



HAL
open science

CARACTERISATION CHIMIQUE ET ETUDE DE SOURCES DES PARTICULES AU COURS DE L'ANNEE 2018

Olivier Favez, Robin Aujay, Laurent Alleman

► **To cite this version:**

Olivier Favez, Robin Aujay, Laurent Alleman. CARACTERISATION CHIMIQUE ET ETUDE DE SOURCES DES PARTICULES AU COURS DE L'ANNEE 2018. LCSQA. 2020. hal-04251392

HAL Id: hal-04251392

<https://imt-nord-europe.hal.science/hal-04251392>

Submitted on 20 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Caractérisation chimique et étude de sources des particules en Martinique au cours de l'année 2018

Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

CARACTERISATION CHIMIQUE ET ETUDE DE SOURCES DES PARTICULES AU COURS DE L'ANNEE 2018

**Olivier FAVEZ, Robin AUJAY (Ineris)
Laurent ALLEMAN (IMT Lille-Douai)**

Etude réalisée en collaboration avec



Mars 2020

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Olivier FAVEZ	Caroline MARCHAND	Marc DURIF
Qualité	Ingénieur de l'unité ASUR Direction des Risques Chroniques	Responsable de l'Unité ASUR Direction des Risques Chroniques	Responsable du Pôle CARA Direction des Risques Chroniques
Visa			



LE LABORATOIRE CENTRAL DE SURVEILLANCE DE LA QUALITÉ DE L'AIR

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air est constitué des laboratoires de l'IMT Lille Douai, de l'INERIS et du LNE. Il mène depuis 1991 des études et des recherches à la demande du Ministère chargé de l'environnement, et en concertation avec les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Ces travaux en matière de pollution atmosphérique ont été financés par la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (bureau de la qualité de l'air) du Ministère chargé de l'Environnement. Ils sont réalisés avec le souci constant d'améliorer le dispositif de surveillance de la qualité de l'air en France en apportant un appui scientifique et technique au ministère et aux AASQA.

L'objectif principal du LCSQA est de participer à l'amélioration de la qualité des mesures effectuées dans l'air ambiant, depuis le prélèvement des échantillons jusqu'au traitement des données issues des mesures. Cette action est menée dans le cadre des réglementations nationales et européennes mais aussi dans un cadre plus prospectif destiné à fournir aux AASQA de nouveaux outils permettant d'anticiper les évolutions futures.

TABLE DES MATIERES

RESUME	7
REMERCIEMENTS ET COLLABORATIONS.....	8
1. CONTEXTE DE L'ETUDE.....	9
2. OBJECTIFS.....	10
3. MATERIELS ET METHODES	11
3.1 Choix des sites de prélèvements sur filtres	11
3.2 Mesures automatiques	13
3.3 Analyses chimiques au laboratoire	14
4. POUSSIERS NATURELLES	15
4.1 Sels de mer	15
4.2 Poussières sahariennes	16
4.3 Contributions aux dépassements du seuil journalier	18
5. ESTIMATION DES CONCENTRATIONS DE POUSSIERS SAHARIENNES A L'AIDE DES MESURES AUTOMATIQUES	20
6. VARIATIONS SPATIALES ET TEMPORELLES DES ESPECES CHIMIQUES MAJEURES	22
7. ANALYSES PMF DES SOURCES DE PM₁₀ A RENEVILLE ET LAMENTIN.....	26
8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	30
9. LISTE DES ANNEXES.....	31
ANNEXE 1.....	35
ANNEXE 2.....	43
ANNEXE 3.....	44
ANNEXE 4.....	47
ANNEXE 5.....	48

RESUME

La valeur limite annuelle relative à la concentration journalière en PM_{10} est dépassée quasiment chaque année sur une ou plusieurs station(s) de l'Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air en Martinique (Madininair). En 2010, des travaux du programme CARA avaient permis d'illustrer l'importance du rôle probablement joué par les poussières sahariennes dans la survenue de ces dépassements et conclu à la nécessité de mettre en œuvre une méthodologie d'estimation systématique de leur contribution aux PM_{10} à l'échelle régionale, sur la base des recommandations européennes en la matière. Madininair s'est alors attaché à implanter une station de fond régional répondant aux besoins de cette méthodologie, aboutissant à l'instrumentation en 2016 du site de « Brume - pointe couchée » (FR-39019) puis à la préparation d'une campagne de validation de sa représentativité spatiale pour la mesure des poussières sahariennes. Cette campagne a pu être réalisée en 2018, incluant la collecte de filtres journaliers PM_{10} sur 5 stations du dispositif régional. Elle avait également pour objectif de documenter la contribution de sources anthropiques au niveau des PM mesurées.

Le présent rapport rend compte des résultats obtenus par le LCSQA lors de l'exploitation des jeux de données de spéciation chimique issus de cette campagne de prélèvement réalisée par l'AASQA. Il fait suite à la rédaction d'une note technique à l'automne 2019, utilisée en appui au rapportage européen pour la justification des dépassements de la valeur limite annuelle sur les stations de Renéville (proximité automobile ; FR-39011) et au Lamentin (fond urbain ; FR-39009) en 2018.

Les résultats présentés ici 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. Ils illustrent également l'homogénéité spatiale des fortes concentrations de poussières sahariennes, et permettent ainsi de proposer une méthodologie simple d'estimation de ces concentrations à partir des mesures automatiques réalisées sur le site de fond régional de Brume et/ou sur le site de fond péri-urbain de Sainte Luce (FR-39014). Cette méthodologie inclut la confirmation du transport à longue distance de particules désertiques à l'aide d'observation satellites et/ou de travaux de modélisation.

Par ailleurs, des mesures automatiques de carbone suie ainsi que l'utilisation de la *Positive Matrix Factorization* pour l'analyse statistique des données de spéciation chimique, ont permis de mettre en évidence le rôle joué par le trafic automobile au sein des particules anthropiques influençant les niveaux de PM_{10} à Renéville et au Lamentin. Outre les particules carbonées émises à l'échappement, les émissions primaires liées à l'abrasion des freins (et/ou des pneus) semblent conséquentes, en particulier à Renéville. Enfin, une meilleure compréhension de l'influence des émissions industrielles sur les concentrations de PM nécessiterait la réalisation d'une campagne de prélèvement et/ou de mesure spécifique.

REMERCIEMENTS ET COLLABORATIONS

Le travail présenté dans ce rapport a été rendu possible grâce à la collaboration entre le Bureau de la Qualité de l'Air du MTES, le LCSQA, et les services études (Carole Boullanger et Karen Ramassamy) et techniques (sous la responsabilité d'Olivier Noteuil) de Madinair (directeur : Stéphane Gandar) qui ont réalisé l'ensemble des prélèvements de cette campagne.

Les auteurs LCSQA remercient également Valérie Minguet, Nicolas Chatellier, Hervé Bautista et Arnaud Papin (Ineris) ainsi que Bruno Malet (IMT LD) pour les analyses chimiques réalisées dans le cadre de cette étude, et plus largement pour le compte du programme CARA.

1. CONTEXTE DE L'ETUDE

Les dépassements des valeurs limites fixés pour les PM₁₀ sont récurrents en zone Caraïbes, en particulier en Martinique où le seuil relatif à la valeur limite journalière (concentrations journalières > 50 µg/m³ plus de 35 jours par an) est dépassé chaque année depuis 2005 (hormis 2008) sur une ou plusieurs station(s) de l'Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA), i.e., Madinair (<https://www.madinair.fr/>). La Martinique est ainsi concernée par le contentieux déclenché par la Commission Européenne vis-à-vis de la France, concernant la surveillance et la mise en œuvre de plans d'action pour la réduction des niveaux de PM₁₀.

La compréhension (et, éventuellement, la maîtrise) de ces dépassements nécessite une bonne connaissance des origines (sources et/ou mécanismes de formation) des particules mesurées en air ambiant. De précédents travaux du programme CARA¹ ont permis de mettre en évidence dès 2010 le rôle joué par les particules naturelles dans la survenue de certains pics de PM₁₀ en Martinique². Parmi ces particules naturelles, des poussières sahariennes (ou *Brumes*) peuvent être générées par les tempêtes de sable au Sahara puis transportées sur de longues distances. Ces événements peuvent affecter sensiblement la qualité de l'air en France métropolitaine (en particulier la Corse et la région PACA), mais également impacter la Guyane (le plus souvent entre décembre et avril) et les Antilles (généralement entre avril et septembre). La Figure 1 illustre la survenue de ce type d'épisode d'import de poussières sahariennes en zone Caraïbes, à partir de travaux de modélisation à l'échelle globale.



Figure 1 : Transport de poussières désertiques (PM₁₀ de surface, µg/m³) le 9 Juillet 2014, simulation Ineris.

En lien avec l'article 12 de l'arrêté du 19 avril 2017 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air, ce dernier doit être en mesure de fournir, en vue du rapportage des données, tout élément permettant d'identifier les origines potentielles de dépassements des valeurs réglementaires. Conformément à l'article 28 de ce même arrêté, lorsque les dépassements des valeurs réglementaires peuvent être dus à des sources

¹ Description du programme CARA du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air (O. Favez & E. Leoz-Garziandia). Réf Ineris: DRC-14-144346-09717A.

https://www.lcsqa.org/system/files/rapport/lcsqa_2014_note_synthese_programme_cara_vf.pdf

² 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

naturelles (telles que les éruptions volcaniques, le transport des particules naturelles provenant des régions désertiques, etc.), le LCSQA fournit à la Commission Européenne les éléments justifiant ces dépassements, avec l'appui des AASQA concernées.

Ainsi, il avait été prévu dès 2012 de mettre en œuvre, en collaboration avec Madinair, une stratégie expérimentale, basée sur celle recommandée par le guide méthodologique *ad hoc* de la Commission Européenne³, afin de systématiser l'évaluation des contributions des poussières sahariennes sur les dépassements de seuil journalier des PM₁₀. La première étape de cette étude était d'identifier et d'instrumenter une station de mesure représentative des concentrations de fond insulaire. Une station répondant à cette exigence a été recherchée par Madinair sur la période 2012-2016, et le site « Brume - Pointe Couchée » (située sur la façade Atlantique, à l'est de l'île) a finalement été retenu et équipé d'un analyseur automatique de PM pour répondre à cet objectif. Une fiche action LCSQA 2017-2018 a ensuite pu être proposée pour la réalisation et l'exploitation d'une large campagne de spéciation chimique sur plusieurs stations de Madinair (dont Brume), afin de valider la pertinence de la mise en œuvre à plus long terme de la méthodologie envisagée. Compte-tenu des aléas de mise en place de la campagne, cette fiche action a été renouvelée en 2019, donnant lieu à la rédaction du présent rapport final.

2. OBJECTIFS

Le premier objectif de cette étude était de quantifier la contribution des poussières sahariennes lors de dépassements du seuil journalier pour les PM₁₀ en 2018. Cet objectif a fait l'objet d'une note spécifique (cf. version consolidée en Annexe 1) étayant la justification française du non-respect des valeurs limites en Martinique dans le cadre de l'exercice de rapportage européen pour l'année 2018. Dans ce rapport, l'étude de l'influence des poussières naturelles sur les concentrations de PM₁₀ a aussi été étendue aux embruns marins (Chapitre 4).

Ce rapport a également pour objectif de proposer les modalités de mise en œuvre d'une méthodologie pour l'estimation de l'impact des poussières naturelles sur les concentrations de PM₁₀, dans une perspective à plus long terme (Chapitre 5).

Enfin, l'influence de sources anthropiques sur les niveaux des PM₁₀ enregistrés sur différentes stations de Madinair a également pu être investiguée, notamment à partir de mesures automatiques du carbone suie en fond urbain (Chapitre 6) ainsi que la réalisation d'étude de sources à l'aide de l'outil statistique de type *Positive Matrix Factorization* (Chapitre 7).

³ "Establishing guidelines for demonstration and subtraction of exceedances attributable to natural sources under the Directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for Europe". Sec(2011) 208 final. P.22 (subsection 4.1.5). http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/pdf/sec_2011_0208.pdf

3. MATERIELS ET METHODES

L'ensemble des normes citées dans ce rapport, et utilisées pour la conduite de cette étude, sont disponibles auprès de l'AFNOR.

3.1 Choix des sites de prélèvements sur filtres

Les sites de prélèvements (décrits par le Tableau 1 et la Figure 2) ont été choisis par Madinair au sein de leur réseau de stations de surveillance, en concertation avec le LCSQA.

Tableau 1 : Typologie et localisation des sites de prélèvements mis en œuvre dans le cadre de l'étude (sites CARA 2018)

Site	N° Station	Type de Site	Latitude	Longitude
Renéville	FR-39011	Trafic	14° 36' 55	61° 03' 11
Lamentin	FR-39009	Fond urbain	14° 36' 38	61° 00' 09
Bellevue	FR-39017	Péri-urbain	14° 36' 06	61° 05' 04
Ste-Luce	FR-39014	Péri-urbain	14° 28' 07	61° 55' 38
Brume	FR-39019	Fond rural	14° 45' 19	61° 10' 43



Figure 2 : Localisation des sites de prélèvements pour la caractérisation chimique des PM (sites CARA 2018)

Ce panel de sites intègre notamment les deux stations (Renéville et Lamentin) ayant enregistré plus de 35 dépassements du seuil journalier de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{10} au cours de l'année 2018 (Annexe 2).

Par ailleurs, afin de pouvoir appliquer la méthode européenne pour l'estimation de l'impact des poussières sahariennes, il convient de choisir un site de fond rural pour lequel une augmentation « anormale » des concentrations de PM (i.e. en dehors du champ de variation, relativement étroit, caractéristique d'un site de fond éloigné de toute source) peut être directement reliée à un épisode de poussière saharienne et considéré comme représentatif d'une zone géographique donnée. Les concentrations de poussières exogènes estimées sur le site de fond régional peuvent ensuite être retranchées aux concentrations totales mesurées sur l'ensemble des stations de cette zone géographique. Le choix du site de Brume comme site de fond régional a fait l'objet d'une note intitulée « Protocole de validation de la méthodologie pour évaluer la contribution des particules désertiques aux dépassements en particules fines » produite par Madinair en août 2016.

