

Note technique

Travaux financés par le ministère chargé de l'environnement

ANALYSE DES DONNÉES DE MESURE DE PM EN MARTINIQUE : ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS ENTRE 2000 ET 2018

Morgane SALOMON (INERIS)

SYNTHÈSE

La présente note dresse un bilan de l'évolution des concentrations dans l'air ambiant des particules fines mesurées sur les stations de Martinique. Ce travail repose sur les données journalières de PM₁₀ et PM_{2,5} disponibles et extraites de GEOD'AIR et de la BDQA sur la période 2000 - 2018.

Sur l'ensemble des stations, les concentrations en PM₁₀ sont plus élevées en période estivale et pendant les jours ouvrés. Les stations trafic mesurent des niveaux de concentration plus élevés que les sites de fond. La moyenne, toutes années confondues, des concentrations journalières est de 35,8 µg/m³ sur les sites de proximité automobile et de 27,7 µg/m³ sur les sites urbains et périurbains de fond. La station trafic Renéville enregistre en particulier de plus fréquents dépassements du seuil d'information et de recommandation de 50 µg/m³, avec plus de 35 dépassements observés chaque année.

Sur l'ensemble de la période, une seule station présente une tendance à la baisse significative des concentrations en PM₁₀. Pour les autres stations, aucune tendance n'est mise en évidence. L'analyse des relations entre PM_{2,5} et PM₁₀ est limitée par le nombre de stations effectuant simultanément les deux mesures. Cependant de fortes déviations entre les concentrations de PM_{2,5} et PM₁₀ sont régulièrement observées, notamment lors de la période des brumes de sable. Ainsi, le ratio PM_{2,5}/PM₁₀ varie entre 12% et 100% pour la station de Bishop, entre 10% et 89% pour la station de Sainte Luce et entre 16% et 82% pour la station de Schoelcher, avec des valeurs généralement plus faibles en période de brume de sable. Ce ratio a tendance à diminuer depuis 2008 pour la station de Bishop (période 2008-2015).

REMERCIEMENTS ET COLLABORATIONS

L'interprétation des résultats a bénéficié de l'expertise de Madinair, et en particulier de Stéphane Gandar, son directeur, Carole Boullanger, responsable des études, et Audrey Alfred, du service Etudes. Qu'ils soient remerciés pour leur collaboration.

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

La Martinique est souvent touchée par des pics de pollution atmosphérique causés par les particules fines. Ces particules proviennent de la conjonction entre les émissions des activités anthropiques et les conditions météorologiques conduisant à l'import de brumes de sable depuis le Sahara. Les PM_{10} caractérisent ces particules ; elles représentent la concentration massique des particules de diamètre inférieur à $10\ \mu m$ et incluent la fraction plus fine des $PM_{2,5}$. Les particules fines constituent de plus en plus un sujet de préoccupation pour la santé et les écosystèmes.

Cette étude propose une analyse exploratoire des concentrations en particules fines sur les stations de Martinique pour les années 2000 à 2018.

Les objectifs de cette étude sont de :

- fournir une vue d'ensemble des données avec des statistiques élémentaires ;
- évaluer le profil temporel des concentrations, dégager des tendances ;
- examiner la variabilité relative des PM_{10} et des $PM_{2,5}$.

Dans un premier temps, l'étude porte sur les concentrations en PM_{10} , puis sur les concentrations en $PM_{2,5}$, et enfin sur la comparaison de ces deux variables.

Avertissement : *Avant 2007, la surveillance des PM était réalisée par des systèmes de mesures automatiques qui ne prenaient pas en compte la fraction semi-volatile des particules et sous-estimaient de ce fait les concentrations. Toutefois, cette sous-estimation est considérée plus faible en Martinique qu'en métropole du fait des températures ambiantes relativement élevées tout au long de l'année. Dans l'analyse qui suit, aucune correction n'a été appliquée aux données des années 2000 à 2007.*

2. ANALYSE EXPLORATOIRE DES CONCENTRATIONS DE PM_{10}

2.1 Sélection des sites de mesure

Cette étude s'appuie sur les données de PM_{10} mesurées par Madinair entre 2000 et 2018. Elles ont été extraites de la base nationale des données d'observation GEOD'AIR sur la période 2013-2018. Pour les années antérieures, les données historiques de la BDQA ont été utilisées.

Sont recensées au cours de cette période cinq stations urbaines de fond, trois stations périurbaines de fond et deux stations urbaines sous influence du trafic.

La Figure 1 représente la répartition géographique des sites, suivie d'une description des stations dans le Tableau 1. La station périurbaine « François Couchée », qui est un site d'observation spécifique (i.e. orienté recherche), ne sera pas prise en compte dans le reste du rapport.



Figure 1 : Répartition spatiale des stations de mesure pour les PM (en rouge les stations trafic, en orange les stations urbaines de fond, en vert les stations péri-urbaines de fond et en gris la station d'observation spécifique)

Tableau 1 : Liste des stations de Madininair avec des données disponibles en PM₁₀ sur la période d'étude

Code	Station	Implantation	Influence (PM ₁₀)	Année de mise en service	Année d'arrêt des mesures	Commentaire
39001	Musée histoire	Urbaine	Fond	2000	2013	
39007	Bishop	Urbaine	Fond	2003	2016	Fermeture de la station par suite d'une modification de son environnement (circulation déviée)
39008	Ville de Schoelcher	Urbaine	Fond	2003		
39009	Lamentin	Urbaine	Fond	2003		
39011	Renéville	Urbaine	Trafic	2010	2019	
39013	Robert Mansarde	Urbaine	Trafic	2012	2016	
39014	Sainte_Luce	Périurbaine	Fond	2013		
39016	Robert Bourg	Urbaine	Fond	2015		
39018	CDST	Périurbaine	Fond	2015		Station observatoire et de recherche Cette station fait des mesures indicatives de PM.
39019	François Couchée	Périurbaine	Fond	2016		Station d'étude

2.2 Statistiques descriptives

2.2.1 Statistiques élémentaires

L'analyse est réalisée sur les **concentrations moyennes journalières**. Ces données issues de GEOD'AIR ont été calculées à partir des concentrations horaires.

Des statistiques descriptives par station ont été calculées, toutes années confondues (Tableau 2). En annexe (§5.1) sont présentées les mêmes statistiques en distinguant les années.

La Figure 2 montre la fréquence d'apparition de ces concentrations journalières par intervalle de valeur.

Tableau 2 : Statistiques des concentrations journalières moyennes (en µg/m³) par station (statistiques calculées sur les périodes de fonctionnement propre à chaque station, entre 2000 et 2018).

Station	Nombre de données	% données valides	Minimum	Moyenne	Médiane	Maximum	Ecart-type
Musée histoire	4749	76,0%	0,1	27,2	22,0	165,0	15,9
Bishop	5114	81,8%	0	32,4	27,0	180,0	17,5
Ville de Schoelcher	5842	93,1%	4,7	28,8	23,1	160,5	17,1
Lamentin	5839	81,0%	4,5	29,9	24,0	189,0	17,6
Renéville	3286	88,2%	4,5	39,8	35,6	167,0	17,5
Robert Mansarde	1461	74,1%	4,8	31,8	27,0	96,0	15,9
Sainte_Luce	1085	74,5%	4	26,0	20,2	184,2	19,1
Robert Bourg	1095	81,6%	5,5	25,9	20,9	166,7	17,9
CDST	366	84,7%	7,1	23,8	19,6	79,5	13,8

Sur l'ensemble des stations et des années considérées, la moyenne des concentrations journalières est de $29,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Elle est de $35,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur l'ensemble des stations trafic, de $27,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur les stations urbaines et périurbaines de fond.

Les deux sites de trafic et en particulier la station Renéville, mesurent des concentrations moyennes journalières plus élevées que les autres sites, avec une fréquence maximale d'apparition entre 25 et $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Renéville et entre 20 et $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Robert Mansarde (Figure 2).

