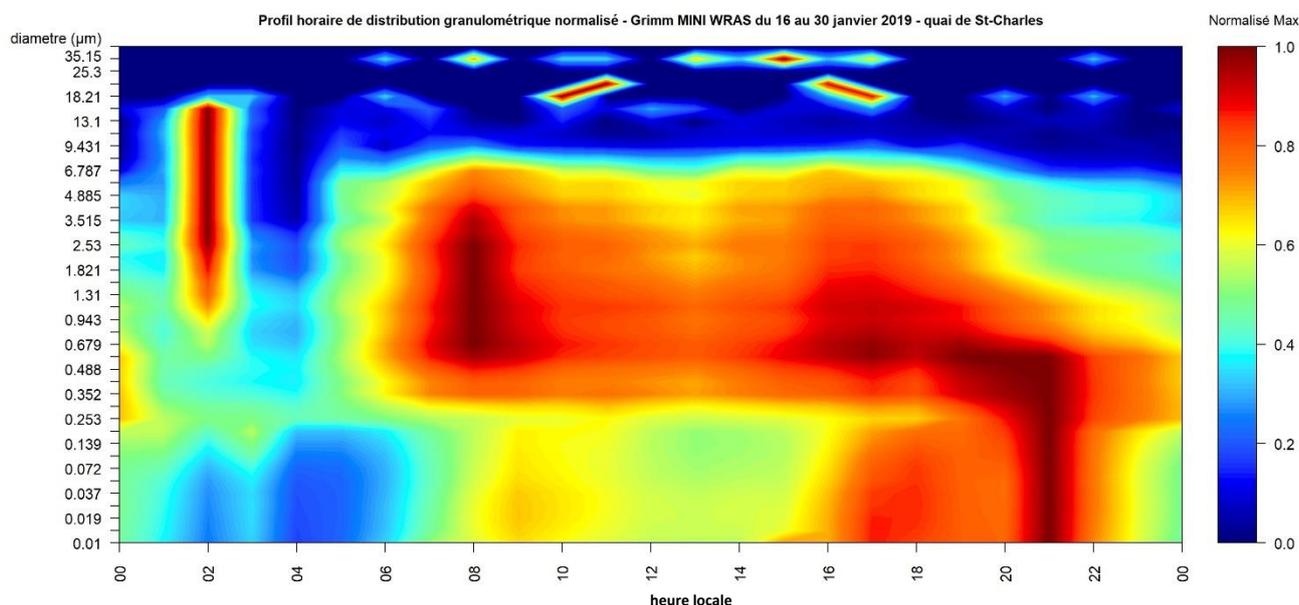
<sup>8</sup> Pollution chimique de l'air des enceintes de transports ferroviaires souterrains et risques sanitaires associés chez les travailleurs - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective - Septembre 2015

## ► Évolution temporelle

Le profil moyen journalier des concentrations normalisées par le maximum de cet appareil, plus discriminant mais sur une période plus courte, montre les mêmes tendances, en précisant l'évolution des concentrations des particules entre 10 nm et 250 nm :

- Les concentrations des fractions les plus grossières (>600 nm) montrent un lien avec la période d'ouverture du réseau et plus particulièrement pendant les horaires où les fréquences de passage des rames sont les plus importantes (7h à 19h),
- Les particules de 10 à 600 nm semblent être impactées par la période d'ouverture du réseau sans être significativement influencées par la fréquence de passage des métros. **Elles montrent une augmentation significative en soirée, autour de 21h. Elles semblent influencées par un apport plutôt extérieur.** Cette hypothèse est confortée par les données du granulomètre de la station de référence de fond urbain de Marseille Longchamp (cf. **annexe 10**) qui présente une augmentation significative des fractions de 15 à 600 nm aux mêmes heures.

En fin de soirée, l'ensemble des particules voient leur nombre décroître au cours de la nuit. En période de fermeture du réseau, il est tout de même observé un nombre de particules important de 1 à 13  $\mu\text{m}$ , uniquement dû à la période d'entretien nocturne du 21 janvier (cf. données du MINI-LAS).



**Figure 19 : Profil moyen journalier du nombre de particules/litre des fractions de 10 nm à 35  $\mu\text{m}$  normalisé par le maximum de chaque fraction - station Saint-Charles**

Pour la gamme de particules de 10 nm à 35  $\mu\text{m}$  sur la période de mesure de deux semaines, les particules les plus nombreuses sont centrées autour de la fraction 72 nm (plus largement entre 30 et 140 nm).

Les particules inférieures à 250 nm ne semblent pas plus influencées par la fréquence de passage des rames que les particules de 250 à 600 nm.

Une augmentation significative du nombre de particules de 10 à 600 nm est observée autour de 21h. Elles semblent influencées par un apport essentiellement extérieur.

## 5.4.2 Granulométrie des particules à la Blancarde

### 5.4.2.1 Distribution granulométrique de 250 nm à 32 µm à la Blancarde

#### ► Les particules les plus nombreuses

A la station Blancarde, sur les tailles de particules allant de 250 nm à 32 µm, les données du granulomètres MINI-LAS montrent également que les particules les plus nombreuses sont les plus petites de la gamme de mesure (250 nm). Comme pour la station Saint-Charles, le profil horaire montre que le nombre des particules les plus fines est plus important de 21h à 1h, moyen pendant la journée mais les niveaux baissent moins pendant la période de fermeture du réseau (1h-5h).

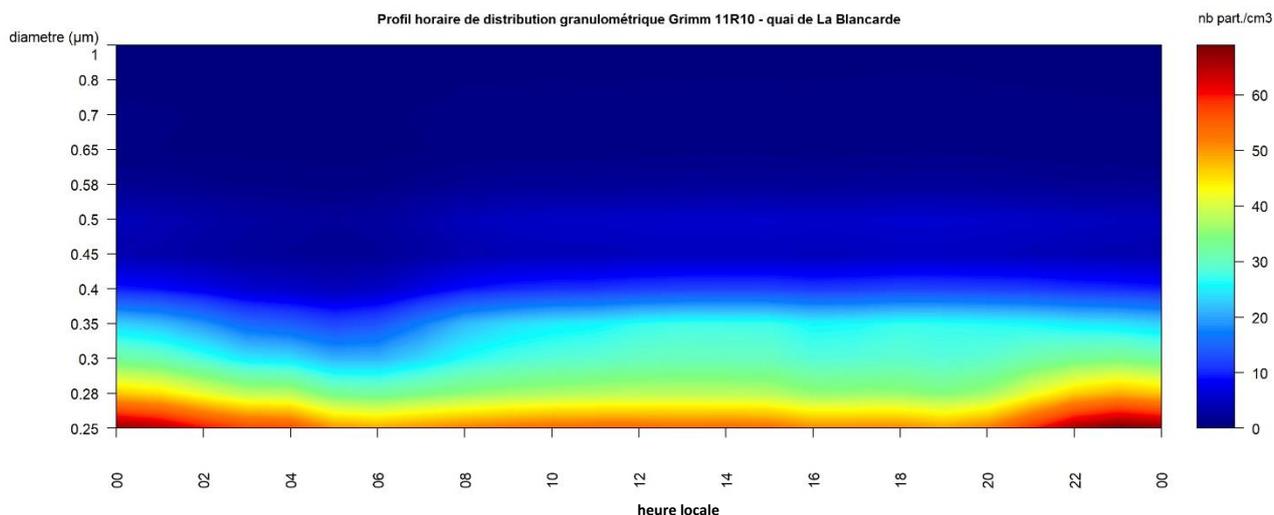


Figure 20 : Profil moyen journalier du nombre de particules/litre des fractions de 250 nm à 1 µm - station Blancarde

Comme à la station Saint-Charles, sur l'ensemble de la gamme de mesure du granulomètre, les particules les plus nombreuses sont les plus petites mesurées : autour de 250 nm. Ces particules les plus nombreuses présentent des concentrations plus importantes en soirée que le reste de la journée.

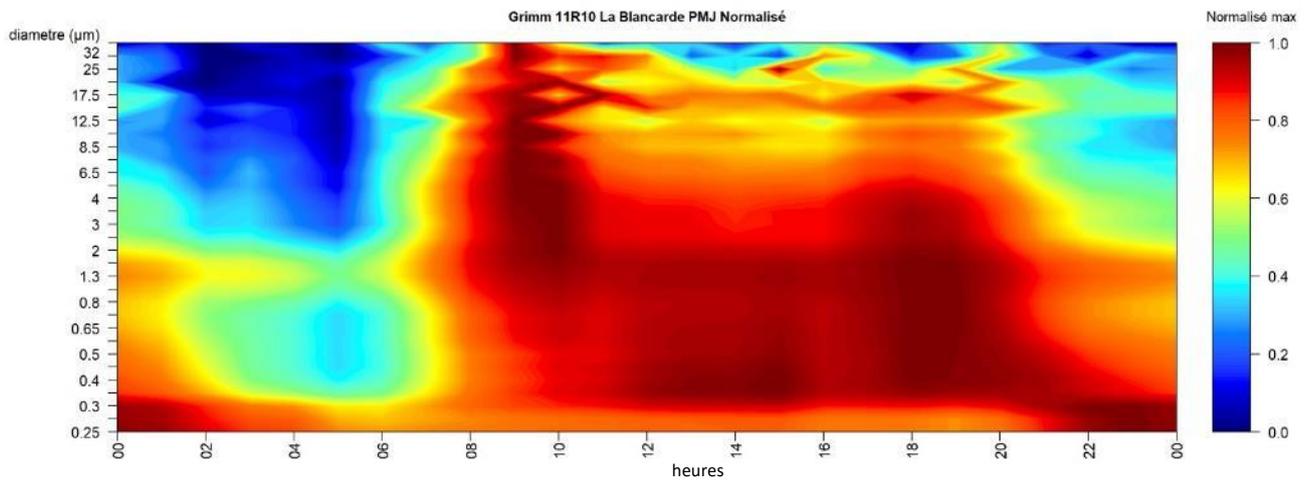
#### ► Évolution temporelle

A la Blancarde, l'examen du profil moyen journalier normalisé par le maximum montre des tendances similaires à celles de la station Saint-Charles, à savoir :

- L'influence de la période d'ouverture du métro sur l'ensemble des tailles de particules,
- Les particules entre 250 nm et 600 nm présentent une augmentation progressive de leur nombre au cours de la journée, elles ne semblent donc pas significativement influencées par le passage des rames,
- Les particules supérieures à 600 nm semblent d'avantage corrélées à la fréquence de passage des rames, avec des pics vers 9h et 18h puis une diminution vers 21h,
- Les particules de 250 à 300 nm sont à leur niveau maximum en soirée, entre 22h et minuit, corrélé à ce qui est observé à la station de fond urbain de Marseille (cf. annexe 9), elles semblent donc influencées par un apport plutôt extérieur.

A la différence des données de la station Saint-Charles, il n'est pas observé de niveaux importants de particules pendant la période nocturne, vraisemblablement puisqu'il n'y a pas eu de périodes d'entretien nocturne (passage de rames diesel, travaux d'entretien) dans cette zone.

