

ÉTAT DES LIEUX DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES ACTUELLES SUR LES PARTICULES EN SUSPENSION EN MARTINIQUE

• ÉDITION 2021 •



ETAT DES LIEUX DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES ACTUELLES SUR LES PARTICULES EN SUSPENSION EN MARTINIQUE

Année 2021

Madininair : Observatoire de la Qualité de l'Air



Rapport édité sous système de management de la qualité
certifié AFAQ ISO 9001 : 2008

	Rédaction	Vérification/Approbation
Nom	M.LE QUILLEUC	C.BOULLANGER
Qualité	Ingénieure d'études	Responsable études
Visa		



□ SOMMAIRE □

I.	Remerciements.....	10
II.	Synthèse de l'étude	11
III.	Glossaire.....	16
III.1	Les acronymes.....	16
III.2	Quelques définitions pour la compréhension des termes employés.....	17
IV.	Introduction.....	19
IV.1	Les particules : définition	19
IV.2	Les enjeux des particules	19
IV.2.1	Les impacts sanitaires	19
IV.2.2	Les impacts climatiques.....	21
IV.3	Problématiques locales et objectifs de l'étude	21
V.	Les particules en Martinique	24
V.1	Sources locales de particules fines	24
V.1.1	Particules d'origine naturelle.....	24
V.1.2	Particules d'origine anthropique.....	25
V.2	Sources transfrontalières de particules	31
V.2.1	Particules désertiques	31
V.2.2	Autres sources transfrontalières potentielles	40
VI.	Réglementation et évaluation des particules	45
VI.1	Cadre réglementaire.....	45
VI.1.1	Seuils réglementaires.....	45
VI.1.2	Seuils d'évaluation	45
VI.2	Les méthodes d'évaluation des particules	46
VI.2.1	Mesure quantitative	46
VI.2.2	Mesure qualitative.....	48
VI.2.3	Prévision et modélisation.....	49
VI.3	La surveillance et l'évaluation des particules par Madinair en Martinique.....	50
VI.3.1	Présentation du réseau de surveillance de Madinair	50
VI.3.2	Les méthodes utilisées au sein de Madinair.....	52
VII.	Evaluation quantitative des particules fines de 2001 à 2020	54
VII.1	Le cas particulier de l'année 2020	54

VII.1.1	Confinement.....	54
VII.1.2	Focus sur l'évènement de particules désertiques de juin 2020.....	54
VII.1.3	Conclusions.....	56
VII.2	Evolution pluriannuelle des concentrations en PM10 selon les typologies des stations entre 2001 et 2019.....	56
VII.2.1	Stations urbaines.....	57
VII.2.2	Stations périurbaines.....	61
VII.2.3	Stations à influence trafic.....	62
VII.2.4	Conclusions.....	63
VII.3	Evolution pluriannuelle des concentrations en PM2,5 selon les typologies des stations entre 2003 et 2019.....	65
VII.3.1	Stations urbaines.....	65
VII.3.2	Stations périurbaines.....	67
VII.3.3	Conclusions.....	67
VII.4	Analyse des PM10 de 2001 à 2019 par gamme de concentrations.....	68
VII.4.1	Analyse annuelle par gamme de concentrations.....	70
VII.4.2	Analyse mensuelle par gamme de concentrations.....	77
VII.4.3	Exemple d'épisodes particuliers liés à la présence de brume de sable.....	84
VII.4.4	Conclusions.....	86
VII.5	Durée des épisodes de dépassement du seuil de 50 µg/m ³ en PM10 de 2001 à 2019	87
VII.5.1	Au niveau des stations de fond.....	87
VII.5.2	Au niveau des stations à influence trafic.....	89
VII.5.3	Conclusions.....	93
VII.6	Analyse spécifique des épisodes de dépassement du seuil de 50 µg/m ³ en PM10...	94
VII.6.1	Au niveau des stations de fond.....	95
VII.6.2	Au niveau des stations à influence trafic.....	98
VII.6.3	Conclusions.....	101
VIII.	Evaluation qualitative des particules fines.....	102
VIII.1	Introduction.....	102
VIII.2	Caractérisation chimique et détermination des sources des particules fines PM10 en Martinique.....	102
VIII.2.1	Analyse de la composition chimique.....	103



VIII.2.2	Composition chimique des particules lors d'épisodes de brume de sable.....	111
VIII.2.3	Composition chimique des particules associées au trafic automobile.....	114
VIII.2.4	Composition chimique des particules à proximité d'autres sources	122
VIII.3	Conclusions	123
IX.	Conclusion	127
X.	Références bibliographiques	132
XI.	Annexes.....	144
XI.1	Annexe 1 : Localisation des principales régions émettrices de particules désertiques à l'échelle du globe.	144
XI.2	Annexe 2 : Synthèse des seuils réglementaires pour la protection de la santé des différents polluants.	146
XI.3	Annexe 3 : Synthèse des seuils d'évaluation.....	148
XI.4	Annexe 4 : Lien entre particules et virus (cas de la COVID-19).....	150
XI.5	Annexe 5 : Inventaire des émissions de particules PM10 en Martinique en 2016.....	152
XI.6	Annexe 6 : Synthèse de la caractérisation chimique des particules fines.....	153



□ FIGURES □

Figure 1 : Impact des particules atmosphériques sur le corps humain, en fonction de leur taille (Source : Encyclopédie de l'Environnement, 2019).....	20
Figure 2 : Inventaire des émissions de particules anthropiques par secteur d'activité, à l'échelle de la Martinique en 2016 (Source : Madinair, 2018).....	25
Figure 3 : Répartition des émissions de particules PM10 anthropiques par secteur d'activité et par commune (Source : Inventaire 2016, v2018, Madinair).	26
Figure 4 : Cartographie des émissions routières de PM10 en 2016 (Source Madinair).....	27
Figure 5 : Zones sources majeures potentielles (PSA : Potential Sources Areas) proposées par Scheuven et al. (2013) issu de Formenti et al. (2011) à partir des résultats de Brooks & Legrand (2000), Middleton et Goudie, 2001, Caquineau et al. (2002), Israelevich et al., 2002 et Prospero et al., 2002 et Schepanski et al. (2009).	32
Figure 6 : Identification des principales trajectoires de particules désertiques depuis les zones sources nord-africaines (BEGUE, 2012).	34
Figure 7 : Schéma du transport des particules désertiques depuis l'Afrique du Nord selon l'altitude et la saison : le transport vers les Caraïbes se fait durant le printemps/été à hautes altitudes, le transport vers l'Amérique du Sud se fait dans les basses couches de l'atmosphère durant l'hiver. La ligne en pointillés représente la position la plus au sud de l'ITCZ (issu de Prospero et al., 2014).	34
Figure 8 : Position de la Zone de Convergence Inter Tropicale en juin (en rouge) et en janvier (en bleu).	35
Figure 9 : Synthèse du transport particulaire transatlantique, Source : Météo France Antilles..	36
Figure 10 : Prévion de dispersion de la poussière désertique modélisé par PREV'AIR pour le 22/05/2020 sur l'arc antillais.....	49
Figure 11 : Zoom de la prévion de la figure 10 sur le territoire de la Martinique.....	49
Figure 12 : Localisation et typologie des stations de mesures mises en place depuis 2001 et utilisées pour cette étude et localisation des zones administrative de surveillance.....	51
Figure 13 : Analyseur TEOM FDMS.	53
Figure 14 : Analyseur FIDAS.....	53
Figure 15 : Préleveur Partisol (à gauche), Leckel (au centre), DA80 (à droite).	53
Figure 16 : Evolution pluriannuelle des concentrations de PM10 en fonction de la typologie des stations et nombre de stations de mesures par typologie depuis 2001. Les traits noirs indiquent la valeur limite annuelle et l'objectif de qualité annuelle ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle).....	56
Figure 17 : Concentrations moyennes mensuelles à la station de Musée en 2003 et en 2004. .	57
Figure 18 : Roses des vents à la station de Lycée Schoelcher pour les années 2003 et 2004....	58
Figure 19 : Concentrations moyennes mensuelles à la station de Schoelcher en 2007 et en 2008.	58
Figure 20 : Concentrations moyennes mensuelles aux stations de Schoelcher et du Lamentin en 2014 et en 2015.....	60



Figure 21 : Evolution pluriannuelle des concentrations de PM _{2,5} en fonction de la typologie des stations et nombre de stations de mesures par typologie depuis 2003. Les traits noirs indiquent la valeur limite annuelle et l'objectif de qualité annuelle (25 µg/m ³ et 10 µg/m ³ en moyenne annuelle).....	65
Figure 22 : Evolution annuelle du nombre de jours dans la gamme de concentrations de 30 à 50 µg/m ³ de 2001 à 2019.	71
Figure 23 : Evolution annuelle du nombre de jours dans la gamme de concentrations entre 50 et 80 µg/m ³ de 2001 à 2019.	73
Figure 24 : Evolution annuelle du nombre de jours dans la gamme de concentrations supérieure à 80 µg/m ³ de 2001 à 2019.	75
Figure 25 : Evolution mensuelle moyenne du nombre de jours dans la gamme de concentration entre 30 et 50 µg/m ³ de 2001 à 2019. Les barres verticales représentent les écarts types pour chaque mois.	78
Figure 26 : Evolution annuelle et mensuelle du nombre du nombre de jours dans la gamme de concentration entre 30 et 50 µg/m ³ de 2001 à 2019 au niveau des stations de fond.....	79
Figure 27 : Evolution mensuelle moyenne du nombre de jours dans la gamme de concentration entre 50 et 80 µg/m ³ . Les barres verticales représentent les écarts types pour chaque mois... ..	81
Figure 28 : Evolution annuelle et mensuelle du nombre de jours dans la gamme de concentration entre 50 et 80 µg/m ³ de 2001 à 2019 au niveau des stations de fond.....	82
Figure 29 : Evolution mensuelle moyenne du nombre de jours dans la gamme de concentrations supérieures à 80 µg/m ³ . Les barres verticales représentent les écarts types pour chaque mois.	83
Figure 30 : Evolution annuelle et mensuelle du nombre de jours dans la gamme de concentrations supérieures à 80 µg/m ³ de 2001 à 2019 au niveau des stations de fond.....	84
Figure 31 : Epaisseur optique d'aérosols désertiques issue du modèle NAAPS pour le 17 mai 2007, midi.....	85
Figure 32 : Durée (en jours) des épisodes de dépassement en PM ₁₀ de la valeur réglementaire de 50 µg/m ³ de 2001 à 2019 au niveau des stations de fond. Le nombre d'épisodes de 1 ou 2 jours est aussi indiqué en pourcentage.....	87
Figure 33 : Durée (en jours) des épisodes de dépassement en PM ₁₀ (exprimée en pourcentages) de la valeur réglementaire de 50 µg/m ³ depuis 2001 au niveau des stations de fond (n = 433).....	88
Figure 34 : Durée (en jours) des épisodes de dépassement en PM ₁₀ de la valeur réglementaire de 50 µg/m ³ de 2001 à 2019 au niveau des stations trafic.	90
Figure 35 : Durée (en jours) des épisodes de dépassement en PM ₁₀ (exprimée en pourcentages) de la valeur réglementaire de 50 µg/m ³ depuis 2001 au niveau des stations trafic (n = 407).....	91
Figure 36 : Durée (en jours) des épisodes de dépassement en PM ₁₀ (exprimée en pourcentages) de la valeur réglementaire de 50 µg/m ³ de 2001 à 2008 au niveau de la station trafic de Dillon (gauche, n = 136), de 2010 à 2018 au niveau des stations trafic de Renéville et Robert Mansarde (droite, n = 271).	92
Figure 37 : Evolution annuelle du nombre de jours de dépassement du seuil de 50 µg/m ³ au niveau des stations de fond de 2001 à 2020 selon les gammes de concentrations définies.	95
Figure 38 : Gammes de concentrations (en pourcentage) des jours de dépassement du seuil de 50 µg/m ³ au niveau des stations de fond depuis 2001 (avec 2020), n = 976.....	97



