

Bilan de surveillance des particules atmosphériques à Marseille et à Port-de- Bouc

Bilan des mesures 2018

BILAN DE SURVEILLANCE DES PARTICULES ATMOSPHERIQUES A MARSEILLE ET A PORT-DE-BOUC BILAN DES MESURES 2018

Rédaction	Vérification	Validation
Badr R'MILI Badr.rmili@atmosud.org Thomas ALEIXO Thomas.aleixo@atmosud.org	BouAlem MESBAH boualem.mesbah@atmosud.org	Edwige REVELAT edwige.revelat@atmosud.org
Contact	Date de parution	Références
	Février 2020	Bilan PM 2018

SOMMAIRE

1. Introduction	7
2. Généralités	8
2.1 Terminologies, définitions et classifications.....	8
2.2 Sources des aérosols	9
2.3 Concentration et composition chimique	10
2.4 Principales préoccupations : impacts sanitaires et climatiques	12
2.5 Valeurs réglementaires et recommandations	13
2.6 Surveillance des particules ultrafines (PUF) dans l'air ambiant	14
3. Sites et moyens de mesures dans région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur en 2018	15
3.1 Le site de Marseille/Longchamp.....	16
3.2 Le site de Port-de-Bouc/La Lègue.....	17
3.3 Moyens de mesures en 2018	18
4. Résultats en 2018	19
4.1 Bilan des concentrations en PM ₁₀ et PM _{2.5}	19
4.2 Bilan des concentrations en nombre de particules fines et ultrafines	27
4.3 Sources de pollution	33
5. Conclusions	36
Definitions	39
ANNEXES	41

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1	Profils journaliers PM ₁₀ et PM _{2.5} lors des épisodes de pollution	42
ANNEXE 2	Lecture d'un <i>Box plot</i>	43
ANNEXE 3	Estimation des fractions PM _{FF} et PM _{WB}	44
ANNEXE 4	Profils journaliers et roses de pollutions par classe de taille	45
ANNEXE 5	Sources de pollution, effets sur la santé, réglementation et recommandations OMS	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : valeurs limites réglementaires et recommandations pour le PM ₁₀ et PM _{2.5}	13
Tableau 2 : moyens de mesures par site	18
Tableau 3 : concentrations en masse moyennes journalières des PM ₁₀ et PM _{2.5} en µg/m ³ relevées à Marseille/Longchamp et à Port-de-Bouc/La Lègue lors des épisodes de pollution. Les valeurs soulignées correspondent au dépassement du seuil d'information à 50 µg/m ³	20

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Distribution granulométrique type constatée derrière un véhicule diesel selon le nombre (number), la masse (mass) et la surface spécifique (surface)	9
Figure 2 : les différentes sources d'aérosols d'origine naturelle ou anthropique	10
Figure 3 : Composition moyenne de PM ₁₀ et PM _{2.5} dans des sites urbains et ruraux en Europe	11
Figure 4 : Contributions moyennes annuelles des profils chimiques, identifiées dans les PM ₁₀ dans 15 différents sites en France dont MRS-Marseille, NIC-Nice, PdB-Port-de-Bouc	11
Figure 5 : Régions anatomiques des voies respiratoires et probabilité de dépôt de particules dans les voies respiratoires en fonction du diamètre aérodynamique	12
Figure 6 : réglementations européennes, Euro5 et Euro6 sur les émissions véhiculaires	14
Figure 7 : Localisation géographique deux sites fixes du réseau de mesures d'AtmoSud : Marseille/Longchamp et Port-de-Bouc/La Lègue	15
Figure 8 : Localisation géographique de la station de mesure « Marseille/Longchamp »	16
Figure 9 : Localisation géographique de la station de mesure « Port-de-Bouc/La Lègue »	17
Figure 10 : Evolution en moyennes journalières des concentrations en masse en PM ₁₀ et PM _{2.5} à Marseille/Longchamp	19
Figure 11 : Evolution en moyenne journalière des concentrations en masse des PM ₁₀ et PM _{2.5} à Port-de-Bouc/La Lègue	20
Figure 12 : Rapports massiques PM _{2.5} /PM ₁₀ mensuelles. (a) Marseille/Longchamp (b) Port-de-Bouc/La Lègue	21
Figure 13 : Corrélation des concentrations en masse en PM _{2.5} avec PM ₁₀ en fonction de la période de l'année 2018. (a) Marseille/Longchamp (b) Port-de-Bouc/La Lègue	22
Figure 14 : Profils journaliers des concentrations en masse des PM ₁₀ et PM _{2.5} en µg/m ³ , en moyennes annuelles et par saison relevés à Marseille/Longchamp	23
Figure 15 : profils journaliers des concentrations en masse des PM ₁₀ et PM _{2.5} en µg/m ³ , en moyennes annuelles et par saison relevés à Port-de-Bouc/La Lègue	24
Figure 16 : Evolution en moyennes journalières des concentrations en masse en PM _{FF} , PM _{WB} , PM ₁₀ et PM _{2.5} recensées à Marseille/Longchamp	25
Figure 17 : Profils journaliers des concentrations en masse des PM _{ff} et PM _{wb} en µg/m ³ , en moyennes annuelles et par saison relevés à Marseille/Longchamp	25
Figure 18 : Corrélation des concentrations en masse en PM _{wb} avec PM ₁₀ en fonction de la période de l'année 2018. Données horaires. Site de Marseille/Longchamp	26
Figure 19 : Evolution en moyennes journalières des concentrations en nombre de particules fines et ultrafines (mesure TSI3031) et des concentrations en masse des NO _x , SO ₂ et O ₃ recensées à Marseille/Longchamp	27
Figure 20 : Evolution en moyennes journalières des concentrations en nombre de particules fines et ultrafines (mesure TSI3031) et des concentrations en masse de SO ₂ recensées à Port-de-Bouc/La Lègue	28
Figure 21 : Concentrations en nombre de particule par canal en moyennes journalières relevées lors des épisodes de pollution PM ₁₀ et en en moyenne annuelle à Marseille / Longchamp (a) et à Port-de-Bouc/La Lègue (b)	29
Figure 22 : Bilan statistique des concentrations (a) en nombre annuel total de particules et par canal de l'analyseur TSI 30331 (b) à Marseille/Longchamp et (c) à Port-de-Bouc/La Lègue	29

Figure 23 : Concentration en masse de NOX en fonction de la concentration en nombre total de particules et de la concentration en masse du BC issue de la combustion de carburants fossiles – Marseille/Longchamp.	31
Figure 24 : Profils journaliers des concentrations en masse de NOx, SO ₂ et O ₃ et en nombre totale de particules en moyennes annuelles et par saison relevés à Marseille/Longchamp.	32
Figure 25 : Profils journaliers des concentrations en nombre de particules (a) et en masse de SO ₂ (b), en moyennes annuelles et par saison relevés à Port-de-Bouc/La Lèque.	32
Figure 26 : Roses de pollution par composé (PM ₁₀ , PM _{2,5} , NO ₂ , NO, SO ₂ et PF) relatives à Marseille/Longchamp.....	34
Figure 27 : Roses de pollution par composé (PM ₁₀ , PM _{2,5} , NO ₂ , NO, SO ₂ et PF) relatives à Port-de-Bouc/La Lèque.....	35

1. Introduction

L'intérêt pour les particules en suspension ou aérosols est grandissant. Cet intérêt concerne plusieurs domaines comme la qualité de l'air, les sciences de l'atmosphère, la combustion, les sciences des matériaux et l'industrie pour n'en citer que quelques-uns.

Concernant le domaine de la qualité de l'air, les objectifs sont de mesurer les niveaux d'exposition des populations, d'induire une réduction des émissions d'origine anthropique¹ mais aussi de définir les facteurs déterminant la toxicité : la concentration, la taille, la morphologie et la composition chimique. Dans les sciences de l'atmosphère, il est question d'étudier et de comprendre l'origine des aérosols et leurs impacts sur le climat terrestre.

La mesure des aérosols nécessite souvent de caractériser plusieurs paramètres physico-chimiques pour interpréter un résultat, connaître une source ou détecter un comportement. Puisque les propriétés des aérosols sont fortement affectées par leurs tailles, plusieurs méthodes ou instruments ont été développés pour mesurer des concentrations en nombre ou en masse en fonction de la taille ou d'une gamme de taille.

En matière de surveillance de la qualité de l'air, les valeurs réglementaires sont exprimées en masse par unité de volume (le plus souvent en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et concernent uniquement les particules PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$ dont les diamètres aérodynamiques sont respectivement inférieurs à $10\ \mu\text{m}$ et $2,5\ \mu\text{m}$.²

Cependant, en termes de métrologie des aérosols et pour différentes études toxicologiques et épidémiologiques, les paramètres comme le nombre, la morphologie et la composition chimique sont aussi importants pour comprendre les mécanismes inhérents à la formation, la transformation et l'évolution des particules dans l'air, leurs impacts climatiques et leur toxicité.

Au-delà des mesures réglementaires des PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$, qui sont donc des mesures de concentrations massiques, AtmoSud s'intéresse aux valeurs d'exposition en termes de concentration en nombre. En effet, cela permet d'intégrer les mesures des particules dites ultrafines (PUF) dont le nombre peut être très important relatif à une masse négligeable, comparées aux particules grossières. Ces informations complémentaires, jusqu'à présent limitées au domaine de la recherche scientifique, permettent de mieux caractériser un évènement lié à un pic de pollution et d'aider à en définir les origines et les sources.

Dans ce contexte, AtmoSud réalise des mesures en continu des concentrations en masse de particules, des mesures de composés gazeux réglementés (SO_2 , NO_x et O_3) ainsi que les mesures granulométriques des particules fines et ultrafines. Ce rapport présente un bilan des résultats de l'année 2018.

¹ Emission d'origine anthropique : liée à une activité humaine

² La Valeur limite définie par la réglementation européenne pour la protection de la santé est de $40\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle pour les PM_{10} et $50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière pour les PM_{10} à ne pas dépasser plus de 35 jours par an et est de $25\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle pour les $\text{PM}_{2.5}$.

2. Généralités

2.1 Terminologies, définitions et classifications

Différentes terminologies sont communément utilisées pour décrire un aérosol. Pour la plupart elles sont issues des appellations communément utilisées dans les rapports d'études ou les publications scientifiques. Selon le domaine d'étude, des termes différents sont utilisés, pour définir une même entité.

Aérosol. Le terme aérosol désigne un ensemble de particules, solides ou liquides, d'une substance chimique ou d'un mélange de composés chimiques, en suspension dans un milieu gazeux. Le terme particules, parfois utilisé pour définir un aérosol est en effet un de ces constituants.

Particules de matière. En métrologie des aérosols, les particules (notées « PM » pour *Particulate Matter* en anglais) sont considérées selon plusieurs gammes de taille en raison de leur comportement aérodynamique. L'indice du sigle PM_x fait référence au diamètre aérodynamique de coupure à 50 % d'efficacité en dessous duquel les particules sont échantillonnées. C'est le cas notamment des PM_{10} et des $PM_{2.5}$. Néanmoins, il est communément utilisé pour désigner les particules dont le diamètre est inférieur à la valeur numérique de l'indice.

En fonction du diamètre des particules, des nombres très différents peuvent constituer une même masse. A titre d'exemple, la concentration massique d'une seule particule de $10\ \mu\text{m}$ par cm^3 correspond à la concentration massique d'un milliard de particules (10^6) de $0.1\ \mu\text{m}$ de diamètre par cm^3 (en considérant une densité unitaire). En termes de taille, on parle souvent de trois catégories de particules :

- **Les particules grossières** pour désigner les particules microniques dont la contribution dans un aérosol atmosphérique est très importante en masse mais négligeable en nombre.
- **Les particules fines (PF)** pour désigner les $PM_{2.5}$ ou les PM_{1} (appelés également particules submicroniques). Leur contribution peut être à la fois importante en nombre et en masse.
- **Les Particules UltraFines (PUF)** pour désigner les $PM_{0.1}$. Selon les sources et les conditions météorologiques, leur contribution peut être très importante en nombre avec une masse très négligeable.

Par ailleurs, les mesures granulométriques en nombre ou en masse fournissent une classification des particules selon trois modes :

- **Un mode nucléation** : concerne les particules initiées par des processus de conversion de la phase gazeuse à la phase particulaire. Leur diamètre est généralement inférieur à $0,1\ \mu\text{m}$.
- **Un mode accumulation** : concerne les particules submicroniques formées par agglomération, agrégation ou croissance d'une ou de plusieurs particules ou par condensation de composés gazeux sur des particules du mode nucléation.
- **Un mode « grosses particules »** : concerne les particules de taille micrométrique formées essentiellement par des processus mécaniques (érosion, frottement, ...)

La Figure 1 présente les caractéristiques moyennes de ces trois modes selon le nombre, la masse et la surface spécifique selon un exemple de particules issues d'un véhicule diesel (Kittelson, 1998)³.

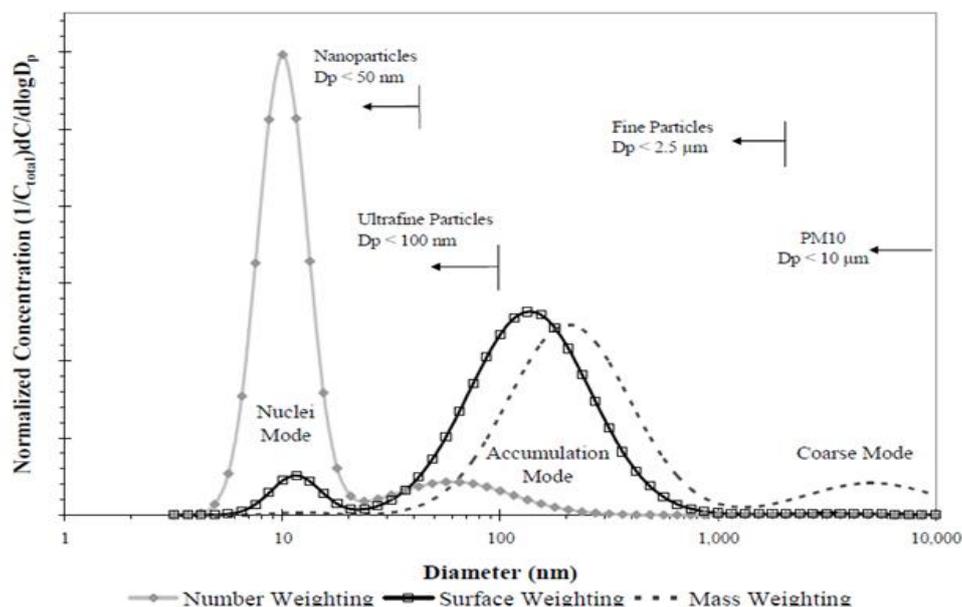


Figure 1 : Distribution granulométrique type constatée derrière un véhicule diesel selon le nombre (number), la masse (mass) et la surface spécifique (surface).

La distribution granulométrique d'un aérosol peut s'étaler sur deux ou trois catégories (particules grossières, fines, ultrafines) et deux ou trois modes (nucléation, accumulation, grosse particules) selon les sources d'émission et/ou les mécanismes physico-chimiques régissant son évolution dans l'atmosphère.

Dans la littérature, le terme particules fines (PF) est souvent utilisé pour désigner le mode accumulation et le terme particules ultrafines (PUF) ou nanoparticules (NP) pour désigner le mode nucléation.

Dans le présent rapport, on entendra par particules ultrafines ou PUF, l'ensemble des particules initiées par nucléation et pouvant évoluer par condensation, coagulation ou agglomération (processus de croissance) pour former des particules plus larges jusqu'à 100 nm (PM_{0,1}). Le terme particules fines (PF) désigna globalement la fraction PM₁ et spécifiquement les particules du mode accumulation.

2.2 Sources des aérosols

Les aérosols ont des sources variées, naturelles et anthropiques (Figure 2) :

- **Aérosols d'origine naturelle** : produits de manière périodique, occasionnelle ou continue par des processus naturels (sels marins, sable du désert, érosion éolienne, éruption volcanique, feu de forêt...),
- **Aérosols d'origine anthropique** : dus aux activités humaines (ex. combustions, activités manufacturières, tâches ménagères...), produits de manière intentionnelle ou non intentionnelle. Les particules produites de manière intentionnelle, le sont en raison de propriétés physico-chimiques recherchées (catalyseurs, semi-conducteurs, batteries, matériaux, additifs).

³ Kittelson, D.B., 1998. Engine and nanoparticles: a review. Journal of Aerosol Science 6, 443–451.

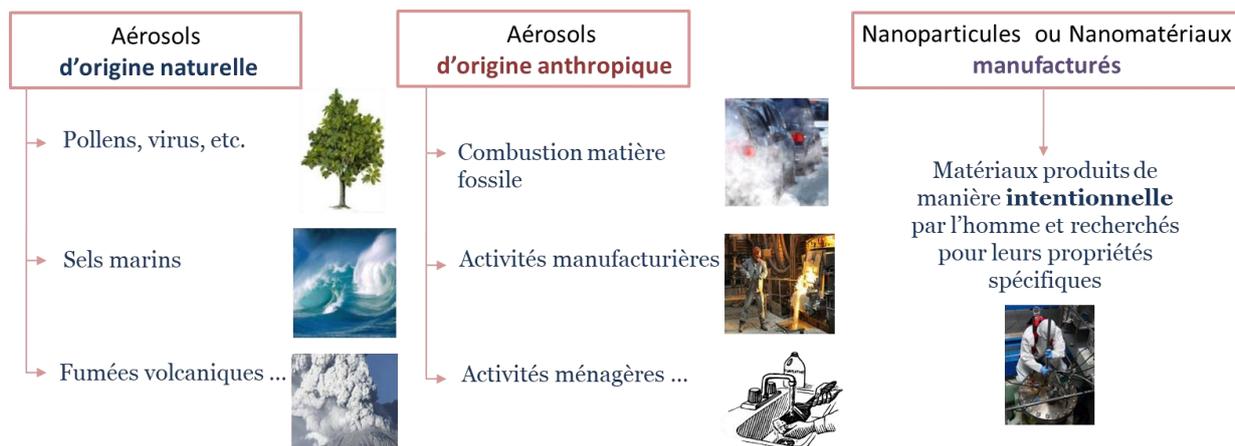


Figure 2 : les différentes sources d'aérosols d'origine naturelle ou anthropique.

Les aérosols peuvent être d'origine primaire ou secondaire :

- **Aérosols ou particules primaires** : issus de la mise en suspension de particules originellement sous forme solide ou liquide (particules d'érosion, pollens, suies...) et donc constatés directement à la source (ex. particules de suies émises par combustion de biomasse ou de matière fossile),
- **Aérosols ou particules secondaires** : issus de la conversion de matière initialement sous forme gazeuse, en matière solide ou liquide par nucléation ou par condensation sur des particules préexistantes dans l'atmosphère. Les aérosols secondaires peuvent donc être formés indépendamment de sources identifiées, en faisant éventuellement intervenir des processus réactifs dans l'atmosphère (ex. photo-oxydation de composés volatils). Cela concerne également les particules primaires qui ont subi des transformations physico-chimiques au cours de leur évolution dans l'atmosphère. **La nucléation** peut être **homogène**, à partir d'une phase initiale gazeuse ou **hétérogène** sur des particules préexistantes. Le processus de nucléation le plus commun implique l'acide sulfurique en raison de sa faible pression de vapeur saturante à des températures atmosphériques. Outre l'acide sulfurique, d'autres précurseurs de nucléation, comme les ions, l'ammoniac, les composés organiques volatils, les composés iodés, peuvent contribuer à la formation de PUF, dont l'importance varie selon les environnements (marins, industriels, urbain, forestier).

2.3 Concentration et composition chimique

Au niveau de la troposphère, les concentrations moyennes en nombre et en masse des aérosols sont respectivement de l'ordre de 10^2 à 10^5 $\#/cm^3$ et de 5 à 50 $\mu g/m^3$. Ces valeurs varient en fonction du milieu (urbain, rural, industriel, océanique) ainsi que des saisons et des conditions météorologiques.