En zone urbaine de fond, les concentrations moyennes journalières varient majoritairement entre 15 et $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figure 2). Fait exception la station de Bishop qui s'apparente davantage à une station de type trafic. Cette station, proche de celle de Renéville, mesure le plus souvent des concentrations supérieures à $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (62% des concentrations sont supérieures à $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Les concentrations les moins élevées sont mesurées aux stations périurbaines de fond. La station CDST présente notamment une fréquence maximale d'apparition entre 10 et $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

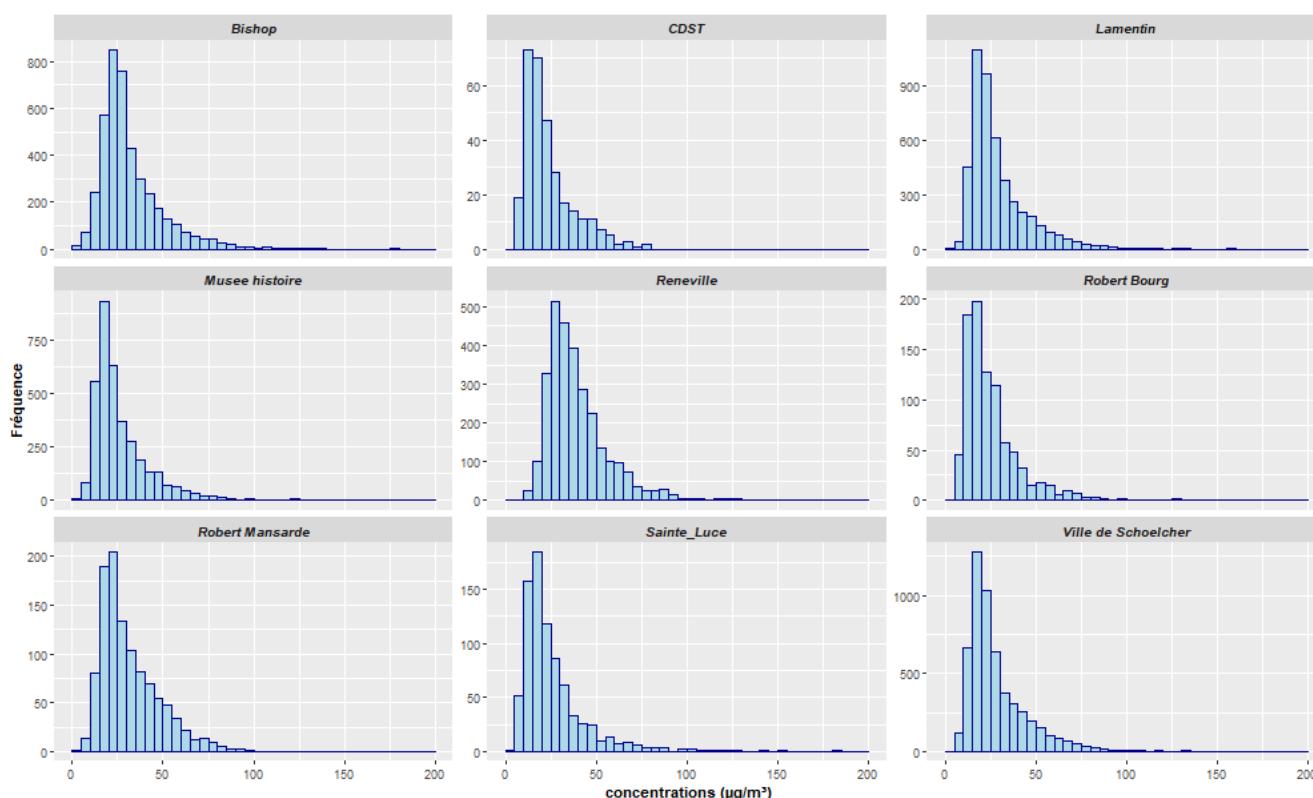


Figure 2 : Histogrammes des concentrations journalières de PM_{10} selon les stations

D'un point de vue statistique (test de Student à 95%), des différences significatives de moyenne sont relevées entre toutes les stations, excepté entre :

- La station de Bishop et la station de Robert Mansarde ;
- La station de Sainte Luce et la station du Musée d'histoire ;
- La station de Robert Bourg avec la station du Musée d'histoire ;
- La station de Sainte Luce et la station de Robert Bourg ;
- La station de Sainte Luce et la station de la Ville de Schoelcher.

2.2.2 Analyse des concentrations en $PM_{10} > 50 \mu g/m^3$ en moyenne journalière

La valeur limite en moyenne annuelle est de $40 \mu g/m^3$. Des dépassements de cette valeur ont été enregistrés seulement pour la station de Reneville. Sur la période d'étude, 5 dépassements de ce seuil annuel ont été constatés (cf. Tableau 5 en annexe).

La valeur limite en moyenne journalière est de $50 \mu g/m^3$, à ne pas dépasser plus de 35 fois par an (Directive 2008/50/CE).

La station trafic de Renéville a enregistré chaque année plus de 35 dépassements du seuil de $50 \mu g/m^3$ (Figure 3).

A l'inverse, les stations périurbaines n'ont jamais détecté plus de 35 dépassements par an.

L'année 2015 se démarque des autres années par un nombre de dépassements de la valeur limite journalière en PM_{10} supérieur à 35 pour toutes les stations qui ont des données disponibles pour cette année. Le maximum des dépassements en PM_{10} pour toutes les stations ayant des données est atteint en 2015.

Un apport des poussières désertiques peut favoriser les dépassements de seuil, comme l'illustrent des mesures effectuées dans le cadre du programme CARA (Caractérisation chimique des particules)¹. Plus récemment, les résultats d'une étude conduite par le LCSQA, en collaboration avec Madininair (*Caractérisation chimique et étude de sources des particules en Martinique au cours l'année 2018*)² confirment le rôle prépondérant joué par les particules naturelles (poussières sahariennes, mais également sels de mer) dans la survenue des dépassements de seuil journalier pour les PM_{10} en Martinique.

¹ Caractérisation chimique des particules : comparaison modèle/mesure (B. Bessagnet, F. Meleux, O. Favez et L. Chiappini). Ref. Ineris: DRC-10-111579-01718A. https://www.lcsqa.org/system/files/drc-10-111579-01718a_pm10-pm2.5_vf.pdf

² Caractérisation chimique et étude de sources des particules en Martinique au cours l'année 2018 (O. Favez et R. Aujay, L. Alleman, en collaboration avec Madininair). Ref. Ineris: https://www.lcsqa.org/system/files/documents/LCSQA2019-CARA_Martinique%202018.pdf

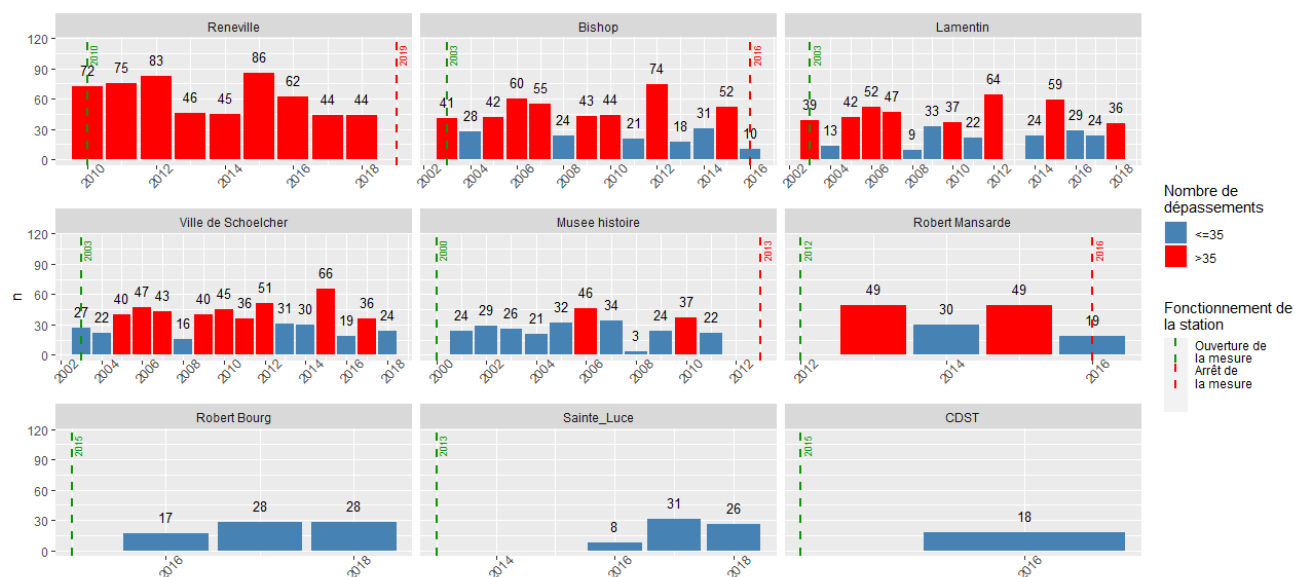


Figure 3 : Nombre annuel de dépassements du seuil limite en moyenne journalière de PM_{10} ($50 \mu g/m^3$) par station

2.3 Analyse chronologique des concentrations

2.3.1 Evolution temporelle des concentrations

Les boîtes à moustaches ci-dessous (Figure 4) représentent la variabilité des concentrations moyennes journalières par année et par mois pour trois stations d'implantation différente (Renéville : urbaine sous influence du trafic, Bishop : urbaine de fond et Sainte-Luce : périurbaine de fond). En annexe (§5.2, Figure 9) se trouvent les boîtes à moustaches des autres stations.