Figure 39 : Gammes de concentrations (en pourcentage) des jours de dépassement du seuil de 50 µg/m ³ au niveau des stations de fond depuis 2001 (sans 2020), n = 921.....	97
Figure 40 : Evolution annuelle du nombre de jours de dépassement du seuil de 50 µg/m ³ au niveau des stations de trafic de 2001 à 2019 selon des gammes de concentrations définies.	98
Figure 41 : Gammes de concentrations (en pourcentage) des jours de dépassement du seuil de 50 µg/m ³ au niveau des stations trafic depuis 2001 (n = 904).....	99
Figure 42 : Gammes de concentrations (en pourcentage) des jours de dépassement du seuil de 50 µg/m ³ de 2001 à 2008 au niveau de la station de Dillon (en haut, n = 276) et de 2010 à 2018 au niveau des stations de Renéville et de Robert Mansarde (en bas, n = 628).	100
Figure 43 : Photos de différents filtres de prélèvement.....	102
Figure 44 : Localisation et typologie des stations choisies pour l'étude de la variabilité de la composition chimique.	103
Figure 45 : Concentrations élémentaires et ioniques des PM10 à la station de François Pointe Couchée (brume) classées selon les sources potentielles de PM10.....	105
Figure 46 : Concentrations élémentaires et ioniques des PM10 à la station de Sainte Luce classées selon les sources potentielles de PM10.	106
Figure 47 : Concentrations élémentaires et ioniques des PM10 à la station du Lamentin classées selon les sources potentielles de PM10.	107
Figure 48 : Concentrations élémentaires et ioniques des PM10 à la station de Renéville classées selon les sources potentielles de PM10.	108
Figure 49 : Concentrations journalières des espèces chimiques majeures des PM10 du 28/11 au 07/12 2018 (absence de brume de sable) et du 04/08 au 13/08 2018 (fort épisode de brume de sable) issu de FAVEZ et al., 2020.	110
Figure 50 : Proportions des composés chimiques majeurs analysés à la station François Pointe Couchée et Sainte Luce en parallèle des concentrations en PM10 en 2018 issu de FAVEZ et al. (2020).....	112
Figure 51 : Concentrations moyennes en arsenic, nickel et plomb à la station de Sainte Luce. .	114
Figure 52 : Part de chaque source tout au long de l'année 2018 sur la station Renéville (FAVEZ et al., 2020).	115
Figure 53 : Rapports moyens OC/EC pour les différentes périodes de mesures en 2018 aux stations de Renéville, du Lamentin et de Sainte-Luce.....	118
Figure 54 : Concentrations moyennes de carbone élémentaire par rapport aux concentrations en PM10 (en pourcentage) pour les différentes périodes de mesures en 2018 aux stations de Renéville, du Lamentin et de Sainte Luce.....	119
Figure 55 : Concentrations moyennes en nickel, arsenic et plomb pendant et hors des jours de dépassement à proximité industrielle.	122
Figure 56 : Distribution géographique des principales zones source de poussière désertique d'après PROSPERO et al., (2002) et TANAKA et al., (2006).....	144



□ TABLEAUX □

Tableau 1 : Typologie, date d'ouverture et de fermeture des différentes stations PM10 et PM2,5 depuis 2001.....	52
Tableau 2 : Concentrations moyennes journalières maximales en PM10 mesurées depuis 2001.	54
Tableau 3 : Influence des principales sources de fond en PM10 selon la gamme de concentration étudiée.....	69
Tableau 4 : Eléments statistiques de la gamme de concentration entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de 2001 à 2019 au niveau des stations de fond et de l'ensemble des stations.....	71
Tableau 5 : Eléments statistiques de la gamme de concentrations entre 50 et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de 2001 à 2019 au niveau des stations de fond et de l'ensemble des stations.	74
Tableau 6 : Eléments statistiques de la gamme de concentration supérieure à 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de 2001 à 2019 au niveau des stations de fond et de l'ensemble des stations.	76
Tableau 7 : Récapitulatif de la durée des épisodes de dépassement en PM10 depuis 2001 au niveau des stations de fond.....	89
Tableau 8 : Synthèse du nombre maximal d'épisodes sur la période 2001-2008 et sur la période 2010-2018.....	92
Tableau 9 : Tableau des seuils et qualificatifs du nouvel indice et des seuils de déclenchement d'un dispositif préfectoral (© Atmo Auvergne-Rhône-Alpes).	94
Tableau 10 : Gammes de concentrations en PM10 utilisées pour étudier les dépassements du seuil réglementaire de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	95
Tableau 11 : Concentrations moyennes des métaux réglementés lors de jours de dépassement du seuil d'information et de recommandation et hors jours de dépassement à la station de Sainte Luce. Valeurs limites et cibles de Pb, As, Cd et Ni.....	114
Tableau 12 : Concentrations moyennes des métaux réglementés lors de jours de dépassement du seuil de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et hors jours de dépassement à la station de Renéville. Valeurs limites et cibles de Pb, As, Cd et Ni.....	116
Tableau 13 : Concentrations en benzo(a)pyrène (B(a)P) mesurées au niveau d'une station urbaine de fond implantée dans une zone urbanisée à trafic modéré en 2014. La valeur cible est indiquée pour comparaison.	116
Tableau 14 : Concentrations en benzo(a)pyrène (B(a)P) mesurées à la station de Sainte Luce en 2017. La valeur cible est indiquée pour comparaison.	117
Tableau 15 : Concentrations moyennes en carbone élémentaire (EC) en 2018 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) au niveau des stations urbaines ou périurbaines étudiées et population des villes sélectionnées selon l'INSEE en 2018.	121
Tableau 16 : Concentrations moyennes en carbone élémentaire (EC) en 2018 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) au niveau des stations trafic ou à proximité trafic étudiées et trafic moyen journalier annuel (TMJA) des sections routières les plus proches des stations trafic étudiées.....	121
Tableau 17 : Concentrations moyennes des métaux réglementés lors de jours de dépassement du seuil de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et hors jours de dépassement à proximité industrielle. Valeurs limites et cibles de Pb, As, Cd, Ni.....	122



I. Remerciements

A travers ce rapport, Madinair a souhaité réunir l'ensemble des informations connues sur les particules en Martinique. Ce diagnostic de la pollution atmosphérique aux particules regroupe les connaissances bibliographiques et les mesures réalisées depuis plus de 20 ans, par Madinair, sur le territoire de la Martinique.

Ainsi, de nombreuses personnes ont participé à la rédaction de ce rapport. Madinair tient à remercier, Audrey Alfred, chargée d'études et, Valentine Busquet, volontaire du service civique, qui ont pu contribuer à son élaboration ainsi que Meryll Le Quilleuc, ingénieure d'études et titulaire d'un doctorat en sciences de la terre et de l'atmosphère sur la composition chimique des particules.

Pour sa finalisation, le rapport a ensuite bénéficié de la relecture des membres de l'équipe de Madinair : Jean Guimberteau, ingénieur d'études, Carole Boullanger, Responsable études et adjointe à la direction, Gaëlle Grataloup, Responsable communication et Stéphane Gandar, Directeur de Madinair.

Madinair remercie le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air qui contribue à assurer la coordination technique de l'ensemble des Associations Agréées pour la Surveillance de la Qualité de l'air, et qui a participé, à travers le programme national CARA (CARActérisation des particules) à alimenter les données sur la composition chimique des particules en Martinique.

Madinair tient à remercier également Monsieur Alain Bateau, Ingénieur Epidémiologiste à la Cellule InterRégionale d'Épidémiologie, puis Directeur de la Veille et Sécurité Sanitaires de l'Agence Régionale de Santé de Martinique pendant plusieurs années. M. Bateau a ainsi fortement contribué à améliorer ce rapport en apportant son regard d'expert sanitaire. Nous le remercions pour son soutien et son implication pendant toutes nos années de collaboration. Enfin, Madinair remercie la Présidente de Madinair, le Bureau et le Conseil d'Administration de la structure, ainsi que l'ensemble de son équipe qui contribue tous les jours à fournir et communiquer des données expertisées et de qualité sur la problématique de la qualité de l'air en Martinique.



II. Synthèse de l'étude

Les particules dites en suspension (PM de l'anglais « particulate matter ») représentent les **particules solides et/ou liquides** portées par l'eau ou l'air. Les particules en suspension **se distinguent selon leur taille** : les PM10, particules dont le diamètre est inférieur à 10 µm et les PM2,5 dont le diamètre est inférieur à 2.5 µm. Quelle que soit leur taille, ces particules peuvent avoir une origine et donc une **composition chimique variée**.

La mesure et l'analyse de ces particules est nécessaire en raison des **différents impacts** qu'elles ont : sanitaires, climatiques et environnementaux.

Tout d'abord, d'un point de vue **sanitaire**, les particules ont un **impact suivant leur quantité, leur taille et leur toxicité**. Entre autres, plus une particule est fine, plus elle pénètre profondément dans les voies respiratoires. Alors que les particules grossières vont être retenues par les muqueuses présentes dans le nez et la gorge, toutes les particules inférieures à 10 µm de diamètre peuvent s'installer plus profondément dans les bronches et les poumons. Il existe également de plus en plus de preuves épidémiologiques permettant de démontrer le lien, entre le niveau de particules dans l'air et le développement de maladies cardiovasculaires.