Les profils moyens journaliers sont similaires en période froide et période chaude, à la différence près que les particules les plus fines sont plus nombreuses au cours de la journée en période froide (cf. annexe 6).



**Figure 21 : Profil moyen journalier du nombre de particules/litre des fractions de 250 nm à 32  $\mu\text{m}$  normalisé par le maximum de chaque fraction - station Blancarde**

L'évolution de nombre de particules est similaire à celle de la station Saint-Charles. Les particules les plus fines ne semblent pas corrélées à la fréquence de passage des métros de la Blancarde, avec une augmentation à nouveau observée en début de soirée. L'évolution des concentrations au cours du temps est similaire à celle de la station Saint-Charles mais les niveaux observés du nombre total de particules sont inférieurs de 17 %.

## 5.5 Composés organiques volatils

Les mesures de COV ont consisté à l'analyse systématique des BTEX (Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylènes) et des 20 composés majoritaires sur des séries de prélèvements correspondant à une durée de 4 semaines, soit 7 séries sur la période du 23 janvier au 31 juillet 2019.

Sur les 27 semaines de prélèvement aux stations Saint-Charles et Blancarde, au total 40 COV ou familles de COV ont été identifiés pour au moins une des séries de mesures envoyées au laboratoire. Certains COV n'ont été identifiés qu'à une reprise alors que d'autres sont identifiés dans plusieurs séries, voire dans toutes les séries de mesures. Les résultats de la série d'échantillonneurs correspondant à la période du 20 mars au 17 avril 2019 pour les 2 stations de métro ont été invalidés.

### 5.5.1 Les BTEX (Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylènes)

Pour les BTEX, les concentrations mesurées respectent les valeurs limites en air ambiant pendant le temps de l'étude.

Le benzène dépasse légèrement la valeur guide en air intérieur de  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , avec une concentration moyenne de  $2,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à la station Saint-Charles et  $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à la station Blancarde (concentration hebdomadaire maximale de  $4,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Les concentrations en BTEX sont similaires à celles observées à la station Saint-Charles lors de la campagne 2016 (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  : benzène 2,6 ; toluène 10 ; éthylbenzène 2,1 ; mp-xylène 8,3 ; o-xylène 3,2).

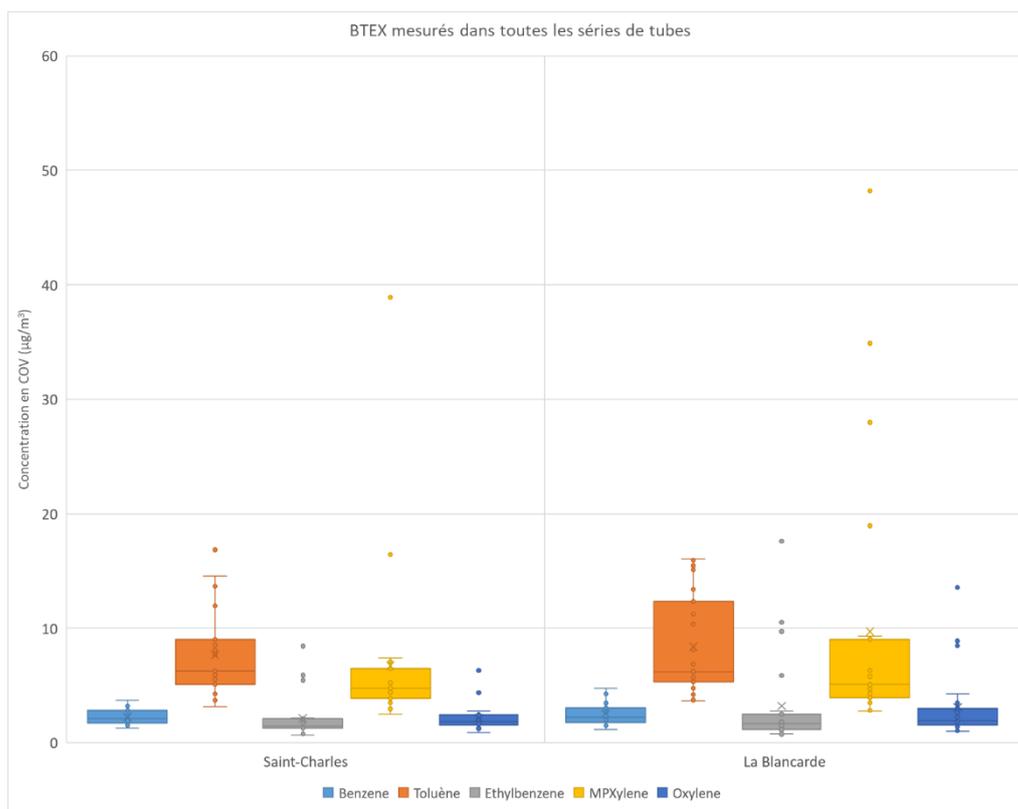


Figure 22 : Concentrations mesurées pour les COV mesurés dans chacune des périodes de mesures

Les gammes des concentrations moyennes hebdomadaires pour le benzène et le toluène sont comparables entre les stations Saint-Charles et La Blancarde. En revanche, des concentrations hebdomadaires plus importantes en éthylbenzène et en xylènes ont été observées sur la station de la Blancarde.

## 5.5.2 Les COV spécifiques : occurrence et concentrations

En dehors des BTEX, une grande gamme de COV a pu être mesurée lors des différentes campagnes menées sur les stations concernées. Pour chacune des campagnes, il a été recherché les 20 COV majoritairement présents ainsi que leur concentration moyenne. Le détail des concentrations est présenté en annexe 11.

### ► Les COV majoritaires dans toutes les séries de mesures

Lors de l'analyse des COV majoritaires de **tous les échantillons prélevés, 3 COV spécifiques ont été identifiés et quantifiés** :

- L'acétate de n-butyle (Acetic acid butyl ester)
- Le pentane 2 méthyl
- Le propane 2 ethoxy 2 méthyl

Leur concentration moyenne est comprise entre 2 et 4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La répartition des gammes de concentrations est relativement similaire entre les deux stations.

Les sources possibles d'acétate de n-butyle sont les diluants pour peintures, laques, vernis, encres d'imprimerie et colles. Le Propane 2 ethoxy 2 méthyl est utilisé comme additif des essences sans plomb.

### ► Les COV présents dans la majorité des séries de mesures

Les 6 composés suivants font partie des COV majoritaires dans **60 à 80 % des prélèvements** :

- Heptane
- Naphtalène
- Hexane
- Méthyl Isobutyl Cétone (MIK)
- Hexane 2 méthyl
- 1,2,4 triméthylbenzène

Hormis le naphtalène, pour lequel la concentration moyenne est d'environ 0.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , les autres composés présentent des niveaux moyens de l'ordre de 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La répartition des gammes de concentrations est relativement similaire entre les deux stations.

Parmi ces molécules, seul le naphtalène possède une valeur de référence en air intérieur (valeur de repère HCSP de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), largement respectée pendant la campagne de mesure.

### ► Les COV présents dans la moitié des séries de mesures

- Acétophénone
- Benzaldéhyde
- Camphène
- Décane
- Furfural
- p-Cymène
- pentane, 3-méthyl
- Pentanedioic acid dimethyl ester
- PGMEA
- Styrène

Leur concentration moyenne est comprise entre 1 et 3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La répartition des gammes de concentrations est relativement similaire entre les deux stations. La station de La Blancarde présente des concentrations supérieures en PGMEA, en décane et en benzaldéhyde par rapport à Saint-Charles.

### ► Des COV identifiés ponctuellement

D'autres COV ont ponctuellement été identifiés comme COV majoritaires et quantifiés dans les prélèvements réalisés, leur liste est proposée ci-dessous :

- p-Cymenene
- Limonene
- Hexane 3 methyl
- 3 Ethyltoluène
- dodecane
- Butanedioic acid dimethyl ester
- Ethyl acetate
- Phénol
- Famille Ethyltoluène
- Famille Triméthylbenzène
- Propyl benzene
- Méthyl méthacrylate
- 2 Ethyltoluène
- 2,2,4,6,6-pentamethylheptane
- Heptane, 3-methyl-
- Octane 3 methyl
- Cyclohexane 124 trimethyl
- cyclohexane methyl
- octane, 2-methyl
- 1-butanol
- octane, 4-methyl

Leur concentration moyenne est comprise entre 0.1 et 3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Sur l'ensemble de la période de la campagne de mesure, hormis les BTEX, 40 COV ou familles de COV différents ont été identifiés. Certains COV n'ont été identifiés qu'une seule fois alors que d'autres sont identifiés dans plusieurs voire l'intégralité des séries de mesures.

Les concentrations moyennes de l'ensemble des COV majoritaires sont relativement faibles ( $< 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Il n'est donc pas identifié de COV en concentration significative pouvant avoir une origine intérieure au réseau (passage des rames, présence des occupants, activités d'entretien...).

Les concentrations moyennes des différentes molécules sont assez similaires entre les stations de Saint-Charles et de La Blancarde. Seule une variabilité plus importante des concentrations au cours du temps est observée à la station de La Blancarde.

## 6. Conclusion

### ► Pourquoi une surveillance de la qualité de l'air au sein des enceintes ferroviaires souterraines ?

Les enceintes ferroviaires souterraines sont des environnements clos dans lesquels sont présents les polluants issus du déplacement du matériel roulant, des occupants et de l'air extérieur.

### ► Des mesures depuis 2010 dans le métro de Marseille

Les deux premières campagnes de mesure de 2010 et 2016 dans le métro Marseillais ont permis de caractériser, à certaines stations, divers polluants parmi lesquels les particules fines  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5}$ , les métaux traces et certains polluants gazeux organiques et inorganiques.

### ► Une nouvelle caractérisation en 2019 dans des stations Saint-Charles et Blancarde

L'étude de 2019 a pour but de poursuivre la surveillance de la qualité de l'air du métro de Marseille, par la mise en œuvre d'une campagne de mesure visant à caractériser une nouvelle station de métro et des polluants complémentaires aux  $PM_{10}$  et aux métaux traces : les particules ultrafines et les composés organiques volatils majoritaires.

### ► Respect la valeur guide 2019 dans les EFS malgré une légère augmentation des $PM_{10}$

A la station Saint-Charles, sur la période d'ouverture du métro (5h à 1h), les concentrations horaires en  $PM_{10}$  ont toujours respecté la valeur guide 2019 dans les enceintes ferroviaires pour une heure d'exposition ( $556 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). La concentration moyenne de l'ensemble de la campagne sur les heures d'ouverture est de  $105 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , soit une légère augmentation par rapport à la campagne 2016 ( $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Cette augmentation peut être influencée par la vétusté du matériel roulant et l'augmentation de la fréquentation du métro de 4 % entre 2016 et 2019. Le profil d'évolution des concentrations au cours d'une journée suit précisément la fréquence de passage des rames de métro, ce qui montre l'importance de l'impact du déplacement des rames sur les concentrations en  $PM_{10}$ . L'estimation des concentrations massiques en  $PM_{2,5}$  montre des profils journaliers plus stables au cours de la journée, avec une augmentation à l'ouverture du réseau à 5h et une décroissance des concentrations à partir de 23h.