Comme synthétisé par le Tableau 2, l'échantillonnage des PM₁₀ sur filtres a été réalisé à l'aide :

- de préleveurs haut-débit (HVS, 30m³/h) de type DA80 (Digitel) sur les stations Renéville, Lamentin et Brume ;
- de préleveurs bas-débit (LVS, 2,3m³/h) de type SEQ (Leckel) sur les stations Bellevue et Sainte-Luce.

Pour les besoins de l'étude, le LCSQA a mis 2 préleveurs DA80 et 1 préleveur Leckel à disposition de Madinair (les 2 autres préleveurs utilisés étant propriété de l'AASQA).

Tableau 2 : Stations de Madinair équipées d'un préleveur de particules au cours de l'année 2018 pour analyses chimiques des PM₁₀

Site	Type de Préleveur	Dates de début et de fin des prélèvements	Mesures automatiques de PM colocalisées (cf. 3.2)
Renéville	DA80 (HVS)	28/12/2017 - 17/12/2018	PM ₁₀
Lamentin	DA80 (HVS)	07/02/2018 - 24/12/2018	PM ₁₀ , Black Carbon
Bellevue	Leckel (LVS)	28/12/2017 - 24/12/2018	-
Ste-Luce	Leckel (LVS)	12/01/2018 - 24/12/2018	PM ₁₀ , PM _{2.5}
Brume	DA80 (HVS)	03/01/2018 - 24/12/2018	PM ₁₀ , non volatil

L'ensemble des prélèvements ont été réalisés sur des filtres constitués de fibres de quartz pur (TissuQuartz, Pall) fournis à l'AASQA par le LCSQA, après traitement thermique à 500°C pendant 24h (afin de minimiser les éventuelles contaminations organiques ayant pu survenir au cours de leur fabrication ou de leur conditionnement).

3.2 Mesures automatiques

Dans le cadre des missions de surveillance réglementaires de Madinainair, les stations Renéville, Lamentin et Sainte Luce assurent la mesure en continu des concentrations de PM₁₀ à l'aide de microbalances équipées du système de compensation de la perte d'espèces semi-volatils (TEOM-FDMS, Thermo), en conformité avec la norme NF EN 16450.⁴

La station Brume est quant à elle équipée d'un TEOM sans FDMS, permettant une maintenance instrumentale simplifiée et moins onéreuse (en particulier pour ce site éloigné des locaux de l'AASQA), tout en assurant néanmoins un suivi adapté des particules non volatiles (telles que les poussières sahariennes et les sels de mer).

La station Bellevue n'est pas équipée d'analyseur automatique des concentrations de PM.

La Figure 3 présente les concentrations en PM₁₀ mesurées sur les 4 sites de cette étude équipées d'un analyseur automatique. On observe des niveaux globalement plus importants de fin mai à début octobre, période de l'année propice à l'import de poussières sahariennes dans les Antilles. Pendant cette période estivale, les écarts de concentrations enregistrés d'un site à l'autre sont moins marqués que le reste de l'année, où la station de proximité automobile (Renéville) présente des niveaux globalement deux fois plus importants que sur les autres sites. De même, si les courbes de concentration se suivent pour l'ensemble des sites en été, leur covariation est moins évidente en début et fin d'année. Ces premières observations soulignent d'ores et déjà le rôle potentiellement important joué par le transport longue distance de mai à septembre, ainsi qu'une influence probablement plus marquée des sources locales en dehors de cette période (en particulier pour Renéville).

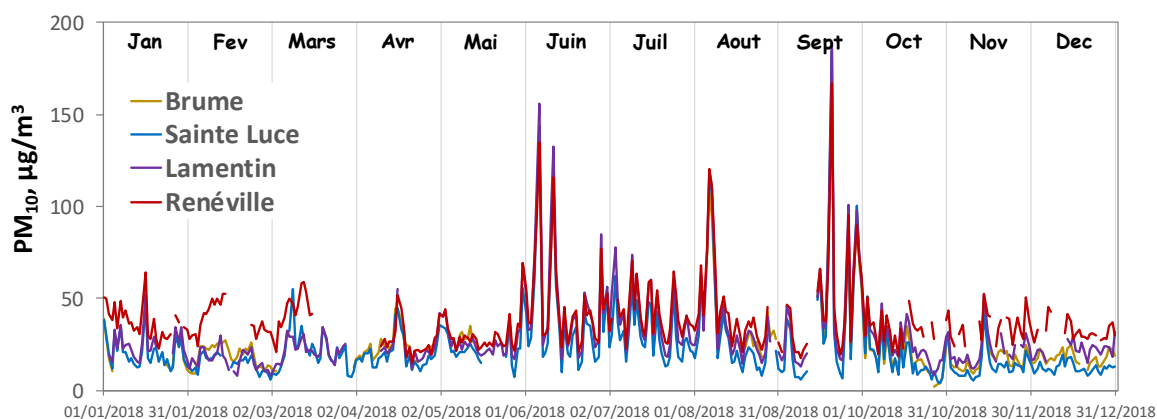


Figure 3 : Mesures PM₁₀ journalières disponibles pour les stations Brume, Sainte Luce, Lamentin et Renéville en 2018.

Il est également intéressant de noter des niveaux de PM₁₀ globalement similaires, voire parfois plus faibles, sur la station Sainte Luce par rapport à Brume. Ce phénomène suggère que les mesures réalisées à Sainte Luce témoignent également des concentrations proches des niveaux de fond à l'échelle régionale. En outre, la concentration moyenne annuelle légèrement plus faible à Sainte Luce qu'à Brume (23,7 µg/m³ contre 25,1 µg/m³) est

⁴ Norme NF EN 16450 : « Air ambiant - Systèmes automatisés de mesurage de la concentration de matière particulaire (PM₁₀ ; PM_{2,5}) ».

principalement liée à une moindre exposition aux embruns marins (cf. section 4.1). Néanmoins, les niveaux de concentrations globalement équivalents sur ces deux sites, alors que seul le TEOM de Sainte Luce est équipé du système FDMS, tendent également à prouver le faible rôle joué par les espèces semi-volatiles sur les niveaux de fond régional de PM₁₀ pour des températures relativement élevées (globalement comprises entre 25 et 30°C en moyennes mensuelles) tout au long de l'année.

Par ailleurs, un aethalomètre multi-longueurs d'onde de type AE33 (*Magee Scientific*), loué par le LCSQA, a été installé par le constructeur sur la station Lamentin en novembre 2017. Cet analyseur permet notamment le suivi du Black Carbon (eBC), en tant qu'indicateur des émissions de combustion, principalement anthropiques (e.g., transport routier, chauffage résidentiel, activités industrielles, etc.). Cet appareil était équipé d'un sécheur, permettant d'éviter les artefacts pouvant être liés à la condensation d'eau dans la cellule de mesure optique. Cet AE33 a été opéré par Madinair à Lamentin pendant une année complète.

3.3 Analyses chimiques au laboratoire

Les données d'analyses chimiques ont pu être validées pour une sélection de 321 filtres journaliers analysés (correspondant à 25% de l'ensemble des filtres prélevés) répartis sur les 5 sites de prélèvement et choisis en fonction i) de leur disponibilité effective, ii) des niveaux de concentrations enregistrées par les systèmes de mesure automatique de PM₁₀ en fonctionnement, et iii) afin de couvrir des périodes de concentrations de fond ou de fortes concentrations et à différentes périodes de l'année en équilibrant les jours ouvrés par rapport aux week-ends (cf. Annexe 3).

Parmi ces analyses chimiques, la mesure des métaux permet d'estimer les concentrations massiques liées à la présence de particules minérales, dont les poussières sahariennes. Ainsi, dans le cadre de cette étude, l'analyse chimique des éléments métalliques (incluant Al, Ca, Fe, K, As, Ba, Cd, Co, Cu, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Sr, V, Zn) a été réalisée par IMT Lille-Douai selon les préconisations de la norme NF EN 14902.⁵ Pour ce faire, les échantillons ont été analysés par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) après minéralisation par digestion au micro-onde en milieu acide.

En parallèle, l'analyse des fractions carbonées (EC/OC) et des espèces inorganiques hydrosolubles (NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) a été réalisée par l'Ineris (selon les préconisations des normes NF EN 16909 et 16913, respectivement)⁶⁻⁷, permettant notamment d'étudier les contributions respectives de l'ensemble des espèces chimiques majeures au sein de la fraction PM₁₀.

Enfin, le lévoglucosan et ses isomères (galactosan et mannosan) ont également été dosés à l'Ineris par chromatographie ionique couplée à un détecteur ampérométrique. Seul le lévoglucosan présentait des concentrations supérieures aux limites de quantification pour

⁵ Norme NF EN 14902 : « Qualité de l'air ambiant - Méthode normalisée pour la mesure du plomb, cadmium, de l'arsenic et du nickel dans la fraction MP10 de la matière particulaire en suspension ».

⁶ Norme NF EN 16909 : « Qualité de l'air ambiant – Mesurage du carbone élémentaire (EC) et du carbone organique (OC) prélevés sur filtres ».

⁷ Norme NF EN 16913 : « Qualité de l'air ambiant - Méthode normalisée pour le mesurage de NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ dans la fraction PM_{2,5} telle que déposée sur des filtres ».

un nombre de filtres suffisamment important pour être utilisées comme marqueur des émissions de combustion de biomasse pour les analyses PMF présentées au Chapitre 7.

4. POUSSIÈRES NATURELLES

4.1 Sels de mer

Comme illustré par la Figure 4, une très bonne corrélation est observée, sur chacun des sites d'étude, entre les deux principaux constituants des sels de mer, i.e., les ions chlorure et sodium, les points s'alignant sur la droite correspondant à leur rapport de concentrations dans l'eau de mer ($\text{Cl}^-/\text{Na}^+ = 1,8$).

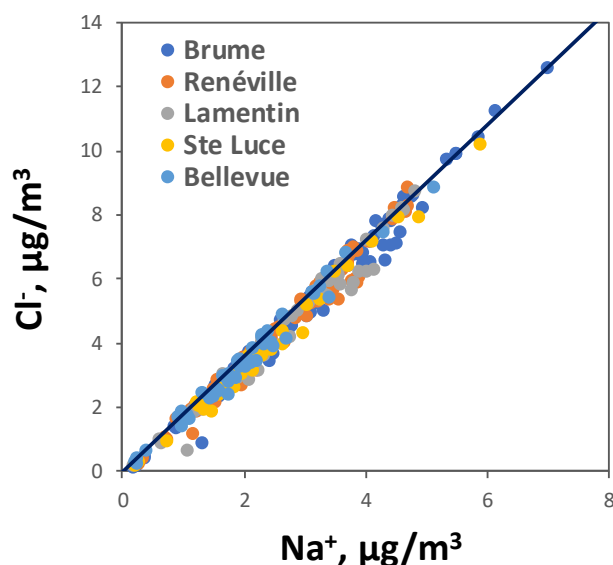


Figure 4 : Corrélation entre Cl^- et Na^+ obtenue pour l'ensemble des filtres analysés. La droite bleue correspond au rapport de concentrations entre ces deux espèces dans l'eau de mer.

Certains filtres présentent des concentrations en Cl^- légèrement inférieures à celles attendues en considérant i) les concentrations de Na^+ mesurées et ii) le rapport Cl^-/Na^+ de l'eau de mer. Ce phénomène étant observé pour des jours ne coïncidant pas avec les fortes concentrations en élément minéraux constitutifs des poussières sahariennes, il est considéré comme étant principalement lié à une déplétion du chlore au sein des sels de mer, plutôt qu'à une éventuelle origine terrigène du sodium. Compte-tenu de ces observations, les concentrations en sels de mer peuvent donc être estimées selon la formule suivante :

$$[\text{sels de mer}] = \text{Na}^+ + \text{Cl}^- + \text{ssSO}_4^{2-} + \text{ssK}^+ + \text{ssCa}^{2+} + \text{ssMg}^{2+}$$

où le sulfate, le potassium, le magnésium et le calcium constituent les autres principales espèces chimiques présentes au sein des sels de mer, leurs concentrations pouvant être estimées à l'aide des concentrations en ion sodium et de leur rapport à cette dernière espèce au sein de l'eau de mer :

- "sea-salt sulfate": $\text{ssSO}_4^{2-} = 0,251 \times \text{Na}^+$
- "sea-salt magnesium": $\text{ssMg}^{2+} = 0,120 \times \text{Na}^+$

- “sea-salt calcium”: $ssCa^{2+} = 0,039 \times Na^+$
- “sea-salt potassium”: $ssK^+ = 0,036 \times Na^+$

La formule d’estimation des sels de mer peut donc être simplifiée selon :

$$[\text{sels de mer}] = 1,45 \times Na^+ + Cl^-$$

L’application de cette formule aux résultats d’analyses chimiques effectuées pour les différents sites indiquent des concentrations en sels de mer globalement plus importantes à Brume que sur les autres stations (Figure 5), ce qui peut s’expliquer par une plus grande exposition aux embruns marins, en raison du positionnement de Brume sur la façade Atlantique.

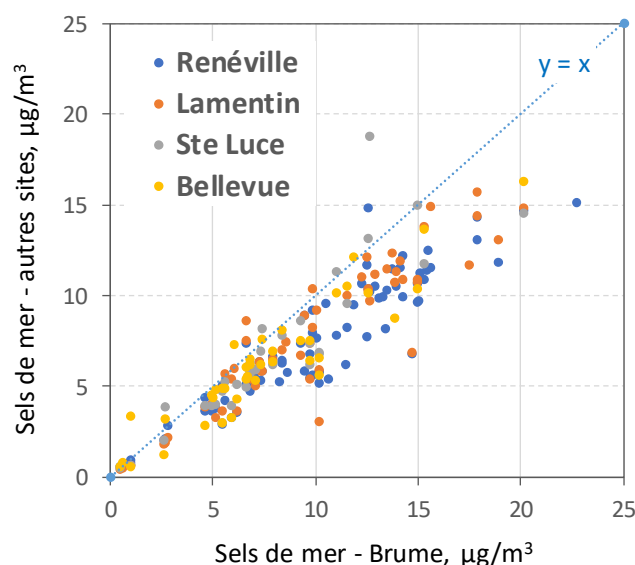


Figure 5 : Comparaison des concentrations de sels de mer estimées pour Renéville, Lamentin, Sainte Luce et Bellevue par rapport à Brume

Les écarts de concentrations varient d’une station à l’autre : de l’ordre de 25% plus faibles à Renéville qu’à Brume, contre 18% à Lamentin et Bellevue, et 10% à Sainte-Luce, toujours par rapport à Brume. Ces différences sont notamment liées à la distance au littoral.