Les caractéristiques (taille, structure, composition chimique) des particules peuvent évoluer ou se transformer (vieillessement) lors de leur transport selon différents processus physico-chimiques (agglomération, coagulation, adsorption ou absorption d'espèces gazeuse, réactions chimiques).

En Europe, les constituants majeurs des PM_{10} et $PM_{2.5}$, présentés en Figure 3, sont des ions inorganiques (principalement des nitrates, sulfates et ammonium), des composés organiques (« OM »), des poussières minérales (« dust »), des sels marins (« sea salt »), et des suies (carbone élémentaire : EC).

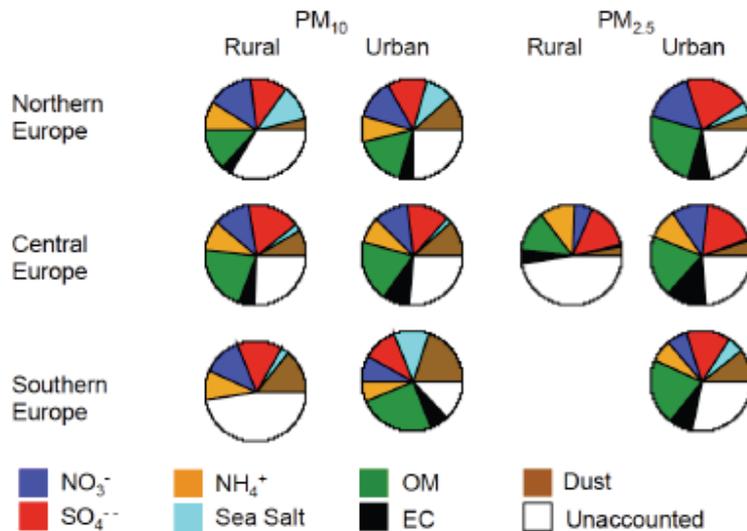


Figure 3 : Composition moyenne de PM_{10} et $PM_{2.5}$ dans des sites urbains et ruraux en Europe⁴

En France, on retrouve sensiblement les mêmes composants, selon une récente étude réalisée sur 15 sites de différentes typologies : urbain, industriel, trafic. Les résultats de cette étude, illustrés en Figure 4 montrent que les niveaux de concentrations annuelles moyennes varient entre 13 et 23,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

L'analyse des profils chimiques montre une importante contribution :

- de la combustion de biomasse (Biomass burning),
- de l'aérosol secondaire (Sulfate et Nitrate-rich)
- des émissions liées au trafic routier (Primary traffic).

Les proportions varient selon la localité et sa typologie. On retrouve, par exemple, une importante contribution de la combustion de biomasse en milieu urbain proche des montagnes (CHAM –Chamonix-), une contribution du trafic à Marseille (MRS) et une contribution particulière liée à la combustion de fioul lourd (HFO) en milieu industriel (PdB -Port-de-Bouc-)⁵.

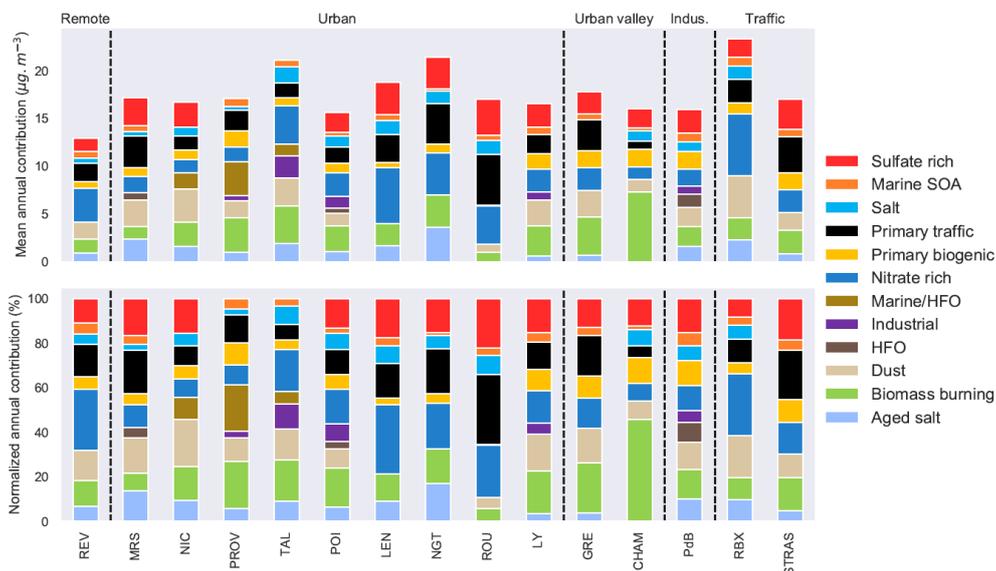


Figure 4 : Contributions moyennes annuelles des profils chimiques, identifiées dans les PM_{10} dans 15 différents sites en France dont MRS-Marseille, NIC-Nice, PdB-Port-de-Bouc

⁴ S. Fuzzi et al. 2015 - Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs –Atmospheric Chemistry and Physics, 15,9217-8299.

⁵ S.Weber et al. 2019 – Comparison of PM_{10} sources profiles at 15 French sites using a Harmonized Constrained Positive Matrix Factorization Approach. Atmosphere, page 1 – 22.

2.4 Principales préoccupations : impacts sanitaires et climatiques

Les aérosols d'origine anthropique sont au cœur des préoccupations actuelles en raison de leurs impacts sur la santé publique et sur le climat.

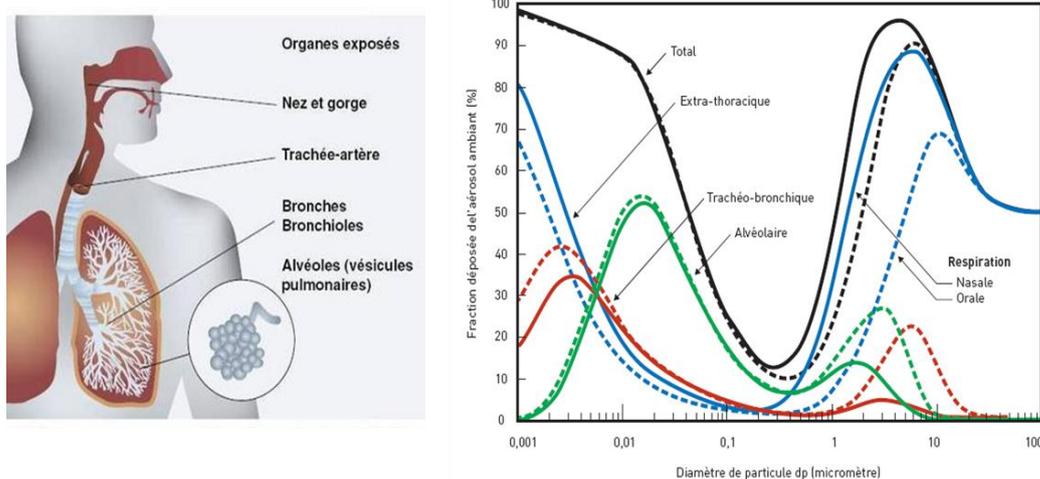


Figure 5 : Régions anatomiques des voies respiratoires et probabilité de dépôt de particules dans les voies respiratoires en fonction du diamètre aérodynamique^{6,7}.

La principale voie d'exposition aux aérosols est par inhalation et, dans une moindre mesure, le contact cutané et l'ingestion.

Les données scientifiques récentes indiquent qu'une exposition par inhalation est susceptible d'induire un stress oxydant, des inflammations, ainsi que des effets génotoxiques et cancérigènes.

Par inhalation, la probabilité de dépôt le long des voies respiratoires (Figure 5) dépend du diamètre aérodynamique des particules. Ces derniers sont soumis à des mécanismes physiques plus au moins importants selon la gamme de taille considérée (sédimentation liée à la gravité, impaction, interception et diffusion brownienne).

Les particules ultrafines ont la plus importante probabilité de dépôt au niveau des alvéoles pulmonaires et sont favorables aux phénomènes de translocation à travers les membranes et les barrières biologiques. Comme elles présentent une surface spécifique très importante, elles peuvent être un vecteur de composés organiques et inorganiques adsorbés, potentiellement toxiques.

L'impact climatique des aérosols résulte notamment de leur interaction directe avec le rayonnement solaire (modification du bilan radiatif terrestre) et de leur capacité à jouer le rôle de noyaux de condensation pour les gouttelettes de nuage. Par ailleurs, les réactions photochimiques peuvent influencer la capacité oxydante de l'atmosphère via la formation/destruction d'ozone (O_3) et des composés radicalaires (ex. le radical hydroxyle $OH\cdot$).

Le Centre International de Recherche sur le cancer (CIRC) a classé la pollution de l'air extérieur cancérigène certain pour l'homme (Groupe 1). Les particules diesel, principales composantes des particules issues du trafic, ont été évaluées séparément et ont également été classées cancérigènes pour l'homme (Groupe 1) en juin 2012.

⁶ Witshger, O. et Fabriès, J-F. 2005. Particules ultra-fines et santé au travail – Caractéristiques et effet potentiels sur la santé, hygiène et sécurité au travail, ND 2227, 21-35

⁷ CIPR-Commission Internationale pour la protection Radiobiologique. Publication 66: Human respiratory tract Model for Radiological protection. Oxford Pergamon, 1994, 24, N° 1-3, 482 p.

2.5 Valeurs réglementaires et recommandations

Le tableau ci-dessous présente les valeurs limites réglementaires pour les PM₁₀ et PM_{2,5} selon la réglementation française (code de l'environnement, article R221-1), la directive européenne 2008/50/CE, les valeurs recommandées en 2005 par l'OMS, et en 2012 par le Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP).

Tableau 1 : valeurs limites réglementaires et recommandations pour le PM₁₀ et PM_{2,5}.

	Valeur limite (directive européenne 2008/50/CE)	Réglementation française (code de l'environnement, art. R221-1)	Valeurs recommandées par l'OMS (2005)	Valeurs recommandées par le HCSP (2012)
PM₁₀	50 µg/m ³ en moyenne 24 heures à ne pas dépasser plus de 35 jours par an Objectif de qualité : 30 µg/m ³		Moyenne 24 heures : 50 µg/m ³	
	40 µg/m ³ en moyenne annuelle	30 µg/m ³ en moyenne annuelle	20 µg/m ³ en moyenne annuelle	Objectif de qualité : 25 µg/m ³ en moyenne annuelle
		Seuil d'information et de recommandation : 50 µg/m ³ en moyenne 24 heures		Seuil d'information et de recommandation : 50 µg/m ³ en moyenne 24 heures
		Seuil d'alerte : 80 µg/m ³ en moyenne 24 heures		Seuil d'alerte : 80 µg/m ³ en moyenne 24 heures
PM_{2,5}	Moyenne annuelle : • 25 µg/m ³ (valeur cible au 1 ^{er} janvier 2010) • 25 µg/m ³ (valeur limite du 1 ^{er} janvier 2015 au 31 décembre 2019) • 20 µg/m ³ (valeur limite au 1 ^{er} janvier 2020)	Moyenne annuelle : • 10 µg/m ³ , objectif de qualité • 20 µg/m ³ , valeur cible • 25 µg/m ³ , valeur limite	Moyenne annuelle : 10 µg/m ³	Objectif de qualité : 15 µg/m ³ en moyenne annuelle
			Moyenne 24 heures : 25 µg/m ³	
				Seuil d'information et de recommandation : 30 µg/m ³ en moyenne 24 heures
				Seuil d'alerte : 50 µg/m ³ en moyenne 24 heures

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) précise que, concernant les particules fines, il n'existe pas de seuil en dessous duquel il n'y a pas d'impact sur la santé.

Concernant, les particules ultrafines, les directives européennes liées à la surveillance de la qualité de l'air n'imposent pas une réglementation en termes de nombre et n'incite pas les États membres à mesurer leurs concentrations dans l'air⁸. Néanmoins, d'autres réglementations européennes, relatives aux émissions, imposent depuis 2011 aux véhicules récents (principaux émetteurs en milieu urbain et péri-urbain) des limitations sur les émissions en nombre (pour les particules de diamètre, dp, supérieur à 23 nm) et en masse de particules et des régulations sur les concentrations d'oxydes d'azote, NO_x (Figure 6). Elles ont été renforcées en 2014, notamment sur la limite des émissions en NO_x.

⁸ Extrait d'une question écrite, n° 03387 de [Mme Samia Ghali](#) (Bouches-du-Rhône - SOCR) Publiée dans le JO Sénat du 22/02/2018 - page 756 Transmise au Ministère de la transition écologique et solidaire

véhicules diesel

véhicules à injection directe d'essence (IDE)

2011: <u>Euro 5 : Cycle NEDC</u> PM = 4.5 mg/km PN = $6 \cdot 10^{11}$ #/km ($d_p > 23$ nm) NOx = 180 mg/km	2014: <u>Euro 6b : Cycle NEDC</u> PM = 4.5 mg/km PN = $6 \cdot 10^{12}$ #/km ($d_p > 23$ nm) NOx = 60 mg/km
2014: <u>Euro 6 : Cycle NEDC</u> PM = 4.5 mg/km PN = $6 \cdot 10^{11}$ #/km ($d_p > 23$ nm) NOx = 80 mg/km	2017: <u>Euro 6c : Cycle NEDC où WLTC</u> PM = 4.5 mg/km PN = $6 \cdot 10^{11}$ #/km ($d_p > 23$ nm) NOx = 60 mg/km

Figure 6 : réglementations européennes, Euro5 et Euro6 sur les émissions véhiculaires⁹

2.6 Surveillance des particules ultrafines (PUF) dans l'air ambiant

« Les particules ultrafines présentes dans l'air ambiant font l'objet depuis plusieurs années, notamment dans les régions Nouvelle-Aquitaine, Auvergne-Rhône-Alpes et Provence-Alpes-Côte d'Azur, d'une surveillance par les associations de surveillance de la qualité de l'air agréées par l'État (AASQA).

Ces travaux sont effectués avec l'appui du laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA), désigné comme l'organisme national chargé de la coordination technique de la surveillance de la qualité de l'air.

Toutefois, les connaissances restent encore limitées et le plan national de surveillance de la qualité de l'air ambiant sur la période 2016-2021 prévoit de mettre en place des moyens de mesure afin d'améliorer les connaissances sur les particules ultrafines. En lien avec ce plan national, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) a été saisie par le ministère de la transition écologique et solidaire (MTES) et le ministère des solidarités et de la santé (MSS) pour dresser un état des lieux des polluants chimiques de l'air ambiant non pris en compte à ce jour par la réglementation relative à la surveillance de la qualité de l'air ambiant, mais constituant des polluants d'intérêt au regard de leur impact sanitaire. L'avis de l'ANSES du 28 juin 2018 recommande notamment d'augmenter le nombre de points de surveillance des particules ultrafines.¹⁰

Suite à la publication de cet avis, le MTES étudie les modalités d'un renforcement de la surveillance des concentrations dans l'air de ces polluants avec les acteurs concernés. Ainsi, l'ANSES sera sollicitée pour préciser les objectifs sanitaires prioritaires pour la surveillance des particules ultrafines.

La connaissance de ces objectifs permettra au LCSQA et aux AASQA de bâtir, en lien avec le MTES, la stratégie de surveillance la plus efficace d'un point de vue technique et économique. Sur ce sujet, différents instruments pour la surveillance des particules ultrafines sont disponibles pour des coûts équivalents ou parfois trois fois plus onéreux que les analyseurs de PM_{2,5} et PM₁₀. La fiabilité et la robustesse sur le long terme de ces équipements doivent être étudiées.

Enfin, la directive 2008/50/CE du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe est en cours d'évaluation par la Commission européenne. La France participera à cette évaluation et à la réflexion sur la possible prise en compte des particules ultrafines par la future directive »¹¹.

⁹ Règlement (CE) N°692/2008 de la commission du 18 juillet 2008 portant application et modification du règlement (CE n° 715/2007 du Parlement européen et du conseil du 20 juin 2007.

¹⁰ <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2015SA0216Ra.pdf>

¹¹ Réponse du Ministère de la transition écologique et solidaire à Mme Samia Ghali Publiée dans le JO du Sénat du 02/08/2018 - page 4042

3. Sites et moyens de mesures dans région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur en 2018

Le présent rapport présente un bilan des mesures en continu des concentrations en masse de particules, des mesures de composés gazeux réglementés (SO₂, NO_x et O₃) et des mesures granulométriques des particules fines et ultrafines réalisées sur deux sites fixes du réseau de mesures d'AtmoSud : Marseille/Longchamp et Port-de-Bouc/La Lègue (Figure 7).

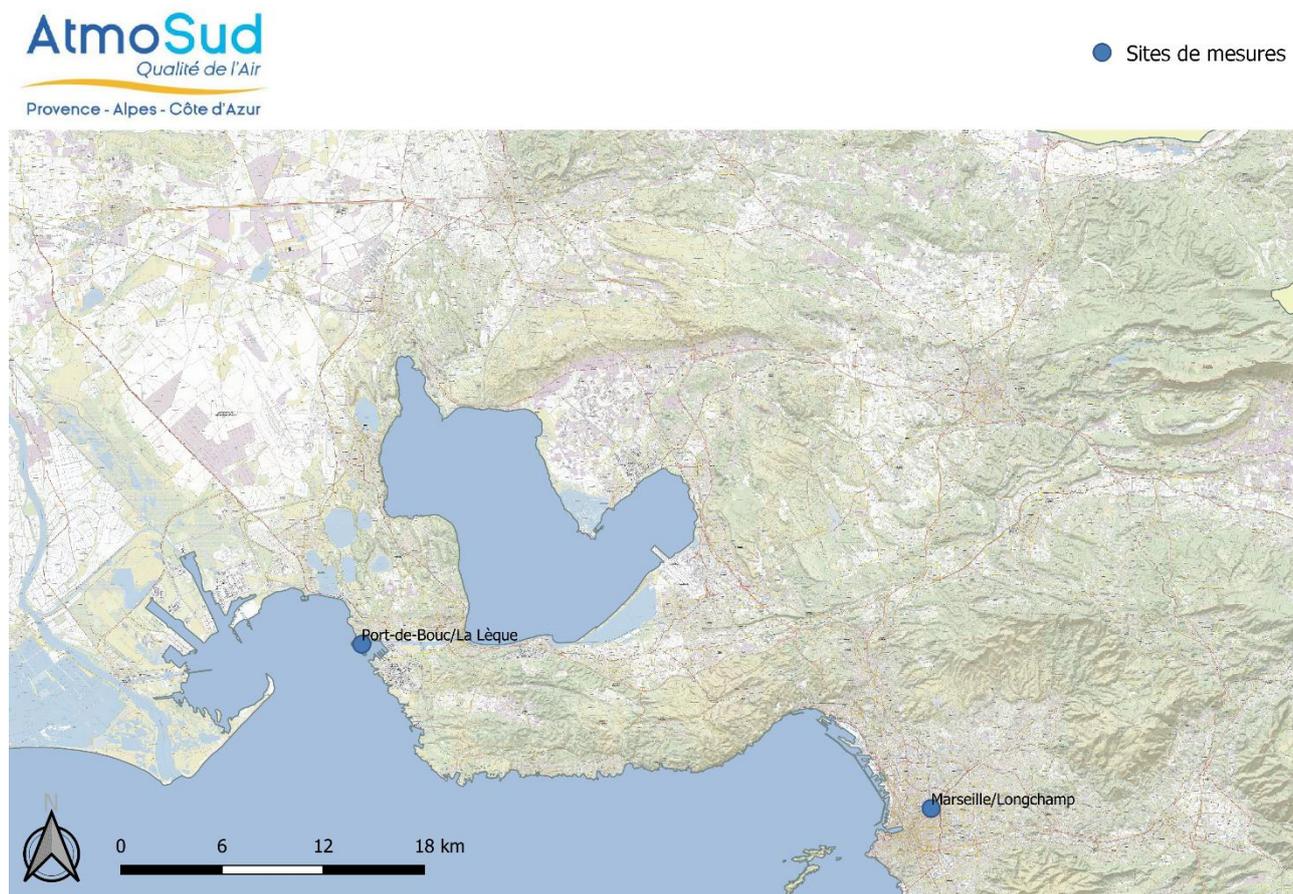


Figure 7 : Localisation géographique deux sites fixes du réseau de mesures d'AtmoSud : Marseille/Longchamp et Port-de-Bouc/La Lègue.