### ► Les métaux traces en concentrations similaires à la campagne de 2016

Pour les métaux traces, les résultats confortent ceux de la précédente campagne avec, parmi les 41 métaux mesurés, des métaux prédominants qui sont, par ordre décroissant de concentration : fer (Fe), cuivre (Cu), calcium (Ca), Aluminium (Al), manganèse (Mn), potassium (K). Les quatre métaux réglementés dans l'air ambiant (arsenic As, cadmium Cd, nickel Ni, plomb Pb) montrent des concentrations similaires à la campagne de 2016. On observe un dépassement des valeurs cibles définies pour l'air ambiant pour l'arsenic (As) et le nickel (Ni).

### ► Des particules ultrafines plus nombreuses entre 20 et 250 nm qui ne suivent pas les $PM_{10}$

Aux deux stations de métro échantillonnées, la mesure des particules ultrafines montre que les plus nombreuses d'entre-elles sont situées autour de 72 nm de diamètre, plus largement entre 20 et 250 nm. Le nombre des particules de diamètres entre 10 et 600 nm ne semble pas en lien avec la fréquence de passage des métros mais il est impacté par les heures d'ouverture du réseau : augmentation des concentrations à l'ouverture, baisse des concentrations à la fermeture. Il semble également influencé par les concentrations extérieures avec un pic de concentration entre 21h et 22h, également observé en air ambiant à la station de fond urbain de Marseille Longchamp.

### ► Des COV majoritaires en concentrations faibles

Les concentrations moyennes des COV majoritaires n'excèdent pas  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à l'intérieur du réseau. Seul le benzène montre une concentration légèrement supérieure à la valeur guide en air intérieur de  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , tel que cela a été mis en évidence dans la campagne de mesure de 2016. Il n'est pas identifié de COV en concentration significative pouvant être d'origine intérieure au réseau.

### ► Des résultats à la station Blancarde globalement similaires à ceux de la station Saint-Charles

Malgré des quais plus larges et un volume intérieur plus important, les concentrations en  $PM_{10}$  et en métaux traces particulières sont similaires entre les stations Saint-Charles et la Blancarde. Dans cette dernière, les particules ultrafines suivent les mêmes évolutions au cours du temps qu'à Saint-Charles mais avec des niveaux moyens inférieurs de l'ordre de 17 %.

# BIBLIOGRAPHIE

ANSES (2015). Rapport d'expertise collective. Pollution chimique de l'air des enceintes de transports ferroviaires souterrains et risques sanitaires associés chez les travailleurs.

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

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

INERIS (2020). Guide de recommandations pour la réalisation de mesures harmonisées de la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines.

Ministère de la santé, de la famille et des personnes handicapées (2003). Annexe II de la Circulaire DGS/SD 7 B n° 2003-314 du 30 juin 2003 relative à la qualité de l'air dans les enceintes ferroviaires souterraines.

Parlement européen et le conseil de l'union européenne (2008). Directive 2008/50/CE du 21/05/08 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe.

# GLOSSAIRE

## Définitions

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Particules d'origine secondaires :** Les particules secondaires résultent de la conversion en particules, des gaz présents dans l'atmosphère. Cette conversion, soit directement gaz-solide, soit par l'intermédiaire des gouttes d'eau, est appelée nucléation. La nucléation est le mécanisme de base de la formation des nouvelles particules dans l'atmosphère. Les principaux précurseurs impliqués dans la formation des particules secondaires sont le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub> et nitrates), les composés organiques volatils (COV) et l'ammoniac (NH<sub>3</sub>). Les particules secondaires sont essentiellement des particules fines (<2.5 µm).

**Percentile 10 (P 10) :** Valeur respectée par 10 % des données de la série statistique considérée (ou dépassée par 90 % des données).

**Percentile 90 (P 90) :** Valeur respectée par 90 % des données de la série statistique considérée (ou dépassée par 10 % des données).

## Sigles

**AASQA** : Association Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air

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

**OMS** : Organisation Mondiale de la Santé

**RTM** : Régie des Transports Métropolitains

## Unité de mesures

**mg/m<sup>3</sup>** : milligramme par mètre cube d'air  
(1 mg = 10<sup>-3</sup> g = 0,001 g)

**µg/m<sup>3</sup>** : microgramme par mètre cube d'air  
(1 µg = 10<sup>-6</sup> g = 0,000001 g)

**ng/m<sup>3</sup>** : nanogramme par mètre cube d'air  
(1 ng = 10<sup>-9</sup> g = 0,000000001 g)

**TU** : Temps Universel

## Polluants

**As** : Arsenic

**BTEX** : Benzène - Toluène - Éthylbenzène - Xylènes

**C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>** : Benzène

**Cd** : Cadmium

**COV** : Composés Organiques Volatils

**Cu** : Cuivre

**ML** : Métaux lourds (Ni, Cd, Pb, As)

**Mn** : Manganèse

**Ni** : Nickel

**Pb** : Plomb

**PM<sub>10</sub>** : Particules d'un diamètre < 10 µm

**PM<sub>2,5</sub>** : Particules d'un diamètre < 2,5 µm

**PM<sub>1</sub>** : Particules d'un diamètre < 1 µm

# ANNEXES

## ANNEXE 1 Statistiques des résultats de mesures de PM<sub>10</sub> à la station Saint-Charles

Tableau 10 : Concentrations en PM<sub>10</sub> de la station Saint-Charles pour toutes les heures de mesure – analyseur automatique

	PM10 (µg/m <sup>3</sup> )	Période totale	Jours ouvrés	Samedi	Dimanche	Période froide	Période chaude
<b>Toutes données horaires</b>	Nombre de valeurs	4390	3145	622	623	1724	2666
	Taux de couverture de la période prévue	94.3%	94.9%	92.8%	92.8%	99.8%	91.1%
	Moyenne	94.1	99.3	91.5	70.6	93.8	94.3
	Médiane	99.9	107.7	99.6	75.9	99.0	100.4
	Percentile 10	32.0	32.8	35.2	21.6	30.2	32.7
	Percentile 90	136.9	141.3	123.4	99.3	136.5	137.5
	Minimum	3.7	4.7	5.1	3.7	4.7	3.7
Maximum	985.0	985.0	275.2	137.7	985.0	649.9	
<b>Période d'ouverture du métro (5h – 1h)</b>	Nombre de valeurs	3662	2624	519	519	1436	2226
	Taux de couverture de la période prévue	94.4%	95.0%	92.8%	92.8%	99.7%	91.2%
	Moyenne	104.8	110.3	101.8	80.1	103.9	105.4
	Médiane	107.0	113.6	102.7	79.8	106.0	107.5
	Percentile 10	67.4	70.8	74.4	57.2	65.5	68.5
	Percentile 90	139.1	143.4	125.0	102.5	138.1	139.9
	Minimum	9.7	9.7	31.0	16.0	15.0	9.7
Maximum	272.8	272.8	149.0	185.8	187.0	272.8	

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

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

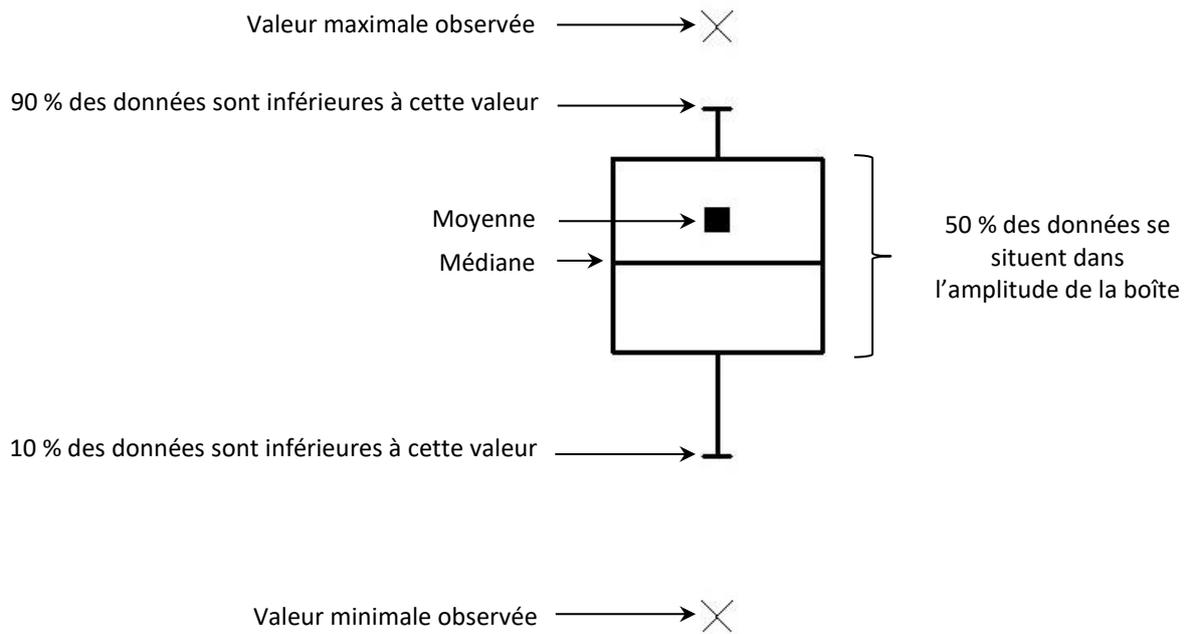


Figure 23 : Schéma explicatif du diagramme en boîte

## ANNEXE 3 Profil moyen journalier en PM<sub>10</sub> : Influence de la saison

### ► Influence de la saison

Il n'est pas observé de différence significative entre les profils moyens journaliers de la période froide et de la période chaude. Seules des concentrations plus importantes au cours des heures de fermeture du réseau sont observées en hiver, en lien avec une fréquence de travaux nocturnes plus importante en période froide.