Les stations se ressemblent par l'allure générale de leurs distributions :

- En se focalisant sur les distributions mensuelles, deux périodes se distinguent : une période comprise entre octobre et avril avec des concentrations moyennes mensuelles relativement stables (entre 15 et $30 \mu g/m^3$ selon le type de sites), et une période comprise entre mai et septembre où les niveaux des concentrations sont significativement plus élevés (e.g., jusqu'à près de $50 \mu g/m^3$ pour le mois de juin à Renéville). Cette situation est mise en évidence pour toutes les stations. La période de mai et septembre correspond à la survenue d'intenses épisodes de brume de sable (transport de poussières Sahariennes) sous l'effet de la circulation atmosphérique générale.³
- Par ailleurs, les niveaux des concentrations sont plus élevés pour les stations géographiquement proches de Renéville (site de proximité automobile) et Bishop (site urbain dense, fortement impacté par le trafic et fermé fin 2016).

³ <https://www.madinair.fr/Les-brumes-de-sable>

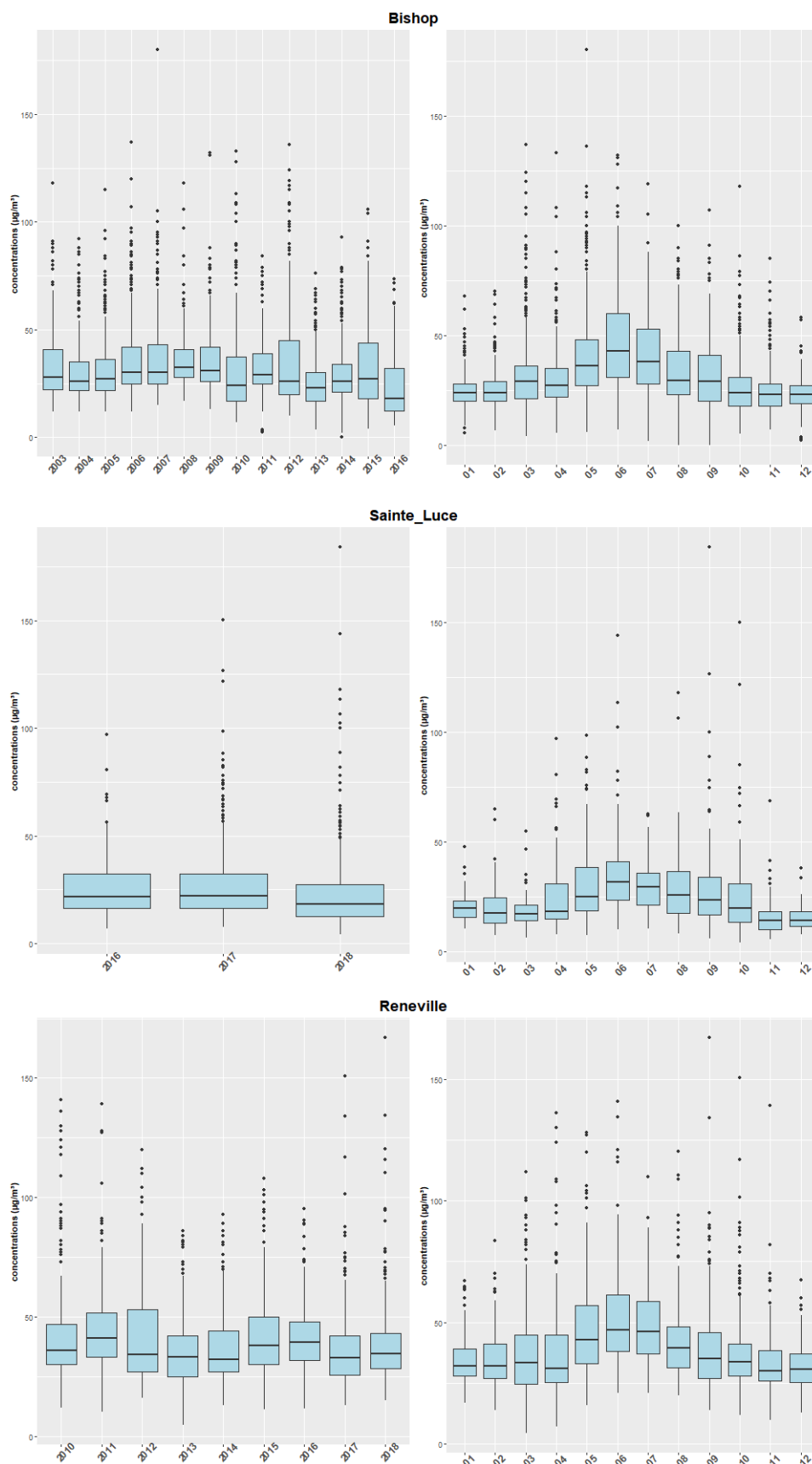


Figure 4 : Distribution, sous forme de boîtes à moustaches, des concentrations journalières de PM₁₀ en fonction des années (figures de gauche) et en fonction des mois (figures de droite) pour les stations de Sainte-Luce, Bishop et Renéville

Des analyses similaires peuvent être réalisées en fonction du profil hebdomadaire. Les résultats sont présentés en annexe (cf. Figure 10). La variabilité des concentrations est fortement marquée en fonction des jours de la semaine, ainsi que des heures du jour. En effet, les concentrations sont plus importantes les jours ouvrés et pendant les heures d'activité, avec pour certaines stations un pic matinal assez prononcé.

Sur la station de trafic Robert Mansard on observe des concentrations moins élevées le week-end et également le mercredi, jour où les écoliers ne travaillent généralement pas.

Ces observations suggèrent une influence sensible des émissions du trafic sur la pollution particulaire. Cette influence a été mise en évidence dans les travaux récents évoqués précédemment² ; des mesures automatiques de carbone suie complétées par une analyse statistique des données de spéciation chimique (Positive Matrix Factorization ou PMF) ont montré le rôle des émissions des véhicules comme source de particules anthropiques à Renéville et au Lamentin.

2.3.2 Analyse de tendance des concentrations en PM_{10}

Les analyses de tendance sont effectuées sur les stations disposant de plus de 85% de données valides sur trois ans, soit plus de 930 jours de données valides sur la période 2000-2018. Comme le montre la Figure 5, cinq stations sont sélectionnées : Bishop, Lamentin, Musée d'histoire, Renéville et Ville de Schoelcher. Les données couvrent une période assez large pour réaliser une analyse de tendance.

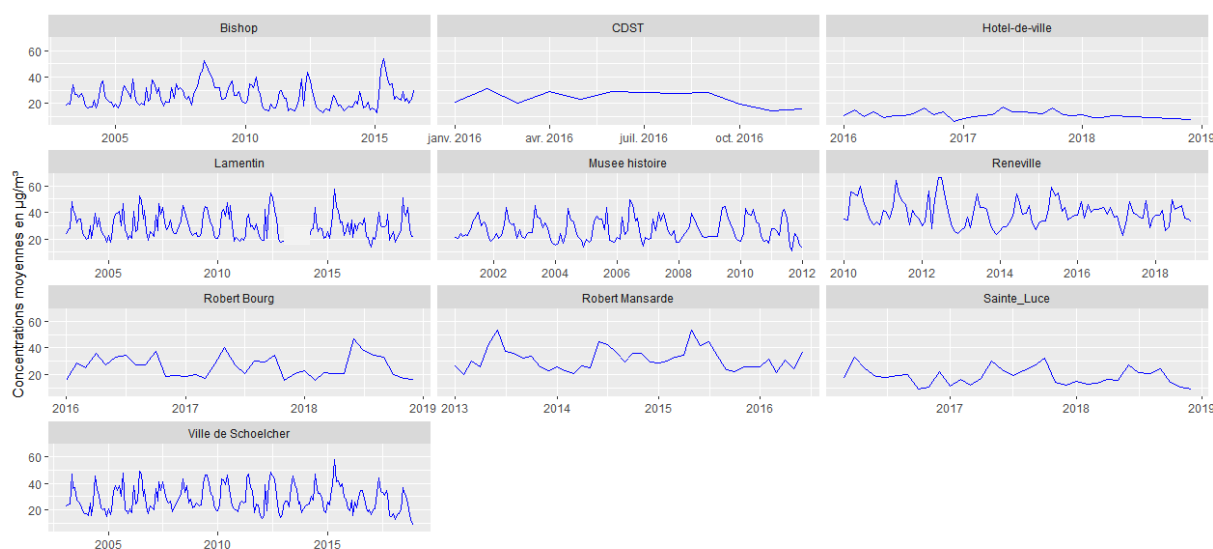


Figure 5 : Série chronologique des concentrations moyennes mensuelles en PM_{10} sur la période de mesure de chaque station

Les paragraphes précédents ont mis en évidence des différences de concentration selon les cycles. Afin d'identifier une tendance globale sur la période, les données sont lissées pour extraire la composante saisonnière (au sens statistique), qui correspond à des fluctuations régulières. Le lissage est réalisé par une régression et permet de produire des courbes lissées, ajustées au nuage de points.

Un test de Mann-Kendall a été utilisé pour détecter la présence d'une tendance significative (voir annexe 5.3).

Pour la station de Bishop, deux analyses ont été réalisées : une première analyse jusqu'en 2012 et une seconde analyse sur toute la période disponible (2003-2016). Cette station est un cas particulier car depuis 2013, des travaux ont été entrepris pour la construction d'une ligne de tramway et la circulation a été déviée. Entre 2013 et sa fermeture fin 2016, la station n'est plus représentative d'un environnement urbain dense.