3.1 Le site de Marseille/Longchamp

Le site de Marseille/Longchamp (Figure 8) est situé sur le sommet du parc Longchamp (70 m d'altitude), à Marseille. Ce site est principalement sous influence des activités urbaines :

- Zones résidentielles de fortes densités de population : 850 000 habitants
- Axes de circulation principaux :
 - Boulevard Cassini au nord à 130 m,
 - Boulevard Philippon au sud à 220 m,
 - Boulevard Monticher à l'ouest à 110 m.
 - La gare Saint-Charles et les voies SNCF à 540 m au Nord-Ouest.

Cette station est qualifiée de site urbain : implanté dans une zone à forte densité de population, il est représentatif de la qualité de l'air ambiant « urbain » sans cibler l'impact d'une source d'émission particulière.

On note également une importante activité portuaire avec le port de Marseille, à l'Ouest du site. Ce port dispose d'espaces et d'infrastructures pour accueillir à la fois des activités maritimes, logistiques et industrielles et représente ainsi une importante source de polluants particulaires et gazeux.

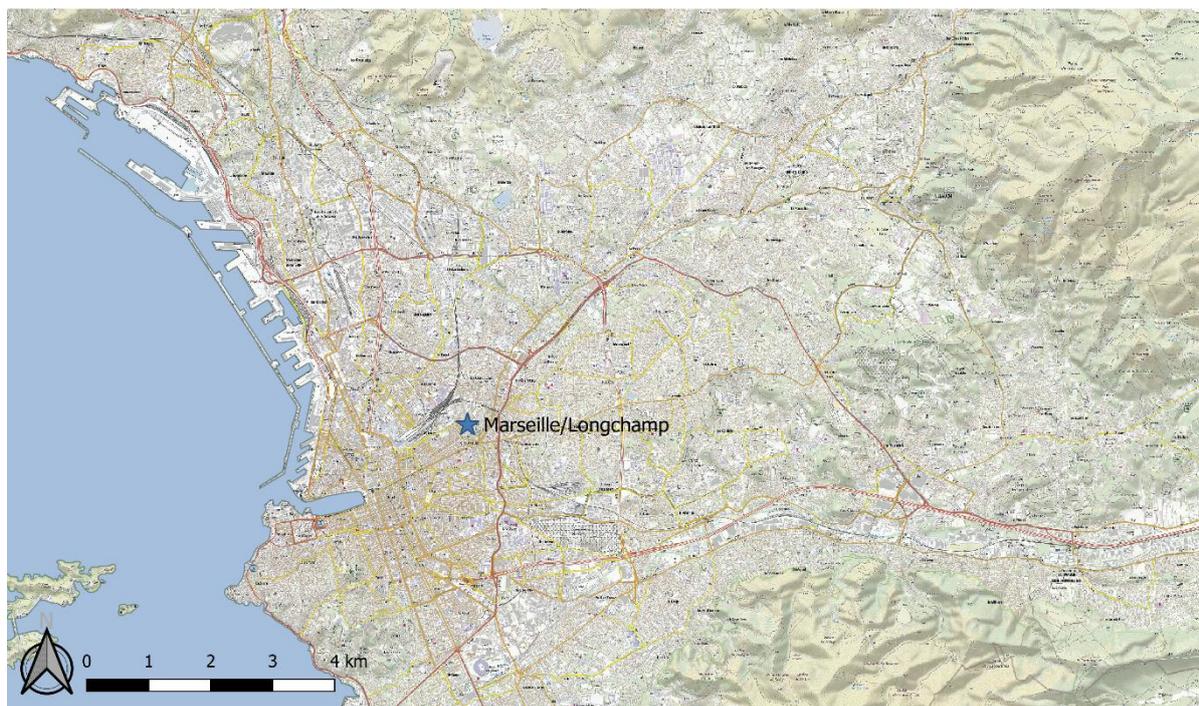


Figure 8 : Localisation géographique de la station de mesure « Marseille/Longchamp »

3.2 Le site de Port-de-Bouc/La Lègue

Le site de **Port-de-Bouc/La Lègue** (Figure 9) est situé dans un tissu urbain peu dense (17 000 habitants) mais sous influence de sources industrielles. Le site de mesure est situé dans l'enceinte de la caserne des marins pompiers de la ville dans le quartier de la Lègue, en périphérie du centre-ville et à proximité de la mer. On note aux alentours :

- Des axes routiers :
 - Avenue Maurice Thorez à 130 m à l'Ouest,
 - Route Nationale N568 à 1500 m au Nord-Est.
- Le port pétrolier de Lavéra : à 1200 m à l'Est, Sud/Est.
- La zone industrielle Lavéra : à 3000 m, à l'est, Sud-Est.
- Les ports Minéralier, conteneurs, pétrolier et gazier de Fos-sur-Mer : 7 km au Nord-Ouest.
- La zone industrielle de Fos-sur-Mer : au Nord-Ouest à 8 km.

Cette station est qualifiée de site de proximité industrielle : elle est représentative de l'impact sur la population d'une source d'émission liée aux activités industrielles. Elle est installée dans l'environnement proche de cette source d'émission, dans une zone occupée par une « population sensible » (écoles, hôpitaux, stades, foyers de personnes âgées...).



Figure 9 : Localisation géographique de la station de mesure « Port-de-Bouc/La Lègue »

3.3 Moyens de mesures en 2018

Le Tableau 2 regroupe les différentes mesures réalisées sur ces deux sites tout au long de l'année 2018.

Tableau 2 : moyens de mesures par site

	Mesure	Marseille/Longchamp	Port-de-Bouc/La Lègue
Phase particulaire	Granulométries (PM ₁)	Oui	Oui
	BC	Oui	Non
	PM ₁₀	Oui	Oui
	PM _{2,5}	Oui	Oui
Phase gazeuse	SO ₂	Oui	Oui
	O ₃	Oui	Non
	NO et NO ₂	Oui	Non

- La mesure granulométrique (PM₁) est réalisée à l'aide d'un analyseur de type : TSI 3031.
Le modèle TSI 3031 est équipé d'un neutraliseur type corona, d'une colonne DMA (Differential Mobility Analyser) et d'un électromètre à cage de Faraday pour le comptage des particules. Il permet une mesure de la distribution en taille et de la concentration en nombre des particules réparties en 6 classes de taille (ou canaux) :
CH1 20-30nm, CH2 30-50 nm, CH3 50-70nm, CH4 70-100nm, CH5 100-200 nm, CH6 > 200nm.
- Les concentrations en carbone suies ou *Black Carbon* sont mesurées à l'aide d'un Aethalomètre de type AE33.
- Les concentrations PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁ sont suivies par un FIDAS 200E à Marseille/Longchamp et par un BAM1020 à Port-de-Bouc/La Lègue.
- Les concentrations de SO₂ sont suivies par un API100E à Marseille/Longchamp et par un API100T à Port-de-Bouc/La Lègue.
- **Les concentrations d'ozone et de NO_x mesurées uniquement à Marseille/Longchamp** sont respectivement suivies à l'aide d'un API400E et d'un SERINUS40.
- Le site de Marseille Longchamp est également doté d'un ACSM (*Aerosol Chemical Speciation Monitor*) qui permet de mesurer la fraction non-réfractaire de l'aérosol (Organiques, sulfates, nitrates, ammonium et chlore) par spectrométrie de masse à temps de vol.

4. Résultats en 2018

4.1 Bilan des concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5}

► Evolution temporelle

La Figure 10 et la Figure 11 présentent l'évolution temporelle en moyennes journalières des concentrations en masse en PM₁₀ et PM_{2.5} relevées respectivement à Marseille /Longchamp et à Port-de-Bouc / La Lègue. Les figures présentent également les moyennes annuelles mesurées en PM₁₀ et PM_{2.5} et le seuil réglementaire d'information à 50 µg/m³ en moyenne journalière relatif aux concentrations de PM₁₀. Sont notées également les positions temporelles des épisodes de pollution en PM₁₀ recensés sur l'année 2018. Les valeurs relevées correspondant à ces épisodes de pollution sont données dans le Tableau 3.

Les moyennes annuelles en concentrations massiques PM₁₀ et PM_{2.5} sont du même ordre de grandeur sur les deux sites et restent en dessous des valeurs limites annuelles préconisées par la directive 2008/50/CE (Tableau 1).

La valeur limite fixée à 40 µg/m³ en moyenne annuelle et l'objectif de qualité à 30 µg/m³ sont respectés pour les PM₁₀.

Pour les PM_{2.5}, les moyennes annuelles sur les deux sites sont inférieures à la valeur limite fixée à 25 µg/m³ (applicable du 1^{er} janvier 2016 au 31 décembre 2019). Elles restent néanmoins supérieures à l'objectif de qualité fixé à 10 µg/m³.

Les valeurs recommandées par l'OMS sont plus strictes et les niveaux moyens annuels sont égaux voire légèrement supérieurs à ces recommandations.

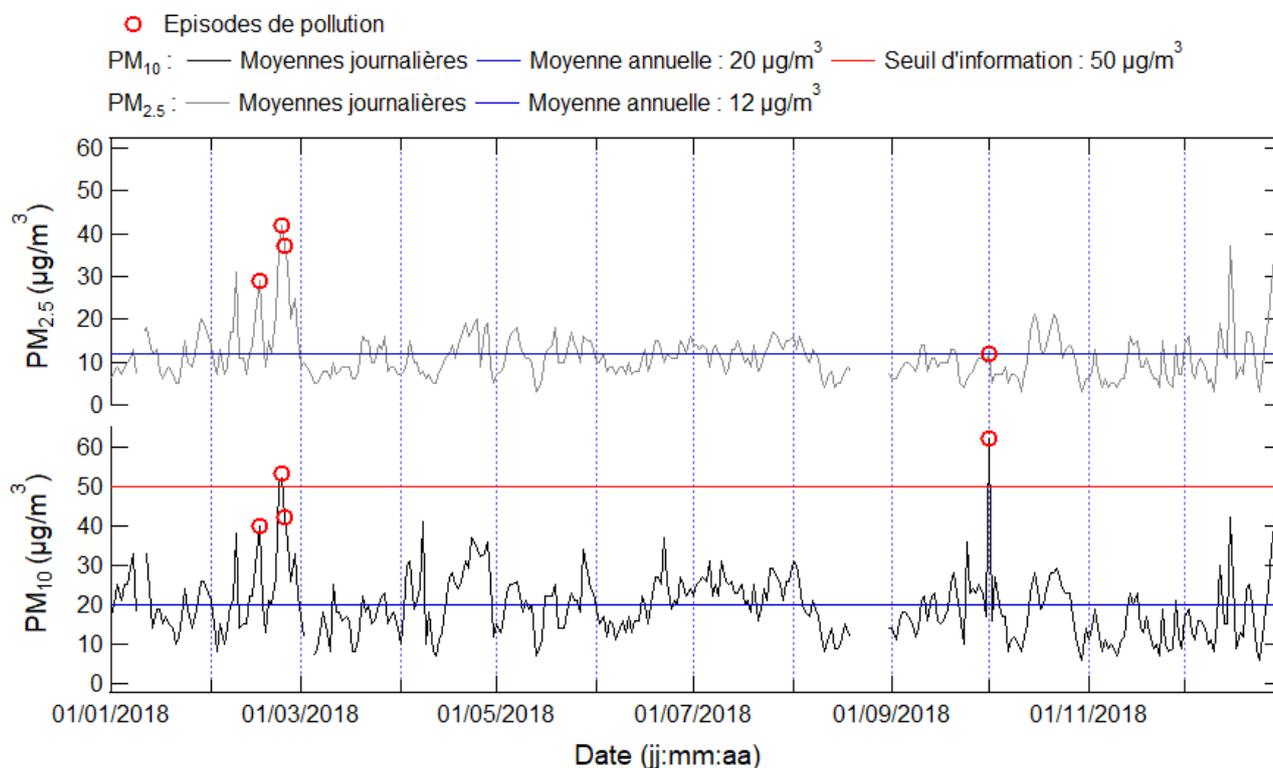


Figure 10 : Evolution en moyennes journalières des concentrations en masse en PM₁₀ et PM_{2.5} à Marseille/Longchamp

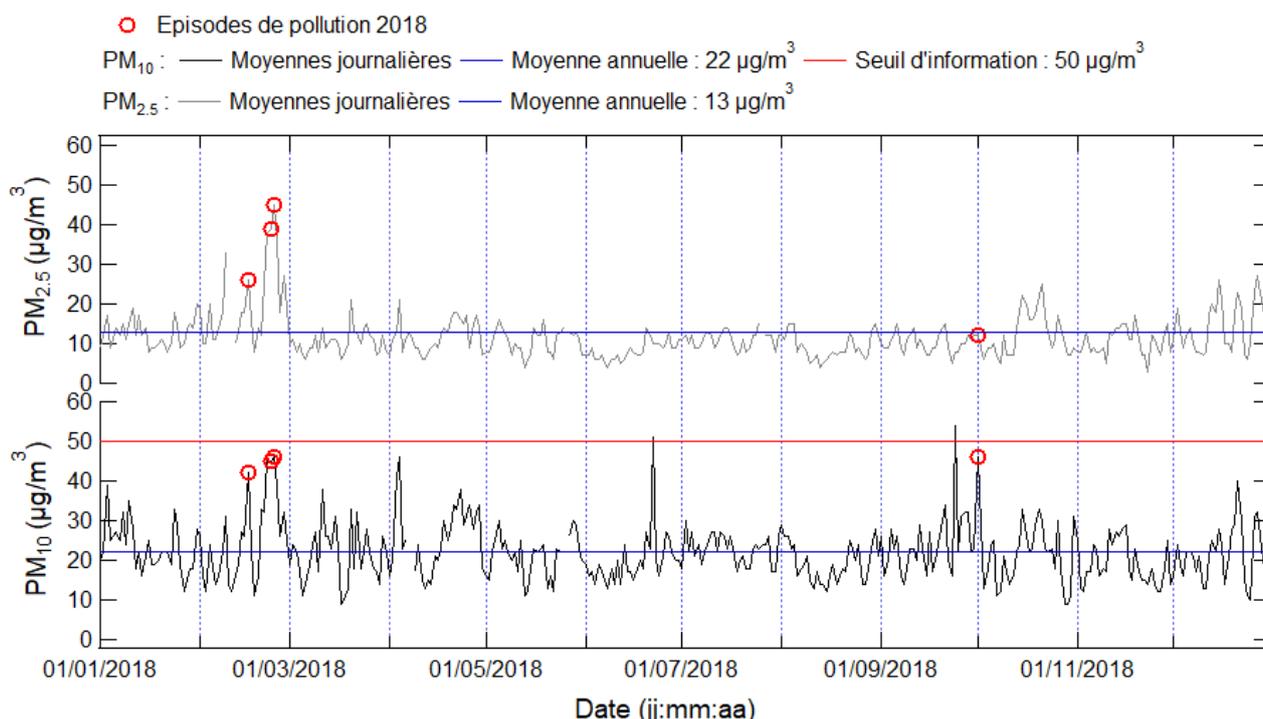


Figure 11 : Evolution en moyenne journalière des concentrations en masse des PM₁₀ et PM_{2,5} à Port-de-Bouc/La Lègue

► Analyse des épisodes de pollution

Sur l'année 2018, quatre épisodes de pollution ont été recensés dans la région (voir profils **Annexe 1**). Le Tableau 3 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les concentrations moyennes journalières en masse des PM₁₀ et PM_{2,5} en µg/m³ relevées à Marseille/Longchamp et à Port-de-Bouc/La Lègue lors de ces épisodes.

Tableau 3 : concentrations en masse moyennes journalières des PM₁₀ et PM_{2,5} en µg/m³ relevées à Marseille/Longchamp et à Port-de-Bouc/La Lègue lors des épisodes de pollution. Les valeurs soulignées correspondent au dépassement du seuil d'information à 50 µg/m³

Date de l'épisode de pollution	Marseille/Longchamp		Port-de-Bouc/La Lègue	
	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{2,5}
16/02/2018	40	29	42	26
23/02/2018	<u>53</u>	42	45	39
24/02/2018	42	37	46	45
01/10/2018	<u>62</u>	12	46	12

On peut noter deux dépassements du seuil d'information à 50 µg/m³ en moyenne sur 24 heures, uniquement sur le site urbain de Marseille/Longchamp : les 23 février et 1^{er} octobre.

Les trois premiers épisodes (en février 2018) sont dus à une augmentation des PM_{2,5}. Le quatrième (1^{er} octobre 2018) se traduit par une seule augmentation des PM₁₀ : par conséquent, il est dû à une augmentation de la fraction PM_{2,5-10} (particules de tailles comprises entre 2,5 et 10 µm).

Sur la Figure 11 on peut également noter trois pics supplémentaires en PM₁₀ (le 4 avril avec 46 µg/m³, le 22 juin avec 51 µg/m³ et le 24 septembre avec 54 µg/m³) sur le site de Port-de-Bouc/La Lègue avec donc deux dépassements du seuil d'information à 50 µg/m³. Ces pics ne correspondent pas à des événements de pollution recensés dans la région. Dans ce cas, ils peuvent être dus une influence très localisée.

Les valeurs limites en moyenne annuelle PM10 et PM2.5 et le nombre limite de dépassements en moyenne journalière PM10 sont respectés sur les deux sites (voir Tableau 1). On reste néanmoins légèrement au-dessus de l'objectif de qualité en moyenne annuelle fixé à 10 µg/m³ pour les PM2.5 par la réglementation française (code de l'environnement, art. R221-1).

Les trois premiers épisodes (en février 2018) sont dus à une augmentation des PM2,5. Le quatrième (1er octobre 2018) se traduit par une augmentation de la fraction PM2,5-10.

► Profil mensuel des ratios PM₁₀/PM_{2,5}

La Figure 12 présente les valeurs statistiques mensuelles en *Box Plot* (voir lecture des *Box plot* en Annexe 2) des rapports massiques PM_{2,5}/PM₁₀. Les valeurs moyennes des ratios sont représentées avec des ronds rouges.

Ce ratio varie d'un site à l'autre et d'une saison à l'autre. Il s'agit d'un bon indicateur de la fraction massique majoritaire de l'aérosol, fine (PM_{2,5}) pour un ratio proche de 1 ou grossière (PM₁₀) pour un ratio autour de 0.5 ou inférieur.

Pour les deux sites, les rapports PM_{2,5}/PM₁₀ varient en moyenne entre 0.44 et 0.78. La moyenne annuelle du ratio est de 0.60 ± 0.07 et de 0.56 ± 0.09 respectivement pour Marseille/Longchamp et pour Port-de-Bouc/La Lèque. Cela indique une dominante annuelle PM₁₀ sur la fraction massique totale de l'aérosol.

Selon le rapport EMEP de 2012¹², les faibles ratios PM_{2,5}/PM₁₀ observés en bassin méditerranéen sont attribuables à une contribution locale ou régionale de poussières minérales ou sel marins ou à du transport inter-continent de sable du désert.

Le ratio PM_{2,5}/PM₁₀ le plus élevé (≥ 0.7) est obtenu, sur les deux sites, pendant le mois de février, période marqué par trois épisodes de pollution PM_{2,5}. On peut noter également une augmentation de ce ratio pendant le mois de décembre, période des vacances de fin d'année propice au brulage de bois de chauffage.