D'autre part, les particules jouent un **rôle sur le climat** : elles peuvent selon les cas induire un réchauffement global des basses couches de l'atmosphère (la troposphère), mais aussi provoquer un refroidissement global de la planète en augmentant la **réflexion des rayons solaires** vers l'espace (phénomène d'albédo).

Enfin, selon les éléments chimiques constituant les particules, celles-ci peuvent avoir un **impact environnemental** en apportant des éléments nutritifs dans l'océan et dans les sols. Cet apport d'éléments nutritifs présents notamment dans les particules sahariennes mais également dans les sédiments résultant de la déforestation du bassin amazonien au Brésil peut être **un des contributeurs de la croissance des algues sargasses** (LOUIME et al., 2017).

Pour toutes ces raisons, il est important d'étudier et d'analyser quantitativement et qualitativement les particules dans l'atmosphère.

Depuis l'adoption de la **loi sur l'Air** et l'utilisation rationnelle de l'Energie de 1996, ayant abouti à la création des AASQA (Association Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air), les exigences réglementaires obligent une mesure des quantités dans l'air de ces particules. Ces seuils, à ne pas dépasser, sont fixés par des **décrets européens et nationaux**. Ces exigences pour protéger la population sur cette problématique se traduisent par une **réglementation à long terme** (valeurs limites et objectifs de qualité annuels) et une **réglementation d'action rapide** (seuil d'information et de recommandation ou seuil d'alerte journalier).

Madininair, observatoire de la qualité de l'air en Martinique, assure depuis plus de 20 ans la surveillance et l'évaluation des polluants atmosphériques, dont les particules en suspension, afin de répondre aux exigences européennes, nationales et aux problématiques locales. Et lorsque les concentrations des polluants réglementés (notamment les particules en suspension



PM10) dépassent ou risquent de dépasser les seuils réglementaires, Madininair, déclenche, par délégation préfectorale, des **procédures d'information et de recommandation**, ou **d'alerte** à la pollution atmosphérique. Le déclenchement d'une procédure d'alerte est accompagné de mesures préfectorales permettant de diminuer rapidement la pollution de l'air et/ou l'exposition des populations.

Les actions permettant de planifier une diminution sur le long terme, sont quant à elles intégrées dans **les programmes et plans territoriaux** afin d'inclure l'ensemble des acteurs dans la prise en compte des enjeux de la qualité de l'air et dans son amélioration.

Depuis 2001, et conformément aux exigences réglementaires, les stations de mesure de Madininair, réparties sur l'ensemble de la Martinique, enregistrent en continu et en temps réel **l'évolution des concentrations** en particules fines respirables. Celles dont le diamètre est inférieur à 10 μm (PM10) sont enregistrées dans 8 stations de mesures, et celles dont le diamètre est inférieur à 2,5 μm (PM2,5) dans 4 de ces stations. Des épisodes de pollution par les particules ont ainsi pu être dénombrés chaque année.

Par ailleurs, en complément de la mesure quantitative de particules fines dans l'air, Madininair procède épisodiquement à une étude qualitative des particules en Martinique grâce à une **analyse de la composition chimique** des particules prélevées sur filtre.


Les particules observées en Martinique ont, tout d'abord, une **source locale**. Il existe des particules d'origine **naturelle** telles que les

embruns marins, les particules biogéniques (pollens, spores, champignons, bactéries, etc.) ou encore les particules minérales issues du sol et du sable. On trouve également des particules d'origine **anthropique** émises par des activités humaines notamment par l'ensemble des transports, l'industrie manufacturière, l'énergie, l'agriculture, et le secteur du résidentiel/tertiaire.

Il existe, par ailleurs, des **sources transfrontalières** de particules, telles que les cendres volcaniques ou les **particules désertiques** provenant du Sahara et du Sahel transportées par le vent à haute altitude et retombant à plusieurs milliers de kilomètres de leur source, occasionnant le phénomène de **brume de sable**.

Une part mineure des particules transportées depuis l'Afrique peut avoir une origine anthropique issues des feux de biomasse, des biofuels et des combustibles fossiles. Il peut également être retrouvé des microorganismes. Néanmoins, les concentrations en microorganismes se sont révélées 100 à 1000 fois plus faibles que les valeurs typiques continentales (PROSPERO et al., 2005) et aucun lien direct entre la brume de sable et la présence de ces organismes n'a pu être identifié.

Sur les mesures réalisées entre 2001 et 2020 et analysées dans ce rapport, les **concentrations moyennes annuelles en particules fines PM10 et PM2,5** au niveau des stations de **fond** (urbaines et périurbaines) sont relativement stables et sous les seuils annuels réglementaires. Ces concentrations varient essentiellement en fonction de la création et/ou de l'interruption de certaines stations de mesure ainsi qu'à la présence plus ou moins



importante de **brume de sable**. Selon les années, un apport anthropique peut parfois être observé au niveau de quelques stations mettant en avant l'influence du trafic automobile.

En revanche, dans les **stations à influence trafic** (proche des zones à trafic dense), les concentrations moyennes annuelles en particules PM10 présentent de plus grandes variations provoquant des **dépassements réguliers** de la valeur limite annuelle de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Par ailleurs, depuis le début des mesures, des variations sont observées d'une année sur l'autre sur le nombre de dépassements constatés des seuils journaliers de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en particules fines, correspondant à des épisodes de pollution.

Ces variations peuvent être liées aux épisodes de brume de sable disparates d'une année sur l'autre. Ainsi, **aucune tendance annuelle claire** sur l'évolution du nombre d'épisode de pollution ne peut être réalisée.

En moyenne, 76% des épisodes de dépassement du niveau journalier de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ne durent qu'**un ou deux jours** et 8% ont une durée **supérieure ou égale à 5 jours**. Aucune tendance à l'augmentation de la récurrence de ces épisodes longs n'a été observée ces dernières années. Ces épisodes représentent entre 0 à 19% du total d'épisodes selon les années. Cette disparité s'explique notamment par la **variation du nombre d'épisodes de brume de sable d'une année sur l'autre**.

Il est à noter que 2015 est à la fois l'année où Madininair a enregistré le plus grand nombre d'épisodes de pollution et celle où la part des épisodes longs est la plus importante.

Les épisodes de dépassement du niveau de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sont associés en majorité à des


concentrations entre 50 et $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Néanmoins, certains épisodes enregistrent des concentrations **supérieures à $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voire à $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$** . Ces épisodes d'une forte intensité sont imputables à des épisodes de brume de sable dense puisqu'observés au niveau de l'ensemble de la Martinique.

Là encore, en 20 ans de mesure, il n'est observé aucune tendance à l'augmentation de ces épisodes intenses du fait de l'imprévisibilité annuelle des épisodes de brume de sable.

Un épisode récent de brume de sable, en juin 2020, a tout de même, provoqué un **record** du nombre de jours de **concentrations supérieures à $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$** . Le caractère exceptionnel de cet épisode ne permet pas d'en conclure une plus grande récurrence d'épisodes de concentrations très élevées. La reproduction de ce type d'évènement est, toutefois, à surveiller de près.

Concernant la **composition chimique des particules**, celle-ci diffère selon leur origine. Les particules retrouvées en Martinique sont principalement, quelle que soit la station d'étude, des **particules minérales** (apport diffus de particules désertiques mais aussi apport local de particules minérales issues de l'érosion du sol ou de l'envol de sable), des **sels de mer** (issus des embruns marins) et des **particules anthropiques originaires de la pollution automobile**.

Les particules minérales sont composées principalement d'aluminium, de calcium, de fer, de potassium, de magnésium et de titane, tandis que les sels de mer sont constitués d'ions chlorure, potassium, magnésium, calcium ou sodium. La pollution automobile émet de la matière carbonée



mais aussi des gaz précurseurs de particules et d'autres composés tels que les métaux lourds.

Les brumes de sable provoquent une augmentation des concentrations de particules minérales. En effet, la brume de sable a une composition correspondant à celle de la **croûte terrestre** puisque ce sont des particules terrigènes **issues du sol**. Elle est donc constituée d'éléments chimiques tels que l'aluminium, le calcium, le fer, le potassium, le magnésium et le titane. Une augmentation, mais dans une moindre importance, peut être observée au niveau des **particules secondaires** (nitrates, sulfates) formées à partir de précurseurs gazeux (d'origine naturelle ou anthropique) et transportées par ou avec les particules désertiques. Ces dernières peuvent également faciliter la formation de ces particules secondaires par réaction avec les précurseurs gazeux.

Il a été également observé, lors des épisodes de brume de sable, une faible augmentation de la quantité de métaux lourds (arsenic, nickel, cadmium, plomb) et d'autres métaux (baryum, chrome, zinc, cuivre, ...) en raison de la **présence naturelle** de ces éléments dans les particules terrigènes et aussi possiblement par un apport anthropique de ces éléments véhiculés par la brume de sable. Toutefois, les concentrations de ces métaux lourds restent bien **en-dessous des normes environnementales**.

Des composés dits radioactifs peuvent également être mesurés lors des épisodes de brume de sable puisque la radioactivité est un **phénomène physique naturel** issu des propriétés de certains atomes présents dans la croûte terrestre. Cependant, la **faiblesse des taux** de radioactivité mesurés dans l'air ambiant ne permet pas d'envisager un


impact sanitaire lié à l'inhalation de ces particules.

Enfin, la présence de composés anthropiques tel que le **carbone élémentaire** émis lors de processus de combustion peut être observée au niveau de stations éloignées de l'activité anthropique locale. Un **apport transfrontalier** peut, en effet, se faire par le transport de ces composés par ou avec les particules minérales de la brume de sable. Celui-ci peut avoir des origines anthropiques extrarégionales diverses. Un apport de particules issues des feux de biomasse d'Afrique du Nord est, cependant, peu probable, ces derniers ayant lieu de novembre à avril, période où les masses d'air sont transportées vers l'Amérique du Sud plutôt que vers la Caraïbe. Si des apports ponctuels de feux de biomasse ou d'autres sources anthropiques d'Afrique du Nord peuvent se produire, il apparaît clairement, par les études actuelles, que **leurs quantités restent très faibles**.

En revanche, il est observé en Martinique, que les quantités de carbone élémentaire au niveau des zones à trafic dense sont bien plus importantes qu'au niveau des stations éloignées de l'activité anthropique.