Les résultats des analyses pour les différentes stations sont présentés en annexe (cf. Figure 11). Ils ne montrent aucune tendance significative excepté pour la station de Bishop entre 2003 et 2016. Cette baisse est expliquée par la diminution du trafic routier à partir de 2013.

3. COMPARAISON ENTRE LES CONCENTRATIONS DE PM_{10} ET $PM_{2,5}$

3.1 Sites de mesure de $PM_{2,5}$



Figure 6 : Répartition des sites de mesures en $PM_{2,5}$

Tableau 3 : Liste des stations de Madininair avec des données disponibles en $PM_{2,5}$

Code	Station	Implantation	Influence ($PM_{2,5}$)	Année de mise en service	Année d'arrêt des mesures
39007	Bishop	Urbaine	Fond	2003	2015
39008	Ville de Schoelcher	Urbaine	Fond	2017	
39015	Hôtel de ville	Urbaine	Fond	2015	2019
39014	Sainte_Luce	Périurbaine	Fond	2015	

Les sites de mesure des $PM_{2,5}$ sont moins nombreux que pour les PM_{10} . Aucune station sous influence du trafic ne mesure des concentrations en $PM_{2,5}$.

3.2 Statistiques descriptives des concentrations en $PM_{2,5}$

La mesure des $PM_{2,5}$ est plus récente que celle des PM_{10} , ainsi le nombre de données disponibles est-il beaucoup moins important pour les $PM_{2,5}$ que pour les PM_{10} . Pour les stations qui mesurent les deux polluants, on constate également que le pourcentage de données valides est plus faible pour les $PM_{2,5}$.

Comme pour les PM_{10} , la station Bishop présente des concentrations de $PM_{2,5}$ supérieures à celles des deux autres sites urbains.

De même, la station périurbaine de Sainte-Luce mesure des concentrations de $PM_{2,5}$ en moyenne plus faibles qu'en zone urbaine.

D'un point de vue statistique (test de Student à 95%), des différences significatives de moyenne sont relevées entre toutes les stations, excepté entre :

- La station de Sainte Luce et la station de la Ville de Schoelcher,
- La station de l'hôtel de ville et la station de la Ville de Schoelcher

Tableau 4 : Statistiques des concentrations moyennes journalières (en $\mu g/m^3$) en $PM_{2,5}$ par station

Station	Nombre de données	% données valides	Minimum	Moyenne	Médiane	Maximum	Ecart-type
Bishop	4748	76,9%	3	14,5	14	67,0	6,2
Ville de Schoelcher	556	45,7%	2	10,6	9	58,0	6,5
Sainte_Luce	1091	65,4%	2	9,8	8	76,8	7,6
Hôtel de ville	915	70,9%	3	11,9	10	58,4	5,9

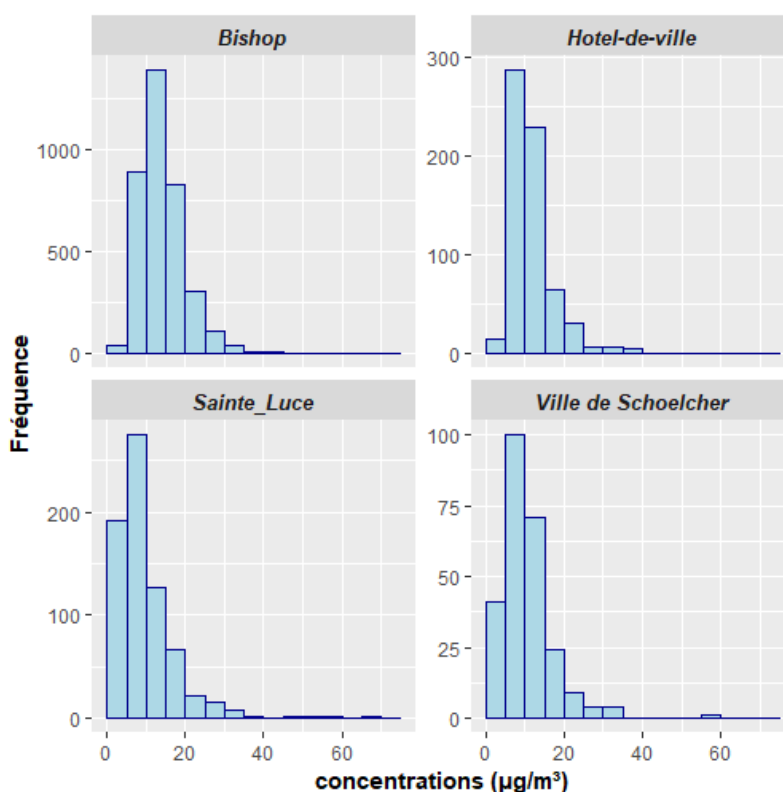


Figure 7 : Histogrammes des concentrations journalières en $PM_{2,5}$

Sur l'ensemble des stations et des années considérées, la moyenne des concentrations journalières en $PM_{2,5}$ est de $11,7 \mu g/m^3$. Pour les $PM_{2,5}$, la valeur limite est de $25 \mu g/m^3$ et la valeur cible nationale de $20 \mu g/m^3$ en moyenne sur l'année. Le Tableau 5 en annexe montre qu'aucune station n'a dépassé ces valeurs pour chaque année.

Les histogrammes des concentrations journalières en PM_{10} (Figure 2) et en $PM_{2,5}$ (Figure 7) ont des allures similaires, avec un étalement des concentrations plus important pour les PM_{10} . L'intervalle des concentrations le plus fréquent est différent, avec des concentrations plus faibles pour les $PM_{2,5}$.

Les stations de Sainte-Luce, Hôtel de ville et de Schoelcher mesurent des concentrations le plus souvent comprises entre 5 et $10 \mu g/m^3$ pour les $PM_{2,5}$ et 15 et $20 \mu g/m^3$ pour les PM_{10} . La station de Bishop a une typologie un peu différente : en effet, ses niveaux de concentrations sont compris le plus régulièrement entre 10 et $15 \mu g/m^3$ pour les $PM_{2,5}$ et 20 et $25 \mu g/m^3$ pour les PM_{10} .

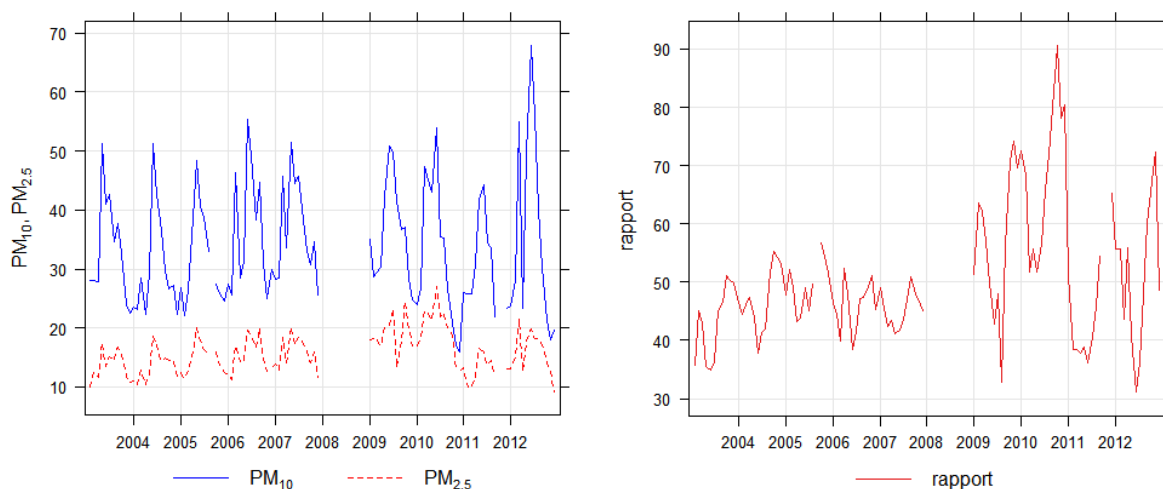
3.3 Ratio et corrélation des concentrations de $PM_{2,5}$ et PM_{10}

Cette comparaison s'effectue seulement sur les trois stations disposant à la fois de données de PM_{10} et de $PM_{2,5}$.