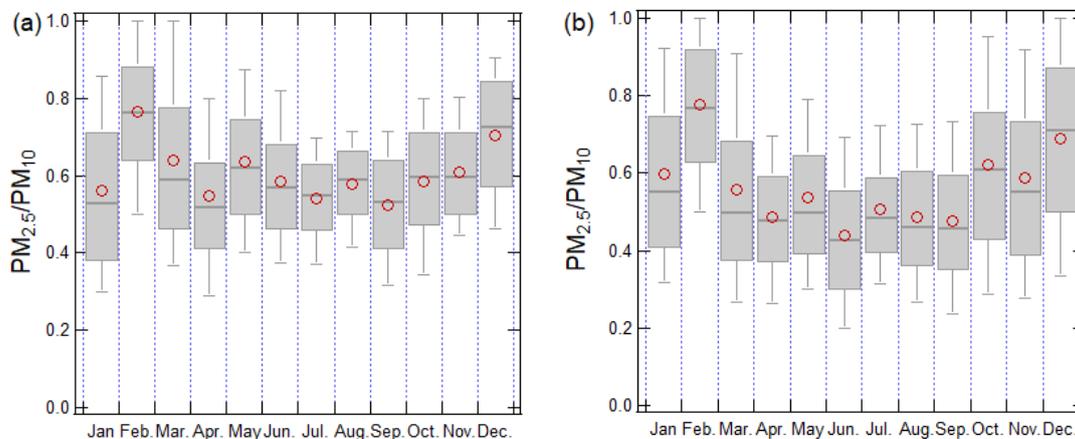


Figure 12 : Rapports massiques PM_{2,5}/PM₁₀ mensuelles. (a) Marseille/Longchamp (b) Port-de-Bouc/La Lèque.

Les rapports PM_{2,5}/PM₁₀ varient en moyenne entre 0.44 et 0.78. La moyenne annuelle dans la région est autour de 0.60 ce qui indique une dominante annuelle des PM₁₀ sur la fraction massique totale de l'aérosol dans la région. Les ratios les plus élevés sont obtenus pendant le mois de février, période marqué par trois épisodes de pollution PM_{2,5} et pendant le mois de décembre, période hivernale de fin d'année propice au brulage de bois de chauffage.

¹² EMEP 2012 Transboundary particulate matter in Europe, statut report 2012.

► Corrélations $PM_{2,5}$ / PM_{10}

La Figure 13 illustre des corrélations **des données horaires** $PM_{2,5}$ et PM_{10} avec un code couleur illustrant les tendances en fonction du temps. La taille des marqueurs augmente selon la concentration des PM_{10} sur une échelle entre $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (barrière symbolique des moyens journaliers à ne pas dépasser) et $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (maximas).

Cette représentation permet de discerner des événements particuliers ayant eu lieu sur l'année 2018. Une corrélation linéaire $PM_{2,5}$ - PM_{10} témoigne d'une source commune à l'aérosol mesuré. Une dominante $PM_{2,5}$ signifie que l'aérosol est de nature fine (particules fines) alors qu'une dominante PM_{10} signifie que l'aérosol est de tailles comprises entre 2.5 et $10 \mu\text{m}$.

A Marseille/Longchamp, on peut noter des corrélations linéaires des $PM_{2,5}$ - PM_{10} (Figure 13a), pendant la période hivernale (marqueurs rouges et bleus) avec une dominante $PM_{2,5}$ et en octobre (marqueurs jaunes) avec une dominante PM_{10} . Les points corrélés marquent des événements ponctuels bien spécifiques, à l'origine des PM_{10} et/ou des $PM_{2,5}$:

- Les maximales hivernales des $PM_{2,5}$ plus importantes à Marseille/Longchamp (marqueurs rouges) correspondent à des événements ayant eu lieu fin décembre (à partir du 24 décembre). Ces événements peuvent être attribués à des particules fines issues du brûlage de bois pour un usage domestique. Ce constat est confirmé plus loin avec les mesures massiques du Black Carbon.
- Les maximales en octobre des PM_{10} (marqueurs jaunes) correspondent à un événement particulier ayant eu lieu le 1^{er} octobre 2018. Il s'agit probablement d'un épisode désertique et semble davantage avoir impacté le site de Marseille/Longchamp.

Pendant la période estivale, la corrélation est nettement moins marquée, illustrée par une grande dispersion des couples ($PM_{2,5}$, PM_{10}) avec globalement une dominante PM_{10} . Dans ces cas, plusieurs sources peuvent contribuer à ces fractions.

A Port-de-Bouc/La Lèque, la corrélation $PM_{2,5}$ - PM_{10} est moins marquée (Figure 13b) que sur le site urbain de Marseille/Longchamp. Ce site est soumis à des sources de $PM_{2,5}$ en période hivernale et de PM_{10} en période estivale. Le site semble par ailleurs moins impacté par les épisodes $PM_{2,5}$ issues du brûlage de bois relevés à Marseille/Longchamp fin décembre.

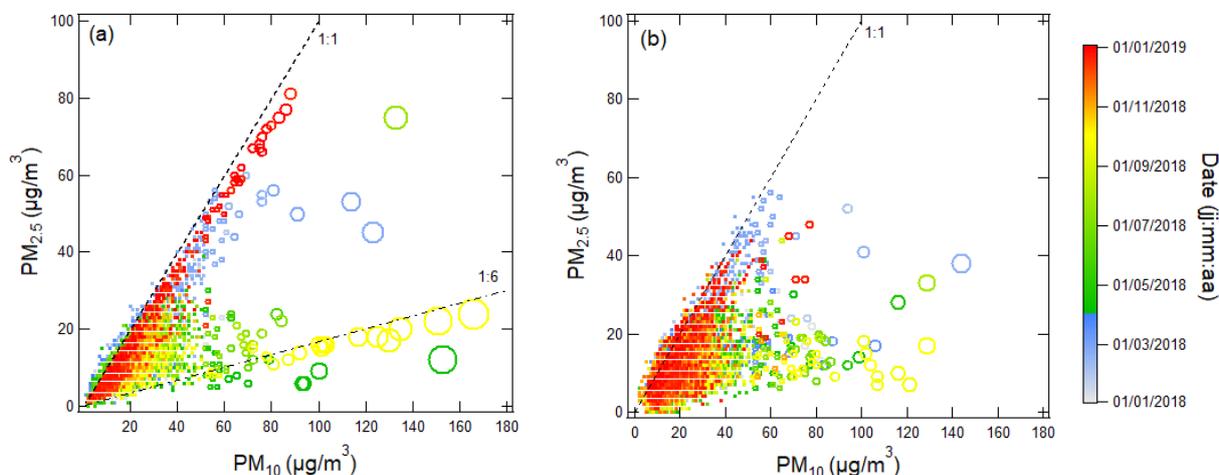


Figure 13 : Corrélation des concentrations en masse en $PM_{2,5}$ avec PM_{10} en fonction de la période de l'année 2018.
(a) Marseille/Longchamp (b) Port-de-Bouc/La Lèque.

La période hivernale est marquée par une contribution massique importante, voire majoritaire des $PM_{2,5}$ sur la fraction totale des particules dans l'atmosphère régionale. La période estivale est illustrée par une forte dispersion des couples ($PM_{2,5}$, PM_{10}) avec globalement une dominante PM_{10} .

► Profils journaliers

La Figure 14 et la Figure 15 présentent les profils journaliers des concentrations en masse des PM_{10} et $PM_{2.5}$ en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en moyennes annuelles et par saison relevés respectivement à Marseille/Longchamp et à Port-de-Bouc/La Lègue.

- Sur le site urbain de Marseille/Longchamp.

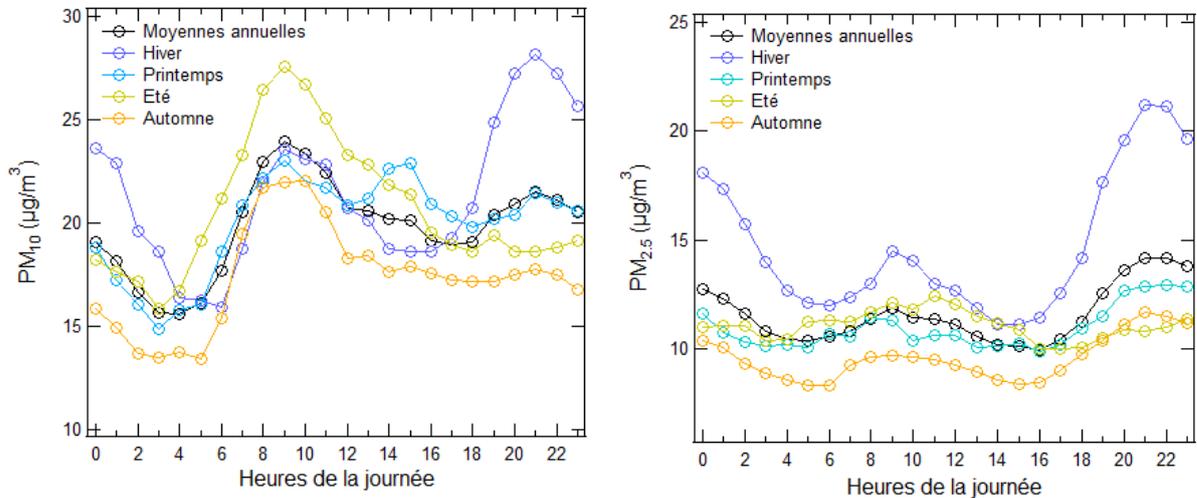


Figure 14 : Profils journaliers des concentrations en masse des PM_{10} et $PM_{2.5}$ en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en moyennes annuelles et par saison relevés à Marseille/Longchamp

Les profils $PM_{2.5}$ relevés en printemps, été et automne restent comparables aux profils moyens annuels. Le comportement des $PM_{2.5}$ est différent en période hivernale : la fraction des $PM_{2.5}$ augmente en fin de soirée et tout au long de la nuit avec un maximum relevé vers 21h, induisant de fait une augmentation similaire des concentrations en PM_{10} sur la même période. En effet, concernant les PM_{10} , les profils saisonniers sont globalement comparables au profil moyen annuel en automne et au printemps. En période hivernale, les fractions des PM_{10} suivent le même type d'évolution que la fraction $PM_{2.5}$ en fin de soirée et tout au long de la nuit.

Les plus faibles concentrations sont relevées en automne avec des valeurs moyennes journalières en PM_{10} et $PM_{2.5}$ en dessous des valeurs moyennes annuelles.

La fraction PM_{10} augmente généralement pendant la matinée, et de façon plus prononcée durant l'été, avec un maximum relevé vers 9h.

La contribution importante des $PM_{2.5}$ relevés à Marseille/Longchamp en période hivernale a lieu essentiellement en période nocturne, en lien avec le chauffage domestique au bois. La fraction PM_{10} augmente généralement pendant la matinée.

- Sur le site industriel de Port-de-Bouc/La Lègue

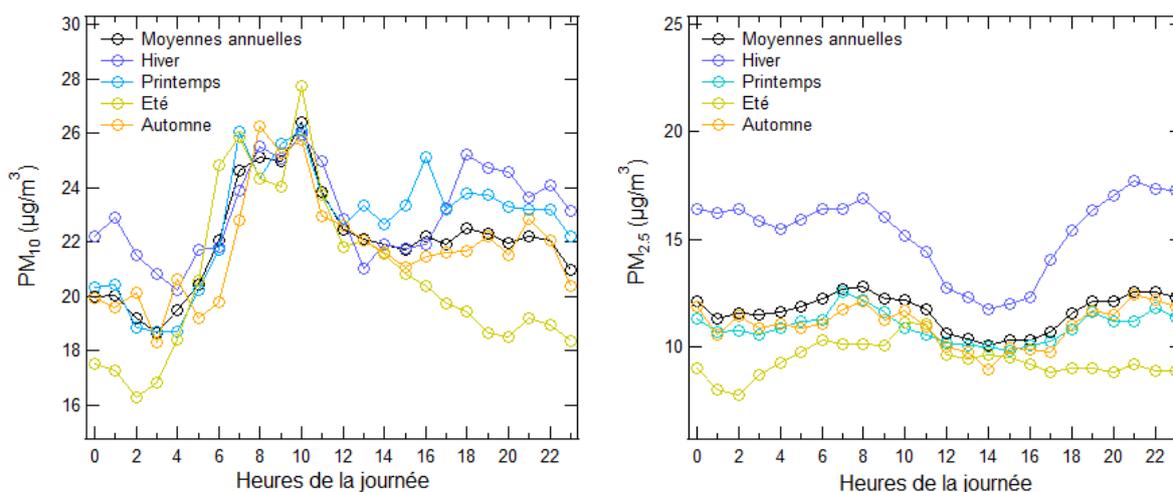


Figure 15 : profils journaliers des concentrations en masse des PM_{10} et $PM_{2,5}$ en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en moyennes annuelles et par saison relevés à Port-de-Bouc/La Lègue.

Pour le site de Port-de-Bouc/La Lègue, les profils journaliers sont différents (Figure 15). On retrouve néanmoins l'augmentation des PM_{10} durant la matinée avec des maximums entre 7 et 10h et l'augmentation des $PM_{2,5}$ pendant l'hiver témoignant d'une influence régionale ou de sources communes ou semblables.

Les concentrations en $PM_{2,5}$ sont également importantes durant la matinée surtout en hiver.

L'été, elles deviennent faibles surtout le soir et la nuit. On note également une baisse des concentrations en PM_{10} sur ces mêmes moments.

Le reste de l'année, on retrouve des profils journaliers et des valeurs proches des moyennes annuelles, à l'exception d'une augmentation des PM_{10} en printemps en début d'après-midi.

Cette augmentation est observée sur les deux sites de Marseille/Longchamp et de Port-de-Bouc/La Lègue, ce qui peut être attribué à une activité biogénique naturelle ou lié à une activité agricole d'influence régionale.

Le site de Port-de-Bouc/La Lègue est marqué par une augmentation des $PM_{2,5}$ en période hivernale ayant lieu en période nocturne et durant la matinée. La fraction PM_{10} augmente généralement pendant la matinée. Les concentrations sont plus faibles l'été par rapport au reste de l'année, le soir et la nuit.

► Black Carbon et contributions des PM_{ff} et PM_{wB}

Le *Black Carbon*, ou carbone suie, est un composé de la fraction fine (PM_{2,5}) majoritairement émis dans l'atmosphère selon des processus de combustion incomplète des carburants fossile (trafic routier, maritime et aérienne, industries) et de biomasse (chauffage domestique, brulage saisonnier).

La mesure du *Black Carbon* avec l'Aethalomètre AE33 permet une spéciation et une différenciation chimique des particules issues de la combustion de biomasse (PM_{wB} : Wood Burning) et des particules issues des carburants fossiles (PM_{ff} : Fossil Fuel).

Le site de Marseille/Longchamp est équipé d'un AE33 et permet d'étudier l'évolution des concentrations en masse des PM_{FF} et des PM_{wB} et leur contribution aux PM₁₀ et PM_{2,5}.

La mesure de la fraction PM_{FF} et PM_{wB} à partir des données AE33 est donnée en Annexe 3

La Figure 16, présente l'évolution en moyennes journalières des concentrations en masse des PM_{FF} et des PM_{wB} comparées à celle des PM₁₀ et PM_{2,5}.

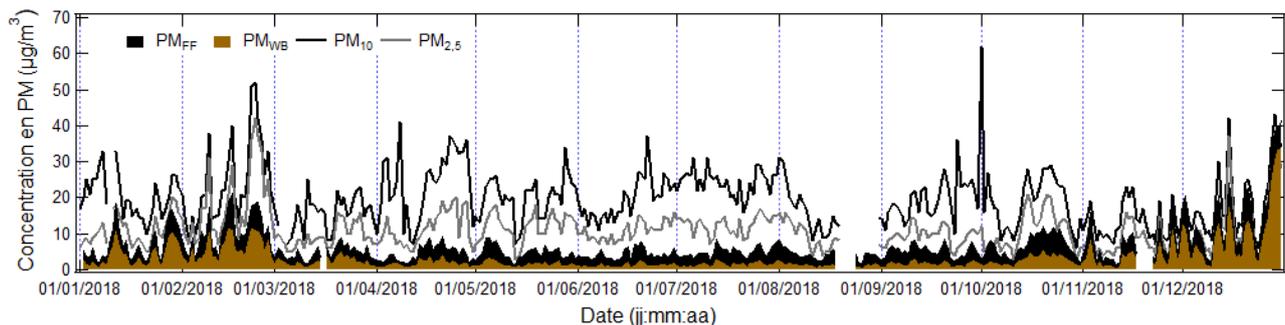


Figure 16 : Evolution en moyennes journalières des concentrations en masse en PM_{FF}, PM_{wB}, PM₁₀ et PM_{2,5} recensées à Marseille/Longchamp

La contribution des PM_{FF} est relativement stable tout au long de l'année alors que la contribution des PM_{wB} à la concentration en masse des PM₁₀ et notamment des PM_{2,5} est importante en période hivernale et devient majoritaire en décembre en lien avec le chauffage domestique au bois.

La Figure 17 présente les profils journaliers des concentrations en masse des PM_{FF} et PM_{wB} en µg/m³, en moyenne annuelle et par saison relevés à Marseille/Longchamp.

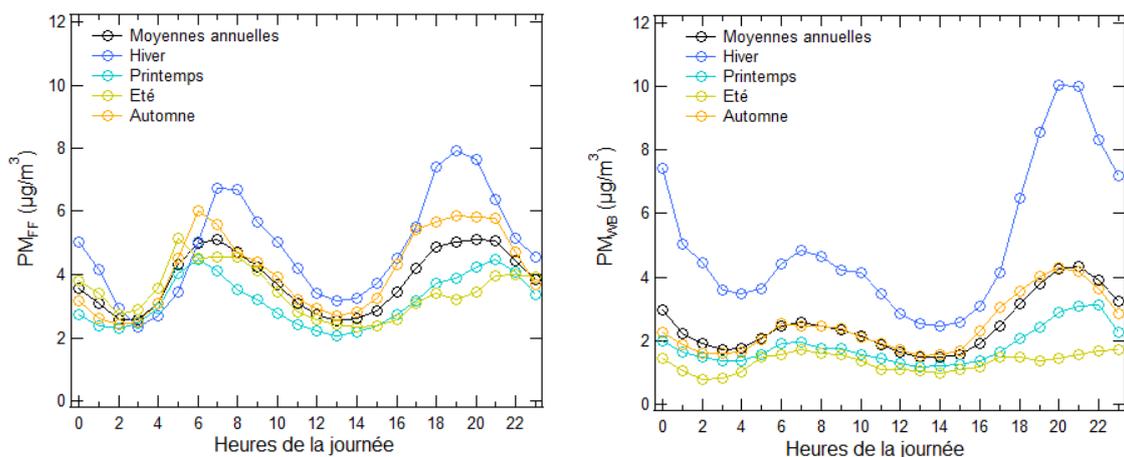


Figure 17 : Profils journaliers des concentrations en masse des PM_{ff} et PM_{wB} en µg/m³, en moyennes annuelles et par saison relevés à Marseille/Longchamp

Le profil journalier des PM_{FF} montre l'impact du trafic routier avec deux pics quotidiens en matinée et en fin d'après-midi (correspondant aux heures de pointe des trajets domicile/travail) avec des concentrations plus importantes en

hiver. En situation anticyclonique hivernale, le sol se refroidit plus vite et la couche d'inversion est plus basse. Les conditions sont peu dispersives et les polluants émis se concentrent au niveau du sol. Les conditions météorologiques sont ainsi propices à l'accumulation d'émissions anthropiques dans une couche de mélange de faible épaisseur ce qui favorise la formation par condensation en phase particulaire d'espèces semi-volatiles. Pour les printemps, été et automne, les profils saisonniers sont très proches du profil moyen annuel.

Les concentrations des PM_{WB} sont également plus importantes sur la période hivernale surtout en soirée et tout au long de la nuit. Ce même constat a été relevé pour les $PM_{2.5}$. De même, on retrouve une corrélation linéaire PM_{WB} - PM_{10} similaire à celle précédemment relevée entre les $PM_{2.5}$ et les PM_{10} relative à des maximales hivernales (marqueurs rouge) correspondants à des émissions ayant eu lieu à partir du 24 décembre (Figure 18).