Il en va de même pour les concentrations de métaux lourds (arsenic, nickel, plomb, cadmium) mais aussi de composés tels que le cuivre, le fer ou le zinc qui sont également observées en **plus grande quantité proche des zones à trafic dense** puisque tous ces composés sont émis par la circulation automobile locale.

Bien que l'impact sur la santé soit avant tout **fonction de la taille d'une particule**, des effets plus ou moins délétères s'additionnent en **fonction de leur**



composition chimique. Une particule désertique étant composée d'éléments minéraux naturels constitutifs de la croûte terrestre présente donc une composition moins nocive qu'une particule fine carbonée. En effet, ces dernières sont composées d'un **mélange complexe d'hydrocarbures** émises par le trafic routier ou encore le brûlage de biomasse. Bien que le carbone suie, principal composé des particules carbonées, ne soit pas soumis à des normes environnementales, ce composé au vu de sa composition chimique préoccupe les organismes sanitaires. Ainsi, l'ANSES a conclu dans un rapport d'expertise (2019) que **la survenue d'effets sur la santé respiratoire ou cardiovasculaire mais aussi des hospitalisations et des mortalités toutes causes chez l'Homme** peuvent être associées à des expositions aux matières carbonées tant sur le long terme que sur le court terme. Le rapport suggère aussi de possibles effets à long terme des particules

de carbone suie sur la **santé périnatale et la santé neurologique, en particulier chez l'enfant.**

Avec le développement des connaissances ces dernières années et en accord avec les stratégies nationales de surveillance de la qualité de l'air, la mise en place d'une **surveillance en continu du carbone suie** aux abords des axes routiers constitue une des perspectives 2022 de Madinair afin d'évaluer l'impact du trafic routier sur la population locale et **améliorer la connaissance de la contribution anthropique** sur les pics de pollution.

En parallèle, Madinair travaille à l'amélioration des connaissances sur les **particules ultrafines**, objectif clairement affiché et soutenu aujourd'hui par les acteurs de la santé et de l'environnement et s'inscrivant dans les **enjeux nationaux** de surveillance de l'air.



III. Glossaire

III.1 Les acronymes

AASQA : Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l’Air

ANSES : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l’alimentation de l’Environnement et du Travail.

CIRE : Cellules interrégionales et régionales d’épidémiologie

COV : Composés Organiques Volatiles

FDMS : Filter Dynamics Measurement System

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

INERIS : Institut National de l’Environnement Industriel et des Risques

IPSL : Institut Pierre Simon Laplace

LCSQA : Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l’Air

MOCAGE : Modèle de Chimie Atmosphérique de Grande Echelle

NO_x : Oxydes d’azotes

NO₂ : Dioxyde d’azote

NSS : Non Sea Salt. Utilisé dans le cadre du terme « nss-sulfate », c’est-à-dire « sulfate ne provenant pas des embruns marins ».

O₃ : Ozone

PM : terme générique pour « Particules » (Particulate Matter)

PM_{2,5} : Particules fines dont le diamètre est inférieur à 2,5 µm

PM₁₀ : Particules fines dont le diamètre est inférieur à 10 µm

PUF : Particules ultrafines, dont le diamètre est inférieur à 0,1 µm

TEOM : Tapered Element Oscillating Microbalance

ZAR : Zone à Risques

ZAS : Zone Administrative de Surveillance

ZR : Zone Régionale



III.2 Quelques définitions pour la compréhension des termes employés

Particules : Matières en suspension solides et/ou liquides portées par l'eau ou l'air.

Particules PM10 : particules dont le diamètre est inférieur à 10 μm .

Particules PM2,5 : particules dont le diamètre est inférieur à 2,5 μm .

Valeur limite : Niveau à ne pas dépasser, à atteindre dans un délai donné, et fixé sur la base des connaissances scientifiques afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble.

Valeur cible : Niveau à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné, et fixé afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou l'environnement dans son ensemble.

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


Seuil d'information et de recommandation : Niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine de groupes particulièrement sensibles au sein de la population et qui rend nécessaire l'émission d'informations immédiates et adéquates à destination de ces groupes et des recommandations pour réduire certaines émissions. Pour les PM10, ce seuil est à 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière.

Seuil d'alerte : Niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé de l'ensemble de la population ou de dégradation de l'environnement, justifiant l'intervention de mesures d'urgence. Pour les PM10, ce seuil est à 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière.

Episode de pollution : correspond à une période, où les concentrations de polluants dans l'air ne respectent pas ou risquent de ne pas respecter les niveaux réglementaires, selon des critères prédéfinis. Quatre polluants sont intégrés dans la procédure de déclenchement d'épisode de pollution de l'air : l'ozone (O_3), le dioxyde d'azote (NO_2), le dioxyde de soufre (SO_2) et les particules en suspension inférieures à 10 μm de diamètre (PM10).

Matière organique : matière qui provient directement ou indirectement de tissus ou d'organismes vivants, qui contiennent du carbone.

Carbone organique : correspond au carbone contenu dans la matière organique. Il peut être émis directement dans l'atmosphère (carbone organique primaire) et aussi être formé par condensation ou nucléation de composés organiques volatiles (carbone organique secondaire).



Carbone suie : terme générique qui désigne les particules carbonées non organiques émises lors de processus de combustion incomplets.

Carbone élémentaire : (aussi nommé EC) particule de carbone suie qui représente la partie réfractaire de l'aérosol carboné. Il est mesuré en laboratoire après prélèvement sur filtre. Composé purement primaire, apparenté à du graphite pur.

Black Carbon : (aussi nommé BC) particule de carbone suie qui possède la plus grande capacité d'absorption du spectre lumineux. Il peut être mesuré de façon automatique grâce à un aéthalomètre.

Particules minérales : sont des particules terrigènes, issues du sol, et composées des éléments constitutifs de la croûte terrestre tels que l'aluminium (Al), le calcium (Ca), le fer (Fe), le potassium (K), le magnésium (Mg), le sodium (Na) et le titane (Ti).

Particules désertiques : font partie des particules minérales. Elles proviennent de l'érosion du sable des régions arides du monde. Les brumes de sable provenant de la région du Sahara et du Sahel sont constituées de particules désertiques.

Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques : sont des molécules complexes constituées d'atomes de carbone et d'hydrogène. Ils sont issus de tout processus de combustion incomplet aussi bien au niveau domestique (gaz d'échappement automobile, chauffage individuel, fumée de cigarette, aliments grillés, etc.) qu'industriel (fumées d'incinération, sidérurgie, raffinerie de pétrole, etc.).

Benzène : molécule d'hydrocarbure utilisé dans de nombreux domaines : industrie pétrochimique, industrie chimique pour des produits de base pour la fabrication de matières plastiques, colles, etc., industrie électronique. Il est également présent dans les carburants.

Microorganisme : être vivant microscopique tel que les bactéries, les virus et les organismes vivants unicellulaire comme les champignons unicellulaires (levures).

Activités anthropiques : activités résultant de l'intervention de l'Homme.



IV. Introduction

IV.1 Les particules : définition

Le terme de **particules en suspension** est un terme générique qui regroupe sans discrimination, les particules solides et/ou liquides portées par l'eau ou l'air. Les particules en suspension dans l'air peuvent également être appelées **aérosols** (ou PM de l'anglais « particulate matter »).

Un **aérosol** englobe la particule, solide ou liquide, ainsi que le gaz dans lequel elle se trouve en suspension.

Dans le cadre de cette étude nous nous intéresserons aux **particules solides ou aérosols solides en suspension** dans la basse couche de l'atmosphère, la **troposphère**, que l'on désignera sous le terme de **particules**.

Les particules solides de plus grandes dimensions sont généralement appelées **poussières**, bien qu'il n'existe aucune définition scientifique précisant le diamètre minimal au-delà duquel une particule doit être nommée poussière. En revanche, les définitions sont plus rigoureuses concernant les **particules fines**. Les particules de 10 µm (PM10) à 2,5 µm (PM 2,5) sont les particules dites « respirables » et correspondent à la fraction grossière des particules fines, car elles peuvent être retenues par les voies respiratoires. Les particules « réellement » fines sont inférieures à 2,5 µm. Enfin, les **particules ultrafines** désignent les particules de diamètre inférieur à 0,1 µm et sont aussi appelées **nanoparticules**.

Le terme de particules désignant un mélange de plusieurs constituants, leur origine peut

être variée. Ainsi, en raison de l'influence qu'exerce aujourd'hui l'Homme sur son environnement, il faut distinguer les **particules d'origine naturelle**, de celles **d'origine anthropique**. Cependant la complexité à définir ce terme ne s'arrête pas là, puisqu'il faut également tenir compte de leur mécanisme de production. Ainsi, les **particules primaires** sont celles directement émises dans l'atmosphère quand les **particules secondaires** se forment dans l'atmosphère par processus de transformation de gaz en particules (BEGUE, 2012).

IV.2 Les enjeux des particules

IV.2.1 Les impacts sanitaires

L'**impact** des particules sur le système respiratoire est fonction de **leur taille**, de **leur composition** (puisqu'elles peuvent être le support de divers matériaux tels que les pesticides, les dioxines, les métaux lourds ou encore les isotopes radioactifs), de **leur trajectoire** mais également du **temps d'exposition** du sujet. De manière assez schématique, plus une particule est **fine**, plus elle pénètre **profondément dans les voies respiratoires**, comme illustré sur la Figure 1. Alors que les particules grossières vont être retenues par les muqueuses présentes dans le nez et la gorge, toutes les particules inférieures à 10 µm de diamètre peuvent s'installer plus profondément dans les bronches et les poumons.