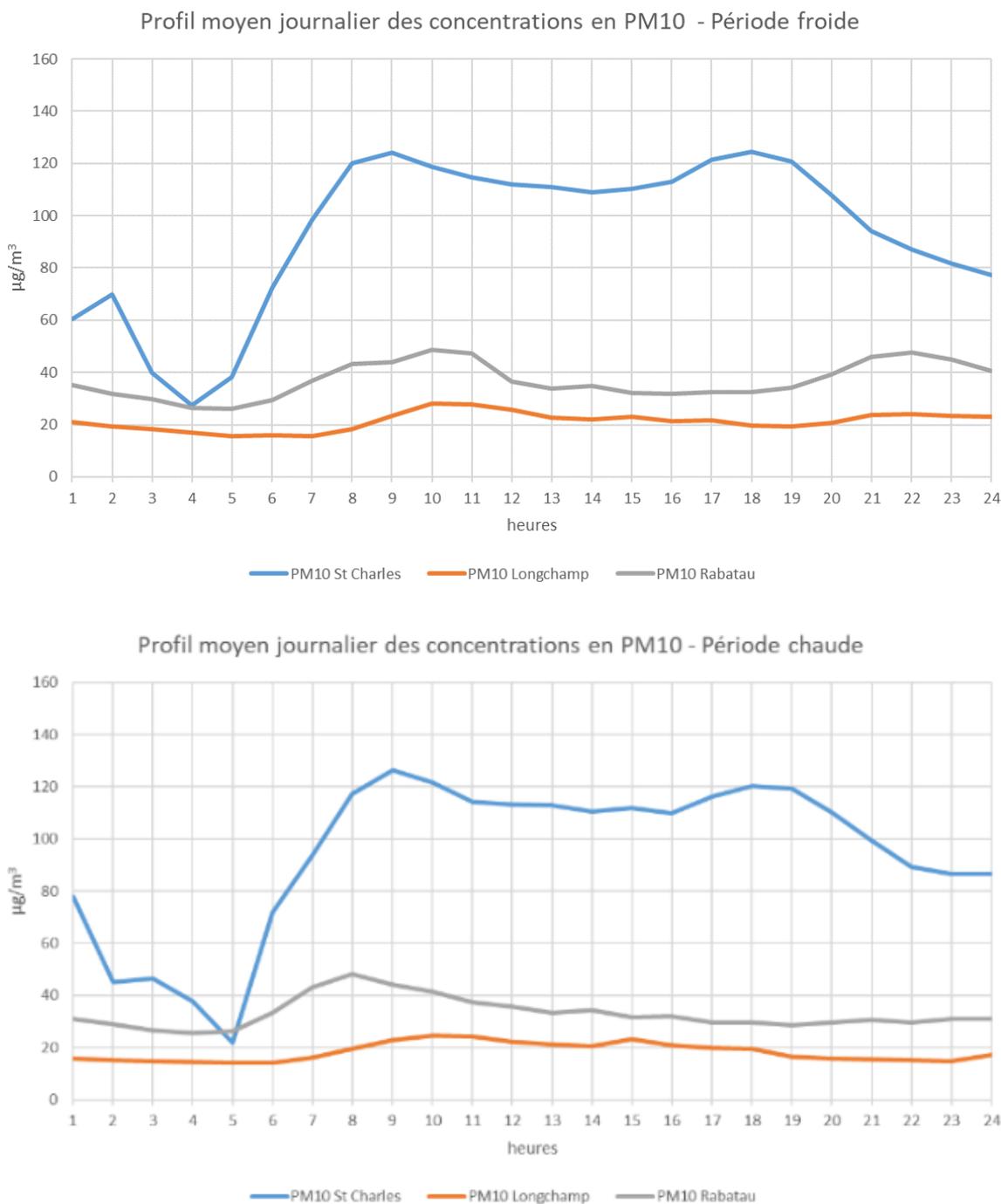


Figure 24 : Profils moyens journaliers des concentrations en PM<sub>10</sub> en période froide et chaude - station Saint-Charles

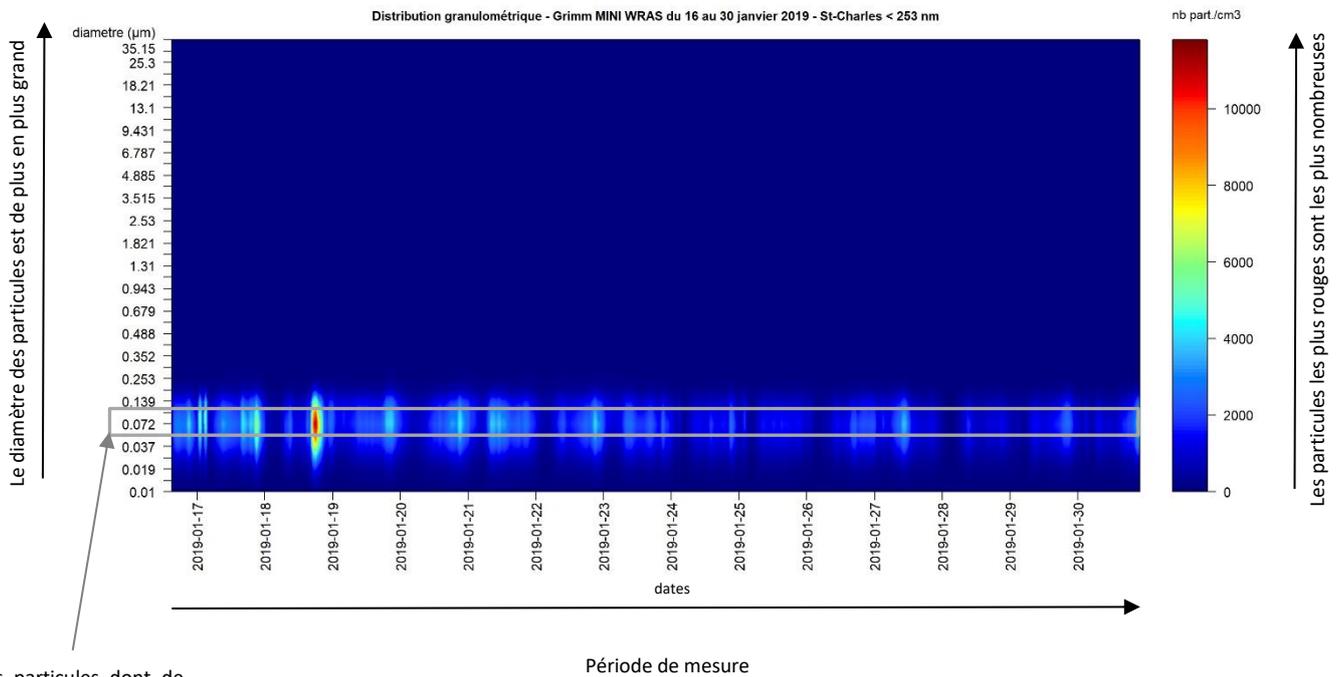
## ANNEXE 4 Métaux traces : Concentrations moyennes de l'ensemble des métaux mesurés

Tableau 11 : Concentrations des 41 métaux traces mesurés - station Saint-Charles et Blancarde

métaux	Station Saint-Charles						Station Blancarde					
	ng/m <sup>3</sup>	Moy.	Min	Max	Méd.	P10	P90	Moy.	Min	Max	Méd.	P10
Al	763	136	1383	765	222	1245	535	29	1036	530	96	798
As	14.3	10.6	17.7	14.5	11.8	16.4	10.8	6.8	14.6	10.6	8.3	13.6
Ba	11.5	3.2	58.4	10.3	4.1	14.1	9.7	2.1	18.3	10.2	4.0	14.2
Ca	1234	71	2159	1394	227	1961	953	13	1945	1097	38	1403
Cd	0.36	0.21	0.81	0.34	0.26	0.46	0.35	0.22	0.75	0.32	0.25	0.47
Ce	1.44	0.91	2.16	1.45	0.95	1.74	1.22	0.62	2.00	1.25	0.76	1.56
Co	4.1	2.0	5.9	4.3	2.4	5.4	3.4	1.5	5.2	3.6	1.6	4.5
Cr	22.6	9.9	40.1	24.2	11.6	32.5	25.7	8.5	55.7	23.9	10.2	42.4
Cs	0.04	0.02	0.08	0.04	0.02	0.06	0.04	0.02	0.06	0.04	0.02	0.05
Cu	2702	1307	4683	2672	1538	3728	3153	1451	4879	2831	1922	4635
Fe	28891	15283	39126	28794	19439	36510	32416	17794	58407	28592	19801	45938
K	189	71	775	175	100	255	144	43	332	144	64	205
La	0.73	0.47	1.16	0.74	0.50	0.92	0.63	0.34	0.96	0.64	0.42	0.80
Li	0.41	0.09	3.13	0.28	0.15	0.46	0.29	0.05	0.56	0.29	0.08	0.48
Mg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Mn	262	103	386	288	125	353	301	111	515	297	117	463
Mo	3.5	2.0	5.6	3.3	2.8	5.1	4.0	2.3	7.1	3.8	2.7	6.1
Na	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ni	77.6	53.2	127.7	75.7	59.8	97.1	86.2	56.5	139.7	83.4	58.7	121.8
Pb	8.4	3.8	58.1	6.1	4.3	10.0	6.8	3.1	24.1	5.7	4.1	8.6
Pd	0.06	0.03	0.41	0.03	0.03	0.03	0.06	0.03	0.40	0.03	0.03	0.17
Pt	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Rb	0.57	0.37	0.83	0.57	0.40	0.72	0.46	0.25	0.73	0.44	0.31	0.64
Sb	4.7	2.2	8.0	4.7	2.7	6.3	5.1	2.0	11.6	4.9	2.5	6.6
Sc	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Se	0.47	0.23	0.87	0.44	0.35	0.68	0.50	0.21	0.98	0.43	0.33	0.81
Sn	5.5	2.2	8.5	5.9	2.7	7.1	7.4	2.8	12.4	7.4	4.0	9.7
Sr	6.8	3.1	44.5	5.0	3.2	8.8	4.3	2.2	11.7	3.7	2.3	7.2
Ti	15.6	6.5	22.8	17.3	8.9	21.2	11.2	3.5	21.6	10.6	4.2	18.8
Tl	0.14	0.13	0.17	0.13	0.13	0.14	0.14	0.13	0.17	0.13	0.13	0.15
V	3.9	1.8	8.2	3.6	2.0	6.0	3.6	1.2	9.0	3.4	1.9	6.1
Zn	76.0	31.0	294.9	66.8	37.7	92.9	71.3	33.6	196.3	71.4	36.7	95.6
Zr	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ga	0.83	0.39	2.40	0.78	0.47	1.00	0.71	0.35	1.05	0.73	0.43	0.88
U	0.03	0.01	0.04	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.05	0.02	0.02	0.04
Hg	0.03	0.01	0.15	0.03	0.01	0.05	0.05	0.01	0.23	0.03	0.02	0.09
Ag	1.30	0.71	11.36	0.87	0.74	1.02	0.96	0.63	1.79	0.89	0.71	1.34
Bo	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Be	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
Te	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01