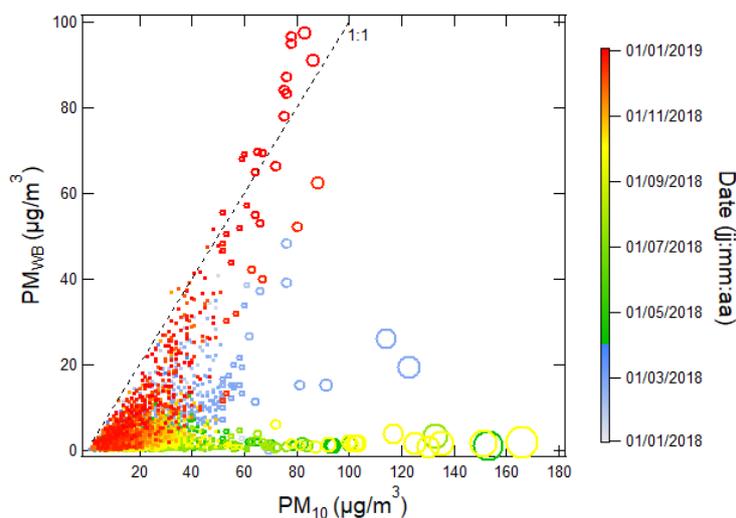


Figure 18 : Corrélation des concentrations en masse en PM_{WB} avec PM_{10} en fonction de la période de l'année 2018. Données horaires. Site de Marseille/Longchamp.

Cela conforte l'idée que l'augmentation hivernale en fin décembre des $PM_{2.5}$ (et par conséquent des PM_{10}) est essentiellement liée à la combustion de biomasse pour un usage domestique du chauffage au bois.

Le reste de l'année, les concentrations $PM_{2.5}$ et PM_{10} sont élevées par rapport aux PM_{FF} et PM_{WB} . D'autres sources sont dans ces cas à l'origine des PM_{10} et $PM_{2.5}$ et peuvent être naturelles (poussières minérales, érosions, embruns marins, sources biogéniques, ...) ou anthropiques (ex : nitrate d'ammonium lié à la reprise des épandages agricoles entre mars et avril).

La période hivernale est marquée par une contribution importante, parfois majoritaire des $PM_{2.5}$ sur la fraction massique totale des particules dans l'atmosphère de la ville de Marseille/Longchamp. Cette contribution a lieu essentiellement en fin de soirée et tout au long de la nuit. La contribution des PM_{WB} à cette fraction est importante pendant ces périodes et devient majoritaire en période des vacances de fin décembre. En effet, la période de fin d'année est davantage propice au brûlage de bois pour un usage domestique.

4.2 Bilan des concentrations en nombre de particules fines et ultrafines

► Evolution temporelle

Les mesures des concentrations en nombre de particules ont débuté le 17/02/2018 sur le site de surveillance de Port-de-Bouc/La Lègue. Sur le site de Marseille/Longchamp, les mesures ont eu lieu jusqu'au 16/11/2018. Les moyennes des concentrations en nombre sont donc calculées sur ces périodes de mesure.

La Figure 19 présente l'évolution temporelle en moyennes journalières des concentrations en nombre de particules fines et ultrafines par classe de tailles et les concentrations des oxydes d'azote NO_x (NO et NO_2), du dioxyde de soufre SO_2 et de l'ozone O_3 relevées sur le site de mesure de Marseille/Longchamp.

La Figure 20 présente celle des concentrations en nombre de particules et les concentrations de SO_2 relevées à Port-de-Bouc/La Lègue. Les concentrations des oxydes d'azote NO_x (NO et NO_2) et de l'ozone O_3 ne sont pas suivies à Port-de-Bouc/La Lègue.

Les NO_x et l'ozone sont respectivement de bons indicateurs des activités anthropiques (trafics routiers, essentiellement) et des phénomènes photochimiques. Les émissions SO_2 sont essentiellement témoin d'une activité industrielle pétrochimique à proximité (cas de Port-de-Bouc/La Lègue) mais peuvent également être liée à une activité portuaire et maritime (cas de Marseille).

A titre d'indication, les positions temporelles des épisodes de pollution en PM_{10} recensés sur l'année 2018 sont également notées sur ces figures.

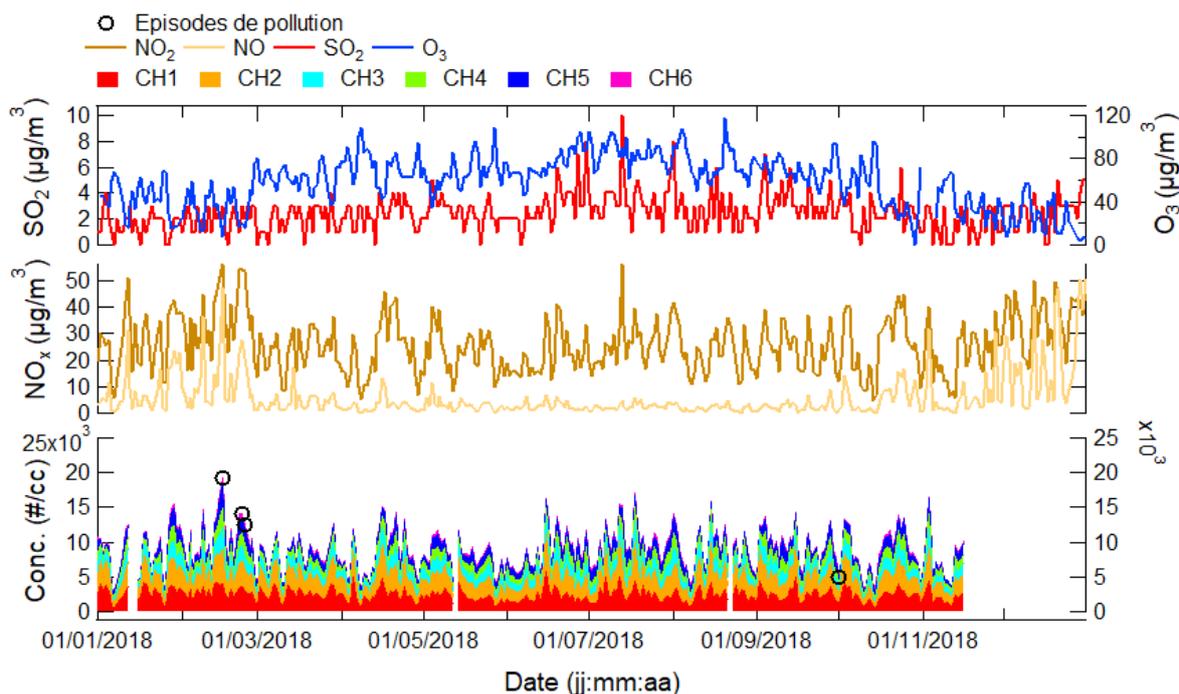


Figure 19 : Evolution en moyennes journalières des concentrations en nombre de particules fines et ultrafines (mesure TSI3031) et des concentrations en masse des NO_x , SO_2 et O_3 recensées à Marseille/Longchamp.

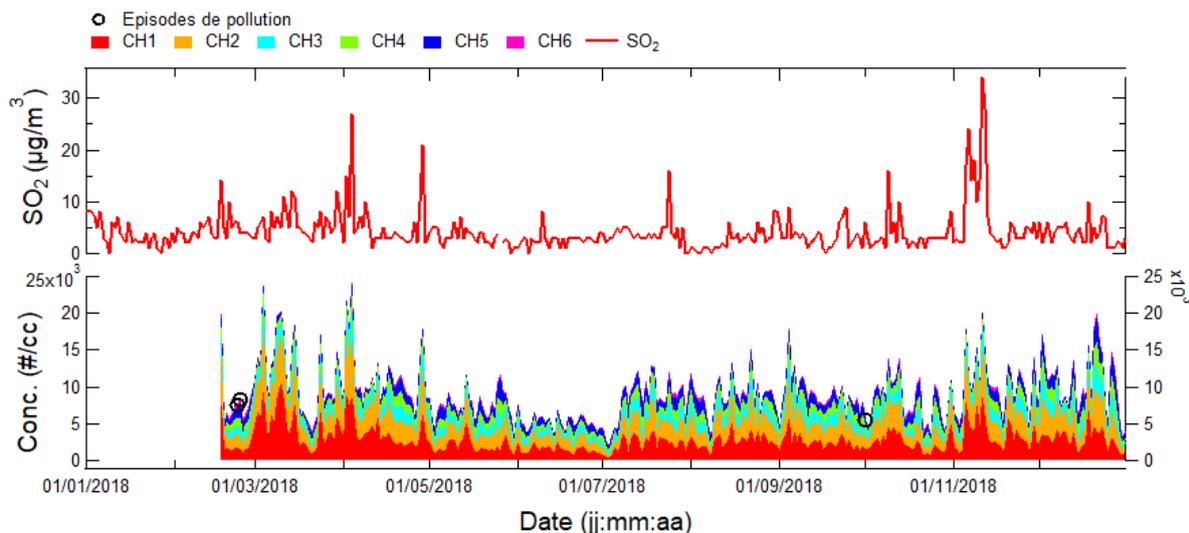


Figure 20 : Evolution en moyennes journalières des concentrations en nombre de particules fines et ultrafines (mesure TSI3031) et des concentrations en masse de SO₂ recensées à Port-de-Bouc/La Lègue.

Globalement, aucun évènement particulièrement notable n'est observé à Marseille/Longchamp au cours de l'année 2018.

Sur le site de Port-de-Bouc/La Lègue, on peut noter plusieurs pics en nombre de particules ultrafines (canal 1 et 2, respectivement 20-30 nm et 30-50 nm), qui coïncident avec les augmentations des concentrations en SO₂.

► Analyse des épisodes de pollution

Des épisodes de pollution en PM₁₀ ont été recensés au niveau régional, les 16, 23 et 24 février et le 1^{er} octobre 2018. Les mesures PM₁₀ et PM_{2.5} présentées précédemment ont permis d'attribuer les trois premiers à une augmentation des PM_{2.5} et le quatrième à une augmentation de la fraction PM_{2.5-10}.

La Figure 21 présente les distributions granulométriques (analyse TSI 3031) en moyennes journalières relevées lors de de ces épisodes de pollution et également en moyenne année 2018, sur le site urbain de Marseille/Longchamp et sur le site industriel de Port-de-Bouc/La Lègue. Ceci, afin d'évaluer si les augmentations en masse se sont également accompagnées d'un nombre plus important de particules fines et ultrafines,

Les distributions granulométriques moyennes annuelles sont comparables entre les deux sites, avec, néanmoins, des concentrations en nombre de particules ultrafines (ch1 notamment et ch2) plus importantes à Port de Bouc/La Lègue.

Sur le site urbain de Marseille/Longchamp, les distributions granulométriques relevées lors des trois premiers épisodes de pollution présentent des concentrations en nombre de particules fines (canal 5, 100-200 nm) et ultrafines (canal 1, 20-30 nm, et canal 2, 20-50 nm) plus importante que les moyennes annuelles. Sur le site industriel de Port-de-Bouc/La Lègue, on peut noter une tendance inverse.

Les épisodes de pollution recensés en 2018 sont de portée régionale et le profil d'évolution des PM_{2.5} au cours de trois premiers évènements était similaire entre les deux sites de mesure. L'augmentation des PM_{2.5} ne peut donc être directement attribuées à de particules fines (canal 5, 100-200 nm) et ultrafines (canal 1, 20-30 nm, et canal 2, 20-50 nm). Les concentrations en nombre de particules plus importantes à Marseille lors de ces évènements sont spécifiques à ce site et à la période de mesure (voir profils hivernaux plus loin)

Le quatrième épisode de pollution attribué à la fraction PM_{2.5-10} n'as pas été également accompagné d'une augmentation en nombre de particules fines et ultrafines.

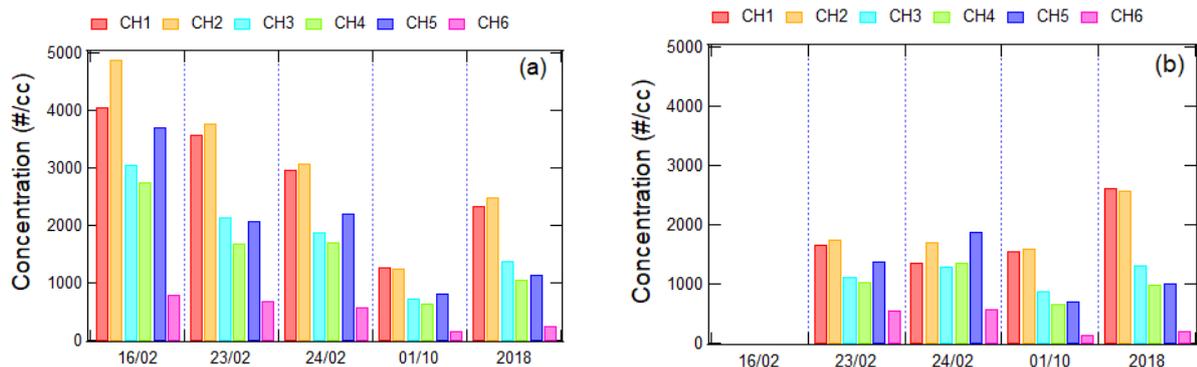


Figure 21 : Concentrations en nombre de particules par canal en moyennes journalières relevées lors des épisodes de pollution PM₁₀ et en moyenne annuelle à Marseille / Longchamp (a) et à Port-de-Bouc/La Lègue (b).

Les épisodes de pollution PM₁₀ et/ou PM_{2.5} recensés en 2018 au niveau régional ne peuvent être corrélés à des augmentations en nombre de particules fines et ultrafines (dont le diamètre est inférieur à 200 nm).

► Bilan annuel

Comme on peut le noter sur la Figure 22a les concentrations en nombre de particules en moyennes annuelles sont du même ordre de grandeur sur les deux sites avec $8,71 \cdot 10^3$ particules/cm³ et $8,77 \cdot 10^3$ particules/cm³ respectivement relevés sur la station urbaine de Marseille/Longchamp et la station industrielle de Port-de-Bouc/La Lègue. Les valeurs statistiques (percentiles) sont néanmoins plus dispersées pour le site industriel de Port-de-Bouc/La Lègue.

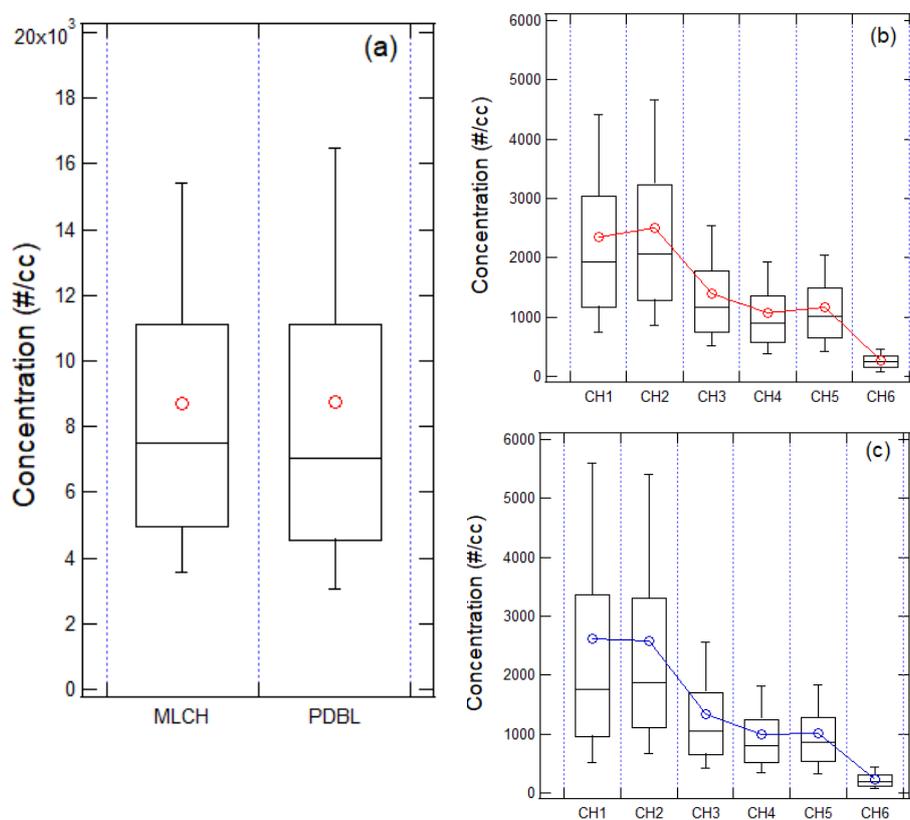


Figure 22 : Bilan statistique des concentrations (a) en nombre annuel total de particules et par canal de l'analyseur TSI 30331 (b) à Marseille/Longchamp et (c) à Port-de-Bouc/La Lègue.

Les percentiles élevés (supérieurs à 75 %) sont supérieurs à Port-de-Bouc/La Lègue comparés à ceux de Marseille. La médiane et les faibles percentiles (inférieurs à 25 %), présentent des valeurs plus élevées sur le site de Marseille/Longchamp qu'à Port-de-Bouc/La Lègue. Les niveaux de fond sont plus importants à Marseille en raison d'une activité urbaine chronique alors que le site de Port-de-Bouc est plutôt marqué par des épisodes de pollution ponctuels.

En comparant les valeurs statistiques par canal de mesure (Figure 22 b&c), ces constats peuvent être attribués :

- à une dispersion annuelle plus importante des concentrations en particules ultrafines, à Port-de-Bouc/La Lègue, (ex : CH1&2, D_p 20-50 nm) en raison des processus d'émissions ou de formation épisodiques par nucléation de PUF,
- à des concentrations de fond, notamment en particules fines (ex : CH5, D_p 100 - 200 nm), plus importantes à Marseille/Longchamp.

Sur le site industriel de Port-de-Bouc/La Lègue, on note plusieurs pics de particules ultrafines qui coïncident avec des concentrations plus élevées de dioxyde de soufre. Ce dernier est potentiellement accompagné par des précurseurs de formation des particules secondaires dans l'air ambiant. Le plus commun est l'acide sulfurique en raison de sa faible pression de vapeur saturante dans les conditions de températures classiques en présence d'eau.

Cela peut être à l'origine des concentrations annuelles de particules ultrafines plus importantes observés à Port-de-Bouc/La Lègue (canal 1).

Les deux sites présentent, par ailleurs, des concentrations moyennes annuelles, comparables en nombre totale de particules. Les particules peuvent globalement être issues des processus de nucléation d'ampleur régional impliquant en plus de l'acide sulfurique, des ions, l'ammoniac (NH_3) et la photo-oxydation des effluents gazeux tels que les composés organiques volatils (COV) et semi-volatils (COSV) précurseurs.

Globalement, aucun évènement particulièrement notable impactant le nombre total des particules n'est observé à Marseille/Longchamp au cours de l'année 2018.

Le site de Port-de-Bouc/La Lègue est marqué par plusieurs pics de particules ultrafines (augmentation en nombre de particules du canal 1 et 2, respectivement 20-30 nm et 30-50 nm) en parallèle avec les émissions de SO_2 .

Les deux sites présentent des concentrations moyennes annuelles en nombre de particules ultrafines comparables : $8,71.10^3$ particules/cm³ et $8,77.10^3$ particules/cm³ respectivement relevés sur la station urbaine de Marseille/Longchamp et la station industrielle de Port-de-Bouc/La Lègue.

► Etude des corrélations linéaires

Les concentrations en nombre de particules relevées à Marseille/Longchamp peuvent être considérées comme corrélées avec les concentrations de NO_x (Figure 23) ; le coefficient de régression linéaire R^2 est de l'ordre de 0.67.

En milieu urbain, les concentrations de NO_x sont, de manière générale, corrélées aux concentrations de particules suies ou *Black Carbon*. Les NO_x sont ainsi un bon indicateur des émissions principalement liées au trafic routier. Dans notre cas le coefficient de régression linéaire R^2 de la relation NO_x/BC_{FF} est de l'ordre de 0.76.