Le nez, le pharynx, le larynx, les poumons, et par conséquent les voies respiratoires sont les systèmes les plus fréquemment infectés. Par ailleurs, si les particules sont souvent incriminées dans les infections respiratoires,

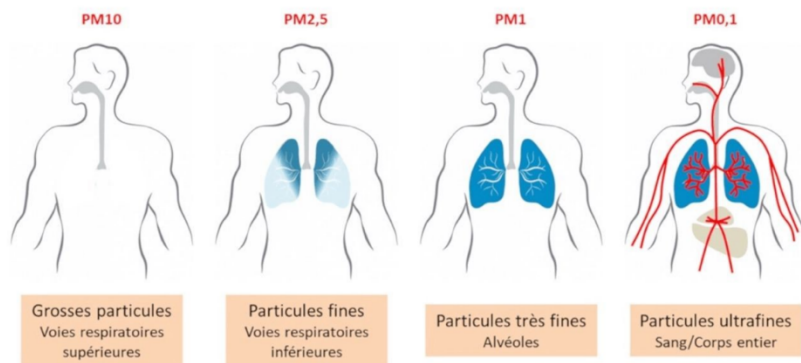


Figure 1 : Impact des particules atmosphériques sur le corps humain, en fonction de leur taille (Source : Encyclopédie de l'Environnement, 2019).

elles semblent également **augmenter le risque de méningite**, donc de l'inflammation des membranes qui entourent le cerveau et la moelle épinière (GHIO, 2014). Elles agissent en altérant les mécanismes de défense des voies respiratoires ainsi que la capacité des poumons à enrayer la prolifération bactérienne. Du point de vue cellulaire, elles peuvent perturber la production des cellules nécessaires à l'élimination des virus ou des bactéries, ou qui travaillent à inhiber la propagation des infections. Selon BROOK et al., 2010, il existe de plus en plus de preuves épidémiologiques permettant de démontrer le lien entre le **niveau de particules dans l'air** et le développement de **maladies cardiovasculaires** tels que l'infarctus du myocarde, l'accident vasculaire cérébral, l'insuffisance cardiaque ou encore les arythmies. Un autre phénomène associé à l'exposition de matières particulaires est l'accumulation de fer dans le corps humain qui tend à exacerber le nombre de maladies infectieuses (GHIO, 2014).


En France, le *Programme de Surveillance Air et Santé*, coordonné par l'Institut de Veille Sanitaire en application de la Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie, a été développé pour permettre une **évaluation**

de l'impact sanitaire des particules atmosphériques à l'échelle locale. Ce programme ne concerne aujourd'hui que 9 villes métropolitaines. Toutefois la CIRE Antilles-Guyane a engagé en 2011, une étude pour permettre à l'agglomération foyale de **d'intégrer ce projet et d'évaluer, à partir des**

données disponibles, l'impact sanitaire à court terme de la pollution atmosphérique en Martinique sur la période de 2003 à 2008.

Si les calculs réalisés dans cette étude doivent être pris à titre indicatif, il apparaît que le **nombre de décès prématurés**, toutes causes et tous âges confondus, imputable à la **pollution atmosphérique** peut être estimé à une soixantaine, entre 2003 et 2008, pour l'ensemble des communes Fort-de-France, le Lamentin et Schoelcher. De plus, une diminution de 5% des niveaux annuels moyens de concentration en particules atmosphériques aurait permis d'éviter une vingtaine de décès sur cette même période (BLATEAU et al., 2012a).

Une autre étude, réalisée sur le territoire martiniquais pour la période de 2001 à 2006, basée sur des données sanitaires et de qualité de l'air, a démontré une **augmentation de la prévalence des maladies cardiovasculaires et respiratoires** (les asthmes et les bronchopneumopathies chroniques obstructives ne sont pas prises en compte) lorsque les niveaux de concentration en particules atmosphériques PM10 s'élevaient de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dans cette étude, BLATEAU et al. (2012b) propose donc d'associer une augmentation de la



concentration en particules de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à la pollution automobile quand une augmentation de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ peut être imputée à un épisode de particules désertiques. Dans ces conditions, il faut donc accorder, en termes d'impact, autant d'importance aux **brumes de sable** qu'à la **pollution automobile**. Toutefois, en se basant sur l'asthme comme indicateur sanitaire, une étude menée à la Barbade sur les années 1996 et 1997, n'a pas permis d'établir un lien entre une augmentation de la concentration en PM10 mesurée dans l'air et les consultations pédiatriques pour asthme (PROSPERO et al., 2008).

IV.2.2 Les impacts climatiques

Les particules peuvent influencer les processus qui déterminent le climat terrestre par **modification du bilan radiatif**. Cette modification est appelée forçage radiatif. Lorsque ce dernier est positif, il implique un réchauffement global de la troposphère, à l'inverse du forçage négatif qui caractérise un refroidissement (BEGUE, 2012).

L'influence des particules sur le bilan radiatif peut être plus ou moins directe. Il existe un phénomène de modification directe par **diffusion ou absorption du rayonnement incident** par les particules. L'absorption peut être définie comme la transformation du rayonnement incident en une autre forme d'énergie, telle que la chaleur, ce qui aura alors pour influence un forçage positif, donc un réchauffement de la basse couche de l'atmosphère. A l'inverse, la réflexion d'une partie du rayonnement incident conduit à une diminution de la quantité d'énergie transmise au sol. Ce mécanisme se traduit par un forçage radiatif négatif, donc un refroidissement (BEGUE, 2012).


Le phénomène d'absorption du rayonnement incident par les particules atmosphériques peut également influencer, de manière semi-directe, sur le bilan radiatif en modifiant la répartition verticale des températures. En effet, la variation des profils de température peut engendrer une **modification des conditions de formation des nuages**, entraînant leur disparition ou une modification de leur extension géographique (HANSEN et al., 1997 ; ACKERMAN et al., 2000).

Cependant, si l'implication des particules dans les changements climatiques actuels est désormais largement reconnue, la **quantification** de leurs impacts reste encore très **incertaine** (ASSAMOI, 2011).

IV.3 Problématiques locales et objectifs de l'étude

L'observation, en Martinique, à intervalle régulier d'une dégradation de la visibilité par des poussières dans l'air suscite de nombreuses interrogations au sein de la population locale. Celle-ci est certes habituée au phénomène, mais peu informée des avancées scientifiques concrètes notamment en termes de quantité de particules respirées.

Avec la **Loi sur L'Air** et l'utilisation rationnelle de l'Energie de 1996, chaque région a été dotée d'organismes spécialisés : les **Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air** (AASQA). Ces AASQA sont des organismes français dont les missions réglementaires sont de **mesurer et d'étudier la pollution atmosphérique dans l'air ambiant**. Madininaise, AASQA de la Martinique, mesure ainsi depuis 2001, en continu et en temps réel, les concentrations



de particules fines dans l'air grâce à un réseau de stations de mesures dispersées stratégiquement sur le territoire.


La présence de particules fines dans l'air est rapidement devenue une problématique sanitaire locale forte et Madinair travaille depuis le début de son activité à améliorer les connaissances sur ce sujet. La Martinique est en effet régulièrement exposée à une **augmentation des concentrations de particules fines** dans l'air. Périodiquement, des épisodes de pollution sont enregistrés sur les particules fines, dites inhalables et dont le diamètre est inférieur à 10 μm (PM10). Les sources de ces particules sont diverses, notamment **d'origine naturelle** comme les embruns marins et les particules biogéniques (particules secondaires formées à partir des gaz émis par la végétation) mais également associées aux **activités anthropiques** telles que l'industrie, l'automobile, l'énergie ou encore l'agriculture. Un phénomène naturel est néanmoins récurrent et atteint spécifiquement l'arc antillais : la **brume de sable**, composée de particules désertiques, provenant des déserts d'Afrique du Nord. Grâce à ses mesures quotidiennes, Madinair observe l'influence de ce phénomène global de brume de sable et des apports anthropiques de proximité sur l'évolution des concentrations en particules fines.

Au-delà de ces mesures en continu, Madinair s'est appliqué à réaliser des mesures ponctuelles afin de déterminer le niveau de pollution en particules dans les zones non couvertes par la mesure fixe, et évaluer l'exposition de la population à ces substances réglementées. En 2010, Madinair a participé à un dispositif national,

le dispositif **CARA** (CARActérisation des particules), mis en place par le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) et en collaboration avec les AASQA volontaires. Ce programme CARA a pour objectif **de fournir des informations sur la composition chimique des particules sur l'ensemble du territoire français**, afin de mieux comprendre leur origine, à la fois en situation de fond mais aussi lors des pics de concentration élevée à proximité des sources anthropiques. Cette recherche des sources permet d'orienter les décideurs locaux dans les actions à mettre en place pour limiter la pollution atmosphérique.

En 2018, dans le cadre de l'obligation de **répondre au contentieux européen** en vigueur, lié à l'augmentation des concentrations en PM10, le Ministère chargé de l'Environnement a missionné le LCSQA pour réaliser une étude nationale sur la composition chimique des particules. Un volet de cette étude a porté sur l'évaluation de la **contribution des particules désertiques lors des pics de pollution aux particules en Martinique**, afin de mettre en œuvre une méthodologie d'estimation systématique de la part naturelle des particules à l'échelle régionale. Dans ce cadre, le LCSQA a analysé les composés chimiques de particules prélevées épisodiquement sur le territoire et a permis d'améliorer les connaissances sur leur composition.

Cette même année, Madinair a pris part à une campagne nationale exploratoire, pilotée par l'ANSES, l'INERIS et Atmo France, consistant à **mesurer les résidus de pesticides dans l'air ambiant** afin de qualifier l'exposition de la population sur le territoire national. Cette étude nationale a



permis l'obtention d'une analyse de paramètres supplémentaires de composition des particules.

Enfin, Madininair évalue également depuis 2010, les **métaux lourds** et les **hydrocarbures aromatiques polycycliques**, présents dans les particules.

Ce rapport vise donc à réaliser une **synthèse de toutes les connaissances acquises par Madininair sur les particules atmosphériques en Martinique**. Une première partie du rapport consistera en une **revue bibliographique** permettant de comprendre l'origine, la composition et les impacts sanitaires et environnementaux des particules atmosphériques collectées sur le territoire, qu'elles soient issues de sources locales ou transfrontalières. La seconde partie de ce rapport s'attachera à l'exploitation de l'ensemble des mesures réalisées par Madininair depuis le démarrage de ses mesures et à la synthèse de l'étude du LCSQA sur les particules atmosphériques. Dans cette deuxième partie, après une brève présentation du réseau de surveillance déployé sur le territoire ainsi que des méthodes et des outils de mesures utilisés par Madininair, une première **étude statistique** basée sur les données quantitatives en PM10 permettra d'apprécier l'évolution des épisodes particuliers sur les 20 années de mesure. Une seconde étude, cette fois qualitative, et basée sur des **données d'analyses chimiques**, permettra d'appréhender la variabilité de la composition des particules sur le territoire et de vérifier le respect des normes environnementales à l'égard des composés réglementés.

Ce rapport traite des données enregistrées de 2001 à 2020. Toutefois, l'analyse

quantitative ne prend pas en compte l'année 2020 en raison des particularités de cette année : les deux confinements qui ont eu lieu durant plusieurs semaines à différentes périodes de l'année et l'épisode de brume de sable exceptionnel durant le mois de juin. L'année 2020 sera donc seulement étudiée dans la partie concernant l'intensité des concentrations obtenues durant les épisodes particuliers.