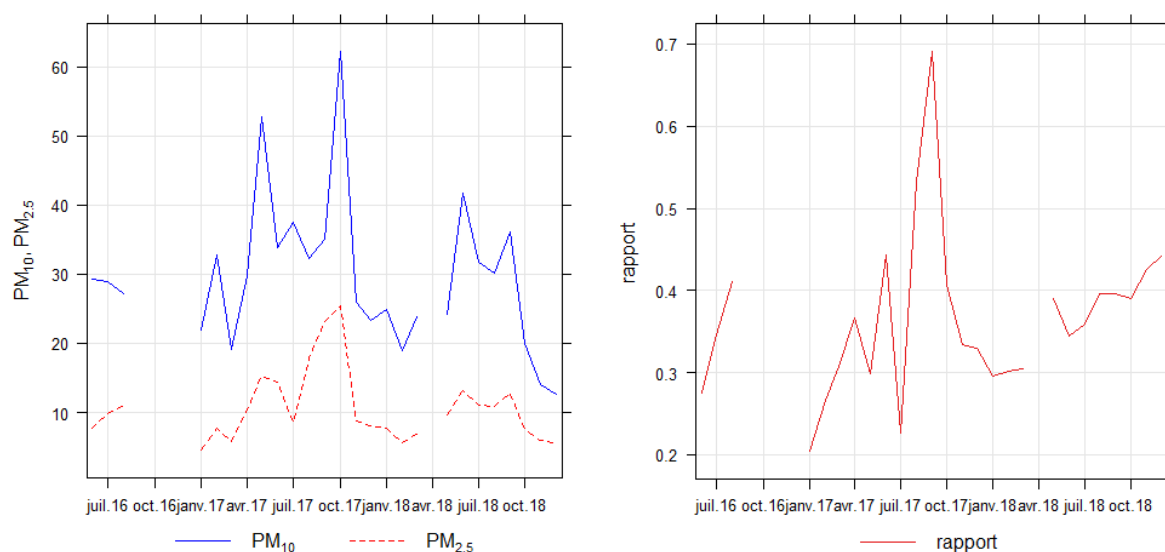
3.3.1 Ratio des concentrations $PM_{2,5}$ et PM_{10}

La Figure 8 présente les moyennes mensuelles des concentrations journalières en PM_{10} et $PM_{2,5}$ ainsi que du ratio journalier $PM_{2,5}/PM_{10}$, disponibles pour les trois stations mentionnées ci-dessus.

Site 1 : Bishop



Site 2 : Sainte-Luce



Site 3 : ville de Schoelcher

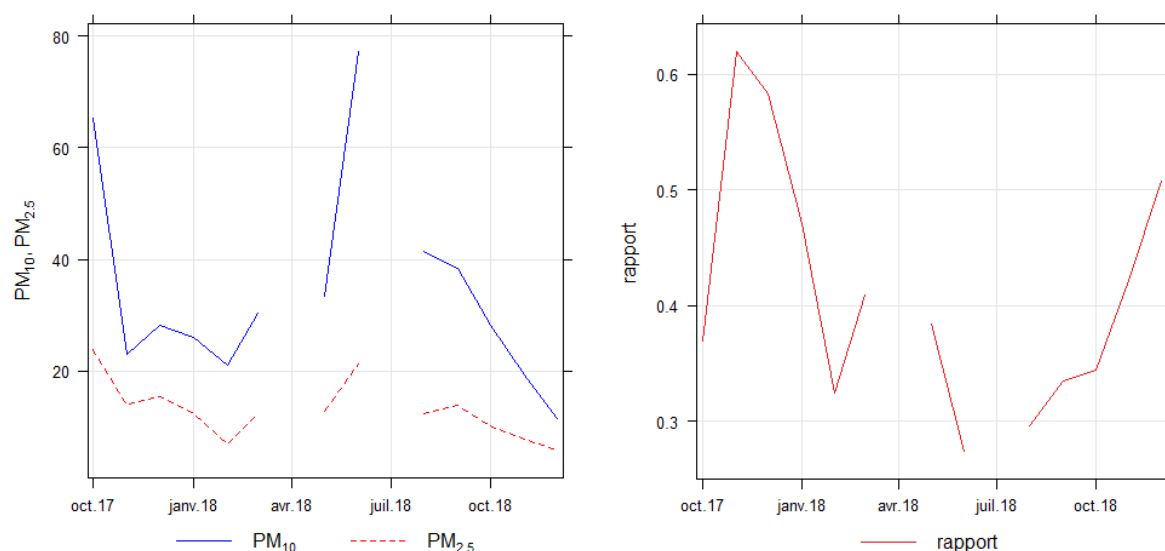


Figure 8 : De haut en bas, séries temporelles pour les stations de Bishop, Sainte-Luce et ville de Schoelcher, des concentrations en PM_{10} et $PM_{2.5}$ (à gauche), du rapport des concentrations $PM_{2.5}/PM_{10}$ (à droite)

On constate que les concentrations de $PM_{2.5}$ et de PM_{10} sont deux paramètres moyennement bien corrélés (avec des coefficients de détermination (R^2) à 50%, pour l'étude de ces moyennes mensuelles). Par ailleurs, le ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ fluctue dans le temps, avec des valeurs globalement plus faibles lors de la période des brumes de sable. Ce dernier phénomène est à relier à la granulométrie des particules sahariennes, présentant une concentration massique généralement plus importante entre 2,5 et 10 μm , qu'en dessous de 2,5 μm .

3.3.2 Variabilité des concentrations de PM_{2,5} et PM₁₀

En complément de l'étude du ratio, la variabilité relative des concentrations de PM₁₀ et PM_{2,5} est examinée. L'objectif est de regarder si les concentrations de PM₁₀ ont une variabilité plus forte que celles des PM_{2,5}. Cette variabilité plus intense peut expliquer l'influence prépondérante des poussières naturelles sur les niveaux de PM₁₀.

Pour mesurer une dispersion relative et comparer deux séries de données, le coefficient de variation est utilisé. La formule suivante représente le rapport entre le coefficient de variation des concentrations journalières de PM₁₀ et celui des concentrations journalières de PM_{2,5}.

$$\text{ratio } (CV_{PM10}/CV_{PM2,5}) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum(x_i - \bar{x})^2}}{\frac{1}{n}\sum x_i} \bigg/ \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum(y_i - \bar{y})^2}}{\frac{1}{n}\sum y_i}$$

x_i et y_i correspondent respectivement aux concentrations journalières des PM₁₀ et des PM_{2,5}.

Un ratio supérieur à 1 indique que les concentrations journalières en PM₁₀ varient plus que les concentrations journalières en PM_{2,5}. A l'inverse un ratio inférieur à 1 indique que la série des concentrations en PM₁₀ est moins variable que la série des concentrations en PM_{2,5}.

La variabilité des concentrations en PM₁₀ est plus grande que celle des PM_{2,5} pour la station Bishop entre 2003 et 2012, avec un rapport des coefficients de variation de 1,396.

Ce dernier résultat concorde avec l'analyse précédente, suggérant que les poussières sahariennes ont une influence plus sensible sur les niveaux de PM₁₀ que de PM_{2,5} en Martinique.

4. CONCLUSION

La mesure des particules fines (PM_{10} et $PM_{2,5}$) en Martinique est assurée par Madinair en plusieurs points du territoire, principalement en milieu urbain et périurbain de fond et localement à proximité du trafic automobile. Si toutes les stations ne possèdent pas le même historique (entre une année et plus de 13 ans selon les stations), la quantité de données disponibles sur la période 2000-2018 permet une analyse de la variabilité et de l'évolution sur le long terme des concentrations.

L'étude réalisée ici a permis de dégager des tendances générales :

- En fonction des périodes (mois, jours, heures) et des types de stations (urbaines ou périurbaines de fond, trafic) les concentrations de PM_{10} sont sensiblement différentes. Ce sont les stations de trafic, en période estivale et pendant les jours ouvrés, qui mesurent les concentrations les plus élevées.
- De manière générale, les concentrations moyennes journalières en site de fond urbain se situent pour les PM_{10} , 21% du temps entre 15 et 20 $\mu g/m^3$, 49% du temps $\geq 25 \mu g/m^3$. Pour les $PM_{2,5}$, les concentrations se situent entre 5 et 10 $\mu g/m^3$ 22% du temps et entre 10 et 15 $\mu g/m^3$ 38% du temps.
Pour les sites de fond périurbain, elles se situent pour les PM_{10} , 23% du temps entre 15 et 20 $\mu g/m^3$, 36% du temps $\geq 25 \mu g/m^3$. Pour les $PM_{2,5}$, les concentrations se situent 21% du temps entre 0 et 5 $\mu g/m^3$, 42% du temps entre 5 et 10 $\mu g/m^3$.
Quant aux sites de trafic, elles sont 79% du temps supérieures à 25 $\mu g/m^3$ pour les PM_{10} .
- Des tendances plutôt à la baisse, quoique non significatives, sont observées pour les concentrations de PM_{10} . Des épisodes exceptionnels de pollution peuvent être observés comme en 2015 où le nombre de dépassements du seuil de 50 $\mu g/m^3$ a été bien plus élevé que les autres années.
- Le ratio $PM_{2,5}/PM_{10}$ est plus faible pendant les périodes des brumes de sable (d'avril à octobre) en provenance du Sahara. La variabilité des concentrations en PM_{10} est plus forte que celle des $PM_{2,5}$; ce constat peut être expliqué par l'arrivée de nuages de poussières sahariennes.