Quoi qu’il en soit, on retiendra des concentrations journalières de sels de mer relativement importantes (généralement comprises entre 5 et 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour l’ensemble des sites d’étude.

4.2 Poussières sahariennes

La méthodologie décrite par le guide européen (EU) pour l’identification des dépassements d’origines naturelles³ préconise de considérer les concentrations de poussières sahariennes comme correspondant à la somme des concentrations d’oxydes d’aluminium sous la forme Al_2O_3 , de silice (SiO_2), d’oxydes de fer sous la forme Fe_2O_3 , et des carbonates de calcium, de magnésium et de potassium, tel que :

$$[\text{poussières sahariennes}] = Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 + CO_3 + K + Ca + Mg$$

en considérant que $SiO_2 = 3 \times Al_2O_3$ et $CO_3 = 1,5 \times Ca + 2,5 \times Mg$.

Cette méthodologie ne tient pas compte du fait que Ca et Mg peuvent également être présents au sein des sels de mer. Dans le cadre de ce rapport, compte-tenu des concentrations relativement importantes de sels de mer (cf. ci-dessus), il a été décidé de remplacer Ca et Mg, dans la formule ci-dessus, par leur composante « non-marine » :

- “non-sea salt Ca”: $nssCa = Ca_{total} - ssCa^{2+} = Ca - 0,039 \times Na+$
- “non-sea salt Mg”: $nssMg = Mg_{total} - ssMg^{2+} = Mg - 0,120 \times Na+$

On observe de très bonnes corrélations entre les différentes espèces chimiques utilisées pour cette estimation des concentrations de poussières sahariennes sur le site Brume (Figure 6), justifiant de leur attribution à une seule et même source.

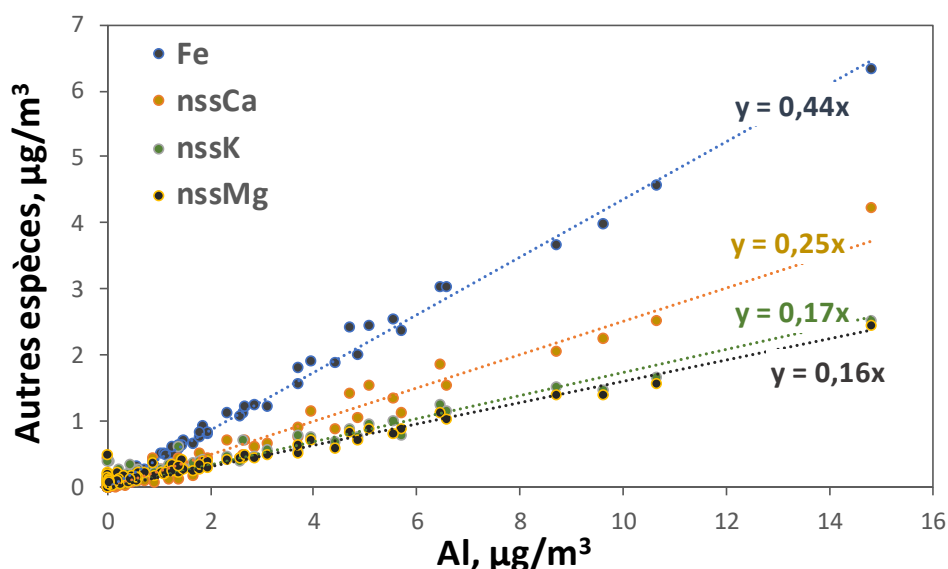


Figure 6 : Corrélation entre Al et les autres espèces chimiques utilisées pour l'estimation des poussières sahariennes sur la station Brume

On observe par ailleurs un bon accord global inter-sites pour l'ensemble de ces espèces chimiques, illustrant l'homogénéité spatiale (à l'échelle régionale) des concentrations de poussières sahariennes lors des principaux épisodes d'import.

Seules les concentrations de fer à Renéville dévient substantiellement des mesures réalisées sur les autres sites pour cette espèce (Figure 7). Cette observation peut notamment s'expliquer par l'influence d'émissions véhiculaires hors-échappement (e.g, abrasion des pneus, freins, ...) sur ce site de proximité automobile.

Ainsi, Al correspond au constituant des particules sahariennes le plus important parmi les espèces chimiques analysées, et ne semble pas être fortement influencé par d'autres sources, même aux faibles concentrations sur les stations urbaines de l'étude (Annexe 4).

Compte-tenu de l'ensemble de ces résultats, il semble raisonnable de proposer une méthodologie simplifiée (mono-traceur) d'estimation des concentrations des poussières sahariennes influençant les niveaux de PM₁₀ en Martinique à partir des concentrations d'Al, selon :

$$[\text{poussières sahariennes}] \approx 9,54 \times Al$$

Cette méthodologie a le mérite de s'affranchir de la possible influence d'autres sources que

les poussières sahariennes sur les concentrations de Fe, Mg, K, et Ca pour les sites (péri-)urbains de Madinainair. Elle est utilisée ci-après pour les stations Renéville, Lamentin, Sainte Luce et Bellevue, lorsque des résultats d'analyses chimiques sont disponibles pour ces sites mais ne le sont pas pour Brume.

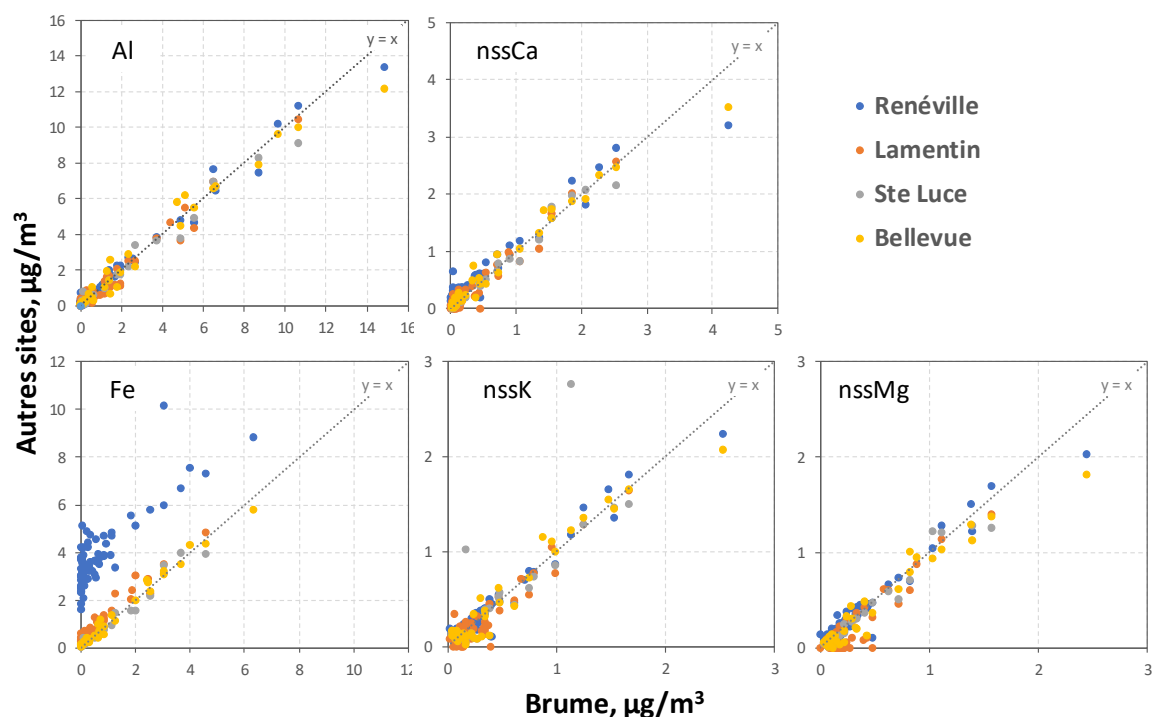


Figure 7 : Comparaisons inter-sites des concentrations des espèces chimiques utilisées pour l'estimation des poussières sahariennes.

4.3 Contributions aux dépassements du seuil journalier

Le tableau 3 synthétise les concentrations de poussières naturelles (sels de mer et/ou poussières sahariennes) calculées pour les jours de dépassements du seuil journalier de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Renéville et Lamentin (les deux sites concernés par un dépassement du seuil journalier plus de 35 fois par an) lorsque des résultats d'analyse chimique sont disponibles pour les filtres prélevés sur ces sites et/ou à Brume. Ces résultats correspondent respectivement à 33 jours (sur 44 dépassements) pour Renéville et 22 jours (sur 36 dépassements) pour Lamentin.

Pour chacun de ces jours, le retranchement des poussières naturelles aux concentrations totales de PM_{10} conduit à des niveaux inférieurs à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces résultats confirment (et renforcent) la conclusion de la note spécifique (Annexe 1) sur le rôle prédominant joué par les poussières naturelles dans la survenue des dépassements du seuil journalier en Martinique en 2018.

Tableau 3 : Concentrations (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de poussières naturelles (sels de mer et poussières sahariennes) et niveaux de « PM10 hors particules naturelles » (= $[\text{PM}_{10} - \text{poussières naturelles}]$), estimées pour les jours de dépassements de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Renéville et Lamentin en 2018.

	Renéville		Lamentin		
	Poussières naturelles	PM10 hors poussières naturelles	Poussières naturelles	PM10 hors poussières naturelles	
16/01/2018	36	28	16/01/2018	25*	27
13/02/2018	13	40	17/04/2018	29*	26
14/02/2018	15	38	01/07/2018	35*	21
13/03/2018	20	38	03/07/2018	17*	35
14/03/2018	19	40	04/07/2018	53*	25
15/03/2018	14	40	19/07/2018	27*	25
17/04/2018	29*	23	25/07/2018	50	10
07/06/2018	131	3	04/08/2018	51	12
11/06/2018	78	3	06/08/2018	58	18
12/06/2018	113	3	07/08/2018	107	13
13/06/2018	55	7	08/08/2018	90*	21
29/06/2018	74	3	09/08/2018	48	10
01/07/2018	35*	18	15/09/2018	39*	12
19/07/2018	27*	28	16/09/2018	46*	20
25/07/2018	41*	24	19/09/2018	62	24
26/07/2018	30	23	20/09/2018	143*	46
04/08/2018	52	16	26/09/2018	75	26
06/08/2018	66	11	28/09/2018	46	19
07/08/2018	111	9	29/09/2018	83*	15
08/08/2018	99	11	30/09/2018	63*	12
09/08/2018	51	15	01/10/2018	49	12
12/08/2018	38	13	14/11/2018	30	22
15/09/2018	39*	15			
16/09/2018	46*	20			
19/09/2018	50*	19			
20/09/2018	145	22			
26/09/2018	83	12			
28/09/2018	47	14			
29/09/2018	85	5			
30/09/2018	67	6			
01/10/2018	51	10			
14/11/2018	30	23			
29/11/2018	13	38			

* poussières sahariennes uniquement

5. ESTIMATION DES CONCENTRATIONS DE POUSSIÈRES SAHARIENNES A L'AIDE DES MESURES AUTOMATIQUES

Selon les préconisations du guide européen *ad hoc*, une fois vérifié que les pics de concentration observés sur la station de fond régional peuvent être attribués à la survenue d'épisodes de poussières sahariennes, il est possible d'utiliser les concentrations de fond enregistrés sur cette station pour détecter et quantifier les concentrations de poussières sahariennes en situation « anormale ».

Par ailleurs, comme mentionné au chapitre 3, la station Sainte Luce enregistre des niveaux de fond en PM₁₀ équivalents à ceux de Brume. Ainsi, il semble opportun d'envisager l'utilisation des mesures automatiques PM₁₀ sur l'une et/ou l'autre de ces stations pour l'estimation systématique des concentrations de poussières sahariennes à l'échelle régionale.

La Figure 8 présente les cycles hebdomadaires moyens des concentrations journalières de PM₁₀ sur chacune de ces stations pour l'année 2018. Ils intègrent l'ensemble des données automatiques de mesure PM₁₀ disponibles, conduisant à l'obtention d'écart-types relativement importants (de 7 à 10 µg/m³ selon le site et le jour de la semaine), liés aux fortes déviations de concentrations lors des épisodes de poussières sahariennes. En effet, comme les analyses chimiques n'ont pu être réalisées pour chaque jour de l'année, il n'a pas été possible de procéder à l'exclusion systématique des jours correspondant à une forte influence des poussières sahariennes. Néanmoins, les valeurs journalières moyennes varient dans une plage de concentrations assez étroite : entre 17 et 20 µg/m³ à Renéville, et entre 15 et 19 µg/m³ à Sainte Luce.

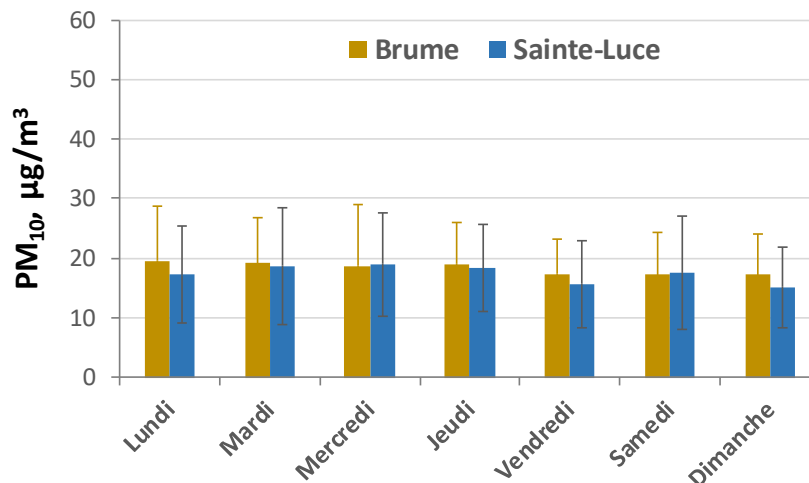


Figure 8 : Cycles hebdomadaires moyens des concentrations journalières de PM₁₀ à Brume et Sainte Luce en PM₁₀.