# ANNEXE 5 Granulométrie : représentation graphique des données

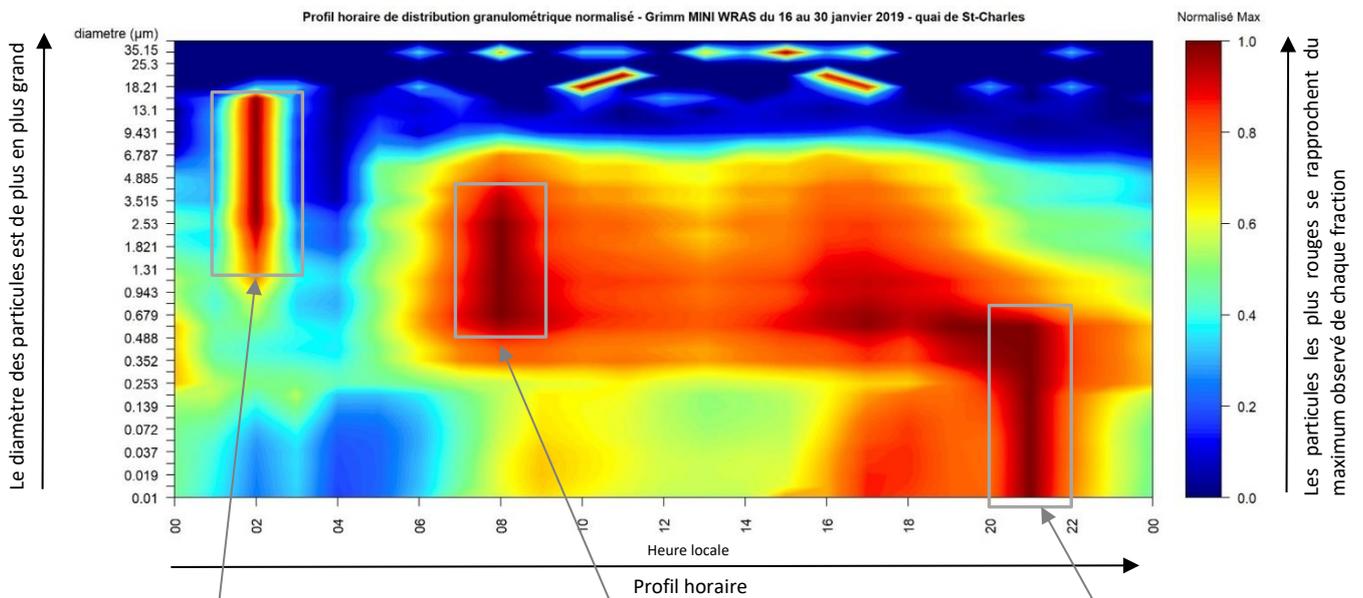
Représentation graphique de la répartition granulométrique des particules au cours du temps :



Les particules dont le diamètre est de 72 nm sont globalement les plus nombreuses

Représentation graphique de l'évolution du nombre de particules de chaque fraction de particule mesurée :

Les données de concentration en nombre de chaque fraction mesurée sont normalisées par le maximum de la fraction



Les concentrations maximums des fractions de particules de 1 µm à 15 µm sont observées à 2h

Les concentrations maximums des fractions de particules de 600 nm à 3 µm sont observées à 8h

Les concentrations maximums des fractions de particules de 10 à 600 nm sont observées à 21h

## ANNEXE 6 Granulométrie : Comparaison des données été/hiver des stations Saint-Charles et Blancarde

### Station Saint-Charles

Les profils moyens journaliers sont similaires en période froide et période chaude, à la différence près que les particules les plus fines sont légèrement plus nombreuses en période chaude.

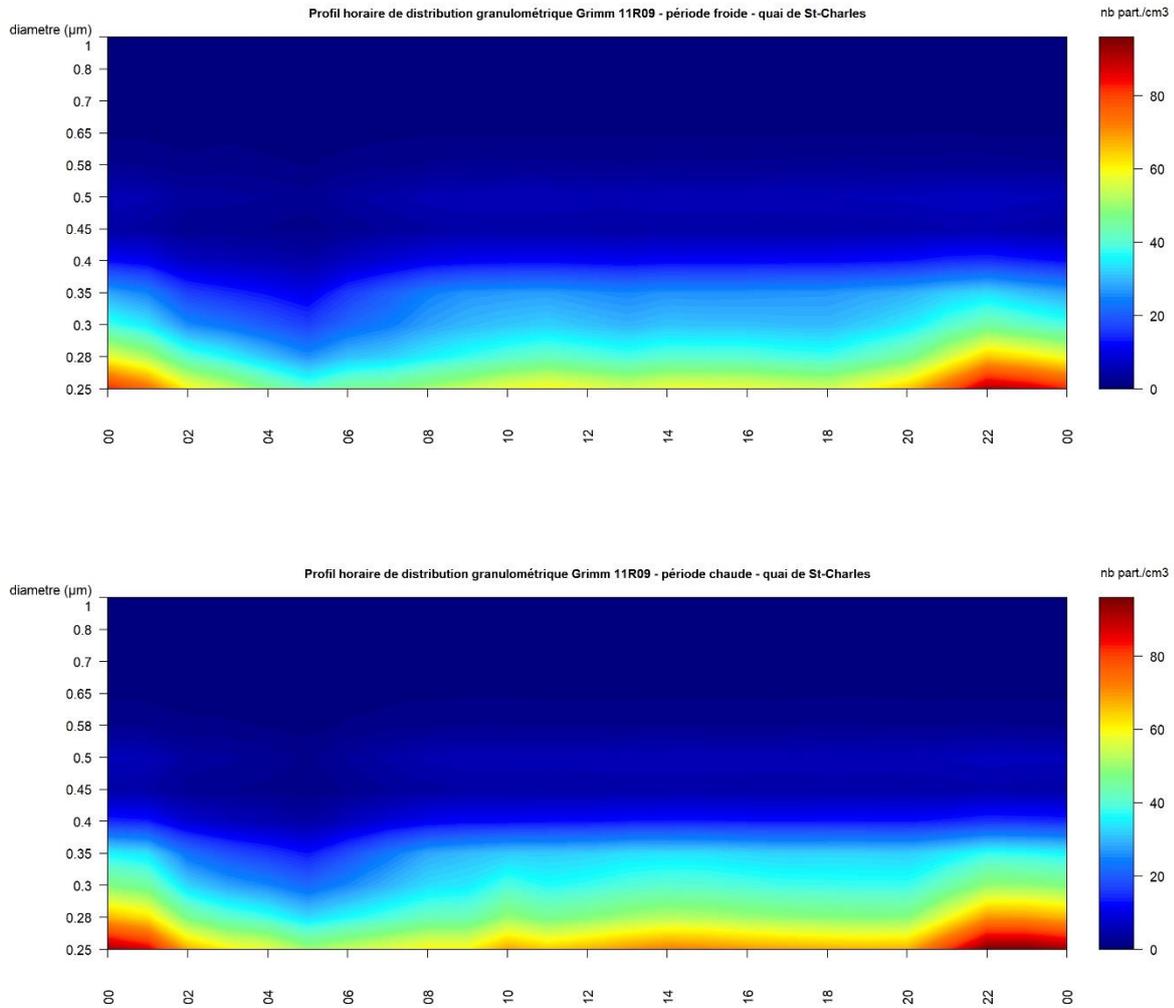
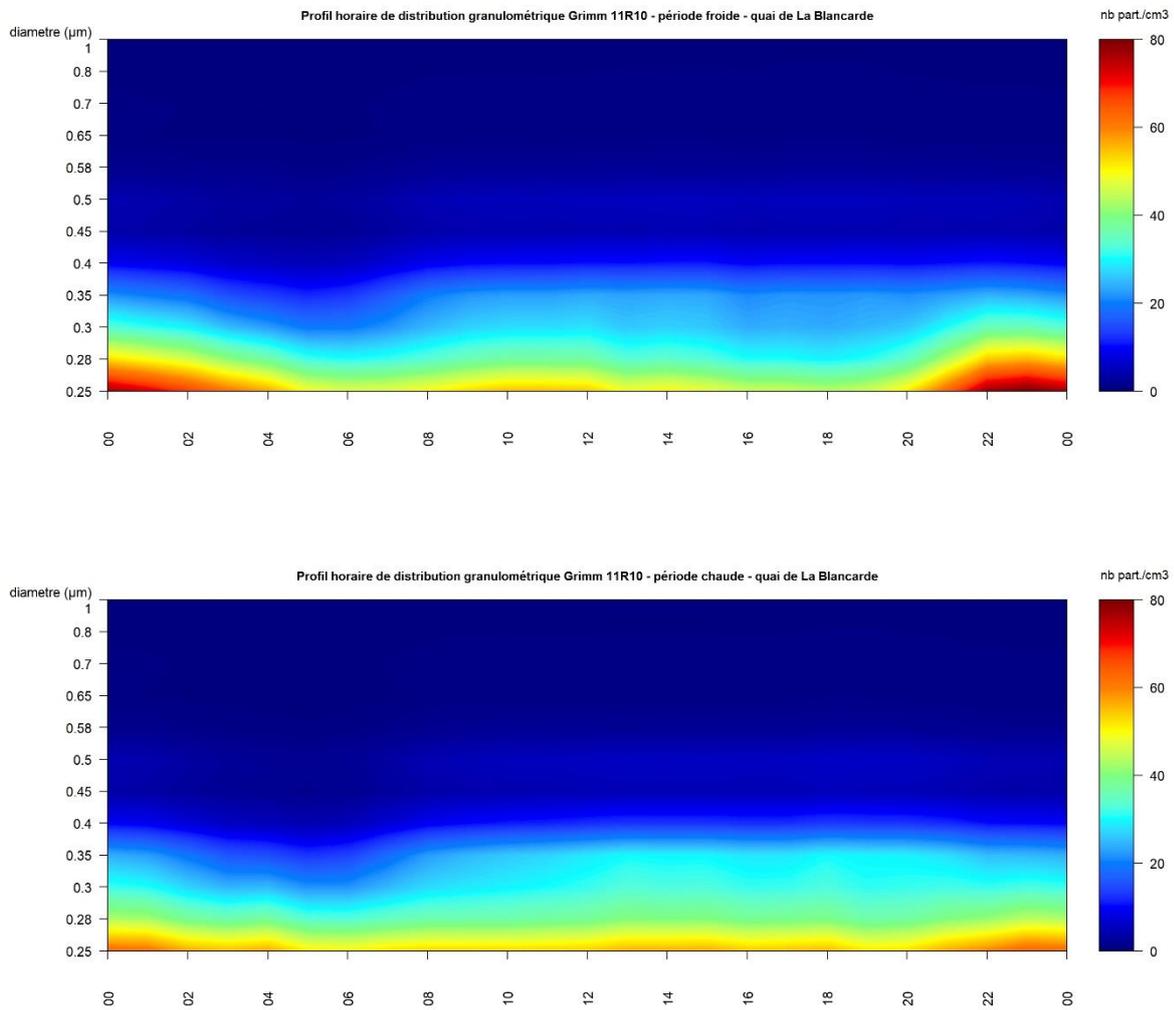


Figure 25 : Comparaison des profils moyens journaliers du nombre de particules par litre des fractions de 250 nm à 1  $\mu\text{m}$  en période froide (à gauche) et chaude (à droite) - station Saint-Charles

## Station Blancarde

Les profils moyens journaliers sont similaires en période froide et période chaude, à la différence près que les particules les plus fines sont plus nombreuses au cours de la journée en période froide (à l'inverse de la station Saint-Charles).