Il serait intéressant d'enrichir ces résultats en étudiant le lien entre les concentrations en PM, la météorologie, et la survenue d'épisodes de poussières désertiques, ou « brumes de sable », dont la contribution peut être significative. Cette analyse permettrait d'interpréter plus finement la variabilité temporelle des concentrations de PM_{10} et de $PM_{2,5}$. Dans cette perspective, il est prévu en 2020 d'exploiter les données de modélisation globale issues du programme européen Copernicus (réanalyses 2003-2015).

5. ANNEXES

5.1 Statistiques des concentrations par année et par station

Les statistiques suivantes portent sur les **concentrations moyennes journalières de PM₁₀** et de **PM_{2,5}** qui font plus spécialement l'objet de cette étude. Elles en décrivent les niveaux moyens et médians ainsi que la variabilité. De ce fait, la moyenne par année présentée dans ces tableaux peut légèrement différer de la moyenne annuelle réglementaire, qui est calculée à partir des données horaires. Celle-ci n'a pas été reportée, ces écarts n'ayant pas d'incidence sur la comparaison avec la valeur limite annuelle réalisée au paragraphe 2.2.2.

Tableau 5 : Statistiques des concentrations moyennes journalières (en µg/m³) de PM₁₀ par année et par station

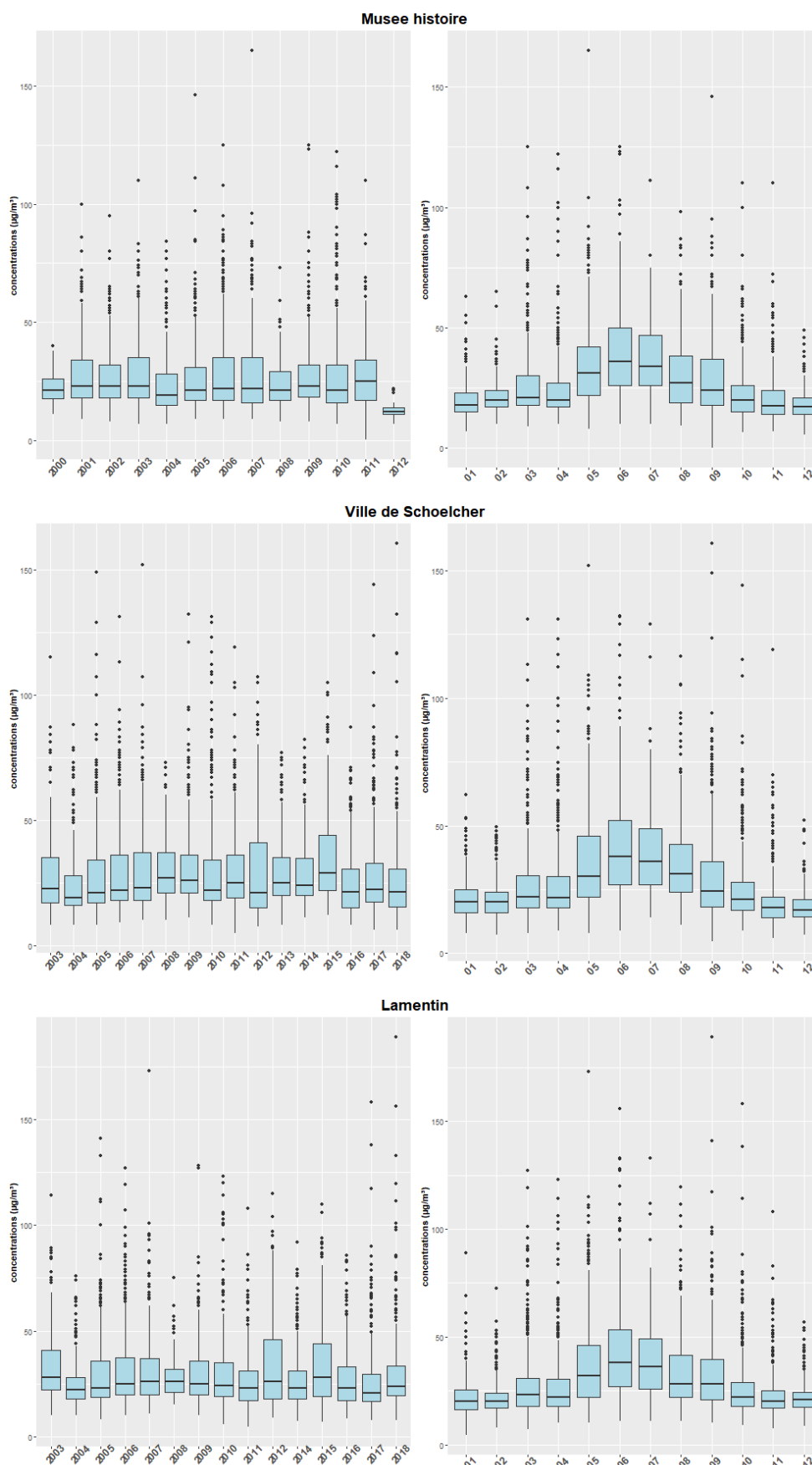
Station	Année	Nombre de données	% données valides	Min	Moyenne	Médiane	Max	Ecart-type
Musee histoire	2000	366	17,21	11	22,17	21	40	6,59
	2001	365	97,81	9	27,95	23	100	14,13
	2002	365	99,45	8	27,14	23	95	12,84
	2003	365	98,36	7	27,99	23	110	14,77
	2004	365	96,72	7	23,53	19	84	13,38
	2005	365	90,14	9	26,97	21	146	17,07
	2006	365	98,08	9	29,14	22	125	18,59
	2007	366	95,34	9	28,25	22	165	17,63
	2008	366	23,77	8	25,03	21	73	11,98
	2009	366	82,74	8	28,03	23	125	15,79
	2010	366	93,42	7	28,42	21	122	20,36
	2011	365	87,95	0,12	26,96	25	110	14,98
	2012	365	6,83	7	12,92	12	22	3,8
Bishop	2003	365	80,55	12	33,83	28	118	16,43
	2004	365	94,26	12	30,17	26	92	13,86
	2005	365	89,86	12	32,63	27	115	16,08
	2006	365	97,26	12	36,27	30	137	18,64
	2007	365	89,59	15	36,58	30	180	18,6
	2008	365	42,62	17	36,88	32,5	118	15,82
	2009	365	85,75	13	35,58	31	132	15,53
	2010	365	90,68	7	30,44	24	133	20,99
	2011	365	61,64	2,3	32,82	29	84	13,25
	2012	365	93,44	10	36,32	26	136	23,73
	2013	366	90,14	3,5	26	23	76	12,74
	2014	366	99,45	0	28,99	26	93	13,73
	2015	366	81,64	4	32,33	27	106	19,18
	2016	366	47,81	5,52	23,6	18,1	73,4	14,94
Ville de Schoelcher	2003	365	82,19	8	28,1	22,5	115	15,95
	2004	365	98,91	8	24,1	19	88	13,72
	2005	365	99,18	8	28,05	21	149	19,04
	2006	365	97,81	9	29,71	22	131	18,91
	2007	365	94,52	10	29,84	23	152	17,7
	2008	365	59,02	10	30,23	27	73	12,4
	2009	365	93,15	11	31,21	26	132	16,42
	2010	365	98,63	8	30,48	22	131	21,11
	2011	365	95,07	4,7	29,29	25	119	16,6
	2012	365	97,54	7,6	29,1	21	107	19,5
	2013	365	94,79	8,1	28,85	25	77	13,79
	2014	365	95,89	11	28,78	24	82	13,15
	2015	365	98,63	12	35,11	29	105	17,66
	2016	365	93,44	7,96	24,87	21,32	87,11	13,08
	2017	366	96,98	6,07	28,15	22,3	144,04	18,07
	2018	366	93,13	6,02	25,88	21,18	160,48	18,41