Les concentrations en nombre de particules sont corrélées aux concentrations de NO_x . De plus, les concentrations de NO_x sont bien corrélées aux concentrations en BC_{FF} . On peut donc en déduire que les concentrations en nombre de particules relevées à Marseille sont essentiellement dues au trafic routier.

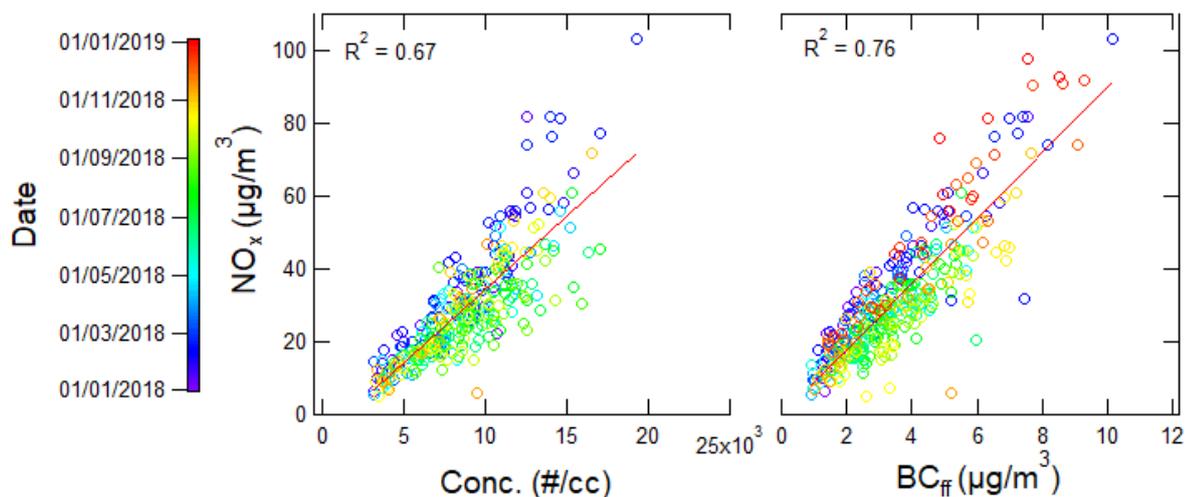


Figure 23 : Concentration en masse de NO_x en fonction de la concentration en nombre total de particules et de la concentration en masse du BC issue de la combustion de carburants fossiles – Marseille/Longchamp.

► Etudes des profils journaliers

La Figure 24 présente le profil journalier des concentrations des NO_x, O₃ et SO₂ en µg/m³ et du nombre total de particules, en moyennes annuelles et par saison, relevés à Marseille Longchamp. Pour les NO_x, on peut constater deux pics quotidiens en matinée et en fin d'après-midi caractéristiques des émissions liées au trafic routier (heures de pointe). L'hiver, les concentrations sont plus importantes en raison des conditions météorologiques peu dispersives.

En termes de concentrations en nombre de particules, on retrouve ces profils à deux pics, néanmoins, combinés avec des niveaux plus importants de particules fines le soir pendant la période hivernale et de particules ultrafines en milieu de la journée en été (voir profils par canal ou classe de taille en Annexe 4). Les concentrations hivernales sont probablement liées à la combustion de biomasse, alors qu'en période estivale, cela est typiquement due à des processus de photo-oxydation et de formation de particules secondaires. Ce processus est accompagné par une formation plus importante d'ozone observable en période estivale en milieu de la journée.

L'été on retrouve également une augmentation des concentrations moyennes de SO₂. Celle-ci peut être attribuée à une activité portuaire plus importante en période estivale (voir roses de pollution ci-après).

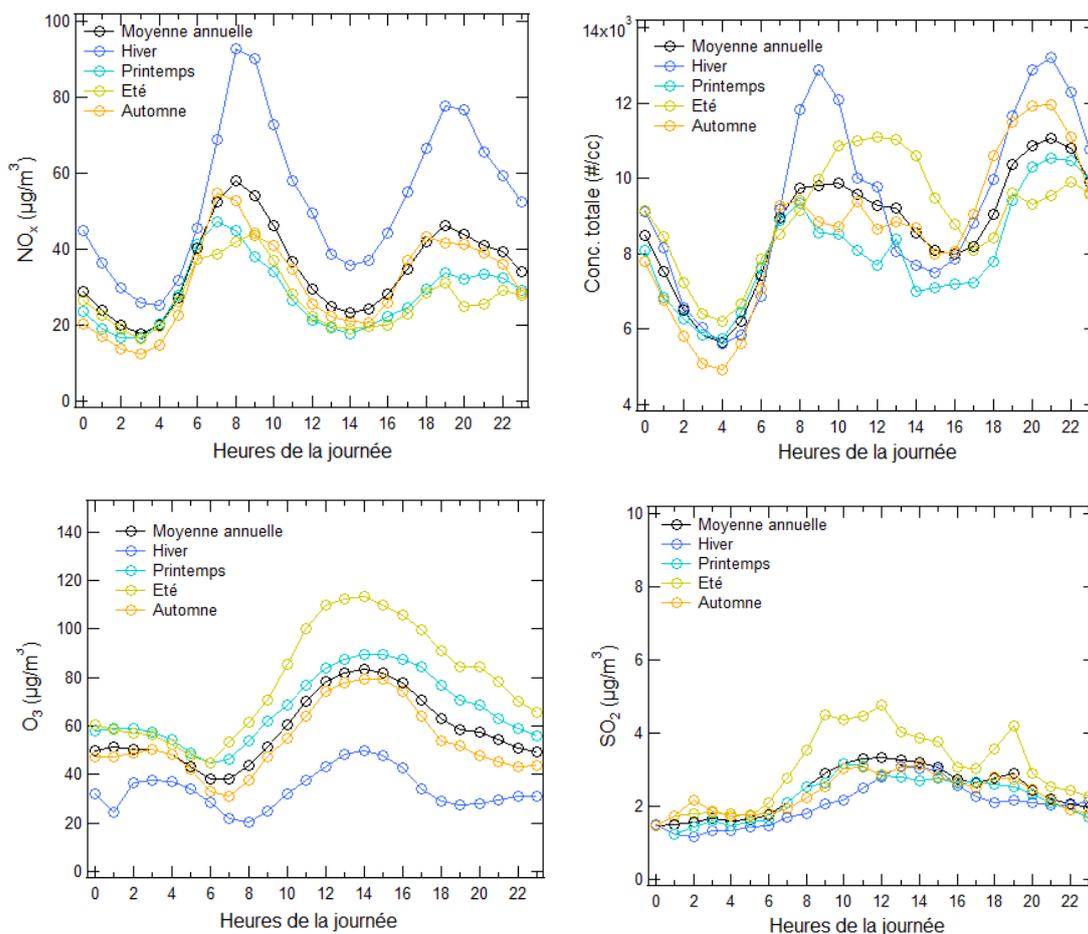


Figure 24 : Profils journaliers des concentrations en masse de NO_x, SO₂ et O₃ et en nombre total de particules en moyennes annuelles et par saison relevés à Marseille/Longchamp.

Les concentrations en nombre de particules fines et ultrafines relevées à Marseille sont essentiellement liées au trafic routier, néanmoins, combinées avec des sources hivernales probablement dues à la combustion de biomasse en soirée. Les concentrations en nombre de particules ultrafines augmentent en été, en milieu de la journée, typiquement dues à des processus de photo-oxydation et de formation de particules secondaires.

A Port-de-Bouc/La Lègue, les profils journaliers sont disparates (Figure 25) et les tendances relevées à Marseille/Longchamp (ex. double pic lié au trafic routier) sont ici moins marquées.

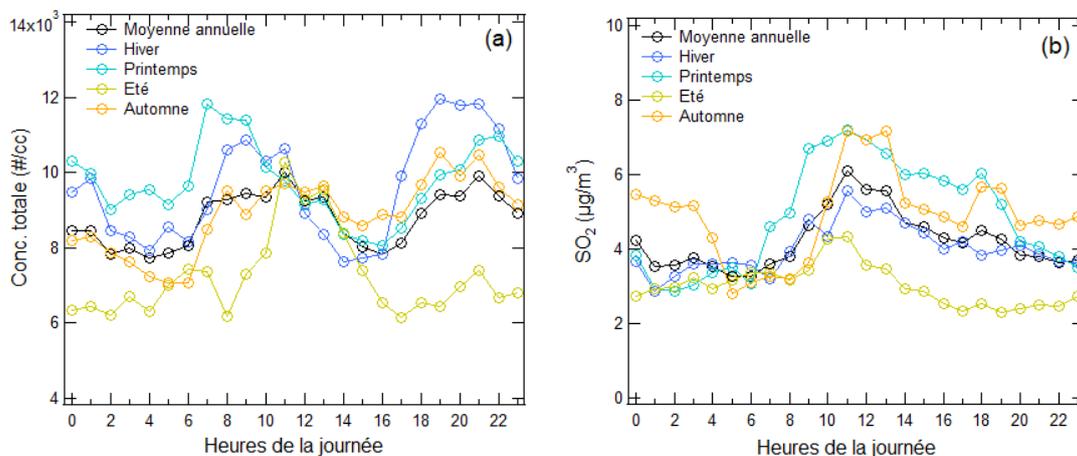


Figure 25 : Profils journaliers des concentrations en nombre de particules (a) et en masse de SO₂ (b), en moyennes annuelles et par saison relevés à Port-de-Bouc/La Lègue.

Le site de Port-de-Bouc/La Lègue est soumis à une influence industrielle caractérisée par des émissions épisodiques de dioxyde de soufre potentiellement accompagné par des précurseurs de formation des particules secondaires dans l'air ambiant.

L'augmentation hivernale observable le soir est principalement due à des émissions de particules fines probablement liées à la combustion de biomasse (voir profils par canal ou classe de taille en Annexe 4).

4.3 Sources de pollution

La Figure 26 et la Figure 27 présentent les roses de pollution des différents composés mesurés, respectivement pour Marseille/Longchamp et pour Port-de-Bouc/La Lègue.

Les roses de pollution permettent d'identifier la provenance des polluants et potentiellement les principales sources d'émissions. Les cercles concentriques indiquent la vitesse du vent en km/h et les concentrations sont présentées sur une échelle de couleur. Les directions sont affichées sur une échelle radiale.

► Analyse des sources sur le site urbain de Marseille/Longchamp :

- PM_{10} : Les plus fortes concentrations ($> 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont apportées par des vents d'Ouest/Nord-Ouest (mistral) et d'Est/Sud-Est. Les concentrations proches de la moyenne annuelle ($\approx 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont amenées par les brises de mer de Sud/Sud-Ouest.
- $PM_{2,5}$: Les plus fortes concentrations ($> 12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont apportées par l'alternance des brises de terre de Nord-Est et par les brises de mer de Sud/Sud-Ouest. Les concentrations proches de la moyenne annuelle ($\approx 12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont amenées par des vents Est/Sud-Est.
- PM_1 (particules fines et ultrafines) : Les particules fines et ultrafines proviennent de sources locales ou proches du site et également amenés par les brises de mer Sud-Ouest.
- SO_2 : le SO_2 provient essentiellement de sources provenant du Sud-Ouest, influences amenées par les brises de mer et dans une moindre mesure en provenance de sources Est et Ouest.
- NO_2 : le NO_2 est essentiellement émis localement ou proches du site avec une influence Sud-Ouest.
- NO : le NO est essentiellement émis par une source très proche du site avec une influence Nord

D'après ces observations, les vents forts d'Ouest/Nord-Ouest et d'Est/Sud-Est véhiculent la fraction grossière des PM_{10} avec une source commune à des $PM_{2,5}$ depuis l'Est/Sud-Est. Ces conditions sont dispersives pour la fraction des particules fines et ultrafines. Cette dernière devient importante lorsque le régime des brises s'installe.

Les analyses précédentes ont permis d'attribuer les particules fines et ultrafines aux émissions liées au trafic routier et aux activités domestiques (comme le chauffage) mais également à des processus de photo-oxydation et de formation de particules secondaires.

D'après la rose de pollution du NO_2 , et par extrapolation avec les roses de pollution par classe de taille (Annexe 4), les activités urbaines contribuent localement aux émissions en nombre de particules fines et également à la concentration en masse de $PM_{2,5}$.

Les émissions de particules ultrafines provenant du Sud-Ouest (voir roses de pollution par classe de taille en Annexe 4) semblent avoir une origine commune avec le SO_2 et pourraient, dans ce cas, marquer une influence portuaire.

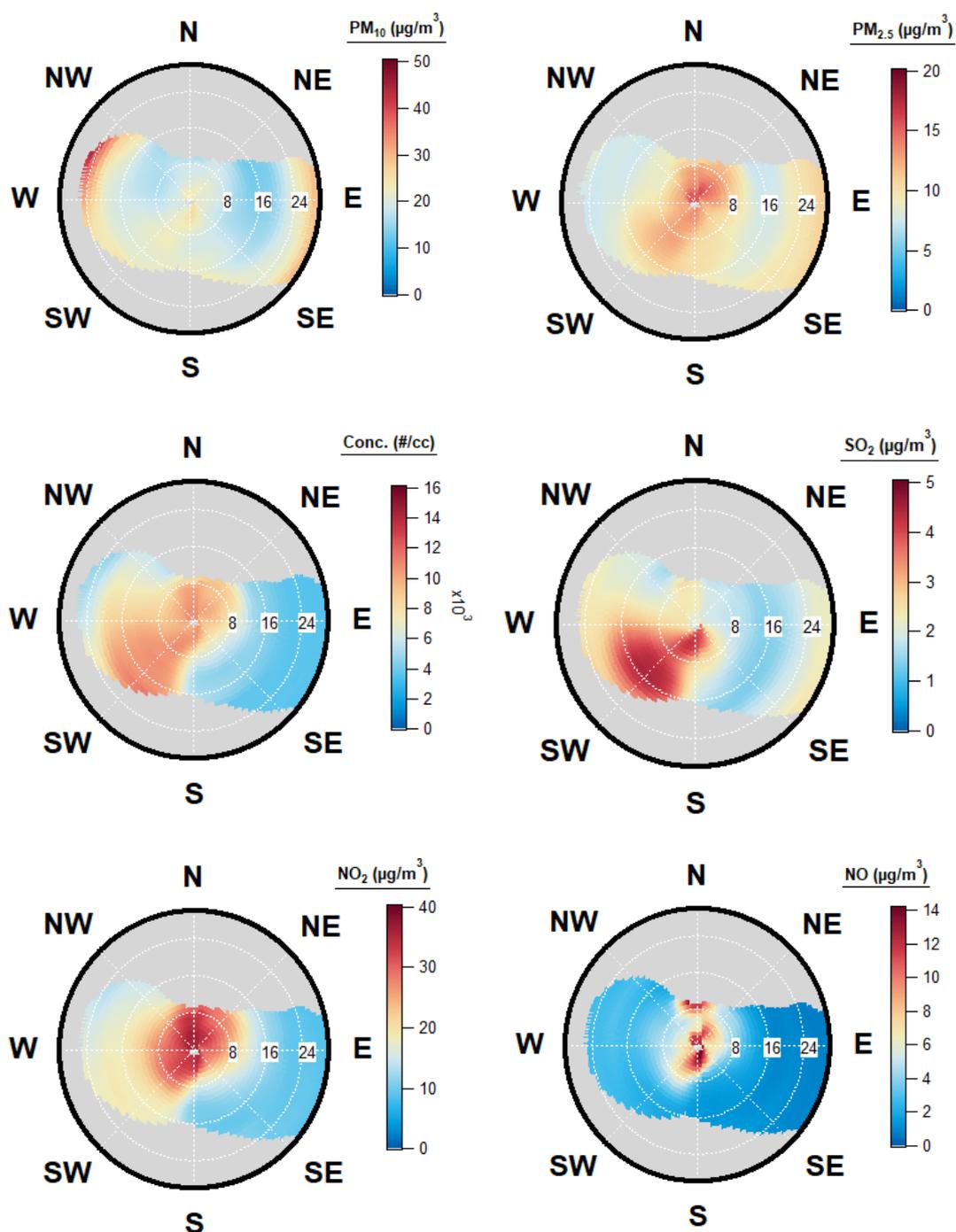


Figure 26 : Roses de pollution par composé (PM_{10} , $PM_{2,5}$, NO_2 , NO , SO_2 et PUF) relatives à Marseille/Longchamp

Les activités urbaines contribuent localement aux émissions en nombre de particules fines et également à la concentration en masse de $PM_{2,5}$.

Les émissions de particules ultrafines provenant du Sud-Ouest ont une origine commune avec le SO_2 et pourraient avoir comme sources l'activité portuaire.

► **Analyse des sources sur le site industriel de Port-de-Bouc/La Lèque :**

- PM_{10} : Les plus fortes concentrations ($> 22 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont apportées par des vents d'Ouest/Nord-Ouest (mistral) et d'Est/Sud-Est et les concentrations proches de la moyenne annuelle ($\approx 22 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont amenées par les brises de mer de Sud-Ouest.
- $PM_{2,5}$: Les $PM_{2,5}$ à Port-de-Bouc/La Lèque sont d'origine locale mais également amenées par les vents Est.
- PM_1 (particules fines et ultrafines) : Les particules fines et ultrafines proviennent de sources Est/Nord-Est et également amenées par les brises de mer Sud-Ouest.
- SO_2 : le SO_2 provient d'une source ponctuelle de provenance Est/Sud-Est.

Comme pour la station urbaine de Marseille/Longchamp, les vents forts sont également les véhicules de la fraction grossière des $PM_{2,5}$ et PM_{10} à Port-de-Bouc/La Lèque avec une source commune à l'Est/Sud-Est. Ces émissions ont probablement une portée régionale. La fraction ultrafine semble avoir une origine commune avec le SO_2 de provenance Est mais est également apportée par les brises de mer Sud-Ouest (voir roses de pollution par classe de taille en Annexe 4). Cela traduit l'influence de la plateforme industrielle de Martigues/Lavéra sur le nombre total de particules et son impact ponctuel mais récurrent sur la formation de particules ultrafines par des émissions de SO_2 et éventuellement par des émissions de précurseurs de formation des particules secondaires dans l'air ambiant.

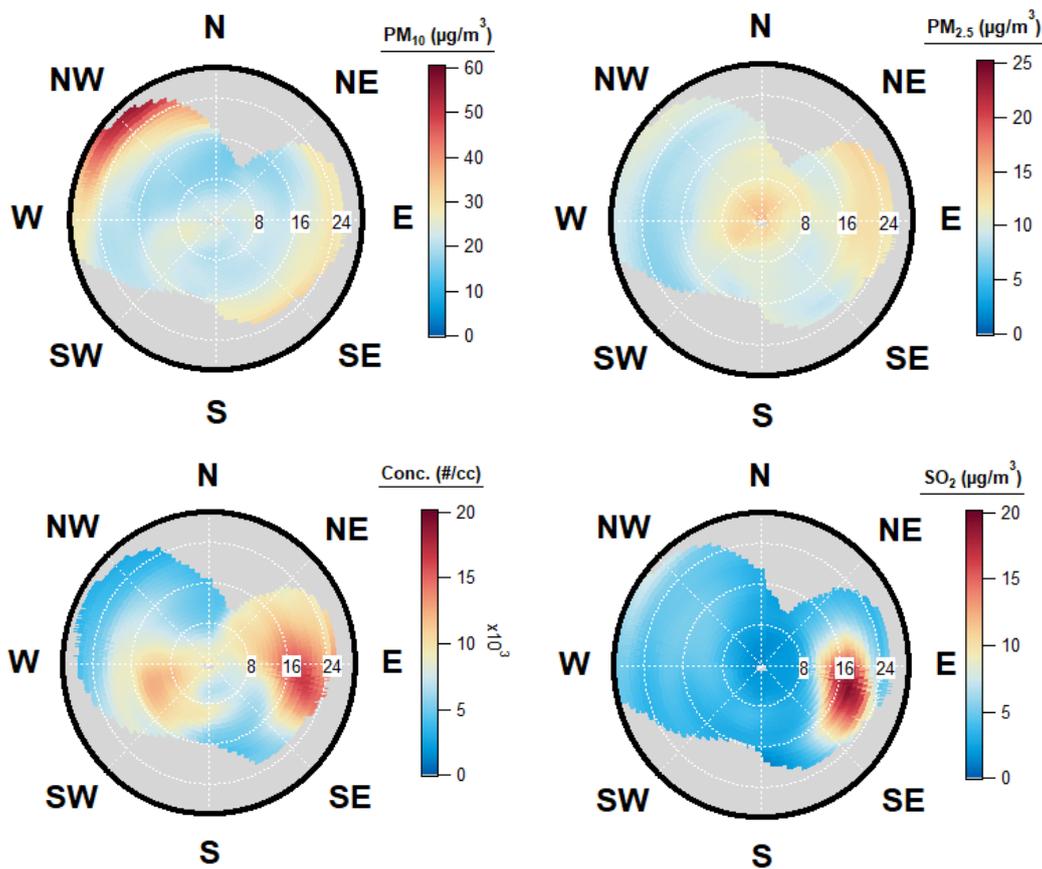


Figure 27 : Roses de pollution par composé (PM_{10} , $PM_{2,5}$, NO_2 , NO , SO_2 et PUF) relatives à Port-de-Bouc/La Lèque

A Port-de-Bouc/La Lèque, la fraction grossière des $PM_{2,5}$ et PM_{10} provient d'un apport régional. La fraction ultrafine est apportée par les brises de mer Sud/Sud-Ouest et semble par ailleurs une origine commune avec le SO_2 traduisant ainsi l'impact de la plateforme industrielle de Martigues/Lavéra.