V. Les particules en Martinique

V.1 Sources locales de particules fines

Chaque territoire a des émissions locales de particules qui lui sont propres. Il existe donc des **sources d'émissions locales** bien identifiées en Martinique. L'inventaire de ces émissions, présentées en fonction de leur origine, naturelle ou anthropique, est l'objet de cette section.

V.1.1 Particules d'origine naturelle

V.1.1.a Les embruns marins

La position insulaire de la Martinique rend pertinente l'étude des particules marines. Les **embruns marins** constituent ainsi la **fraction la plus importante** de particules atmosphériques au monde, toutes origines confondues (WHITE, 2008).

- **Le mécanisme de formation des embruns marins**

Les particules marines primaires se forment par l'éruption de bulles à la surface des océans. En se brisant successivement, une bulle peut ainsi produire une grande quantité de particules marines qui peuvent atteindre la taille d'1 μm . Ces particules fines sont ensuite éjectées vers les hautes altitudes de la troposphère où la vapeur d'eau va en partie s'évaporer. Les particules se concentrent en sodium qui devient le

traceur des sels marins (POSFAI et al., 2000 ; RYU, et al., 2007 ; WHITE, 2008).

- **La composition des embruns marins**

Ces particules **marines primaires**, sont des sels principalement composés de **sodium** et de **chlorure**. Ils sont associés à d'autres composés, présents en moindre quantité, tels que les sulfates, le potassium, le magnésium ou encore le calcium (CALVO et al., 2013).

V.1.1.b Les particules biogéniques

La **biomasse**, qu'il s'agisse de la végétation, des animaux ou de certains micro-organismes, est à l'origine d'une part non négligeable des **particules primaires et secondaires** atmosphériques.

Ainsi, le pollen, les spores de fougères ou encore de champignons sont considérés comme des particules biogéniques primaires, directement émises dans l'atmosphère. Elles présentent en général un diamètre assez grossier, supérieur à 100 μm . Il existe également d'autres particules biogéniques plus petites, généralement de diamètre inférieur à 10 μm , comme les fragments et excréments de plante, d'animaux, les bactéries et virus, ou encore les glucides et les protéines (PÖSCHL, 2005 ; WINIWARTER et al., 2009).

Plusieurs éléments, tels que les phospholipides, le β -1,3-D-glucan, l'ergostérol, le mannitol ou encore l'arabitol ont été proposés comme traceurs des particules biogéniques primaires (CALVO, 2013).



V.1.1.c Les particules minérales

Les particules minérales ou particules terrigènes sont les particules **issues du sol** (terre, sable) et ont donc une composition correspondant à celle de la **croûte terrestre**. Elles sont émises directement dans l'atmosphère **par l'action du vent** et peuvent également être **remises en suspension** après avoir été déposées sur le sol.

V.1.2 Particules d'origine anthropique

V.1.2.a Présentation des émissions locales de particules PM10 à l'échelle de la Martinique par secteur d'activité

A l'échelle de la Martinique, les **activités anthropiques** (activités humaines) à l'origine de particules atmosphériques sont bien identifiées. Madinair a réalisé une évaluation de la quantité de particules rejetées dans l'air sous la forme d'un **inventaire des émissions** de particules PM10, par secteur d'activité. Ce dernier est fondé sur les chiffres de production et de consommation de l'année 2016.

Il est important de bien faire la distinction entre les **émissions de polluants** rejetées par une source et exprimées **en tonnes ou en kilogrammes** et les **concentrations de polluants** que l'on mesure dans l'air

ambiant, exprimées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La concentration d'un polluant dans l'air dépend de son émission mais également de sa **dispersion** suivant les paramètres météorologiques, la topographie ou d'autres paramètres... Pour la majorité des activités polluantes, le taux d'émission est estimé à partir des recommandations méthodologiques du *Pôle de Coordination nationale des Inventaires Territoriaux (PCIT)* mis en place par l'arrêté SNIEBA (*Système National d'Inventaires d'Emissions et de Bilans dans l'Atmosphère*), utilisant des statistiques et des données locales. La Figure 2 présente ainsi les pourcentages de particules atmosphériques d'origine anthropique rejetés par les différents secteurs d'activité. Cet inventaire prend en compte les particules inhalables PM10, dont le diamètre est inférieur à $10\mu\text{m}$.

En Martinique, le principal secteur d'activité producteur de particules atmosphériques d'origine anthropique est **l'industrie manufacturière**, avec **40%** des émissions globales ce qui représenterait 314 tonnes émises pour l'année 2016. Le **transport routier** puis **l'énergie** constituent également deux sources majeures de particules anthropiques, estimées respectivement à

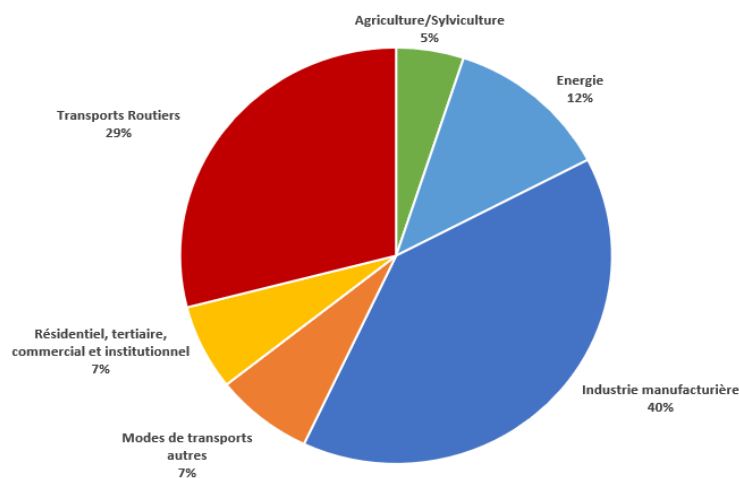


Figure 2 : Inventaire des émissions de particules anthropiques par secteur d'activité, à l'échelle de la Martinique en 2016 (Source : Madinair, 2018).

29%, soit 230 tonnes, et à 12%, soit 98 tonnes, des émissions régionales. Avec 7%, les **transports maritimes et aériens** d'une part (58 tonnes) et le groupement des secteurs **résidentiel, tertiaire, commercial et institutionnel** d'autre part (53 tonnes), représentent les quatrième et cinquième sources de particules en proportion quasi-identique pour l'année 2016. Le dernier secteur identifié dans la production locale de particules est **l'agriculture**. En 2016, elle représentait 5% des émissions globales, soit une production estimée à 40 tonnes de particules.

V.1.2.b Spatialisation des émissions à l'échelle communale

Pour une meilleure visualisation des données, cet inventaire des émissions par secteur d'activité est spatialisé à l'échelle communale (Figure 3 et annexe 5, XI.5). Globalement, si les secteurs de l'industrie et du transport impactent **l'ensemble des communes de la Martinique** à hauteur de la

moitié, voire de la majorité, de l'émission de particules atmosphériques, la Figure 3 permet d'affiner cette répartition. En effet, **dans le secteur ouest**, au niveau des communes traversées par les axes routiers et autoroutiers majeurs reliant Fort de France à Sainte Luce, **le transport tient une place prépondérante dans la production de particules atmosphériques**. A l'inverse, les communes du secteur de **l'est de la Martinique**, notamment Sainte-Marie, la Trinité, ou encore Rivière Pilote, sont majoritairement affectées par **l'industrie**. Quelques communes, telles que Saint-Pierre, le Robert, le Vauclin et Saint-Esprit, sont spécifiquement affectées par l'activité liée à la présence de carrières. L'influence du **secteur agricole** est ressentie sur les communes du **nord de la Martinique** alors que la majorité des émissions de particules atmosphériques liée au **transport maritime** est circonscrite à la commune de **Fort-de-France** qui abrite une zone portuaire essentielle à l'économie de l'île. Si le secteur de l'énergie représente une part non négligeable dans la production de particules à l'échelle régionale, à l'échelle locale, la répartition de ces émissions est explicable par la localisation des centrales thermiques de Bellefontaine et Fort-de-France et de la raffinerie au Lamentin.

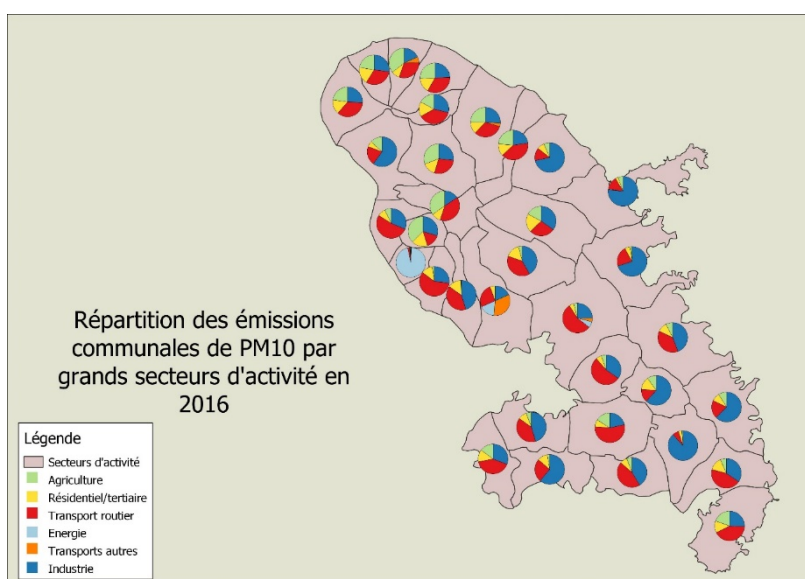


Figure 3 : Répartition des émissions de particules PM10 anthropiques par secteur d'activité et par commune (Source : Inventaire 2016, v2018, Madininair).

V.1.2.c Inventaires des émissions de particules : focus sur les différents secteurs d'activité

• Industrie manufacturière

En Martinique, le principal émetteur de particules est le **secteur industriel**, plus particulièrement les procédés de combustion, tels que les fours à charbon, mais également l'extraction et le travail de matière première.

Les procédés de combustion sont à l'origine de particules carbonées appelées **carbone suie** et **carbone organique primaire**. Bien que les industries représentent la principale source de particules à l'échelle de la Martinique, il reste difficile d'en appréhender la composition exacte car la nature des particules émises varie selon l'étape du procédé mais dépend également de la technologie et du matériel utilisés (CALVO, 2013).

L'exploitation des carrières est quant à elle responsable de l'émission de particules primaires au cours de la production. Cependant, des particules peuvent également être remobilisées lors de la manipulation ou du transport des matériaux extraits.