Station	Année	Nombre de données	% données valides	Min	Moyenne	Médiane	Max	Ecart-type
Lamentin	2003	366	82,74	10	33,2	28	114	15,92
	2004	366	89,07	10	24,94	22	76	11,06
	2005	366	98,63	8	30,17	23	141	19,28
	2006	365	96,44	10	32,36	25	127	19,64
	2007	365	87,95	11	32,41	26	173	18,48
	2008	365	36,07	15	28,13	26	75	10,48
	2009	365	85,75	10	30,09	25	128	15,73
	2010	365	80	6	31,2	24	123	20,3
	2011	365	91,51	4,5	26,47	23	108	14,49
	2012	365	87,43	8,9	33,49	26	115	21
	2013	365	0					
	2014	365	93,97	7,4	26,81	23	92	13,31
	2015	365	95,34	7,1	33,86	28	110	19,34
Reneville	2016	365	93,99	8,54	27,17	23,12	85,86	14,15
	2017	365	87,57	7,91	26,59	20,48	158,3	18,29
	2018	365	90,36	7,9	30,37	23,82	188,98	21,46
	2010	365	89,32	12	42,4	36	141	21,29
	2011	365	80,55	10	44	41	139	17,83
	2012	366	82,51	16	41,93	34	120	20,47
	2013	366	88,49	4,5	35,75	33	86	14,53
	2014	366	96,71	13	36,55	32	93	14,18
	2015	366	98,63	11	41,82	38	108	17,72
	2016	366	84,7	11,51	41,29	39,45	95,17	13,47
	2017	366	88,77	12,9	36,3	32,84	150,69	16,87
	2018	366	83,79	14,8	38,5	34,59	167	17,82
Robert Mansarde	2013	366	85,48	4,8	32,73	28	83	15,55
	2014	364	80,55	9	31,53	27	92	14,68
	2015	362	85,48	10	33,15	28	96	17,34
	2016	365	44,81	6,73	27,91	22,3	85,73	15,2
Sainte Luce	2016	363	39,89	6,99	26,67	21,68	97,11	14,8
	2017	365	87,05	7,62	28,11	21,87	150,1	19,28
	2018	364	97,19	4	23,76	18,14	184,2	20,2
Robert Bourg	2016	363	65,03	7,67	27,23	23,98	77,6	13,42
	2017	364	87,95	6,2	25,32	19	162,48	19,02
	2018	356	92,03	5,51	25,45	19,84	166,7	19,61
CDST	2016	364	84,7	7,08	23,81	19,55	79,53	13,83

Tableau 6 : Statistiques des concentrations moyennes journalières (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en $\text{PM}_{2,5}$ par année et par station

Station	Année	Nombre de données	% données valides	Min	Moyenne	Médiane	Max	Ecart-type
Bishop	2003	365	81,64	6,8	13,87	13	48	4,84
Bishop	2004	366	83,06	6,7	13,37	13	29	4,3
Bishop	2005	365	80,82	4,8	14,95	14	42	5,29
Bishop	2006	365	97,26	7,1	15,48	14	39	5,17
Bishop	2007	365	90,68	7	15,92	14	67	6,34
Bishop	2008	366	0					
Bishop	2009	365	86,58	7	19,35	18	57	6,24
Bishop	2010	365	92,6	7	19,13	17	52	7,08
Bishop	2011	365	96,99	4,2	13,77	13	44	5
Bishop	2012	366	93,99	3,6	15,87	15	42	5,85
Bishop	2013	365	93,42	2,6	9,56	8,6	24	4,14
Bishop	2014	365	94,52	2,8	9,49	8,5	27	3,65
Bishop	2015	365	8,49	5,6	9,61	9,2	16	2,64
Ville de Schoelcher	2017	366	19,27	6,52	12,45	11,01	32,58	5,77
Ville de Schoelcher	2018	366	59,62	2,2	10,25	8,9	58	6,63
Sainte Luce	2016	192	26,5	3,86	9,68	8,57	21,95	4,29
Sainte Luce	2017	363	84,3	2	10,94	8	76,78	9,29
Sainte Luce	2018	360	85,64	1,8	8,73	7,1	55,5	6,24
Hôtel de ville	2016	364	73,22	2,59	11,7	9,68	39,04	6,26
Hôtel de ville	2017	362	71,11	4,83	13,13	11,4	58,41	6,23
Hôtel de ville	2018	189	66,14	4,9	9,62	9,14	20,3	2,72

5.2 Distribution des concentrations de PM₁₀



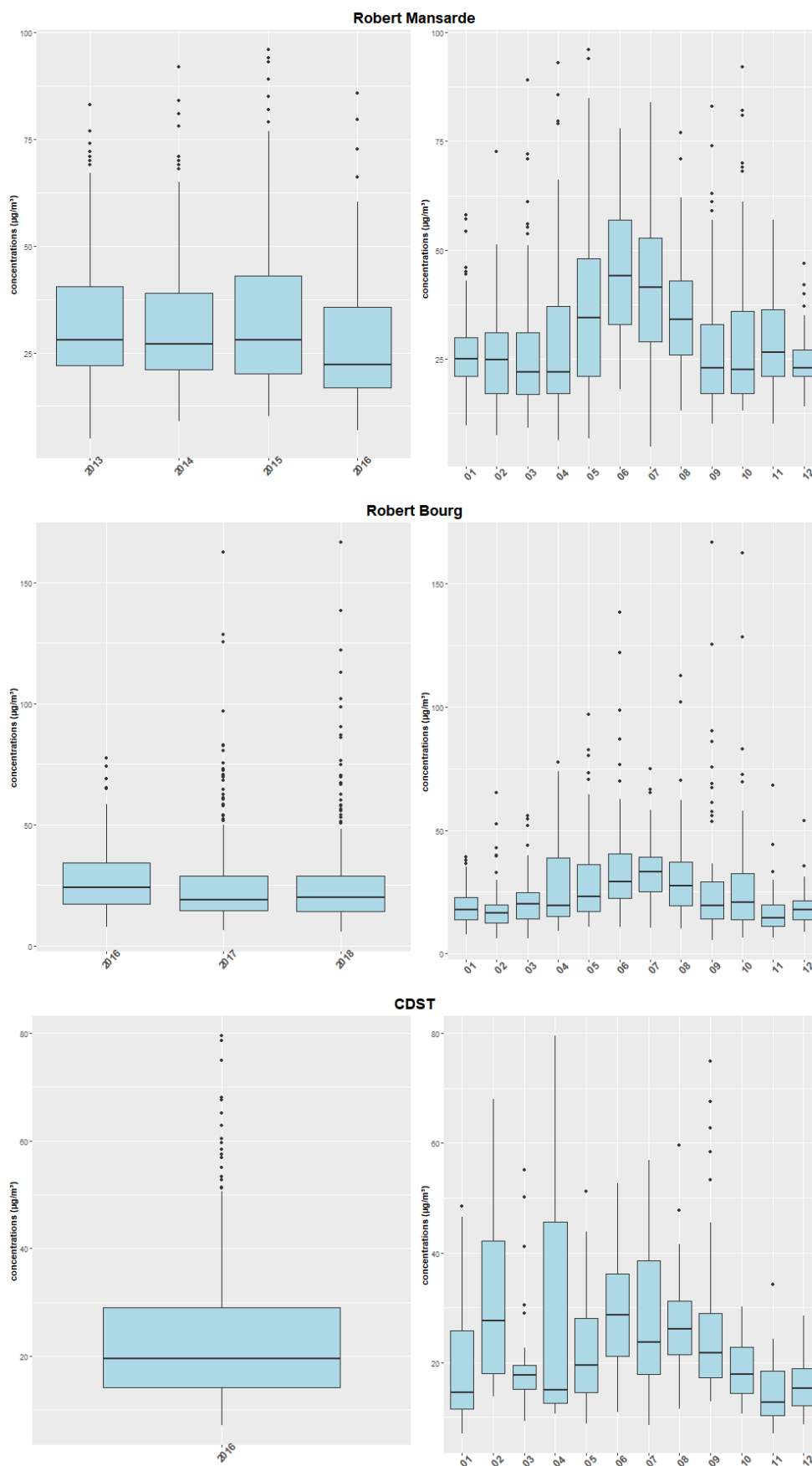


Figure 9 : Distribution, sous forme de boîtes à moustaches, des concentrations journalières de PM₁₀ en fonction des années (à gauche) et des mois (à droite)