5. Conclusions

Au-delà des mesures réglementaires des concentrations massiques PM_{10} et $PM_{2.5}$ et des composés gazeux (SO_2 , NO_x et O_3), AtmoSud s'intéresse à la métrologie de particules fines et ultrafines dont le paramètre du « nombre » peut être très important même en présence d'une masse négligeable, ce qui n'est le cas pour les particules grossières. Ces informations complémentaires, sur le nombre de particules, sont restées jusqu'à présent limitées au domaine de la recherche scientifique. Ces informations permettent en effet de mieux caractériser des événements particuliers et à en définir les origines et les sources.

AtmoSud dispose de plusieurs stations de mesure dans la région Provence-Alpes-Côte-D'azur et notamment dans les Bouches du Rhône. Les sites de Marseille/Longchamp et de Port-de-Bouc/la Lègue sont équipés chacun d'un analyseur TSI 3031 qui permet des mesures granulométriques en nombre de particules, réparties en 6 classes de taille allant de 20 nm à 1 μm . Ces mesures sont réalisées en parallèle des mesures en masse des PM_{10} , $PM_{2.5}$ et de composés gazeux (SO_2 , NO_x , O_3).

Les mesures menées en 2018 sur ces deux sites de typologies différentes (sous influence des activités urbaines pour le 1^{er} et de sources industrielles pour le 2^{ème}) ont permis d'étudier les comportements spatio-temporels des différentes fractions et ont permis de dégager plusieurs observations intéressantes pour la connaissance de la pollution particulaire.

► Concentrations massiques

- Les moyennes annuelles en PM_{10} et $PM_{2.5}$ sont du même ordre de grandeur sur les deux sites et restent en-dessous des valeurs limites annuelles préconisées par la directive 2008/50/CE (PM_{10} à hauteur de 20 $\mu g/m^3$ et $PM_{2.5}$ à hauteur de 12 $\mu g/m^3$ à Marseille/Longchamp, PM_{10} à hauteur de 22 $\mu g/m^3$ et $PM_{2.5}$ à hauteur de 13 $\mu g/m^3$ à Port-de-Bouc). L'objectif de qualité à 30 $\mu g/m^3$ est respecté pour les PM_{10} et les niveaux sont légèrement au-dessus de l'objectif de qualité à 10 $\mu g/m^3$ pour les $PM_{2.5}$.
- Quatre épisodes de pollution particulaire ont été recensés dans la région, traduits par deux dépassements du seuil d'information à 50 $\mu g/m^3$, uniquement sur le site de Marseille/Longchamp. Les trois premiers épisodes sont vraisemblablement dus à une augmentation régionale des $PM_{2.5}$ alors que le quatrième est relatif à une augmentation de la fraction grossière des PM_{10} . Trois pics supplémentaires liés à une augmentation en PM_{10} avec deux dépassements du seuil d'information à 50 $\mu g/m^3$ ont été par ailleurs relevés à Port-de-Bouc/la Lègue.
- Globalement, les $PM_{2.5}$ dominent les concentrations en masse en période hivernale comparés aux PM_{10} et cette tendance s'inverse en période estivale en faveur des PM_{10} (et par conséquent des $PM_{2.5-10}$). La période hivernale est propice aux émissions liées au chauffage au bois et à la combustion de biomasse dont la contribution aux $PM_{2.5}$ devient très importante. Localement, les concentrations hivernales des $PM_{2.5}$ sont moins importantes à Port-de-Bouc/la Lègue comparés à Marseille/Longchamp.

► Concentrations en nombre de particules

- Les concentrations en nombre de particules fines et ultrafines en moyennes annuelles sont du même ordre de grandeur sur les deux sites avec $8,71 \cdot 10^3 \# / cc$ et $8,77 \cdot 10^3 \# / cc$ respectivement relevées à Marseille/Longchamp et à Port-de-Bouc/la Lègue. Le site de Marseille/Longchamp est marqué par des niveaux de fond de particules fines importants en raison d'une activité urbaine chronique alors que le site de Port-de-Bouc est plutôt marqué par des épisodes de formation de particules ultrafines liées notamment à des émissions de SO_2 et de précurseurs de formation des particules secondaires dans l'air ambiant.

► Sources de pollution

- Les profils journaliers des particules fines et ultrafines à Marseille sont typiquement dus au trafic routier, au même titre que les NO_x et les PM_{FF} (combustion de matière fossile) avec une contribution des PM_{wb} (combustion de biomasse) le soir en période hivernale et une contribution des émissions secondaires en été en milieu de la journée. Ces derniers sont d'autant plus importants l'été que la concentration de l'ozone augmente en raison des processus de photo-oxydation des composés organiques volatils en présence de NO_x .

- Au niveau régional, les PM₁₀ sont véhiculés par les vents fort Ouest/Nord-Ouest (mistral) et Est/Sud-Est. Les PM_{2,5} sont véhiculés par les vents Est mais sont également d'origine locale ainsi probablement à la combustion de biomasse en hiver et par ailleurs du trafic routier.
- A Marseille/Longchamp, la fraction fine est d'origine locale au même titre que les NO_x ou d'origine Sud-Ouest commune avec le SO₂. Ceci traduirait l'influence du trafic routier mais aussi probablement l'impact des activités portuaires plus important en période estivale.
- A Port-de-Bouc/la Lègue, la fraction fine semble être apportée par les brises de mer Sud-Ouest mais également d'origine commune avec le SO₂ de provenance Est. Ceci est traduit par l'influence de la plateforme industrielle de Martigues/Lavéra sur le nombre total de particules et son impact ponctuel mais récurrent sur le nombre total de particules ultrafines.

A l'heure actuelle, il subsiste encore des questions ouvertes dans la science des aérosols atmosphériques qui nécessitent davantage d'études de bases et par ailleurs fondamentales, permettant d'expliquer les phénomènes observés, d'améliorer les réglementations en vigueur et de permettre de meilleures prévisions de modèles pour les futurs scénarios.

Le développement de techniques de mesure innovantes, de méthode d'analyse et de traitement de donnée permet de mieux apprécier les bilans et les sources et aide ainsi à l'élaboration et la mise en œuvre de nouvelles mesures aidant à améliorer la qualité de l'air en particulier en ciblant les sources d'émissions primaires. Toutefois, identifier et quantifier les différentes sources et notamment secondaires dans l'air ambiant restent difficiles. Il est néanmoins clair que l'ampleur et la composition des émissions dépendent fortement de l'emplacement, de la période et des conditions à la sources (trafic, brulage de bois, influences maritimes, sources industrielles).

DEFINITIONS

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 sur huit heures ainsi calculée est attribuée au jour où elle s'achève ; autrement dit, la première période considérée pour le calcul sur un jour donné sera la période comprise entre 17 h la veille et 1 h le jour même ; la dernière période considérée pour un jour donné sera la période comprise entre 16 h et minuit le même jour.

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

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

Procédures préfectorales : Mesures et actions de recommandations et de réduction des émissions par niveau réglementaire et par grand secteur d'activité.

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

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

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

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

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

Couche limite : Couche atmosphérique en contact direct avec la surface terrestre, dans laquelle se produisent des modifications d'un point de vue dynamique et thermique. Son épaisseur varie d'une centaine de mètres à quelques kilomètres selon les caractéristiques du sol (rugosité, relief, ...), la saison (humidité, flux de chaleur, température).

Particules d'origine secondaires : Les particules secondaires résultent de la conversion en particules, des gaz présents dans l'atmosphère. Cette conversion, soit directement gaz-solide, soit par l'intermédiaire des gouttes d'eau, est appelée nucléation. La nucléation est le mécanisme de base de la formation des nouvelles particules dans l'atmosphère. Les principaux précurseurs impliqués dans la formation des particules secondaires sont le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO_x et nitrates), les composés organiques volatils (COV) et l'ammoniac (NH₃). Les particules secondaires sont essentiellement des particules fines (<2.5 µm).

AOT 40 : Égal à la somme des différences entre les concentrations horaires d'ozone supérieures à 80 µg/m³ (mesurés quotidiennement entre 8 h et 20 h, heure d'Europe Centrale) et la valeur 80 µg/m³ pour la période du 1er mai au 31 juillet de l'année N. La valeur cible de protection de la végétation est calculée à partir de la moyenne sur 5 ans de l'AOT40. Elle s'applique en dehors des zones urbanisées, sur les Parcs Nationaux, sur les Parcs Naturels Régionaux, sur les réserves

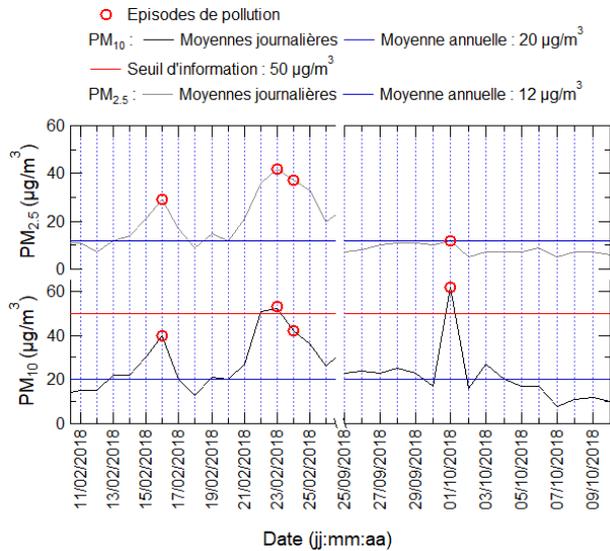
rendant nécessaires des informations immédiates et adéquates.

Naturelles Nationales et sur les zones arrêtées de Protection de Biotope.

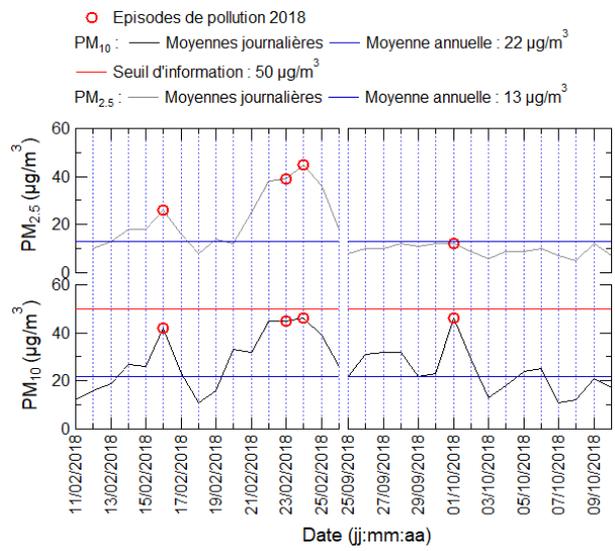
Percentile 99,8 (P 99,8) : Valeur respectée par 99,8 % des données de la série statistique considérée (ou dépassée par 0,2 % des données). Durant l'année, le percentile 99,8 représente dix-huit heures.

ANNEXES

ANNEXE 1 Profils journaliers PM10 et PM2.5 lors des épisodes de pollution



Marseille/Longchamp



Port-de-Bouc/La Lèque

ANNEXE 2 Lecture d'un *Box plot*

Un diagramme en box plot est un moyen graphique représentant la répartition d'une série statistique quantitative.

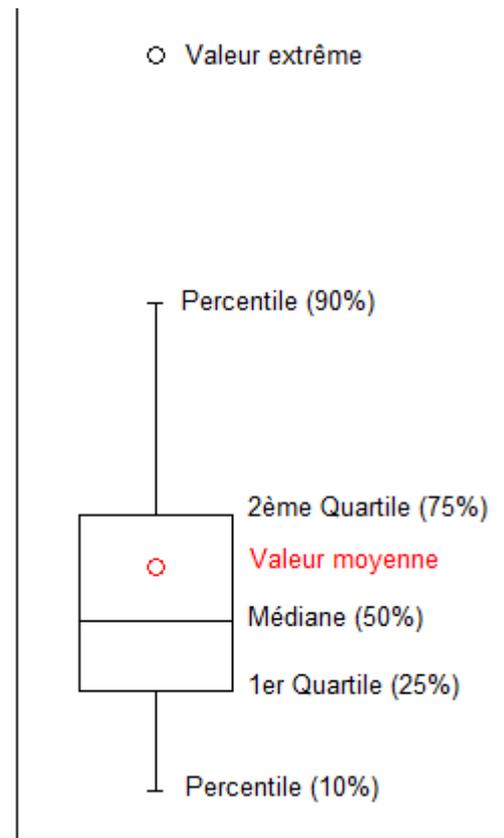
L'échantillon est séparé en 4 parties appelées quartiles ou percentiles.

Un quartile est constitué de 25 % des données de l'ensemble de l'échantillon. Le trait central est appelé médiane (50% des valeurs y sont inférieures, 50% y sont supérieures).

La partie centrale correspondant à une « boîte » représente 50 % des données. Ces données se situent entre le 1^{er} et le 2^{ème} quartile. La différence entre les deux est appelée l'écart inter quartiles.

Les moustaches ou percentiles, réparties de chaque côté de la boîte, représentent respectivement 10 % et 90 % des valeurs. En dehors des percentiles on peut noter des valeurs atypiques ou extrêmes correspondant à des valeurs recueillies moins de 10%.

A une représentation en Box plot on peut rajouter une valeur moyenne des données recueillies.



ANNEXE 3 Estimation des fractions PM_{FF} et PM_{WB} .

En 2018, AtmoSud a assuré la surveillance permanente du *Black Carbon*, grâce à des Aethalomètre AE33 sur trois sites dont le site urbain de Marseille/Palais Longchamp.

L'aethalomètre permet de distinguer et de quantifier deux fractions du Black Carbon que l'on peut relier à la combustion d'hydrocarbures (BC_{FF}) et à la combustion de biomasse (BC_{WB}). Ces fractions peuvent ensuite être utilisées pour estimer (à l'aide d'un facteur multiplicatif et avec une précision de l'ordre de 50 %) les concentrations de PM_{10} attribuables à ces deux familles de sources, à partir de l'expression suivante :

- $PM_{FF} = a \times BC_{FF}$
- $PM_{WB} = b \times BC_{WB}$

où PM_{FF} et PM_{WB} représentent la concentration massique des particules issues respectivement de la combustion d'hydrocarbures et de la combustion de biomasse au sein de la fraction PM_{10} .

Les PM_{FF} et PM_{WB} sont constituées, en plus du BC, principalement d'aérosols organiques primaires. Les coefficients a et b sont issus (i) de la littérature scientifique pour la contribution fossile, et (ii) d'études basées sur la méthodologie du LCSQA pour la contribution biomasse.

Pour la combustion de fuel fossile, l'expression suivante est utilisée quel que soit le site de mesure (El Haddad et al. 2009¹³; Laschober et al. 2004¹⁴) :

$$PM_{FF} = 2,5 \times BC_{FF}$$

Pour la combustion de la biomasse, il a été montré qu'un ratio unique ne pouvait être utilisé pour l'ensemble des sites de mesure. En effet, il varie selon les caractéristiques des sites. En utilisant la méthodologie donnée par le LCSQA en 2015 (O. Favez et al. 2015¹⁵), basée sur l'utilisation des concentrations en lévoglucosan, traceur organique univoque de la combustion de la biomasse, les ratios spécifiques ont été déterminés pour chaque site permanent. Ainsi pour Marseille :

$$\text{Marseille-Longchamp : } PM_{WB} = 14,7 \times BC_{WB}$$

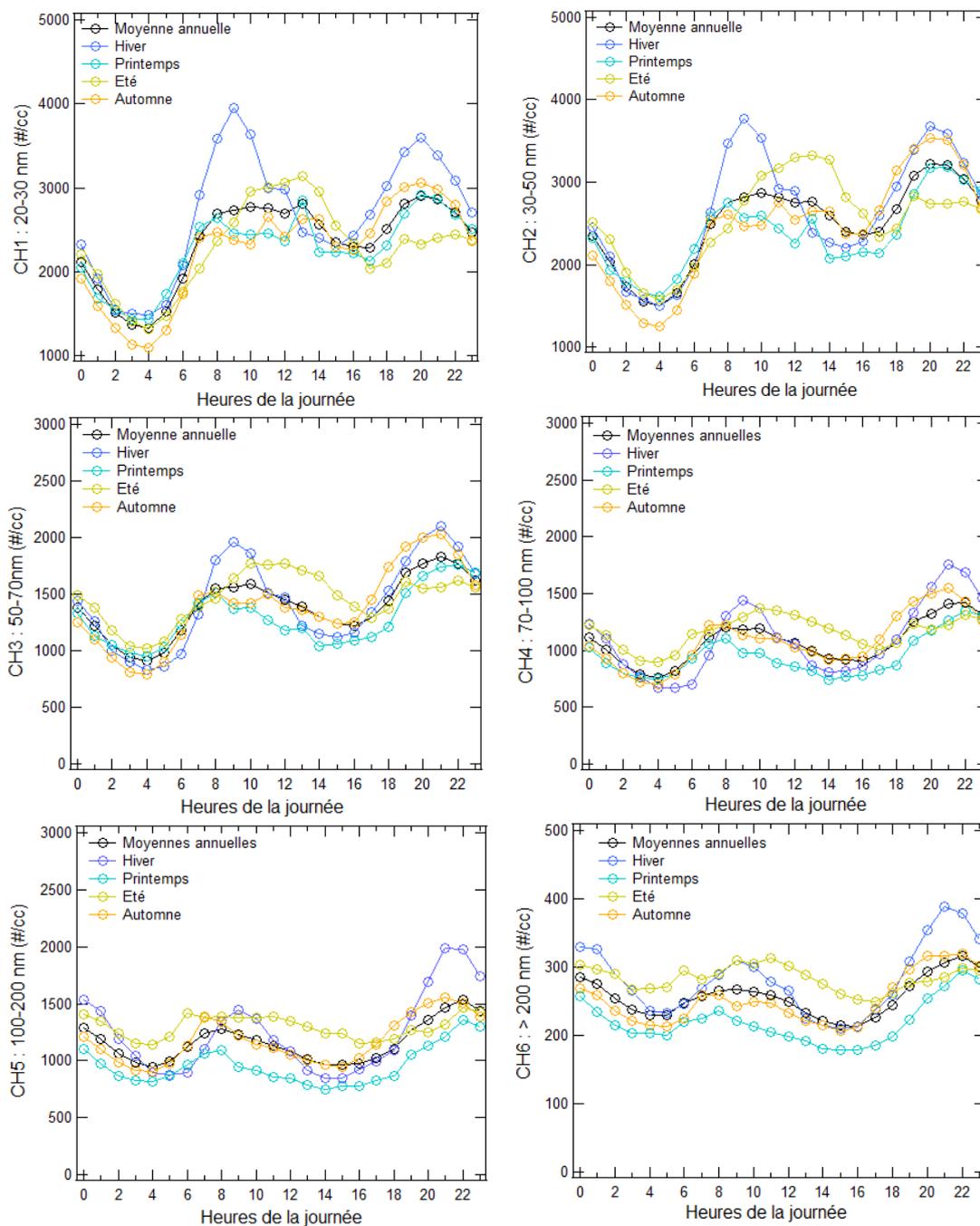
A partir des données de BC_{FF} et BC_{WB} et des expressions définies ci-dessus, on établit une base de données des valeurs estimées des contributions PM_{FF} et PM_{WB} .