Il apparaît donc raisonnable de considérer le seuil de 20 µg/m³ comme la concentration journalière PM₁₀ maximum pour les stations Brume et Sainte Luce en situation de fond (i.e., hors épisode de poussières sahariennes). Cette hypothèse est confirmée par la comparaison entre les mesures automatiques PM₁₀ et les concentrations de poussières sahariennes obtenues pour Brume et Sainte Luce (Figure 9a), indiquant des niveaux de PM₁₀ globalement équivalents à la somme [*poussières sahariennes + 20 µg/m³*] lors des

épisodes de brumes de sables.

Ainsi, il est proposé ici de retrancher $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à la valeur minimale des concentrations journalières en PM_{10} à Brume et Sainte Luce pour estimer de manière systématique les niveaux de poussières sahariennes influençant les dépassements de seuil journalier en Martinique, i.e., typiquement pour Renéville :

$$[\text{Poussières sahariennes}]_{\text{Renéville}} \approx \text{Min.} ([\text{PM}_{10}]_{\text{Brume}} ; [\text{PM}_{10}]_{\text{Sainte Luce}}) - 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

La Figure 9b illustre la pertinence de cette méthodologie, par comparaison aux concentrations pour les données recueillies en 2018 pour les stations Renéville et Lamentin.

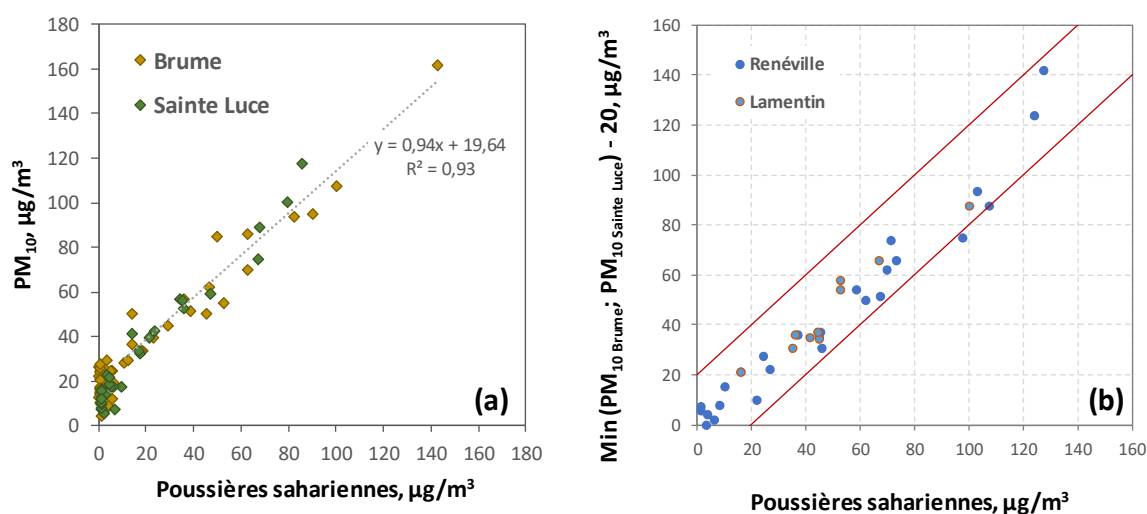


Figure 9 : A gauche (a) : PM_{10} vs. poussières sahariennes à Brume et Sainte Luce. La corrélation est calculée pour les concentrations de poussières sahariennes supérieures à $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A droite (b) : Cohérence entre la méthodologie proposée pour l'estimation systématique des concentrations de poussières sahariennes et les concentrations de poussières sahariennes effectivement mesurées lors des dépassements de seuil journalier à Renéville et Lamentin en 2018

N.B. : Pour une application sur d'autres années que 2018, et préalablement à l'application de cette méthodologie de soustraction des poussières sahariennes au dépassement de seuil journalier, il conviendra de vérifier et de documenter l'occurrence effective d'un épisode saharien, à l'aide d'observations satellites et/ou de produits de sortie de systèmes de modélisation (e.g., Prev'air).

6. VARIATIONS SPATIALES ET TEMPORELLES DES ESPECES CHIMIQUES MAJEURES

Outre les sels de mer et les poussières minérales (dont poussières sahariennes), les particules atmosphériques sont principalement constituées de composés carbonés (carbone suie et matière organique) et d'espèces inorganiques secondaires (dont le nitrate d'ammonium et le sulfate d'ammonium).

Le carbone suie est directement analysé sur filtre sous forme de carbone élémentaire (EC), alors que les concentrations de matière organique (OM) sont estimées par application d'un facteur multiplicatif aux concentrations de carbone organique (OC) afin de tenir compte de la présence d'hétéroatomes (H, O, N, ...) non quantifiés par analyse thermo-optique. Ce facteur multiplicatif est pris ici comme égal à 1,8, en tant que valeur moyenne entre d'une part, les aérosols organiques les moins oxydés généralement issus de la combustion d'hydrocarbures ($OM/OC \approx 1,4$) et d'autre part, les aérosols organiques très oxydés et/ou issus des émissions biogéniques primaires ($OM/OC \approx 2,2$).⁸

Les espèces constitutives des aérosols inorganiques secondaires (e.g., nitrate, sulfate, ammonium, ...) sont quantifiées séparément par chromatographie ionique. Parmi ces dernières, le sulfate peut également être présent au sein des sels de mer (cf. chapitre 4). La formule suivante est appliquée afin de ne pas considérer deux fois sa fraction marine :

$$\text{"non-sea salt sulfate"}: nssSO_4^{2-} = SO_4^{2-}_{\text{total}} - ssSO_4^{2-} = SO_4^{2-} - 0,251 \times Na^+$$

La Figure 10 synthétise les résultats d'analyses chimiques obtenus pour les 3 principaux sites d'étude (Brume, Lamentin et Renéville) à différentes périodes de l'année 2018.

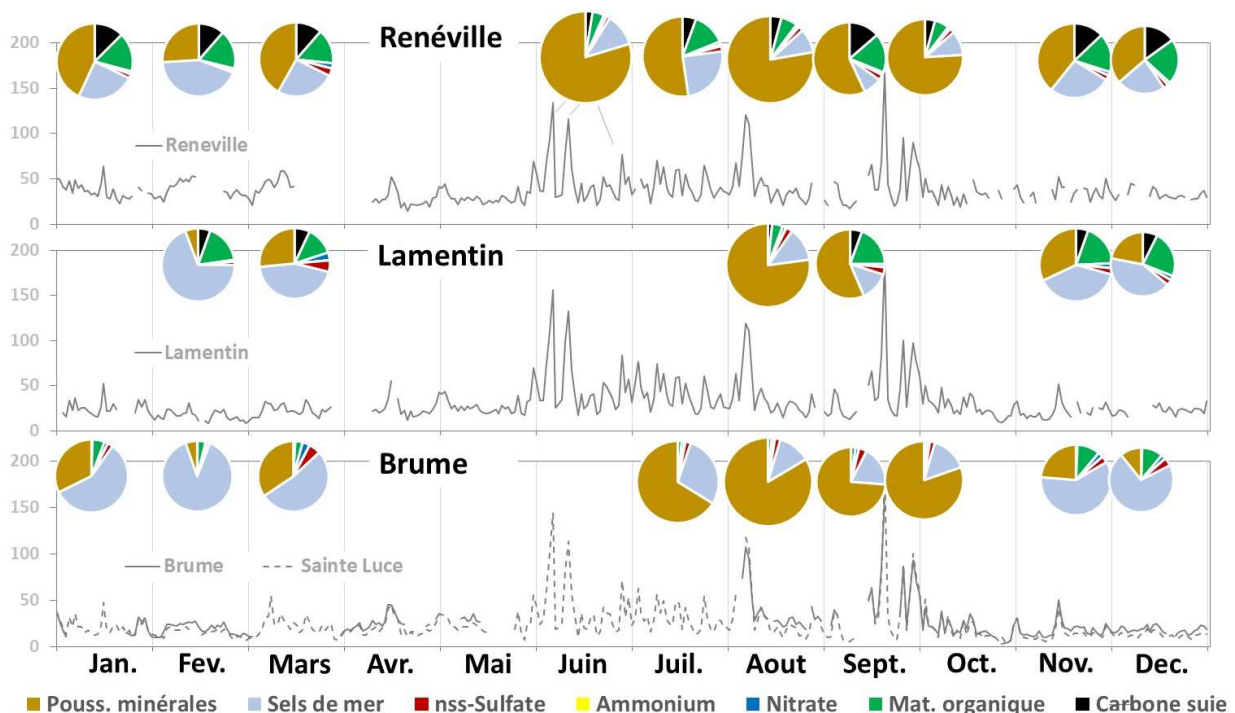


Figure 10 : Contributions relatives des espèces chimiques majeures à différentes périodes de l'année 2018 à Renéville, Lamentin et Brume.

⁸ Aiken et al. O/C and OM/OC Ratios of Primary, Secondary, and Ambient Organic Aerosols with High-Resolution Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometry, Environ. Sci. Technol., 12, 4478-4485, 2008

Ces observations confirment, en premier lieu, l'influence prépondérante des poussières naturelles sur les concentrations de PM₁₀ tout au long de l'année en Martinique. Ci-après, les Figures 11, 12 et 13 se focalisent, pour l'ensemble des 5 sites d'étude, sur 3 périodes de l'année fortement, moins fortement et faiblement impactées par les poussières sahariennes (i.e., 4-13 août, 4-11 septembre, et 28 novembre - 7 décembre).

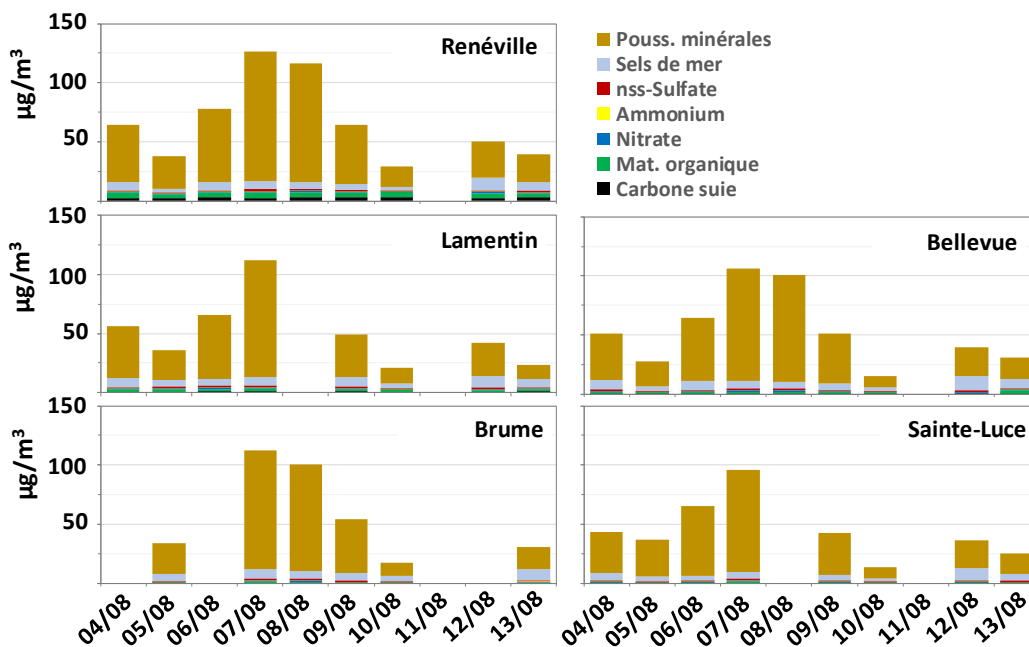


Figure 11 : Concentrations journalières des espèces chimiques majeures du 4 au 13 août 2018 (période fortement impactée par les poussières sahariennes)

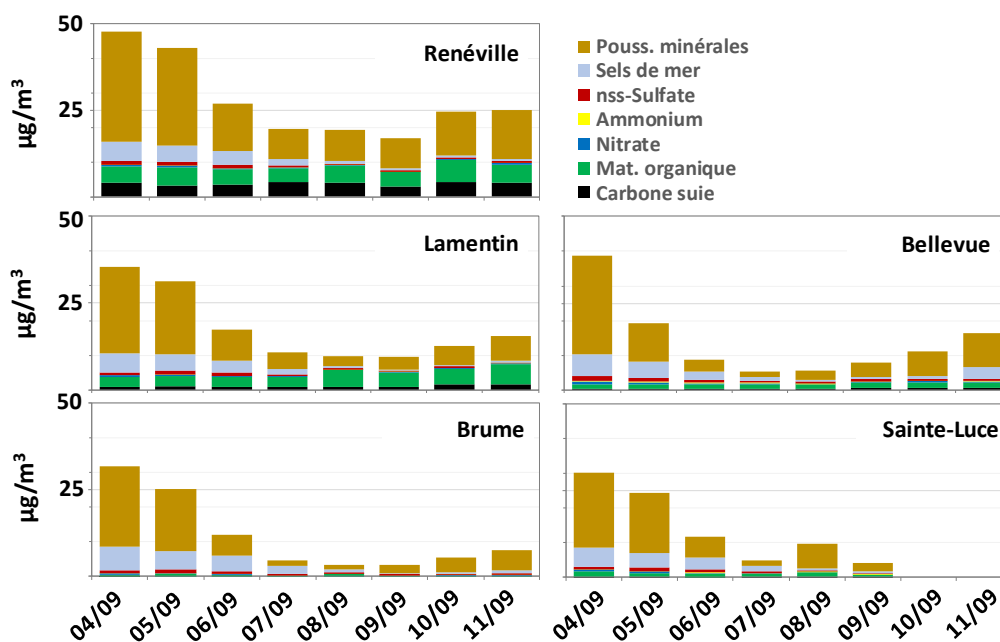


Figure 12 : Concentrations journalières des espèces chimiques majeures du 4 au 11 septembre 2018 (période moyennement impactée par les poussières sahariennes)