- **Transport routier**

A l'échelle mondiale, le **trafic routier** représente la principale source de particules primaires et secondaires d'origine anthropique, particulièrement en zones urbanisées (Calvo et al., 2013). Si en Martinique, il ne s'agit que de la seconde source d'émission en particules, elle demeure **la plus polluante à l'égard des**

populations, en raison de l'influence des principaux axes routiers qui traversent les zones urbanisées, à l'inverse de la localisation

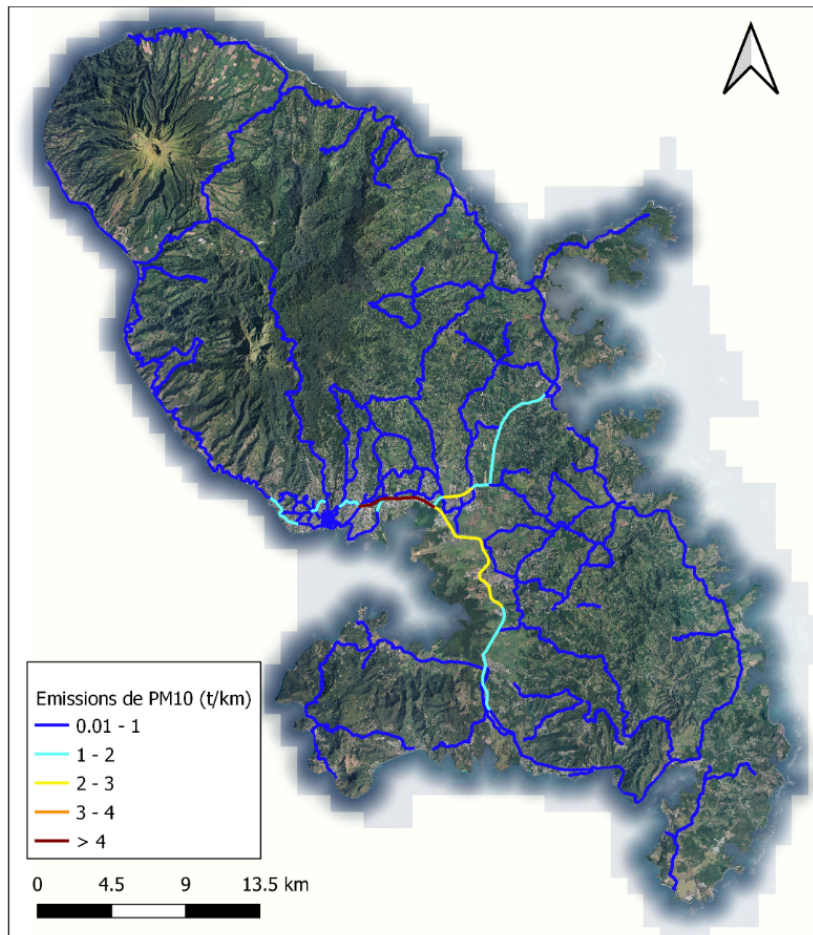



Figure 4 : Cartographie des émissions routières de PM10 en 2016 (Source Madininair)

majoritairement isolée ou côtière des industries. Ainsi, la Figure 4 illustre l'émission de PM10 liée au transport routier pour l'année 2016 et exprimée en tonnes par kilomètre. Ce sont les tronçons reliant Fort-de-France à Sainte Luce et le Robert à Fort-de-France qui apparaissent comme les plus émetteurs en PM10 à l'échelle de la Martinique.

Lorsqu'on parle de particules provenant du trafic routier, il faut prendre en compte, en plus des particules émises par les gaz d'échappement, les particules liées à **l'usure des freins et des pneus, à l'abrasion des**



routes, et la remise en suspension de particules simplement liée à la circulation des véhicules.

Les voitures émettent des gaz et des particules primaires de carbone (Calvo et al., 2013). On trouve également dans la composition des particules issues du trafic routier un grand nombre de **métaux en faible concentration**. L'émission de potassium, de brome ou de chlore est attribuée aux moteurs (PACYNA, 1998). Le cuivre, le zinc ou le cadmium sont associés à l'usure des pneus et des freins (HJORTENKRANS et al., 2007). L'interdiction de l'essence au plomb dans les années 80 a permis une **réduction notable de l'émission de plomb** dans l'atmosphère liée au trafic routier (Calvo et al., 2013). Par ailleurs, une attention particulière est portée sur les véhicules diesel qui sont à l'origine d'émission de composés chimiques cancérigènes, appelés Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP).

- **Energie**

Concernant le secteur énergétique, les principales voies d'émissions proviennent de la **production d'électricité et du raffinage du pétrole**.

La production d'énergie à partir de combustibles fossiles est à l'origine d'une importante source de gaz **précurseur de la formation de particules atmosphériques secondaires** (CALVO, 2013).


- **Résidentiel, tertiaire, commercial et institutionnel**

Cette catégorie recouvre des secteurs d'activité en réalité très variés. Nous nous focaliserons dans ce paragraphe sur **l'apport**

résidentiel, afin de mettre en évidence quelques sources de pollutions particulières mal identifiées comme telles.

La pratique du **brûlage des déchets verts** représente de loin la plus grande contribution de particules atmosphériques du secteur résidentiel. Si ces émissions sont difficilement quantifiables dans la mesure où il n'existe pas d'inventaire fiable en raison du caractère illégal de cette pratique, Madininair a estimé à 5 700 tonnes la quantité de déchets verts brûlés chaque année en Martinique. A titre indicatif, la production de particules fines associée au brûlage de 50 kg de déchets verts équivaut à 5 600 km parcouru par une voiture diesel ou 11 000 km pour une voiture essence (MADININAIR, 2017).

Si la nature très hétérogène des déchets brûlés explique la complexité à définir la composition des particules produites, le brûlage est associé à **l'émission de carbone suie, de carbone organique primaire et de substances cancérigènes tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les dioxines et les furanes** (CALVO, 2013, MADININAIR, 2017). A noter que l'émission de ces substances néfastes est accrue lorsque les végétaux sont humides et associés à des déchets plastiques ou des bois traités. Par ailleurs, LOBERT et al., 1999 ont démontré que l'acide chlorhydrique (HCl), qui n'était habituellement pas retrouvé dans les émissions associées au brûlage de biomasse, se trouvait en grande quantité dans celles associées au brûlage des déchets. **L'utilisation des engins de jardinage** fonctionnant au fioul serait également incriminée dans la production de particules atmosphériques par le secteur résidentiel ainsi que la combustion de propane et de



butane liée au fonctionnement des gazinières et chauffe-eaux.

- **Autres transports**

Par autre transport, il faut comprendre **transport maritime et aérien**, également à l'origine d'une proportion non négligeable de particules et notamment de particules de carbone à proximité des zones aéroportuaires (CALVO et al., 2013). En Martinique, ces sources sont localisées sur les communes de **Fort-de-France et du Lamentin**.

- **Agriculture**

Comme tous les secteurs d'activité, **l'agriculture** est également responsable de l'émission de composés, notamment, **l'ammoniac**. D'après le Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (2015), l'agriculture est responsable à plus de 97% du rejet d'ammoniac d'origine anthropique en France. Une fois dans l'atmosphère, cet ammoniac primaire, joue le rôle de polluant précurseur à la **formation de particules secondaires** par combinaison avec des acides. L'ammoniac particulaire se forme tout d'abord par réaction chimique avec l'acide sulfurique, conduisant à la formation de sels de sulfates d'ammonium. Cette réaction, et donc le taux d'émission de particules atmosphériques, est fortement dépendante du taux de sulfate disponible. Or, il existe depuis les années 90 en Europe une diminution notable du taux de sulfate impliquant une moindre formation de sulfates d'ammonium particuliers. La seconde et donc aujourd'hui principale voie de formation de particule secondaire de l'ammoniac est par réaction avec l'acide


nitrique pour former le nitrate d'ammonium (BESSAGNET et al., 2016).

L'agriculture est également impliquée dans l'émission de particules terrigènes, liée à la **préparation des sols** et généralement de taille supérieure à 2,5 μm , ainsi que l'émission de débris organiques de végétaux en période de moissons. De manière moins directe, l'augmentation de la part des sols dédiée à l'agriculture **tend à accélérer l'érosion éolienne** (TANNER *al.*, 2016). Enfin, à proximité des lieux d'épandage, les **pesticides volatilisés**, participent localement à la quantité de particules atmosphériques (SCHEYER et al., 2008).

V.1.2.d La composition des particules d'origine anthropique

- **Les particules de combustion**

De manière générale, les particules de combustion sont riches en carbone. En théorie, une combustion (autrement dit une oxydation) parfaite de combustibles carbonés transforme l'intégralité du carbone en gaz carbonique ou dioxyde de carbone (CO_2). Dans les faits, la plupart des combustions sont incomplètes, ce qui conduit à l'émission, entre autres, de particules dites primaires, tels que le **carbone suie** et le **carbone organique primaire**. Si ces particules sont qualifiées de primaires, une combustion incomplète peut également produire des particules secondaires par réaction entre les gaz émis, notamment les composés organiques volatiles (COV), et la lumière (ASSAMOI, 2011).



Par ailleurs, la combustion industrielle de charbon génère également des particules primaires d'argiles, de soufre, des chlorures, des carbonates et des métaux, notamment du mercure (SHINDELL et al., 2010). Concernant la combustion de charbon domestique, bien moins contrôlée, elle est associée à l'émission d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et de traces de métaux tels que l'arsenic (As), le sélénium (Se), le mercure (Hg), le chrome (Cr), le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le zinc (Zn) et l'antimoine (Sb) (LIU et al., 2008). Ces éléments se retrouvent particulièrement dans la fraction de particules 2,5 µm (PM 2,5) (LINAK et al., 2007).

En plus de la production de composés carbonés, le brûlage de biomasse entraîne l'émission de **composés inorganiques solubles** tels que du potassium, de l'ammonium, des sulfates et des nitrates (REID et al., 2005 b ; JANHÄLL et al., 2010). Il est également associé à l'émission d'éléments résultant de la **décomposition de la cellulose**, comme le levoglucosan aujourd'hui utilisé comme **traceur de cette activité** (ALVES et al., 2011 a ; OROS et al., 2006).

- **Les pesticides**

Une distinction peut être faite entre les pesticides **inorganiques** et les produits **organiques synthétisés**. Les pesticides inorganiques sont basés sur des éléments chimiques qui ne se dégradent pas tels que le **plomb**, l'**arsenic** et le **mercure**. Les produits organiques synthétisés sont dérivés chimiquement pour la plupart des **produits pétroliers** (BOLAND et al., 2004).