¹³ I. El Haddad et al. 2009, Comprehensive primary particulate organic characterization of vehicular exhaust emissions in France. Atmospheric Environment 43 (2009) 6190-6198.

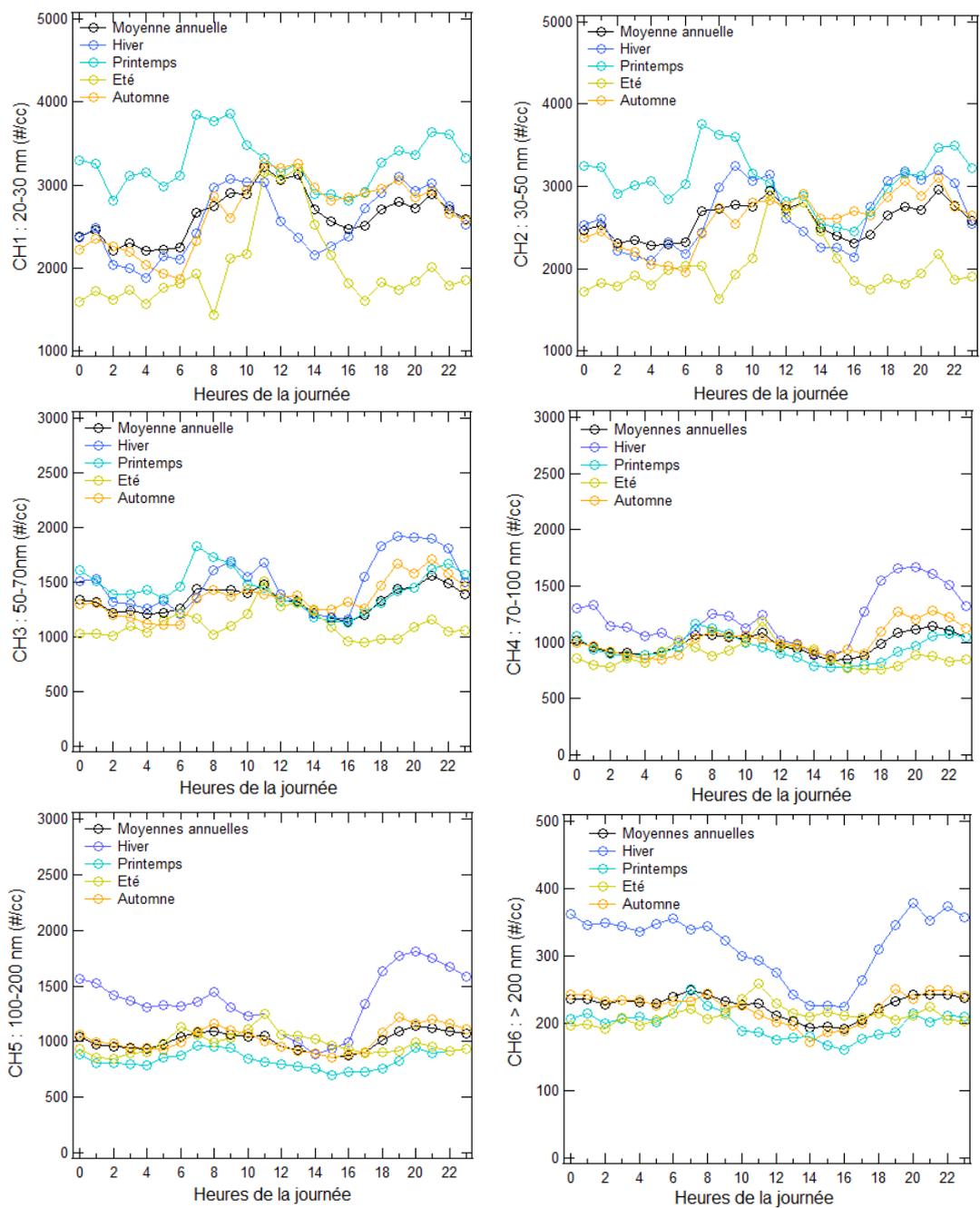
¹⁴ C. Laschober et al. 2004 Particulate emissions from on-road vehicles in the kaisermühlen-tunnel (Vienna, Austria). Atmospheric Environment 38 (2004) 2187-2195.

¹⁵ Favez, O. 2015. « Impact de la combustion de biomasse sur les concentrations de PM_{10} (programme CARA - hiver 2014-2015) ». INERIS - LCSQA. <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/2015/ineris/impact-combustion-biomasse-concentrations-pm10-programme-cara-hiver-2014-2015>.

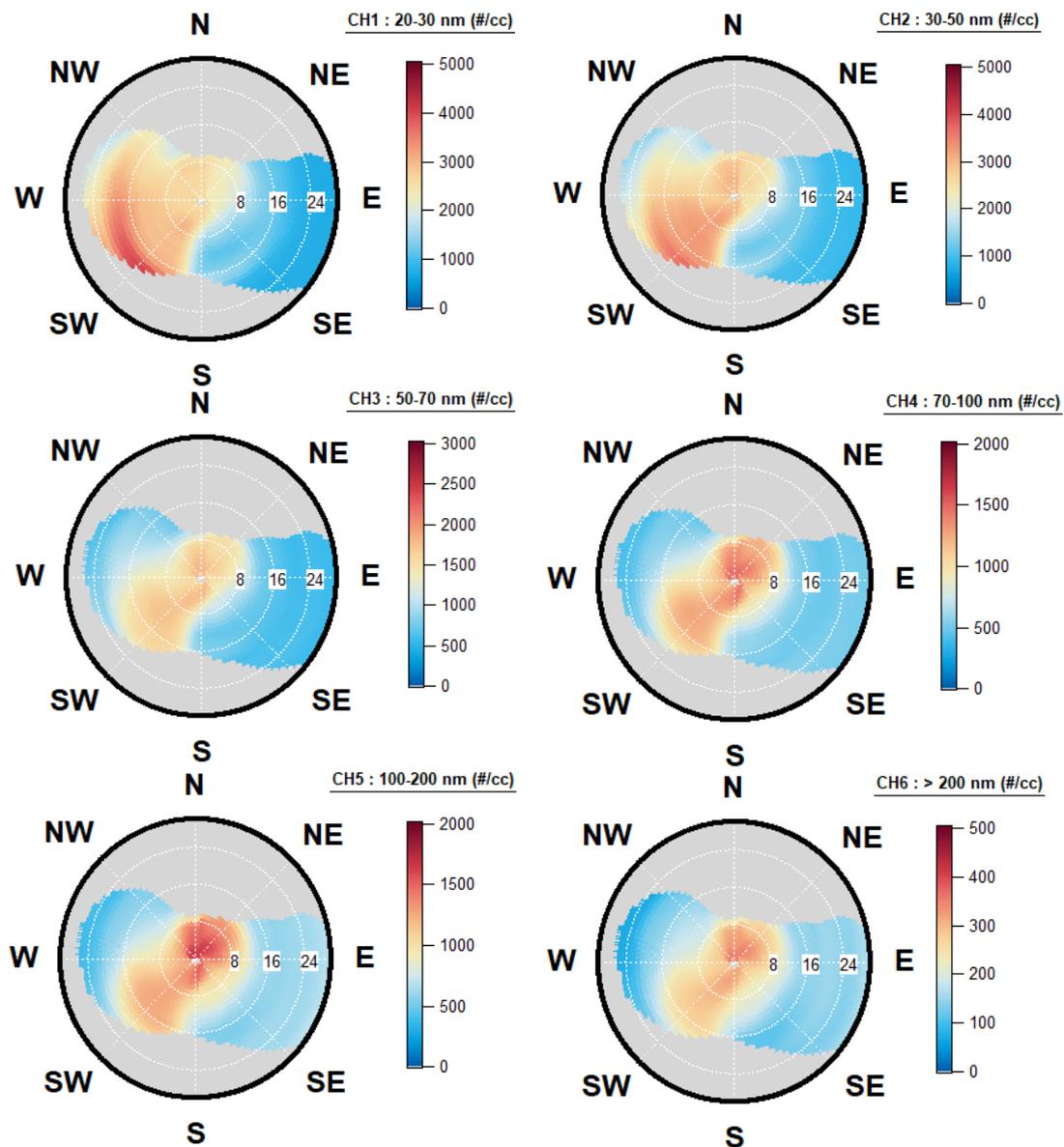
ANNEXE 4 Profils journaliers et roses de pollutions par classe de taille



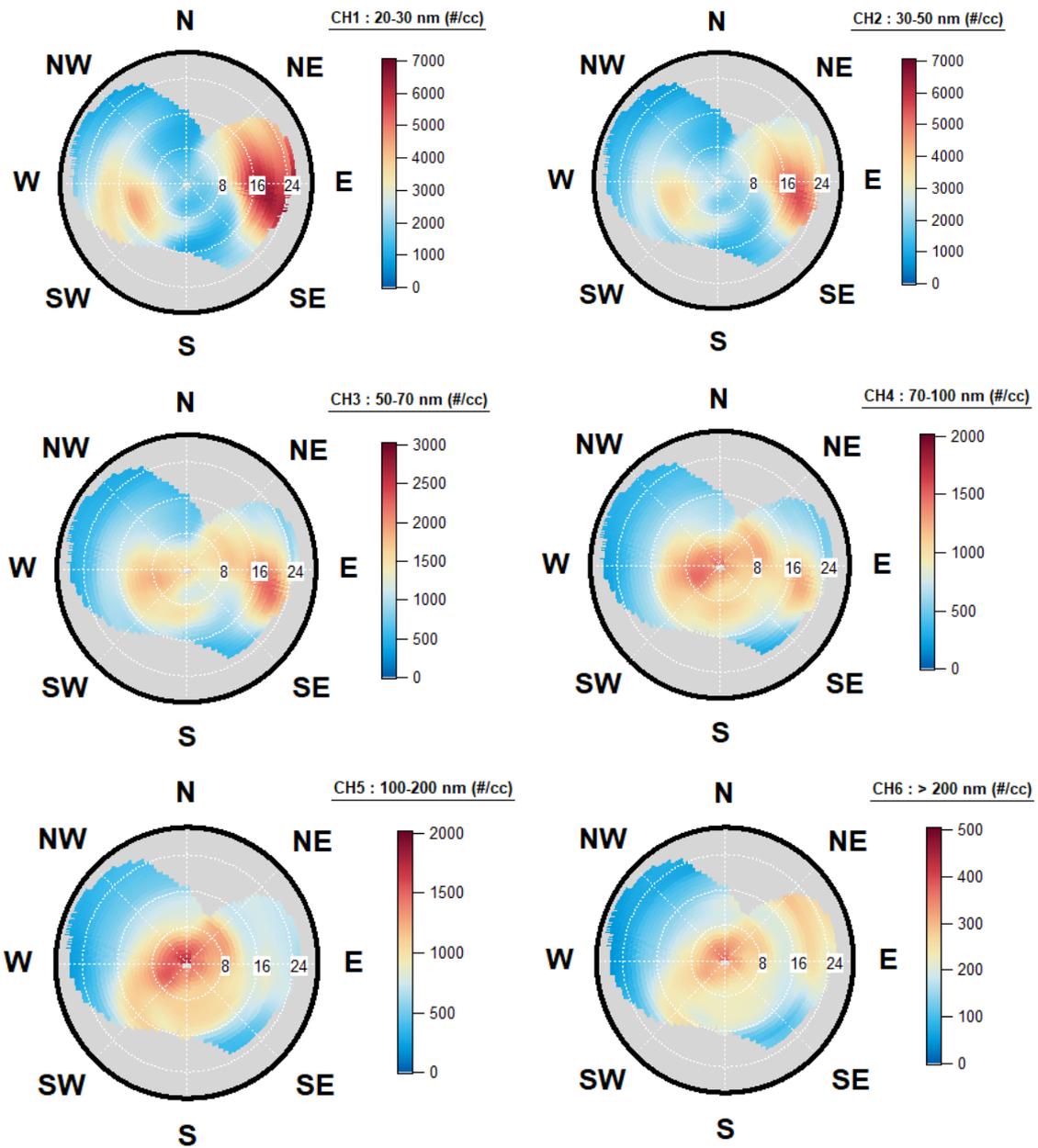
A 1 : Profils journaliers des concentrations en nombre de particules par canal de l'analyseur TSI 3031 à Marseille Longchamp.



A 2 : Profils journaliers des concentrations en nombre de particules par canal de l'analyseur TSI 3031 à Port-de-Bouc la Lègue



A 3 : Rose de pollution des concentrations en nombre de particules par canal relevées à Marseille Longchamp.



A 4 : Rose de pollution des concentrations en nombre de particules par canal relevées à Port-de-Bouc la Lègue

ANNEXE 5 Sources de pollution, effets sur la santé, réglementation et recommandations OMS

Sources de pollution

Les polluants atmosphériques ont diverses origines.

Polluants	Sources principales
O₃ Ozone	L'ozone (O ₃) n'est pas directement rejeté par une source de pollution. C'est un polluant secondaire formé à partir des NO _x et des COV.
Particules en suspension (PM)	Les particules proviennent en majorité de la combustion à des fins énergétiques de différents matériaux (bois, charbon, pétrole), du transport routier (imbrûlés à l'échappement, usure des pièces mécaniques par frottement, des pneumatiques...), d'activités industrielles très diverses (sidérurgie, incinération, chaufferie) et du brûlage de la biomasse (incendie, déchets verts).
NO_x Oxydes d'azote	Les sources principales sont les véhicules et les installations de combustion.
SO₂ Dioxyde de soufre	Le dioxyde de soufre (SO ₂) est un polluant essentiellement industriel. Les sources principales sont les centrales thermiques, les grosses installations de combustion industrielles, le trafic maritime, l'automobile et les unités de chauffage individuel et collectif.
COV dont le benzène Composés organiques volatils	Les COV proviennent de sources mobiles (transports), de procédés industriels (industries chimiques, raffinage de pétrole, stockage et distribution de carburants et combustibles liquides, stockages de solvants). Certains COV, comme les aldéhydes, sont émis par l'utilisation de produits d'usage courant : panneaux de bois en aggloméré, certaines mousses pour l'isolation, certains vernis, les colles, les peintures, les moquettes, les rideaux, les désinfectants... D'autres COV sont également émis naturellement par les plantes.
HAP Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques	Les HAP se forment par évaporation mais sont principalement rejetés lors de la combustion de matière organique. La combustion domestique du bois et du charbon s'effectue souvent dans des conditions mal maîtrisées (en foyer ouvert notamment), qui entraînent la formation de HAP.
CO Monoxyde de carbone	Combustion incomplète (mauvais fonctionnement de tous les appareils de combustion, mauvaise installation, absence de ventilation), et ce quel que soit le combustible utilisé (bois, butane, charbon, essence, fuel, gaz naturel, pétrole, propane).

Effets sur la santé

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

Polluants	Effets sur la santé	Effets sur l'environnement
O ₃ Ozone	<ul style="list-style-type: none"> - irritation des yeux - diminution de la fonction respiratoire 	<ul style="list-style-type: none"> - agression des végétaux - dégradation de certains matériaux - altération de la photosynthèse et de la respiration des végétaux
Particules en suspension	<ul style="list-style-type: none"> - irritation des voies respiratoires - dans certains cas, altération des fonctions pulmonaires 	<ul style="list-style-type: none"> - effets de salissures sur les bâtiments - altération de la photosynthèse
NO _x Oxydes d'azote		<ul style="list-style-type: none"> - pluies acides - précurseur de la formation d'ozone - effet de serre - déséquilibre les sols sur le plan nutritif
SO ₂ Dioxyde de soufre		<ul style="list-style-type: none"> - pluies acides - dégradation de certains matériaux - dégradation des sols
COV dont le benzène Composés organiques volatils	<ul style="list-style-type: none"> - toxicité et risques d'effets cancérogènes ou mutagènes, en fonction du composé concerné 	<ul style="list-style-type: none"> - formation de l'ozone
HAP Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques		<ul style="list-style-type: none"> - peu dégradables - déplacement sur de longues distances
Métaux lourds	<ul style="list-style-type: none"> - toxicité par bioaccumulation - effets cancérogènes 	<ul style="list-style-type: none"> - contamination des sols et des eaux
CO Monoxyde de carbone	<ul style="list-style-type: none"> - prend la place de l'oxygène - provoque des maux de tête - léthal à concentration élevée 	<ul style="list-style-type: none"> - formation de l'ozone - effet de serre

Réglementation

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

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

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

Polluants	Type de réglementation	Valeurs réglementaires ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Durée d'exposition
O₃ Ozone	Seuil d'information-recommandations	180	Heure
	Seuil d'alerte	240	Heure
	Valeur cible		Maximum journalier de la moyenne sur 8 heures (maximum 25 j / an)
	Objectif de qualité	120	8 heures
PM10 Particules	Seuil d'information-recommandations	50	Jour
	Seuil d'alerte	80	Jour
	Valeurs limites	50 40	Jour (maximum 35 j / an) Année
	Objectif de qualité	30	Année
PM2.5 Particules	Valeur limite	25	Année
	Valeurs cibles	20	Année
	Objectif de qualité	10	Année
NO₂ Dioxyde d'azote	Seuil d'information-recommandations	200	Heure
	Seuil d'alerte	400	Heure
	Valeurs limites	200	Heure (maximum 18h / an)
		40	Année
SO₂ Dioxyde de soufre	Seuil d'information-recommandations	300	Heure
	Seuil d'alerte	500	Heure (pendant 3h)
	Valeurs limites	350	Heure (maximum 24h / an)
		125	Jour (maximum 3 j / an)
Objectif de qualité	50	Année	
C₆H₆ Benzène	Valeur limite	5	Année
	Objectif de qualité	2	Année
Pb Plomb	Valeur limite	0,5	Année
	Objectif de qualité	0,25	Année
CO Monoxyde de carbone	Valeur limite	10 000	8 heures
BaP Benzo(a)pyrène	Valeur cible	0,001	Année
As Arsenic	Valeur cible	0,006	Année
Cd Cadmium	Valeur cible	0,005	Année
Ni Nickel	Valeur cible	0,02	Année

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

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

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

Polluants	Effets considérés sur la santé	Valeur recommandée par l'OMS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Durée moyenne d'exposition
O ₃ Ozone	- impact sur la fonction respiratoire	100	8 heures
PM 10 Particules	- affection des systèmes respiratoire et cardiovasculaire	50 20	24 heures 1 an
PM 2.5 Particules		25 10	24 heures 1 an
NO ₂ Dioxyde d'azote	- faible altération de la fonction pulmonaire (asthmatiques)	200 40	1 heure 1 an
SO ₂ Dioxyde de soufre	- altération de la fonction pulmonaire (asthmatiques) - exacerbation des voies respiratoires (individus sensibles)	500 20	10 minutes 24 heures
Pb Plomb	- niveau critique de plomb dans le sang < 10 – 150 g/l	0,5	1 an
Cd Cadmium	- impact sur la fonction rénale	0,005	1 an
CO Monoxyde de carbone	- niveau critique de CO Hb < 2,5 % - Hb : hémoglobine	100 000	15 minutes