**Figure 26 : Comparaison des profils moyens journaliers du nombre de particules par litre des fractions de 250 nm à 1 µm en période froide (à gauche) et chaude (à droite) - station Blancarde**

## ANNEXE 7 Granulométrie : Comparaison des données à la fréquence de passage des rames à la station Saint-Charles

Les particules de tailles situées autour de 1  $\mu\text{m}$  montrent une évolution qui semble être influencée, au moins en partie, par la fréquence de passage des rames. Ceci est visualisable en comparant les fractions 800 nm et 1  $\mu\text{m}$  en comparaison de la fréquence de passage des rames des jours ouvrés hors vacances.

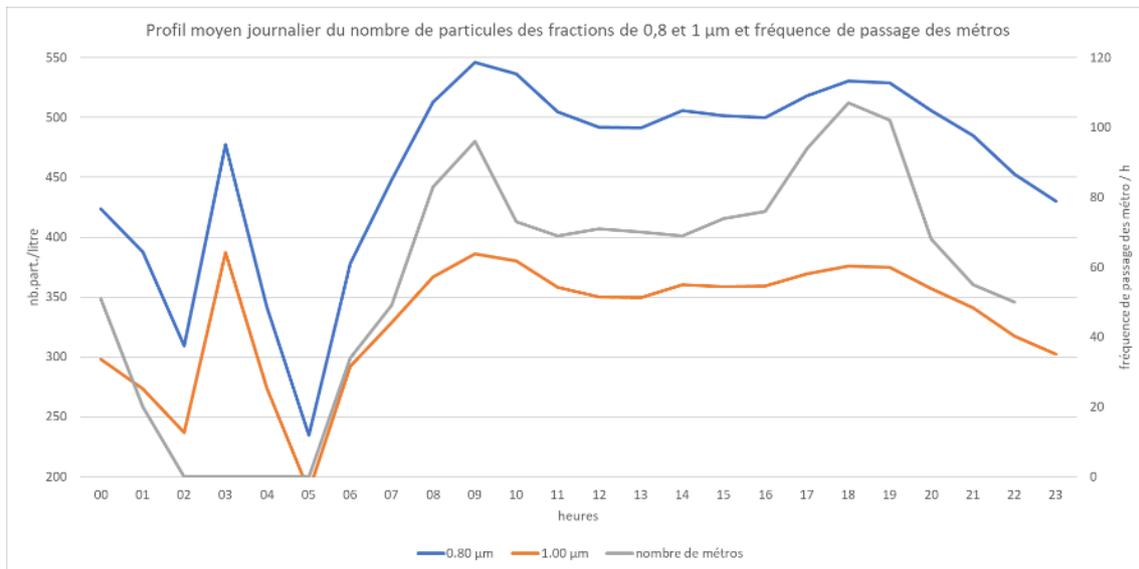


Figure 27 : Comparaison du profil moyen journalier du nombre de particules/litre des fractions de 0,8 et 1  $\mu\text{m}$  à la fréquence de passage des rames de métro des jours ouvrés – station Saint-Charles

## ANNEXE 8 Granulométrie : MINI-WRAS à la station Saint-Charles, série temporelle

Le maximum horaire de la fraction de 72 nm (intervalle de taille de 62 nm à 86 nm) a été observé le 18 janvier à 18h, avec près de 11 800 particules/cm<sup>3</sup>. C'est une période d'une vingtaine de minutes avec des niveaux plus importants qui est à l'origine de ce maximum horaire. A l'échelle de la minute, le maximum de la fraction de 72 nm a été observé le 17 janvier à 15h04, avec près de 31 500 part./cm<sup>3</sup>. Cet épisode intense a été très ponctuel, il n'a duré qu'une minute.

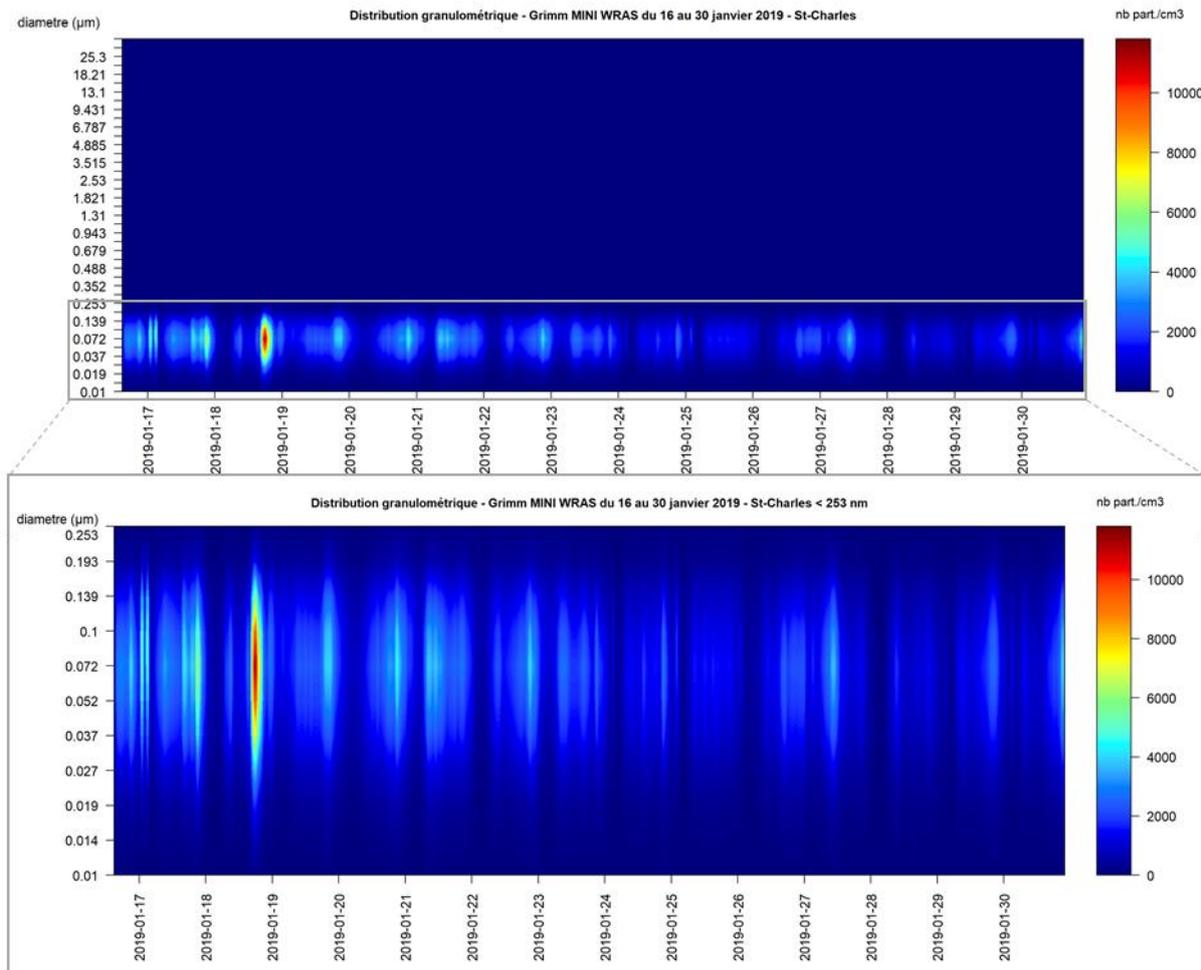


Figure 28 : Concentrations des fractions de 10 nm à 35 µm en particules/cm<sup>3</sup> au cours du temps – station Saint-Charles

## ANNEXE 9 Granulométrie : MINI-WRAS à la station Saint-Charles, série temporelle normalisée par le maximum

La série de mesures du MINI-WRAS à la station Saint-Charles, normalisée par le maximum de la classe de chaque fraction, permet d'observer les périodes où ces différentes fractions sont les plus nombreuses.

La majorité des périodes où l'on observe des concentrations importantes en particules de 72 nm sont associées à un nombre important de particules des fractions de 10 à 400 nm. Les niveaux les plus importants observés des fractions de 250 à 600 nm ne sont pas toujours accompagnés d'un nombre important de particules plus fines.

Il est observé une période au cours de laquelle les fractions de 250 nm à 18 µm montrent un nombre important de particules : le 25 janvier à 2 heures du matin. Cela correspond au maximum horaire de PM<sub>10</sub> du BAM de la période du 16 au 30 janvier (384 µg/m<sup>3</sup>), identifié comme étant lié une période d'entretien/maintenance nocturne.

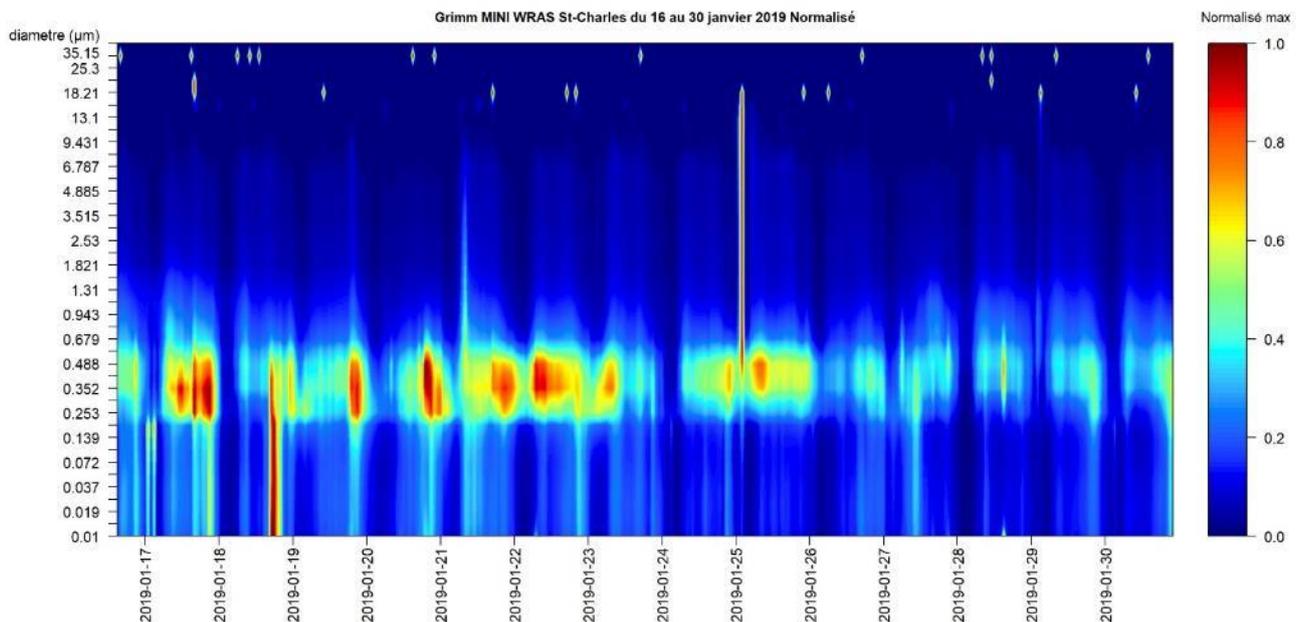
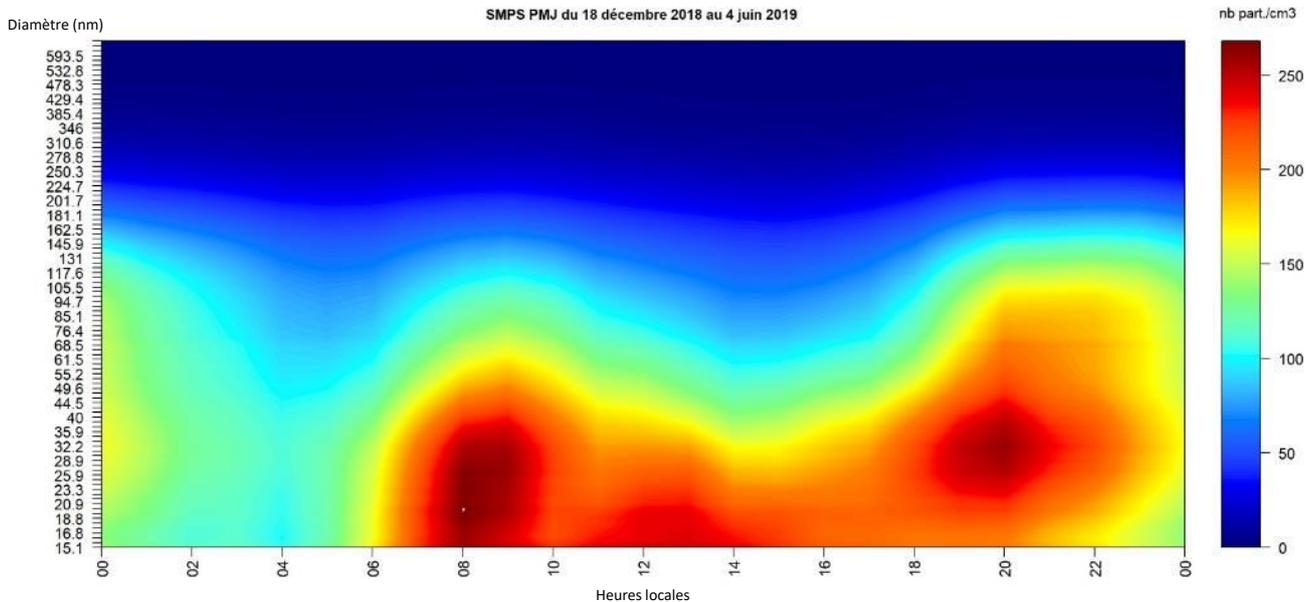