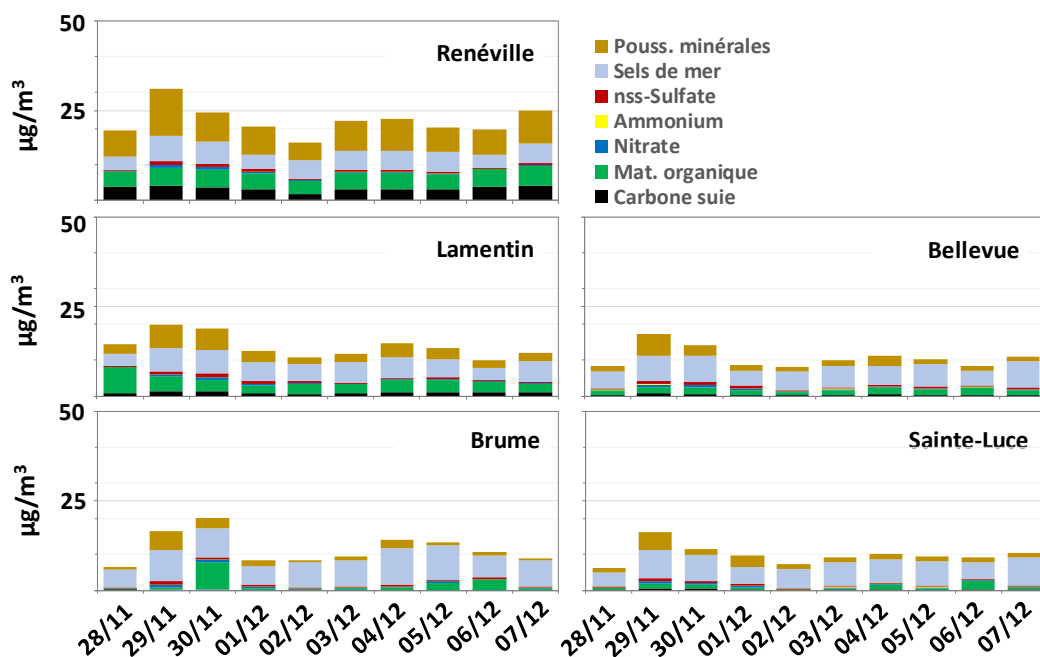


Figure 13 : Concentrations journalières des espèces chimiques majeures du 28 novembre au 7 décembre 2018 (période faiblement impactée par les poussières sahariennes)

Après les poussières naturelles, la deuxième grande famille d'espèces chimiques impactant les concentrations de PM₁₀ en Martinique sont donc les particules carbonées (carbone suie et matière organique), en particulier sur les sites de proximité automobile et de fond urbain (i.e., Renéville et Lamentin). Les mesures par Aethalomètre ont permis de suivre, tout au long de l'étude, les concentrations de carbone suie (eBC), composé principalement issu des émissions primaires de combustion (e.g., échappement automobile, transport aérien et/ou maritime, combustion de biomasse, et activités industrielles), à Lamentin.

Comme illustré par la Figure 14, ce composé présente des concentrations mensuelles moyennes relativement stables, suggérant son émission par une (ou plusieurs) source(s) d'intensité globalement constante tout au long de l'année.

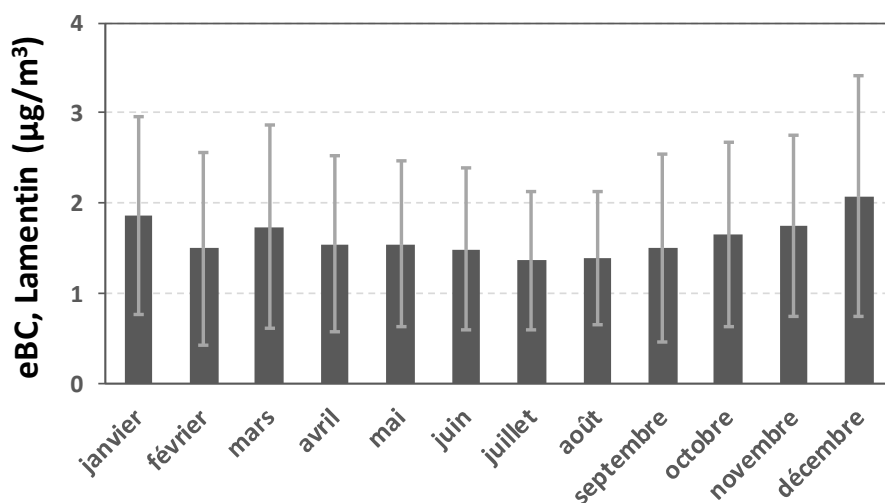


Figure 14 : variations mensuelles des concentrations de carbone suie à Lamentin

Les moyennes mensuelles légèrement plus faibles entre juin et septembre par rapport au reste de l'année (typiquement, 1,5 vs. 1,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) peuvent notamment s'expliquer par le fait que la période estivale correspond à la saison des pluies, favorisant le dépôt des polluants atmosphériques.

Par ailleurs, comme illustré par la Figure 15, les cycles hebdomadaires et journaliers moyens des concentrations de carbone suie (calculés pour l'ensemble de la période d'étude) présentent des maxima i) lors des jours ouvrés (par opposition aux week-ends), et ii) concomittant aux pics de trafic automobile (en particulier lors des déplacements matinaux domicile – travail). Ces observations indiquent une influence majeure du transport routier sur les concentrations de particules carbonées primaires.

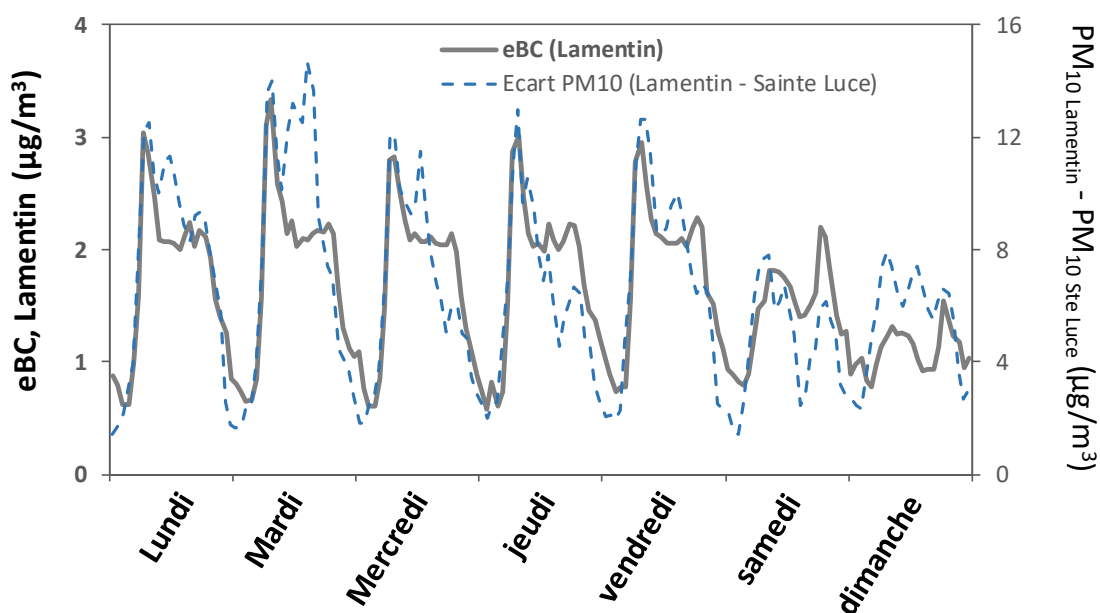


Figure 15 : Cycles journaliers et hebdomadaires des concentrations de carbone suie (eBC) au Lamentin et des écarts de concentrations PM_{10} entre Lamentin et Sainte Luce

Il est également intéressant de noter que l'écart de concentrations PM_{10} entre Lamentin et Sainte Luce suit globalement les concentrations de carbone suie mesurées au Lamentin. Ainsi, l'incrément de concentration en PM_{10} par rapport à Sainte Luce, dû aux émissions locales à Lamentin, semble être principalement lié aux émissions primaires issues du transport routier. Le carbone suie représente globalement $\frac{1}{4}$ de cet incrément, ce qui est pleinement compatible avec sa contribution à l'ensemble des émissions primaires véhiculaires [à l'échappement + hors échappement] généralement observée en milieu urbain influencé par le transport routier.⁹⁻¹⁰

⁹ Variabilité spatiale des concentrations de PM_{10} autour de sites de proximité automobile : mise en œuvre et exploitation de campagnes de mesure (M. Beauchamp, O. Favez & L. Malherbe). Réf Ineris: DRC-11-118225-13905A. https://www.lcsqa.org/system/files/drc-11-118225-13905a-lcsqa2011-variabilite_spatiale_concentrations_de_pm10_sites_auto.pdf

¹⁰ Amato et al. Traffic induced particle resuspension in Paris: Emission factor and source contributions. Atmospheric Environment, 129, 114-124, 2016. doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.01.022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231016300309>

7. ANALYSES PMF DES SOURCES DE PM₁₀ A RENEVILLE ET LAMENTIN

Afin de mieux évaluer la contribution aux PM₁₀ de l'ensemble des sources primaires de particules, l'outil statistique *Positive Matrix Factorization* (PMF) a été utilisé pour l'analyse des données recueillies pour les stations Lamentin et Renéville.

La PMF est utilisée pour une meilleure compréhension des sources de PM dans le cadre des travaux du programme CARA depuis 2012^{11,12}. Sa mise en œuvre s'appuie sur une analyse factorielle des données obtenues par analyse chimique des échantillons, en permettant la résolution d'un système matriciel d'équations de type :

$$x_{i,j} = \sum_p g_{i,p} f_{p,j} + e_{i,j}$$

Pouvant également s'écrire sous la forme :

$$X = G \times F + E$$

où :

- $x_{i,j}$ correspond à la concentration de l'espèce chimique i au temps j (matrice X)
- p représente les différents facteurs, pouvant chacun être associé in fine à une famille de sources ou de mécanismes de formation secondaire
- $g_{i,p}$ et $f_{p,j}$ représentent les éléments des matrices G et F , correspondant respectivement aux séries temporelles et aux concentrations chimiques, pour chaque facteur p
- et $e_{i,j}$ représente les éléments de la matrice E , correspondant aux concentrations résiduelles non modélisées correctement.

Le principe de base fondamental de la PMF consiste à minimiser les éléments constitutifs de la matrice E , en explorant de manière aussi exhaustive que possible l'infinité de solutions correspondant au système d'équations mentionné ci-dessus. Une matrice contenant les incertitudes individuelles de chaque élément de la matrice X est également utilisée, pondérant la matrice E et évitant de forcer le modèle à minimiser les concentrations résiduelles d'espèces chimiques présentant en réalité de fortes incertitudes de mesures.

Le choix final de la solution retenue s'effectue notamment à l'aide de règles statistiques mais également au regard de la plausibilité physique des différentes solutions. Ce choix est laissé à la libre appréciation de l'opérateur, et repose ainsi sur une certaine part de subjectivité.

Dans le cadre de cette étude, la PMF a été appliquée successivement, et de manière indépendante, aux jeux de données de spéciation chimique correspondant aux stations Lamentin (63 échantillons) et Renéville (89 échantillons). L'utilisation d'une variété d'espèces chimiques aussi large que possible est à privilégier pour optimiser l'identification de l'ensemble des facteurs de sources contribuant significativement aux PM₁₀. Néanmoins,

¹¹ Mise en œuvre d'un « modèle récepteur » de type PMF (« Positive Matrix Factorization ») pour l'identification et la quantification des principales sources de PM₁₀ sur le site urbain de fond de Lens (Atmo Nord pas de Calais) (O. Favez, L. Alleman, A. Waked & B. Golly). Réf Ineris : DRC-12-126716-14225A. <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/2012/ineris/mise-oeuvre-modele-recepteur-type-pmf-positive-matrix-factorization-identificati>

¹² Synthèse des travaux 2013 du programme CARA (O. Favez). Réf Ineris: DRC-13-136071-14096A. <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/2013/ineris/synthese-travaux-2013-programme-cara>

pour une utilisation de l'outil PMF, il est préférable de respecter un ratio minimum d'environ 3 entre le nombre d'échantillons et le nombre d'espèces chimiques prises en compte.¹³ Ainsi, un moindre nombre de variables a été sélectionné pour Lamentin (i.e., 22, contre 32 pour Renéville).

Outre les concentrations de PM₁₀, utilisées comme « variables totales » (i.e., paramètre cible à atteindre pour la somme des différents facteurs de source identifiés, cf. Annexe 5), ces espèces chimiques sont :

- Pour Renéville : OC, EC, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, K⁺, As, Ba, Cd, Co, Cs, Cu, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sn, Sr, Ti, Zn, Cr, V, Al, Ca, Fe, Mg et lévoglucosan ;
- Pour Lamentin : OC, EC, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, K⁺, As, Ba, Cd, Cu, Ni, Pb, Rb, Sb, Ti, Zn, V, Al, Ca, Fe, Mg et lévoglucosan.

L'outil PMF 5.0, développé et diffusé librement par l'US EPA¹⁴, a été utilisé ici.

La Figure 16 présente la répartition des différentes espèces chimiques au sein des facteurs optimaux issus de cette analyse PMF.