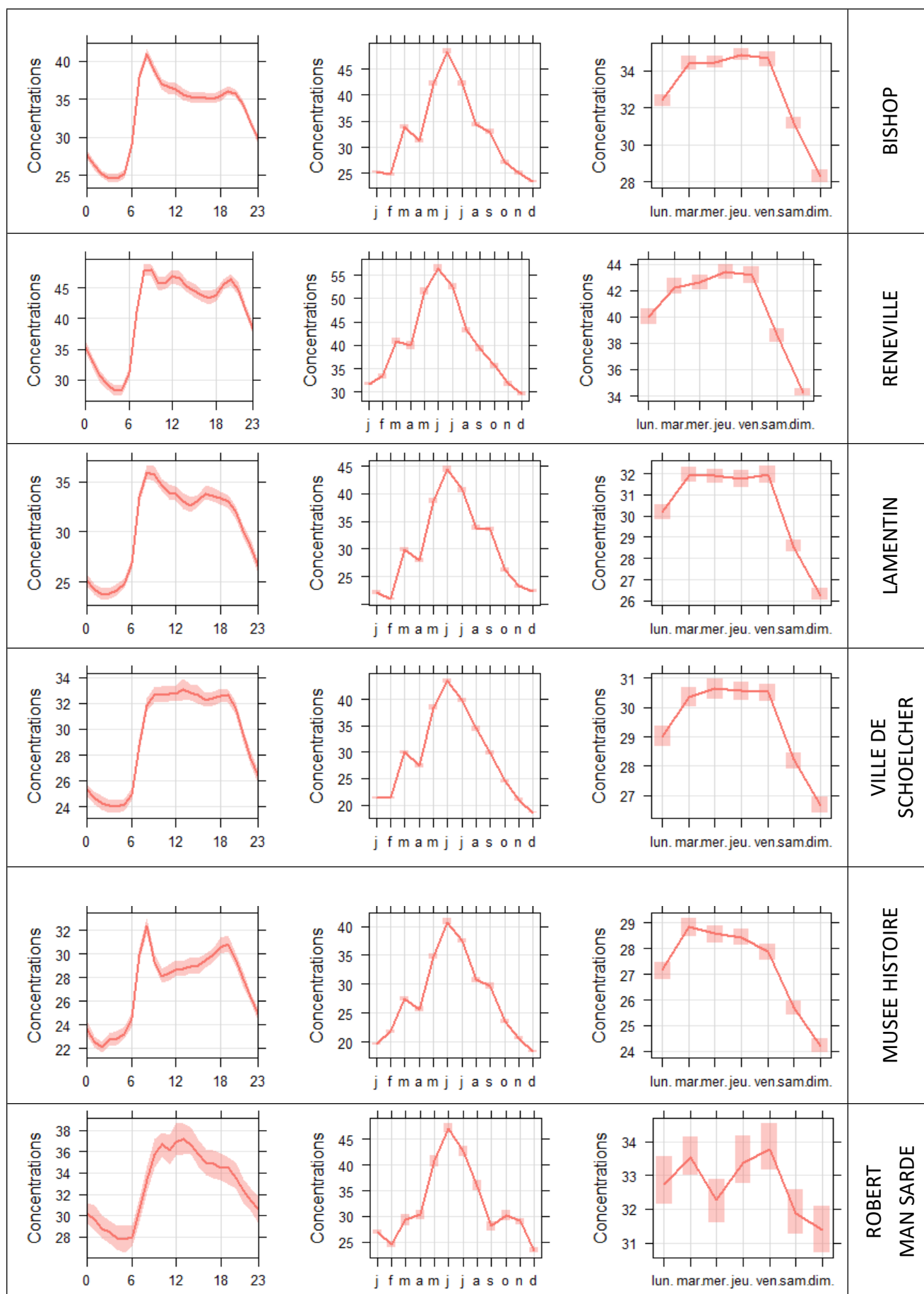


Figure 10 : Variation temporelle des concentrations en PM₁₀ en fonction des heures, des mois et des jours (les ombres montrent les intervalles de confiance à 95% autour de la moyenne)

5.3 Analyse de tendance

Le test de Mann-Kendall permet de tester l'existence d'une tendance monotone d'une série chronologique.

L'hypothèse H0 testée est l'absence de tendance et H1 est la présence d'une tendance monotone.

La statistique de test de Mann-Kendall S est définie comme suit :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

avec

$$\begin{aligned} \text{sgn}(x_j - x_k) &= 1 \quad \text{si } (x_j - x_k) > 0 \\ &= 0 \quad \text{si } (x_j - x_k) = 0, \\ &= -1 \quad \text{si } (x_j - x_k) < 0 \end{aligned}$$

x_j est la concentration pour une unité de temps (dans notre cas j correspond à un mois) ;

n est le nombre d'observations disponibles.

Si l'échantillon contient plus de 10 analyses, la loi de la statistique de test Z peut être approchée par une loi normale centrée-réduite (où α est l'écart type de S) :

Le test de Mann-Kendall renvoie la valeur de la statistique ainsi que la p-value associée. La tendance est dite significative (rejet de l'hypothèse H0) si la p-value du test est inférieure à un seuil de risque. Dans notre cas, le seuil est fixé à 5 %.

En règle générale, la significativité de la tendance peut être qualifiée selon trois seuils : 1 %, 5 % et 10 %. Plus la p-value est faible, plus la tendance est significative :

(***)	p-value ≤ 0,001	→ tendance très fortement significative
(**)	0,001 < p-value ≤ 0,01	→ tendance fortement significative
(*)	0,01 < p-value ≤ 0,05	→ tendance moyennement significative
(+)	0,05 < p-value ≤ 0,1	→ tendance faiblement significative
ns	p-value > 0,1	→ tendance non significative

La pente est effectuée par la méthode de Sen et correspond à la médiane de toutes les pentes calculées entre chaque paire de points.

$$Q_{j\bar{k}} = \frac{x_j - x_k}{j - k}$$

Cette pente peut s'exprimer en unité de concentration par an, ou en pourcentage par an ou sur la période. Elle est souvent associée à un intervalle de confiance (ici à 95%).

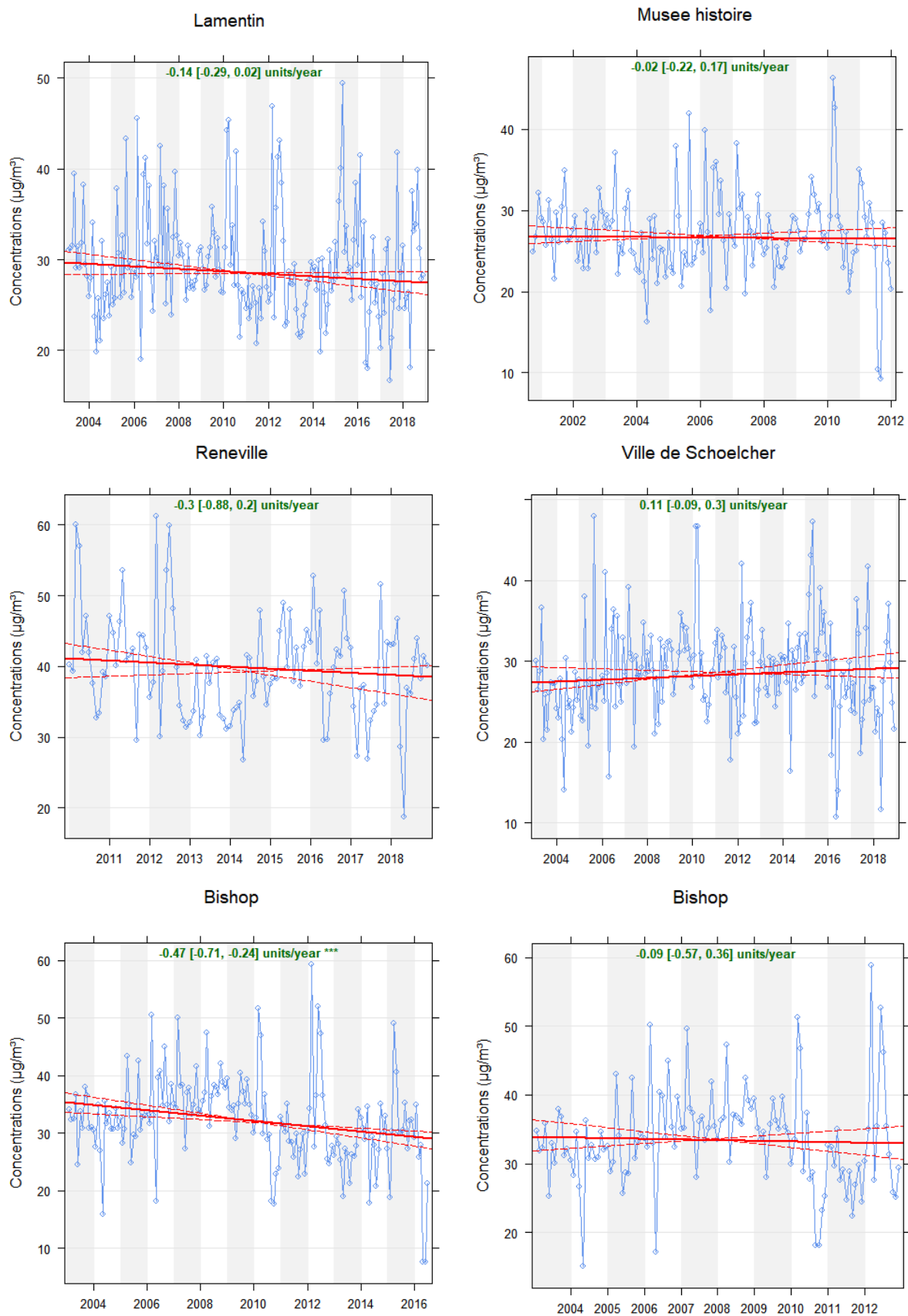


Figure 11 : Analyse de tendance des concentrations moyennes mensuelles en PM_{10} désaisonnalisées

La Figure 11 montre les concentrations en PM_{10} moyennes mensuelles. La composante saisonnière, au sens statistique du terme, qui traduit un effet apparaissant à intervalle régulier, est préalablement extraite par lissage. Sont représentées la pente de la tendance (droite rouge), et les intervalles de confiance à 95 % de la pente (droites rouges en pointillés) ; les étoiles correspondent à la significativité de la tendance (cf. §5.3).

Sur la période 2003-2016, les concentrations en PM_{10} sur la station de Bishop ont diminué significativement de $0,47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par année. L'intervalle de confiance à 95% autour de la pente est $[-0,71 ; -0,24]$. La hausse des concentrations entre les périodes « avant » et « après » 2007 pourrait s'expliquer par le changement de méthode de mesure.