Figure 29 : Concentrations des fractions de 10 nm à 35 µm en particules/cm<sup>3</sup> au cours du temps normalisé par le maximum de chaque fraction - station Saint-Charles

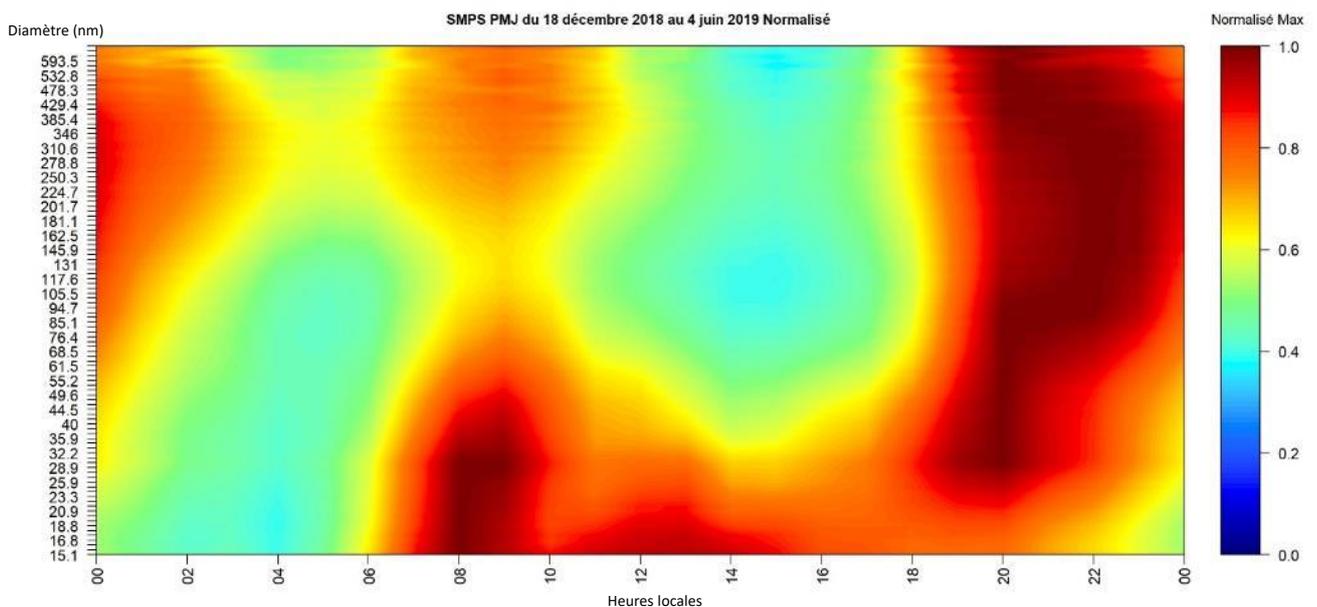
## ANNEXE 10 Granulométrie : Données en air ambiant du SMPS de la station de fond urbain (Marseille/Longchamp) du 18/12/18 au 14/06/19

Les données du granulomètre SMPS de la station de fond urbain (Marseille / Longchamp) montrent, que parmi la gamme de particules de 15 à 600 nm, les plus nombreuses en air ambiant à Marseille sont centrées autour de 30 nm. Le profil moyen journalier montre que ces particules sont plus nombreuses le matin entre 8h et 9h et le soir vers 20h.



**Figure 30 : Profil moyen journalier du nombre de particules du granulomètre SMPS de Marseille/Longchamps du 18 décembre 2018 au 14 juin 2019**

Le profil moyen journalier normalisé par le maximum montre que les particules de 20 à 600 nm présentent des niveaux importants, voire maximums, entre 20h et 22h, ce qui correspond à l'augmentation des particules de 10 à 600 nm dans le métro à la station Saint-Charles et de 250 à 600 nm à la station de La Blancarde.



**Figure 31 : Profil moyen journalier du nombre de particules normalisé par le maximum du granulomètre SMPS de Marseille/Longchamps du 18 décembre 2018 au 14 juin 2019**

## ANNEXE 11 Concentrations des BTEX et des COV majoritaires

### ► Les COV majoritaires dans toutes les séries de mesures

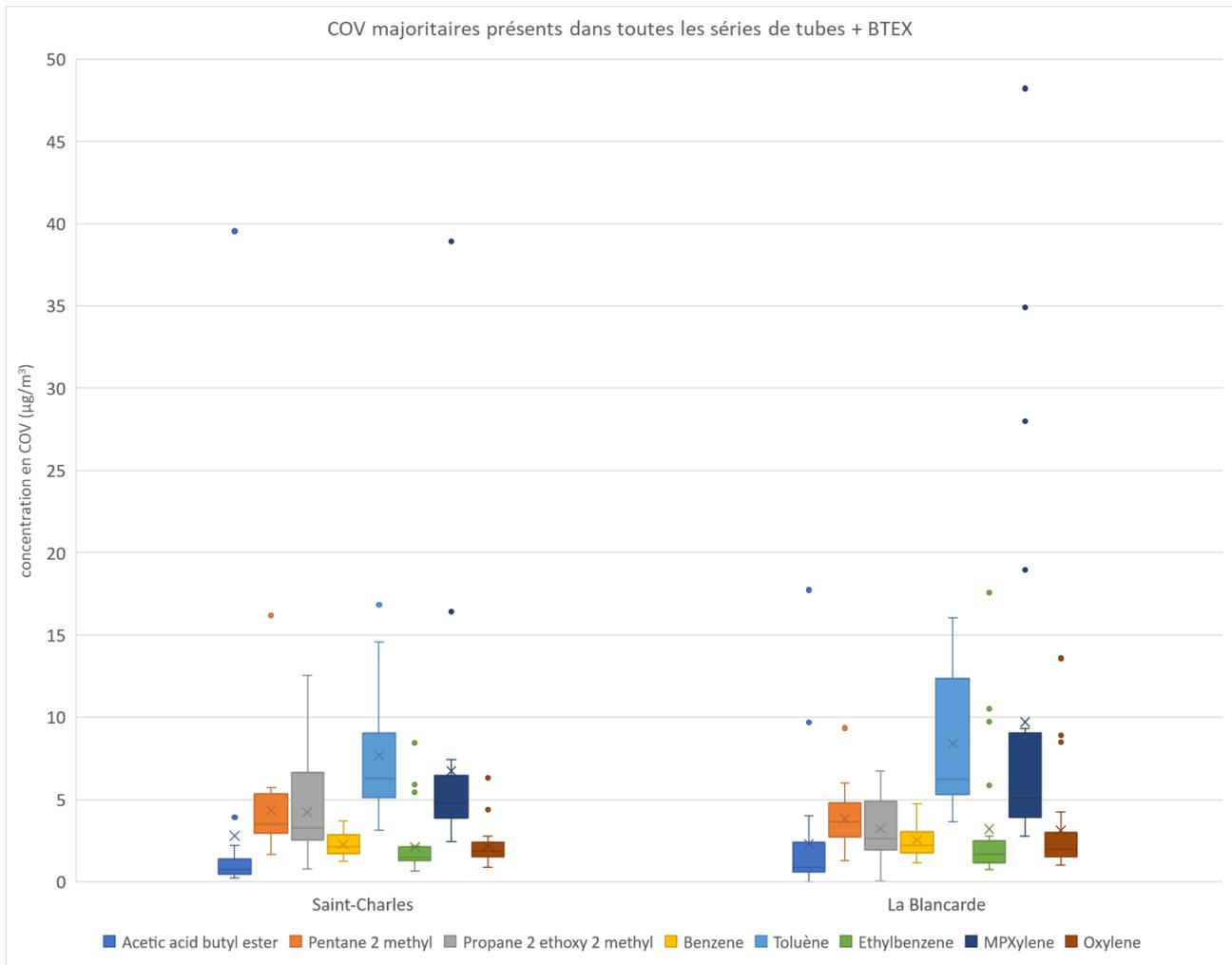


Figure 32 : Box-plot des concentrations en BTEX et COV majoritaires présents dans toutes les séries de mesures aux deux stations de Saint-Charles et Blancarde