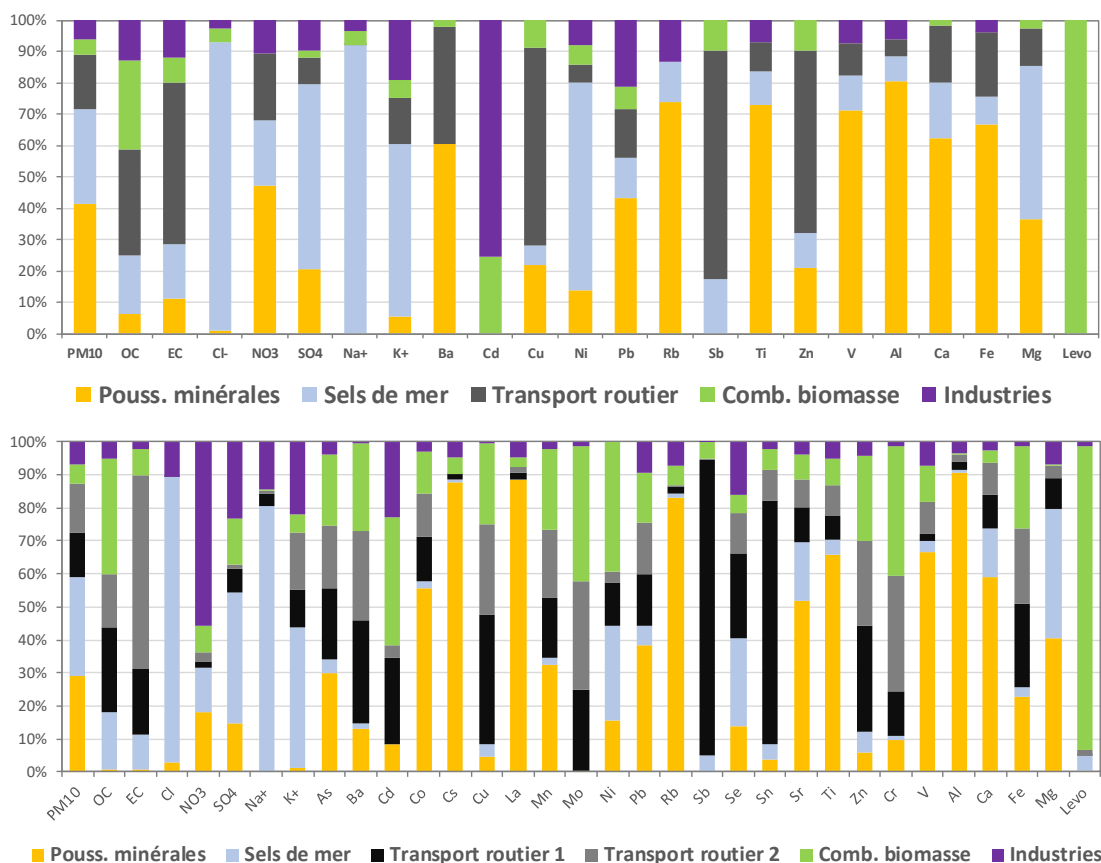


Figure 16 : Répartition des différentes espèces chimiques au sein des facteurs de source déterminés par analyse PMF des jeux de données de spéciation chimique obtenus pour les stations Lamentin (en haut) et Renéville (en bas).

¹³ European Guide on Source Apportionment with Receptor Models – revised version. EUR 29816, Publications Office of the European Union, 2019 Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-09001-4, doi: 10.2760/439106, JRC117306. <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/european-guide-air-pollution-source-apportionment-receptor-models>

¹⁴ <https://www.epa.gov/air-research/positive-matrix-factorization-model-environmental-data-analyses>

Ainsi, les principales sources mises en évidence par ces analyses PMF sont :

- Les deux familles de particules primaires principalement d'origine naturelle, tel que décrit dans les premiers chapitres de ce rapport (i.e., sels de mer et poussières minérales). Outre leurs composants primitifs (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , etc.), les sels de mer semblent associés à quelques espèces chimiques classiquement attribuées à des émissions anthropiques, telles que EC et Ni. Ce phénomène peut résulter du mélange entre embruns marin et résidus de combustion de fioul lourd, provenant potentiellement des émissions par le secteur du transport maritime. Pour les poussières minérales, il est à noter leur association avec des espèces inorganiques secondaires, et en particulier le nitrate, illustrant l'occurrence de mécanismes d'adsorption d'espèces gazeuses (e.g., issus de l'oxydation des NO_x) par réactions acido-basiques en surface des particules minérales.
- Les émissions véhiculaires, incluant les émissions à l'échappement (riches en particules carbonées), et les émissions hors-échappement (riches en Ba, Cu, Sb, Sn, Zn et Cr), notamment issues de l'abrasion des pneus et des freins. De manière notable pour la station Renéville, ces émissions véhiculaires correspondent à deux profils chimiques distincts : le premier - appelé « Transport routier 1 » sur les Figures 16 et 17 - présentant un ratio EC/OC relativement faible (0,5) et comprenant la quasi-totalité de l'antimoine et de l'étain mesurés sur cette station, l'autre (« Transport routier 2 ») présentant un ratio EC/OC élevé (2,6) et fortement émetteur de chrome. Ces profils suggèrent une éventuelle différenciation entre une famille de véhicules globalement à motorisation essence (assez peu émettrice de carbone suie) et/ou équipés de plaquettes de freins garnis d'éléments metalloïdes, et une autre famille de véhicules à motorisation diesel et/ou équipés de disques de freins en fonte ou acier (contenant notamment du graphite, pouvant être quantifié dans la fraction EC). Ces deux types d'émissions véhiculaires pourraient ainsi être attribués, d'un côté, majoritairement aux véhicules légers, et de l'autre, majoritairement aux poids lourds. Néanmoins, aucun élément de preuve définitif n'a pu être apporté à cette hypothèse au moment de la rédaction du présent rapport.
- Les émissions par combustion de biomasse, caractérisées par leur faible rapport EC/OC (environ 0,1) et la présence de la quasi-totalité du lévoglucosan au sein de leur profil chimique. Ces émissions sont également « enrichies » en éléments métalliques, ces derniers ayant tendance à s'accumuler dans les végétaux en croissance et pouvant ensuite être réémis dans l'atmosphère lors des processus de combustion.
- Un dernier facteur attribué principalement aux émissions industrielles, en raison notamment de son influence sur les concentrations de cadmium, en particulier à la station Lamentin. Parmi les sources d'émissions industrielles de cadmium potentielles en Martinique, on peut notamment citer l'incinération des déchets ménagers ainsi que la production de matériaux de construction.¹⁵ Des sources industrielles semblent également contribuer de manière non négligeable aux (faibles) concentrations d'espèces inorganiques secondaires (nitrate et sulfate).

¹⁵ <https://www.citepa.org/fr/2019-cd/>

Enfin, comme illustré par la Figure 17, le transport routier suivi des activités industrielles semblent représenter les principaux contributeurs anthropiques aux niveaux de PM₁₀ enregistrés sur les stations Lamentin et Renéville.

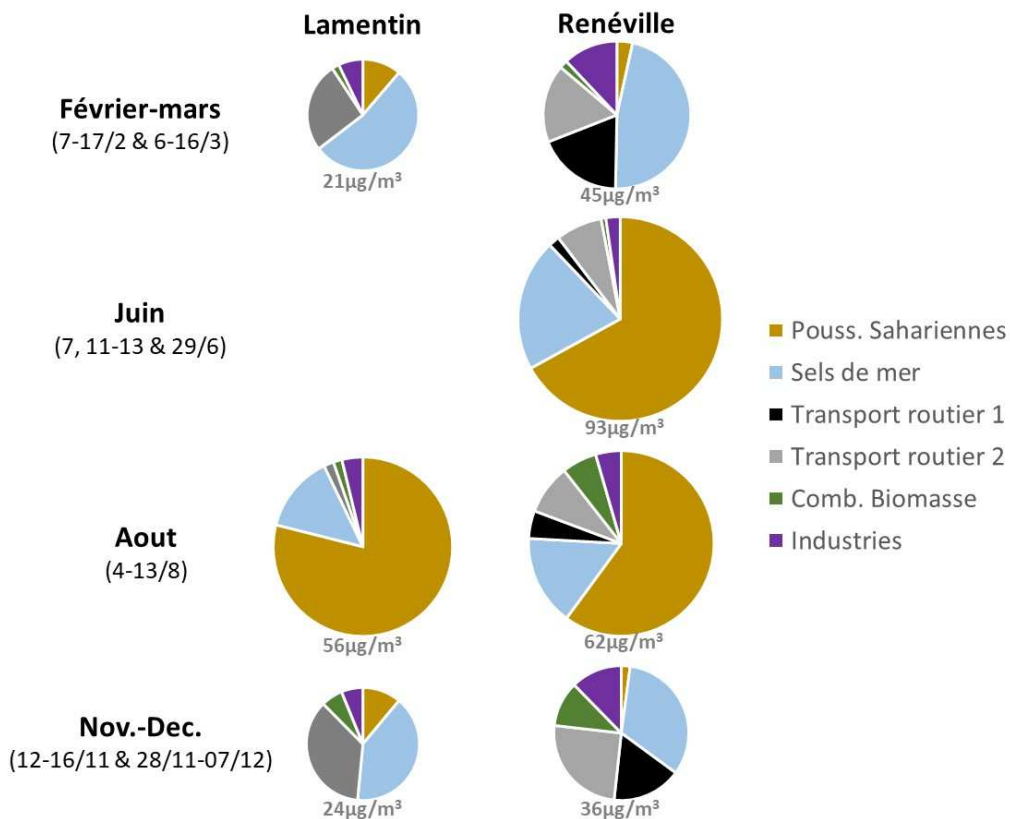


Figure 17: Contributions relatives des principales sources de PM₁₀ à différentes périodes de l'année 2018, telles qu'identifiées par analyse PMF, pour les stations Lamentin et Renéville. Le facteur de source associé au transport routier (représenté en gris foncé pour la station Lamentin) est différencié selon deux sous-facteurs (représentés en gris clair et en noir) pour la station Renéville.

8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude confirment en premier lieu l'influence prépondérante des poussières naturelles (i.e., sels de mer tout au long de l'année, et poussières sahariennes en période estivale) sur les niveaux de PM₁₀ enregistrés en Martinique. En particulier, les poussières sahariennes apparaissent comme le principal contributeur aux dépassements du seuil journalier de 50 µg/m³ sur les stations Renéville et Lamentin ne respectant pas la valeur limite annuelle associée à ces dépassements journaliers en 2018.

La station de fond régional (Brume), mais également celle de Sainte Luce, peuvent dorénavant être utilisées pour une estimation systématique des contributions des poussières sahariennes sur l'ensemble des stations de Madininair, sous réserve d'une vérification simultanée de l'occurrence effective d'un épisode saharien, à l'aide notamment d'observations satellites et/ou de résultats de modélisation. L'implantation d'un analyseur automatique de métaux (e.g., basé sur la technique de fluorescence X) pourrait également permettre un suivi en continu de la composition chimique des poussières telluriques affectant la qualité de l'air en Martinique.

Par ailleurs, les émissions véhiculaires de particules primaires (à l'échappement et hors échappement) semblent être les principaux contributeurs anthropiques aux PM₁₀, sur le site de proximité automobile (Renéville) comme en fond urbain (Lamentin). L'évaluation à moyen/long terme de plans d'actions ciblés sur ce secteur d'activité pourrait bénéficier de l'utilisation d'un analyseur automatique de carbone suie.

Une meilleure identification et quantification des autres sources d'émissions liées aux activités humaines (et en particulier des émissions industrielles) nécessiterait la mise en place de campagnes de mesure spécifiques, faisant appel à l'analyse chimique de marqueurs de source appropriés (notamment au sein de la fraction organique) et/ou à l'utilisation d'un analyseur automatique de métaux (tel que celui mentionné ci-dessus).

L'ensemble des données de spéciation chimique obtenues dans le cadre de cette étude ont été mises à la disposition de l'équipe de modélisateurs du LCSQA afin d'aider à la validation (et, si nécessaire, à l'optimisation) du système de prévision de la qualité de l'air dans les Antilles. Ainsi, un exercice de comparaison mesures / modèles, incluant les concentrations des espèces chimiques majeures présentées dans ce rapport, est prévu au programme de travail du LCSQA en 2020, faisant suite à la qualification des prévisions des concentrations totales de PM₁₀ (programme 2019). Enfin, il est également à noter la publication d'un rapport LCSQA sur l'étude des tendances au cours de la dernière décennie des concentrations de PM en Martinique, en parallèle à la diffusion du présent rapport.

9. LISTE DES ANNEXES

Annexes	Titres
Annexe 1	Note technique produite en appui au BQA dans le cadre du rapportage européen, en vue de la soustraction des concentrations de poussières sahariennes aux dépassements du seuil journalier de 50 µg/m ³ enregistrés par Madinair à Renéville et Lamentin en 2018
Annexe 2	Liste des dépassements du seuil journalier de 50 µg/m ³ enregistrés par Madinair à Renéville et Lamentin en 2018
Annexe 3	Détails des filtres analysés et validés dans le cadre de l'étude
Annexe 4	Comparaison inter-sites des concentrations en Aluminium au sein des PM ₁₀ , pour les concentrations d'Al inférieures à 3 µg/m ³
Annexe 5	Comparaison de la somme des facteurs de sources PMF aux concentrations PM ₁₀ enregistrés sur les stations Renéville et Lamentin

ANNEXES

**Laboratoire Central de Surveillance
de la Qualité de l'Air**

Note LCSQA
Ref. INERIS-DRC-19-181170-06699B

**DETERMINATION DE LA CONTRIBUTION DES POUSSIÈRES NATURELLES LORS DE
DEPASSEMENTS DU SEUIL JOURNALIER FIXE POUR LES PM_{10} SUR LES STATIONS
*RENEVILLE ET LAMENTIN DE MADININAIR (MARTINIQUE) EN 2018***

**Olivier FAVEZ, Robin AUJAY et Laurent LETINOIS (LCSQA/Ineris)
Laurent ALLEMAN (LCSQA/IMT Lille-Douai)**

Résumé

La présente note synthétise les résultats de spéciation chimique des particules pour l'estimation des contributions de poussières sahariennes sur les niveaux de PM₁₀ en Martinique en 2018. Il focalise en particulier sur deux stations de mesure de Madinair (Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air en Martinique) ayant présenté des dépassements de la valeur limite journalière pour les PM₁₀ (concentrations journalières > 50 µg/m³ plus de 35 jours par an) : Renéville avec 44 dépassements, et Lamentin avec 36 dépassements.

L'ensemble des résultats obtenus confirment le rôle prépondérant joué par les particules naturelles dans la survenue de ces dépassements.

Pour Renéville, les concentrations de fond régional en poussières sahariennes sont disponibles pour 25 jours de dépassements et la soustraction de la contribution des poussières sahariennes conduit à des concentrations journalières corrigées inférieures à 50µg/m³, hormis pour 2 jours, ramenant le nombre de dépassements du seuil journalier à 21 pour l'année 2018 sur ce site.

Pour Lamentin, les concentrations de fond régional en poussières sahariennes sont disponibles pour 20 jours de dépassements et la soustraction de la contribution des poussières sahariennes conduit à des concentrations journalières corrigées inférieures à 50µg/m³ pour tous les jours étudiés, ramenant le nombre de dépassements du seuil journalier à 16 pour l'année 2018 sur ce site.