► Les COV présents dans la majorité des séries de mesures

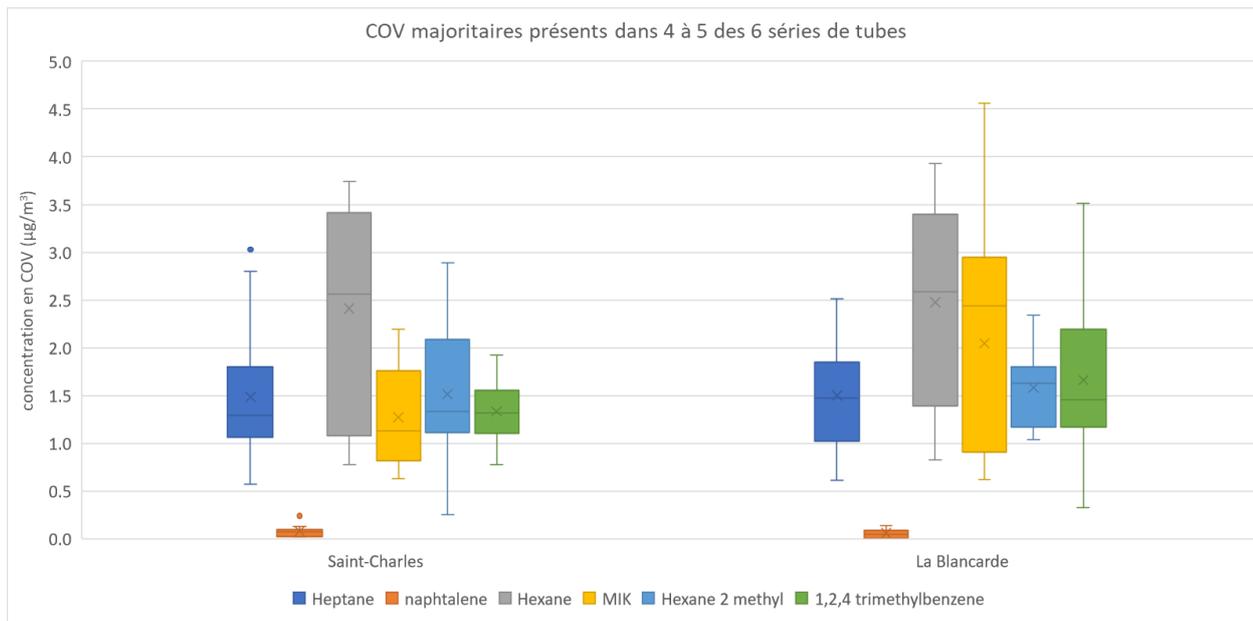


Figure 33 : Box-plot des concentrations en COV majoritaires présents dans la majorité les séries de mesures aux deux stations de Saint-Charles et Blancarde

► Les COV présents dans la moitié des séries de mesures

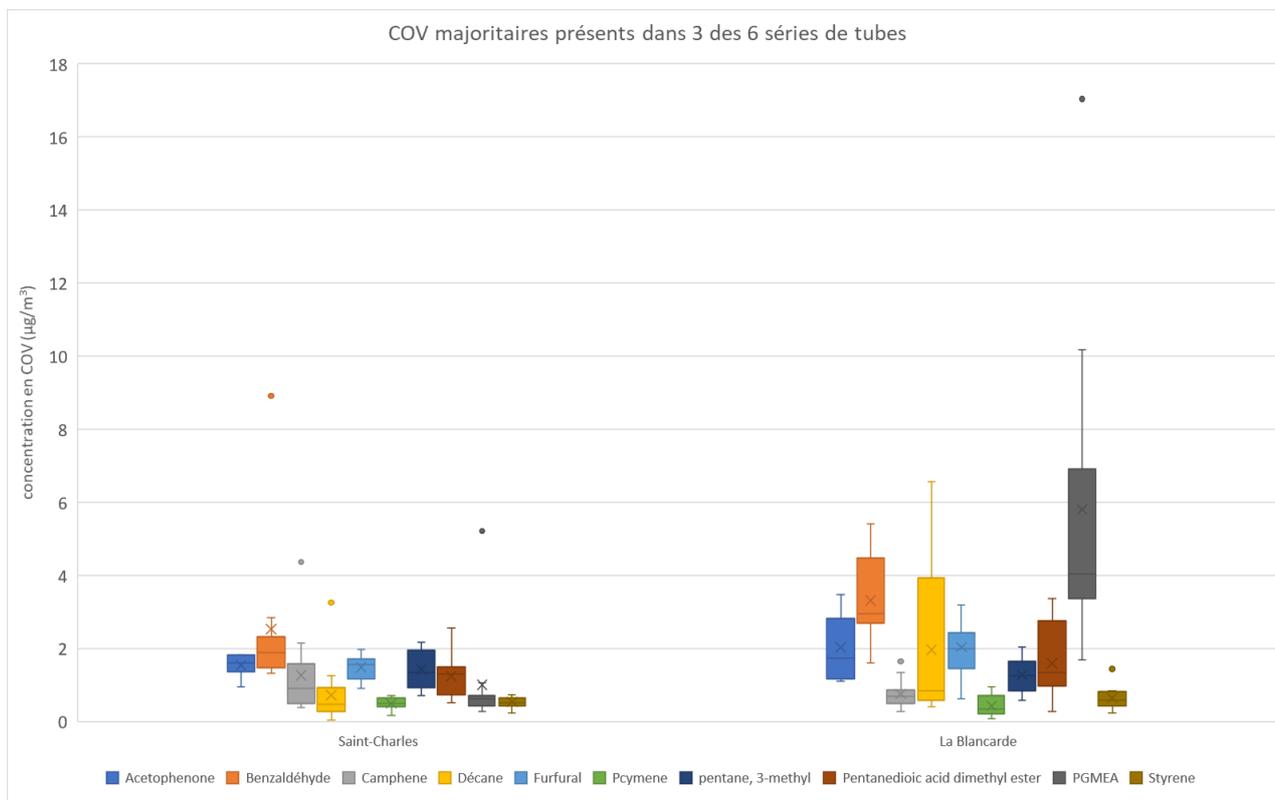


Figure 34 : Box-plot des concentrations en COV majoritaires présents dans la moitié les séries de mesures aux deux stations de Saint-Charles et Blancarde

► Des COV identifiés ponctuellement

**Tableau 12 : Concentrations en COV majoritaires identifiés ponctuellement dans 1 à 2 séries de mesures aux deux stations de Saint-Charles et Blancarde**

COV	Moyenne (µg/m <sup>3</sup> )	Min (µg/m <sup>3</sup> )	Max (µg/m <sup>3</sup> )
p-Cymenene	0.7	0.01	1.3
Limonene	1.4	< LQ	3.8
Hexane 3 methyl	1.9	0.4	2.9
3 Ethyltoluène	0.9	0.3	2.2
dodecane	1.7	0.1	9.8
Butanedioic acid dimethyl ester	0.9	0.3	3.8
Ethyl acetate	3.6	0.4	26.3
Phénol	2.6	1.0	4.2
Famille Ethyltoluène	1.4	0.6	2.5
Famille Triméthylbenzène	1.0	0.2	2.5
Méthyl méthacrylate	2.1	< LQ	8.7
2 Ethyltoluène	0.4	0.1	0.6
2,2,4,6,6-pentamethylheptane	0.0	0.0	0.1
Heptane, 3-methyl-	0.8	0.5	1.3
Octane 3 methyl	0.8	< LQ	3.2
Cyclohexane 124 trimethyl	0.9	< LQ	3.4
cyclohexane methyl	0.6	< LQ	0.9
octane, 2-methyl	0.6	< LQ	2.6
1-butanol	0.7	< LQ	2.1
octane, 4-methyl	0.6	< LQ	2.5
<b>Propyl benzene</b>	<b>0.3</b>	<b>0.2</b>	<b>0.7</b>

## ANNEXE 12 Sources de pollution, effets sur la santé, réglementation et recommandations OMS

### Sources de pollution

Les polluants atmosphériques ont diverses origines,

Polluants	Sources principales
<b>Particules en suspension (PM)</b>	Les particules proviennent en majorité de la combustion à des fins énergétiques de différents matériaux (bois, charbon, pétrole), du transport routier (imbrûlés à l'échappement, usure des pièces mécaniques par frottement, des pneumatiques...), d'activités industrielles très diverses (sidérurgie, incinération, chaufferie) et du brûlage de la biomasse (incendie, déchets verts),
<b>COV dont le benzène</b> Composés organiques volatils	Les COV proviennent de sources mobiles (transports), de procédés industriels (industries chimiques, raffinage de pétrole, stockage et distribution de carburants et combustibles liquides, stockages de solvants), Certains COV, comme les aldéhydes, sont émis par l'utilisation de produits d'usage courant : panneaux de bois en aggloméré, certaines mousses pour l'isolation, certains vernis, les colles, les peintures, les moquettes, les rideaux, les désinfectants... D'autres COV sont également émis naturellement par les plantes,

### Effets sur la santé

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

Polluants	Effets sur la santé	Effets sur l'environnement
Particules en suspension	- irritation des voies respiratoires - dans certains cas, altération des fonctions pulmonaires	- effets de salissures sur les bâtiments - altération de la photosynthèse
COV dont le benzène <b>Composés organiques volatils</b>	- toxicité et risques d'effets cancérigènes ou mutagènes, en fonction du composé concerné	- formation de l'ozone
Métaux lourds	- toxicité par bioaccumulation - effets cancérigènes	- contamination des sols et des eaux

### Réglementation

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

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

Les valeurs réglementaires sont exprimées en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , L'expression du volume doit être ramenée aux conditions de température et de pression suivantes : 293 K et 1013 hPa, La période annuelle de référence est l'année civile, Un seuil est considéré dépassé lorsque la concentration observée est strictement supérieure à la valeur du seuil,

Polluants	Type de réglementation	Valeurs réglementaires ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Durée d'exposition
<b>PM<sub>10</sub></b> Particules	Seuil d'information- recommandations	50	Jour
	Seuil d'alerte	80	Jour
	Valeurs limites	50	Jour (maximum 35 j / an)
		40	Année
Objectif de qualité	30	Année	
<b>PM<sub>2,5</sub></b> Particules	Valeur limite	25	Année
	Valeurs cibles	20	Année
	Objectif de qualité	10	Année
<b>C<sub>6</sub>H<sub>6</sub></b> Benzène	Valeur limite	5	Année
	Objectif de qualité	2	Année
<b>Pb</b> Plomb	Valeur limite	0,5	Année
	Objectif de qualité	0,25	Année
<b>As</b> Arsenic	Valeur cible	0,006	Année
<b>Cd</b> Cadmium	Valeur cible	0,005	Année
<b>Ni</b> Nickel	Valeur cible	0,02	Année

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

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

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

Polluants	Effets considérés sur la santé	Valeur ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) recommandée par l'OMS	Durée moyenne d'exposition
<b>PM<sub>10</sub></b> <b>Particules</b>	- affection des systèmes respiratoire et cardiovasculaire	50	24 heures
		20	1 an
<b>PM<sub>2,5</sub></b> <b>Particules</b>		25	24 heures
		10	1 an
<b>Pb</b> <b>Plomb</b>	- niveau critique de plomb dans le sang < 10 – 150 g/l	0,5	1 an
<b>Cd</b> <b>Cadmium</b>	- impact sur la fonction rénale	0,005	1 an

En partenariat avec :



Publication : Janvier 2021

Photos : Archives AtmoSud