Enfin, compte-tenu de leur période d'occurrence (juin-juillet-août) et de leur homogénéité spatiale, il est raisonnable d'estimer que la plupart des dépassements journaliers n'ayant pu être documentés ici sont également très fortement impactés par les poussières sahariennes.

Introduction

Des dépassements de la valeur limite journalière pour les PM₁₀ (concentrations journalières > 50 µg/m³ plus de 35 jours par an) sont observés chaque année depuis 2005 (hormis 2008) en Martinique, région concernée par le contentieux européen.

Dans la continuité de précédents travaux du programme CARA, une étude coordonnée par le LCSQA/INERIS a été mise en place afin de documenter les principales sources de particules fines en Martinique au cours de l'année 2018, en collaboration avec Madinair. L'un des principaux objectifs de cette étude était de quantifier, à l'aide d'une méthodologie basée sur la spéciation chimique et conforme aux préconisations de la Commission Européenne, l'influence des particules d'origines naturelles, et tout particulièrement des poussières sahariennes, dans la survenue de dépassements de valeurs limites observés en Martinique.

La présente note rend compte de résultats obtenus en réponse à cet objectif.

L'ensemble des normes citées dans cette note, et utilisées pour la conduite de cette étude, sont disponibles auprès de l'AFNOR.

Méthodologies

Prélèvements sur filtres

Afin de pouvoir appliquer la méthode EU pour l'estimation de l'impact des poussières sahariennes, il convient de choisir un site de fond rural pour lequel une augmentation « anormale » des concentrations de PM (i.e. en dehors du champ de variation, relativement étroit, caractéristique d'un site de fond éloigné de toute source) peut être directement reliée à un épisode de poussière saharienne et considéré comme représentatif d'une zone géographique donnée. Les concentrations de poussières exogènes, estimées sur le site de fond régional, peuvent ensuite être retranchées aux concentrations totales mesurées sur l'ensemble des stations de cette zone géographique. Le choix du site de Brume (station n° FR-39019, à l'est de l'île) comme site de fond régional a fait l'objet d'une note intitulée « Protocole de validation de la méthodologie pour évaluer la contribution des particules désertiques aux dépassements en particules fines » produite par Madinair en août 2016.

Outre ce site de fond régional, 4 autres stations de mesure ont été équipées de préleveurs : « Renéville – FR-39011 » (site urbain sous influence trafic), « Sainte Luce – FR-39014 », « Lycée Bellevue- FR-39017 » et « Lamentin- FR-39009 » (sites (péri-)urbains de fond). La Figure 1 présente la localisation de ces sites au sein du réseau de stations de Madinair.

Les stations Brume, Renéville et Lamentin ont été équipées de préleveurs haut-débits de type DA80 (Digitel). Les stations Sainte-Luce et Bellevue ont été équipées de préleveurs bas-débit de type SEQ 47/50 (Leckel). Ces deux types de préleveurs sont pleinement conformes à la norme NF EN 12341.

Les prélèvements ont été mis en œuvre à partir de fin décembre 2017 / début février 2018 (selon les sites) et ont été maintenus jusqu'à fin décembre 2018. Les préleveurs étaient paramétrés pour une période de collecte journalière, de minuit à minuit.

Dans le cadre des missions de surveillance réglementaires de Madinair, les stations Renéville, Lamentin et Sainte Luce assurent la mesure en continu des concentrations de PM₁₀ à l'aide de microbalances équipées du système de compensation de la perte d'espèces semi-volatils (TEOM-FDMS, Thermo), en conformité avec la norme NF EN 16450.

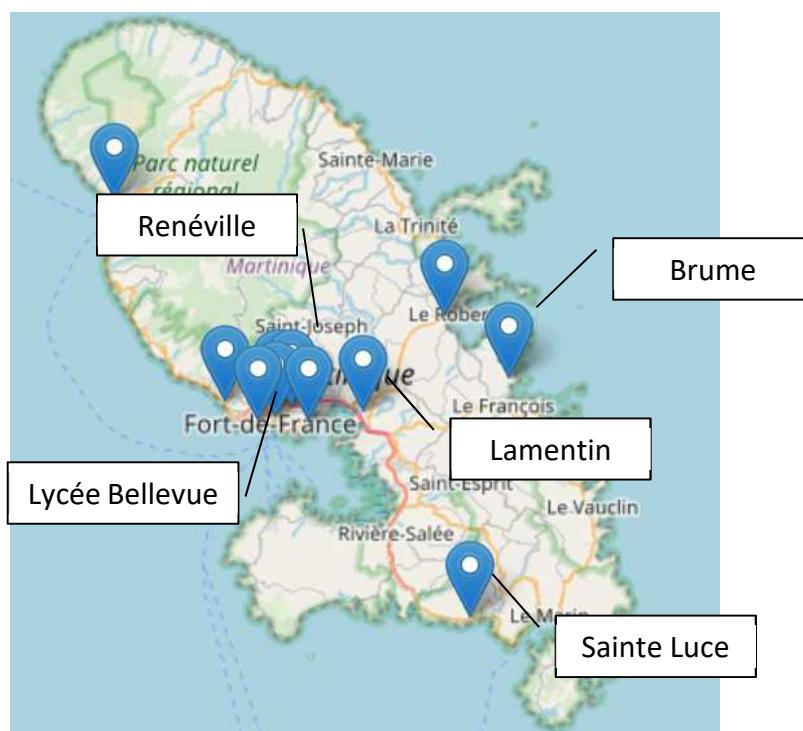


Figure 18 : Carte des stations de mesure de MADININAIR (<https://www.madininair.fr/>)

Analyses chimiques des échantillons

Depuis son lancement en 2007, le programme CARA repose sur des prélèvements sur filtres avec analyses chimiques différées en laboratoire. Il est basé sur la spéciation chimique au laboratoire d'échantillons journaliers collectés en plusieurs points du dispositif national. Parmi ces analyses chimiques, la mesure des métaux permet d'estimer les concentrations massiques liées à la présence de particules crustales, dont les poussières sahariennes. Ainsi, dans le cadre de cette étude, l'analyse chimique des éléments métalliques incluant Al, Ca, Fe, K, As, Ba, Cd, Co, Cu, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Sr, V, Zn) a été réalisée par IMT Lille-Douai selon les préconisations de la norme NF EN 14902. Pour ce faire, les échantillons ont été analysés par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) après minéralisation par digestion au micro-onde en milieu acide.

En parallèle, l'analyse des fractions carbonées (EC/OC) et des espèces inorganiques hydrosolubles (NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) a été réalisée par l'Ineris (selon les préconisations des normes NF EN 16909 et 16913, respectivement), permettant notamment d'étudier les contributions respectives de l'ensemble des espèces chimiques majeures au sein de la fraction PM_{10} .

Les données d'analyses chimiques ont pu être validées pour un total de 321 filtres journaliers répartis sur les 5 sites de prélèvement et choisis en fonction i) de leur disponibilité effective, ii) des niveaux de concentrations enregistrées par les systèmes de mesure automatique de PM_{10} en fonctionnement, et iii) afin de couvrir des périodes de concentrations de fond ou de fortes concentrations et à différentes périodes de l'année en équilibrant les jours ouvrés par rapport aux week-ends.

Méthodologie d'estimation des concentrations de poussières sahariennes

La méthodologie mise en œuvre dans le cadre de cette note est décrite par le guide Européen pour l'identification des dépassements d'origines naturelles disponible (cf. http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/pdf/sec_2011_0208.pdf).

Brièvement, les concentrations de poussières sahariennes sont estimées comme correspondant à la somme des concentrations d'oxydes d'aluminium sous la forme Al_2O_3 , d'oxydes de fer sous la forme Fe_2O_3 , de carbonates de calcium et de magnésium, de potassium et de silice, tel que :

$$\text{Pouss. Sahariennes} = Al_2O_3 + Fe_2O_3 + K + Ca + Mg + SiO_2 + CO_3$$

avec $SiO_2 = 3 \times Al_2O_3$ et $CO_3 = 1,5 \times Ca + 2,5 \times Mg$.

Il est à noter que cette méthodologie ne tient pas compte du fait que Ca et Mg peuvent également être présents au sein des sels de mer. Néanmoins, ces derniers correspondant aussi à des poussières d'origine naturelles, les incertitudes associées aux estimations faites ci-dessus peuvent être considérées comme négligeables dans le cadre de l'objectif de cette note.

Résultats et conclusion

Concentrations des poussières sahariennes

Une estimation des concentrations de poussières sahariennes a été réalisée de façon comparative entre le site de fond régional (Brume) et les 4 autres sites de la présente étude. Comme illustrée par la Figure 2, il ressort de cette comparaison une très grande homogénéité spatiale des concentrations de poussières sahariennes d'un site à l'autre, confirmant la possibilité d'appliquer les concentrations de poussières sahariennes estimées pour le site de fond régional aux autres stations de Madinair.

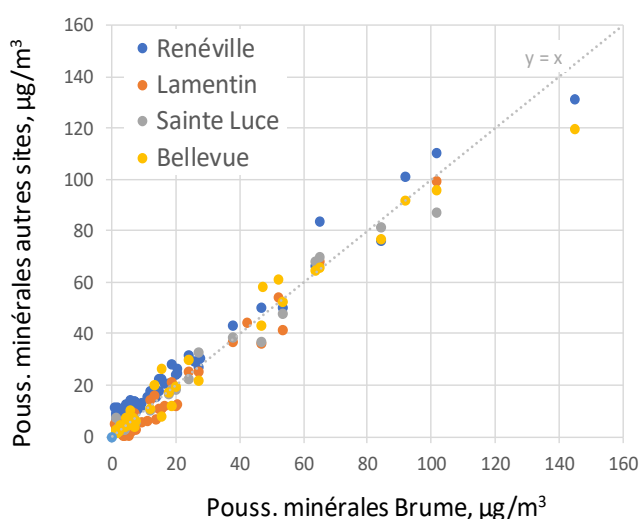


Figure 19: Comparaison des concentrations journalières de poussières sahariennes estimées pour les filtres des stations Renéville, Lamentin, Sainte-Luce et Bellevue par rapport à celles estimées pour le site de fond régional.

Par ailleurs, on observe une très bonne corrélation entre, d'une part, les fortes concentrations journalières de PM_{10} totales mesurées sur les deux stations Lamentin et

Renéville et, d'autre part, les concentrations de poussières sahariennes estimées pour le site « témoin » de Brume (Figure 3). Ces observations constituent une première indication de l'influence significative des poussières sahariennes dans la survenue en Martinique des dépassements du seuil journalier fixé pour les PM₁₀, comme discuté ci-après.

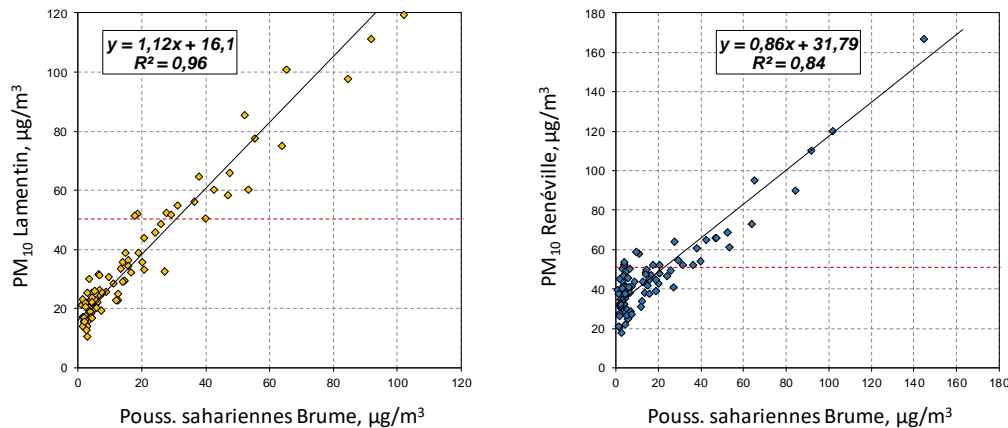


Figure 20 : Corrélations entre moyennes journalières PM₁₀ enregistrées par mesures automatiques TEOM-FDMS sur les stations Lamentin (à gauche) et Renéville (à droite) et les concentrations de poussières journalières estimées à partir des mesures sur les filtres prélevés les mêmes jours sur le site Brume. Sur chacun des deux graphes, les lignes pointillées rouges indiquent la valeur seuil journalière fixée pour les PM₁₀ (50 µg/m³).

Dépassements de seuils journaliers

Comme mentionné en introduction, les stations Renéville et Lamentin ont connu un dépassement de la valeur limite PM₁₀ (concentrations journalières > 50 µg/m³ plus de 35 jours par an), avec respectivement 44 et 36 jours de dépassements, en 2018. Ces jours de dépassement sont listés en Annexe 2.

Afin de quantifier les contributions de poussières naturelles au sein des PM₁₀ lors de ces dépassements du seuil journalier, les concentrations de poussières sahariennes estimées sur le site de Brume, lorsqu'elles étaient disponibles, ont été déduites de la concentration en PM₁₀ des deux sites.

Le Tableau ci-après synthétise l'ensemble des résultats obtenus.

Pour le site de Renéville, les données de poussières sahariennes mesurées à Brume sont disponibles pour 25 des 44 jours de dépassements et la déduction de la contribution des poussières sahariennes conduit à des concentrations journalières corrigées inférieures à 50 µg/m³, hormis pour 2 jours (14 et 15 mars, avec PM₁₀ - [poussières sahariennes] = 50 µg/m³), ramenant le nombre de dépassements du seuil journalier à 21 (au maximum) pour l'année 2018 sur ce site.

Pour le site du Lamentin, les données de poussières sahariennes mesurées à Brume sont disponibles pour 20 des 36 jours de dépassements et la déduction de la contribution des poussières sahariennes conduit à des concentrations journalières corrigées inférieures à 50 µg/m³ pour tous les jours étudiés, ramenant le nombre de dépassements du seuil journalier à 16 (au maximum) pour l'année 2018 sur ce site.

Estimation des concentrations de PM₁₀ une fois retranchée les contributions de poussières Sahariennes (pouss. Sah.) lors des dépassements journaliers en PM₁₀ enregistrés sur les stations Renéville et Lamentin en Martinique pour lesquels des mesures sur filtres étaient disponibles sur le site de fond régional (Brume) au cours de l'année 2018.

	Brume	Renéville (FR-39011)		Lamentin (FR-39009)	
	Pouss. Sahariennes (µg/m³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³) hors pouss. Sah.	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³) hors pouss. Sah.
16/01/2018	27,7	64	36	52	24
13/02/2018	3,7	53	49		
14/02/2018	3,9	53	49		
13/03/2018	11,0	58	47		
14/03/2018	9,5	59	50		
15/03/2018	4,0	54	50		
17/04/2018	31,3	52	21	55	24
01/07/2018	36,3	53	17	56	20
03/07/2018	18,6			52	33
04/07/2018	55,2			78	23
19/07/2018	29,1	55	26	52	23
25/07/2018	42,4	65	23	60	18
26/07/2018	20,7	53	32		
07/08/2018	101,9	120	18	120	18
08/08/2018	91,6	110	18	111	19
09/08/2018	46,7	66	19	58	11
15/09/2018	39,8	54	14	51	11
16/09/2018	47,3	66	19	66	19
19/09/2018	52,2	69	17	86	34
20/09/2018	144,8	167	22	189	44
26/09/2018	65,2	95	30	101	36
28/09/2018	37,9	61	23	65	27
29/09/2018	84,5	90	6	98	14
30/09/2018	63,9	73	9	75	11
01/10/2018	53,4	61	8	61	8
14/11/2018	17,7	53	35	52	34
29/11/2018	6,6	51	44		

Soulignons que ces calculs ne tiennent pas compte de la contribution des sels de mer, autres particules d'origine naturelle dont les concentrations peuvent être retranchées aux PM₁₀ lors du rapportage européen des dépassements de valeurs limites. Or, l'influence des embruns marins sur les niveaux de PM₁₀ ne peut être considérée comme négligeable sur un territoire insulaire tel que la Martinique. Pour preuve, l'analyse chimique des filtres prélevés à Renéville et Lamentin indiquent des concentrations moyennes en ions chlorure et sodium (espèces chimiques principales au sein des sels de mer) respectivement de 4 µg/m³ et 2,5 µg/m³ sur chacun de ces deux sites.

Enfin, il est à noter que la très grande majorité des dépassements listés en Annexe 2 pour lesquels l'estimation des concentrations de fond de poussières sahariennes n'est pas disponible sont centrés sur une période comprise entre le 1 juin et le 12 août 2018 et présente une grande homogénéité spatiale à l'échelle régionale (cf. Tableau ci-dessous).

	Lamentin - FR39009 - PM10 (µg/m3)	Renéville - FR39011 - PM10 (µg/m3)	Sainte Luce - FR39014 - PM10 (µg/m3)
01/06/2018	69,4	69,4	55,9
02/06/2018	52,1	55,1	42,5
05/06/2018	74,7	69,2	60,8
06/06/2018	111,3	94,5	102,3
07/06/2018	156,0	134,4	143,8
11/06/2018	99,1	78,5	81,9
12/06/2018	132,6	116,0	113,4
13/06/2018	66,7	61,6	56,8
23/06/2018	53,4	52,2	41,9
29/06/2018	84,8	76,9	71,2
10/07/2018	74,1	70,4	56,3
12/07/2018	62,7	63,5	49,2
16/07/2018	58,4	59,3	48,2
17/07/2018	59,6	60,2	46,9
04/08/2018	62,8	67,8	57,0
06/08/2018	75,5	77,3	
12/08/2018	46,7	51,2	42,3

Cette homogénéité spatiale suggère une influence majeure de phénomènes d'import de polluants, en pleine période de transport longue distance de poussières sahariennes dans l'hémisphère nord vers les Antilles.

Ainsi, aux vues de l'ensemble des résultats et observations présentés dans cette note, il apparaît raisonnable de conclure que les particules naturelles, et en particulier les poussières sahariennes, jouent un rôle prépondérant dans la survenue des dépassements des seuils journaliers fixés pour les PM₁₀ en Martinique.

ANNEXE 2

Liste des dépassements du seuil journalier fixé pour les PM₁₀ enregistrés pour les stations de Renéville et du Lamentin. (*source: GEOD'AIR*).

Date	Renéville - FR39011 PM10 (µg/m ³) journalier	Lamentin - FR39009 PM10 (µg/m ³) journalier
01/01/2018	51	
16/01/2018	64	52
13/02/2018	53	
14/02/2018	53	
13/03/2018	58	
14/03/2018	59	
15/03/2018	54	
21/03/2018	53	
17/04/2018	52	55
01/06/2018	69	69
02/06/2018	55	52
05/06/2018	69	75
06/06/2018	95	111
07/06/2018	134	156
11/06/2018	79	99
12/06/2018	116	133
13/06/2018	62	67
23/06/2018	52	53
29/06/2018	77	85
01/07/2018	53	56
03/07/2018		52
04/07/2018		78
10/07/2018	70	74
12/07/2018	64	63
16/07/2018	59	58
17/07/2018	60	60
19/07/2018	55	52
25/07/2018	65	60
26/07/2018	53	
04/08/2018	68	63
06/08/2018	77	76
07/08/2018	120	120
08/08/2018	110	111
09/08/2018	66	58
12/08/2018	51	
15/09/2018	54	51
16/09/2018	66	66
19/09/2018	69	86
20/09/2018	167	189
26/09/2018	95	101
28/09/2018	61	65
29/09/2018	90	98
30/09/2018	73	75
01/10/2018	61	61
14/11/2018	53	52
29/11/2018	51	

ANNEXE 3

Liste des filtres analysés et dont les données d'analyse chimique ont pu être validées pour chacun des sites de la présente étude.

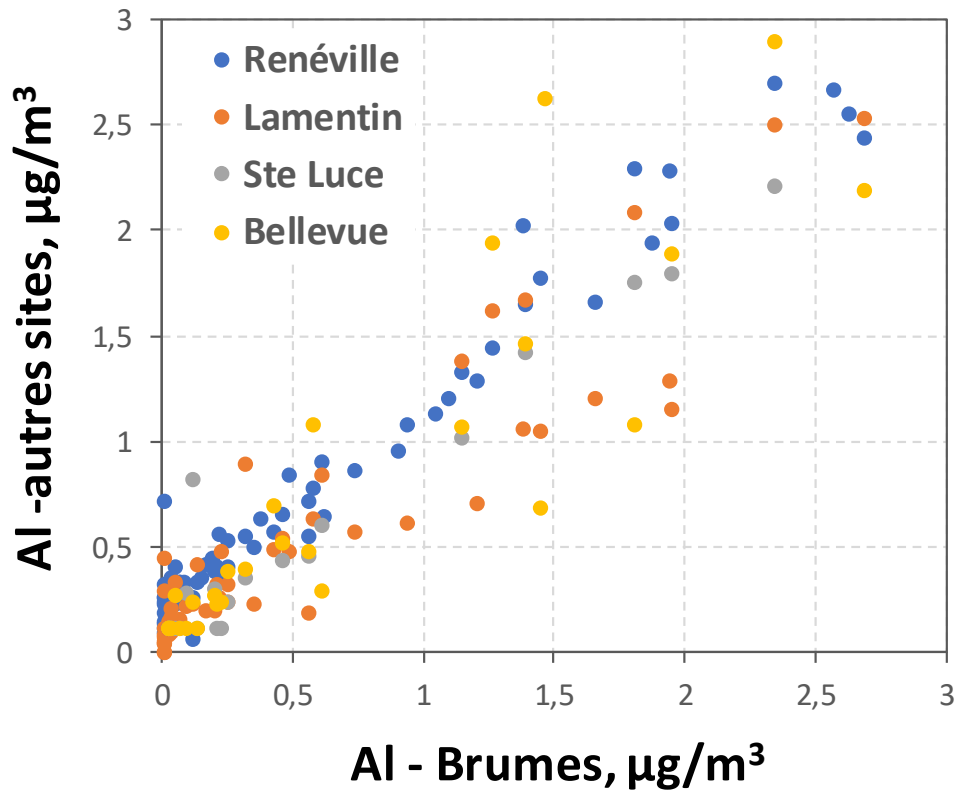
	Brume	Renéville	Lamentin	Ste-Luce	Bellevue
03/01/2018	X	X			
04/01/2018	X	X			
05/01/2018	X	X			
06/01/2018	X	X			
07/01/2018	X	X			
08/01/2018	X	X			
09/01/2018	X	X			
10/01/2018	X	X			
11/01/2018	X	X			
12/01/2018	X	X			
13/01/2018	X	X			
14/01/2018	X	X			
15/01/2018	X	X			
16/01/2018	X	X			
17/01/2018	X	X			
18/01/2018	X	X			
05/02/2018	X	X			
06/02/2018	X	X			
07/02/2018	X	X	X		
08/02/2018	X	X	X		
09/02/2018	X	X	X		
10/02/2018	X	X	X		
11/02/2018	X	X	X		
12/02/2018	X		X		
13/02/2018	X	X	X		
14/02/2018	X	X	X		
15/02/2018		X	X		
16/02/2018	X	X	X		
17/02/2018	X	X	X		
06/03/2018	X	X	X		
07/03/2018	X	X	X		
08/03/2018	X	X	X		
09/03/2018	X	X	X		
10/03/2018	X	X	X		
11/03/2018	X	X	X		
12/03/2018	X	X	X		

13/03/2018	X	X	X		
14/03/2018	X	X	X		
15/03/2018	X	X	X		
16/03/2018	X	X	X		
17/04/2018	X				
07/06/2018		X			
11/06/2018		X			
12/06/2018		X			
13/06/2018		X			
29/06/2018		X			
01/07/2018	X				
02/07/2018		X			
03/07/2018	X				
04/07/2018	X				
05/07/2018	X	X			
19/07/2018	X				
20/07/2018	X	X			
25/07/2018	X		X		
26/07/2018	X	X	X		
27/07/2018	X	X	X		
04/08/2018		X	X	X	X
05/08/2018	X	X	X	X	X
06/08/2018		X	X	X	X
07/08/2018	X	X	X	X	X
08/08/2018	X	X			X
09/08/2018	X	X	X	X	X
10/08/2018	X	X	X	X	X
12/08/2018		X	X	X	X
13/08/2018	X	X	X	X	X
04/09/2018	X	X	X	X	X
05/09/2018	X	X	X	X	X
06/09/2018	X	X	X	X	X
07/09/2018	X	X	X	X	X
08/09/2018	X	X	X	X	X
09/09/2018	X	X	X	X	X
10/09/2018	X	X	X		X
11/09/2018	X	X	X		X
15/09/2018	X				
16/09/2018	X				X
17/09/2018	X		X		X
18/09/2018	X				X

19/09/2018	X		X		X
20/09/2018	X	X			X
21/09/2018	X	X	X		X
26/09/2018	X	X	X	X	X
27/09/2018	X	X	X	X	X
28/09/2018	X	X	X	X	
29/09/2018	X	X		X	X
30/09/2018	X	X		X	X
01/10/2018	X	X	X	X	X
12/11/2018	X	X	X	X	X
13/11/2018	X	X	X	X	X
14/11/2018	X	X	X	X	X
15/11/2018	X	X	X	X	X
16/11/2018	X	X	X	X	X
28/11/2018	X	X	X	X	X
29/11/2018	X	X	X	X	X
30/11/2018	X	X	X	X	X
01/12/2018	X	X	X	X	X
02/12/2018	X	X	X	X	X
03/12/2018	X	X	X	X	X
04/12/2018	X	X	X	X	X
05/12/2018	X	X	X	X	X
06/12/2018	X	X	X	X	X
07/12/2018	X	X	X	X	X

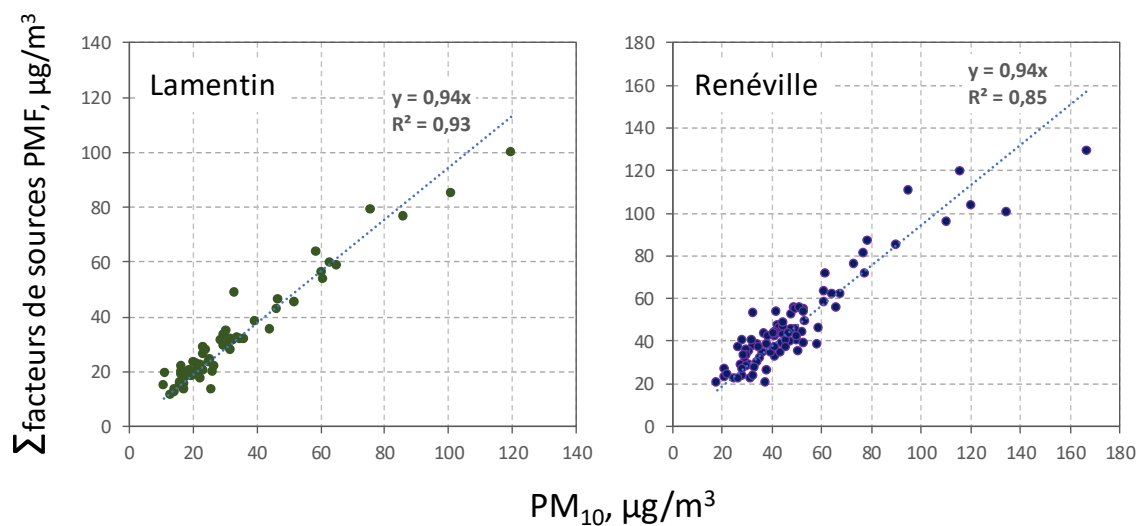
ANNEXE 4

Comparaison des concentrations en Aluminium mesurées au sein des PM₁₀ entre le site Brume et les autres sites de l'étude, pour les concentrations d'Al inférieures à 3 µg/m³



ANNEXE 5

Comparaison entre la somme des concentrations attribuées aux facteurs de sources identifiés par PMF et les concentrations journalières de PM₁₀ mesurées sur les stations Lamentin et Renéville.





direction et secrétariat du LCSQA

INERIS - parc technologique Alata - BP 2 - F60550 Verneuil-en-Halatte
tél. 03 44 55 64 04 - www.lcsqa.org