V.1.2.e Les impacts des particules d'origine anthropique


- **Les impacts sanitaires des particules de carbone suie**

En raison de leur composition chimique, les particules de **combustion** présentent un **caractère inflammatoire avéré** (DELFINO et al., 2008 ; RAMGOLAM et al., 2009), notamment impliqué dans l'augmentation des risques de tuberculose (GHIO, 2014). De plus, dans leur travaux, TOREN et al., 2011, ont démontré que les personnes pratiquant des feux domestiques augmentaient le risque et l'intensité des infections respiratoires et des pneumonies.

Actuellement, le carbone suie, émis lors des processus de combustion, n'est pas soumis à des normes environnementales, toutefois ce composé préoccupe les organismes sanitaires. Ainsi, l'ANSES a conclu dans un rapport d'expertise (2019) que la survenue d'effets sur la **santé respiratoire ou cardiovasculaire mais aussi des hospitalisations et des mortalités toutes causes chez l'Homme** peuvent être associés à des expositions aux matières carbonées tant sur le long terme que sur le court terme. Ils suggèrent aussi de possibles effets à long terme des particules de carbone suie sur la **santé périnatale et la santé neurologique, en particulier chez l'enfant**.

- **Les impacts des pesticides**

Les impacts sanitaires



À la suite de la campagne nationale exploratoire des résidus de pesticides, l'ANSES a publié, en octobre 2020, un rapport d'appui scientifique et technique sur les **premières interprétations sanitaires** associées aux substances détectées lors de la CNEP (ANSES, 2020). Les critères de toxicité chronique retenus pour caractériser le danger des substances détectées sont les suivants :

- Les effets cancérogènes
- Les effets mutagènes
- Les effets reprotoxiques et sur le développement
- Les effets perturbateurs endocriniens
- Les effets neurodégénératifs
- Les effets liés à une toxicité spécifique pour certains organes cibles par suite d'une exposition répétée

Lors de cette campagne, il a donc été détecté des **substances cancérogènes** chez l'Homme et/ou **reprotoxiques** chez l'Homme et/ou **perturbateurs endocriniens**.

Les impacts environnementaux

Au-delà de retrouver des pesticides dans l'atmosphère, ceux-ci peuvent également aboutir **dans les sols** ou encore dans l'**eau** par lessivage des surfaces lors de pluies. Les organismes vivants de ces milieux sont alors affectés également. Par ailleurs, un pesticide est **persistant** et peut donc **s'accumuler dans l'environnement** ou dans la **chaîne alimentaire** provoquant une pollution chronique (BOLAND et al., 2004).

V.2 Sources transfrontalières de particules

V.2.1 Particules désertiques

V.2.1.a L'origine des particules désertiques en Martinique

Les particules désertiques sont des particules primaires, produites directement par l'action mécanique du vent et dont le cycle de vie se divise en trois phases, l'**émission** depuis les régions sources, le **transport** et le **dépôt**.

Les particules désertiques trouvent leur origine dans les **régions arides à semi-arides**, caractérisées de manière climatologique par un taux de précipitation annuel inférieur à 200 millimètres. Ces régions sont fortement soumises à l'érosion éolienne en raison de l'absence de couvert végétal et d'un faible taux d'humidité des sols (SEINFELD et al., 1998 ; GOUDIE, 2009). Enfin, le dernier facteur déterminant la formation de particules désertiques reste la quantité de matériel fin disponible à la surface des sols (WEBB et al., 2006). Cette disponibilité est favorisée par de nombreux facteurs : climatique, géologique, topographique ou encore biologique, faisant intervenir différents processus mécaniques tel que la désagrégation, l'érosion ou l'abrasion (BEGUE, 2012).

Dans leurs travaux, PROSPERO et al., 2002, définissent **neuf régions sources de particules désertiques** à l'échelle du globe, principalement localisées dans l'hémisphère nord (annexe 1, XI.1). Ces particules sont émises à hauteur d'environ **2000 méga tonnes à l'échelle annuelle** (YU et al., 2015).

Au sein de ces régions sources, des zones d'émissions préférentielles, aux caractéristiques dynamiques et topographiques spécifiques, appelées « hot spot », permettent d'affiner cette distribution géographique. La majeure partie de ces « hot spot » se concentre sur les continents africain et asiatique, et sont souvent associés à des dépressions topographiques fermées (GINOUX et al., 2001 ; PROSPERO et al., 2002), le Sahara étant la zone émettrice d'aérosols désertiques **la plus importante au monde**. On estime, en effet, que plusieurs centaines de méga tonnes de particules désertiques provenant du Sahara sont émises dans l'atmosphère chaque année, la plupart d'entre elles portées par les vents au niveau du tropique dans la **direction de l'Océan Atlantique nord et le continent américain** (YU et al., 2015).

Quatre zones d'émission particulièrement actives ont pu être mises en évidence (ENGELSTAEDTER et al., 2006 SCHEPANSKI et al., 2012) : **la dépression de Bodélé dans la région du Tchad, l'Afrique de l'Ouest** notamment dans une zone située à la jonction entre le Mali, la Mauritanie et l'Algérie avec le **désert du Tanezrouft**, et les régions **libyenne** et **soudanaise** (désert de Nubi) (Figure 5). Il a été de nombreuses fois établi (GOUDIE et al., 2001 ; ISRAELEVICH et al., 2002 ; WARREN et al., 2007) que la dépression de Bodélé représente la source la plus importante de particules désertiques au monde.

Les sources en **Afrique de l'Ouest** constituent les sources majoritaires de **particules désertiques en Martinique**.

De manière générale, il a été démontré que la fréquence de ces phénomènes serait **intensifiée par la modification anthropique des surfaces désertiques**. En effet, l'augmentation des feux de forêt, l'enlèvement du couvert végétal à des fins agricoles, la dessiccation des lacs ou encore l'épuisement des ressources souterraines sont autant de facteurs de désertification qui tendent à accentuer le phénomène de particules désertiques (GINOUX et al., 2010, GOUDIE et al., 2013). A titre d'exemple, MULITZA et al., 2010, ont établi un lien entre l'augmentation de la production de particules au début du 19^{ème} siècle et l'avènement de l'agriculture intensive dans la région du Sahel à cette même époque.

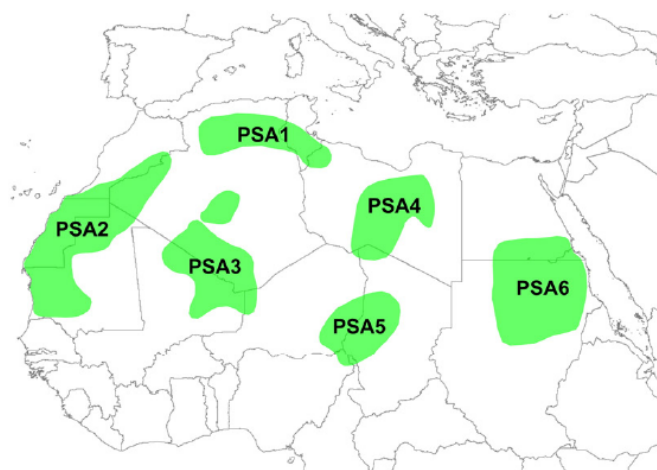



Figure 5 : Zones sources majeures potentielles (PSA : Potential Sources Areas) proposées par Schevens et al. (2013) issu de Formenti et al. (2011) à partir des résultats de Brooks & Legrand (2000), Middleton et Goudie, 2001, Caquineau et al. (2002), Israelevich et al., 2002 et Prospero et al., 2002 et Schepanski et al. (2009).

V.2.1.b Vecteur de dispersion



L'émission de particules désertiques dans l'atmosphère est un processus fortement tributaire du vent qui en est également le vecteur de transport. Pour décrire ce transport, il est possible de distinguer le processus de mobilisation des particules disponibles à la surface des sols, du transport à grande échelle.

- **La mobilisation des particules désertiques depuis les zones sources**

La production de particules désertiques est dépendante de la **vitesse du vent** qui, par son action mécanique, arrache les particules du sol. De manière très théorique, c'est à partir de la vitesse du vent moyen que l'on peut définir la vitesse de frottement ou de friction, qui permet de quantifier la capacité du vent à mobiliser des particules. **Il existe donc, pour chaque nature de sol, une vitesse minimale seuil pour qu'il y ait mobilisation des particules désertiques vers l'atmosphère** (SCHWANGHART et al., 2007 ; SCHEPANSKI et al., 2009).

Une fois arrachée du sol, c'est le diamètre de la particule qui définit son mouvement. Les particules inférieures à 60 μm peuvent être **entraînées en suspension**, mais parmi cette fraction, **seules les particules inférieures à 20 μm seront transportées sur de longues distances**, quand celles supérieures retomberont à proximité des zones sources. Les particules de diamètre supérieur, allant jusqu'à 2000 μm , ne sont pas mobilisées par suspension mais subissent d'autres moyens de transport (appelés saltation ou reptation) qui peuvent entraîner la production de particules secondairement formées, plus fines, et qui seront à leur tour mobilisées par

un transport en suspension (HAMBLINI et al, 2001).

Le processus de **mobilisation de particules**, dans la mesure où il est dépendant du régime des vents, présente un caractère cyclique, diurne et surtout **saisonnier**, très marqué. Ainsi, en région nord-africaine, la production de particules désertiques est faible entre les mois d'octobre et décembre, période au cours de laquelle quasiment seule la dépression de Bodélé fonctionne comme une source active. Son activité croît progressivement jusqu'au mois de mars mais c'est **entre avril et juin** que la production de particules désertiques est à son maximum. Au cours de cette période, toutes les zones source de particules désertiques sont impliquées, particulièrement l'Afrique de l'Ouest qui maintient son activité de production jusqu'à septembre tandis que le sud du Sahara redevient inactif (MIDDLETON & GOUDIE, 2001, LE QUILLEUC, 2019).

- **Le transport des particules désertiques à grande échelle**

Le contexte nord-africain est particulièrement propice à l'**activation des zones sources** et au transport en altitude des particules désertiques en raison de l'existence d'un certain nombre de processus dynamiques et météorologiques tels que le flux d'Harmattan, **vent sec typique des saisons sèches**, le **flux de mousson chargé d'humidité** et la convergence de ces deux flux en basse couche de l'atmosphère, l'occurrence de systèmes convectifs ou encore d'activités

cycloniques (BEGUE, 2012). L'ensemble de ces mécanismes de soulèvement constitue un moyen efficace pour la **distribution verticale** des particules désertiques dans l'atmosphère, qui seront ainsi

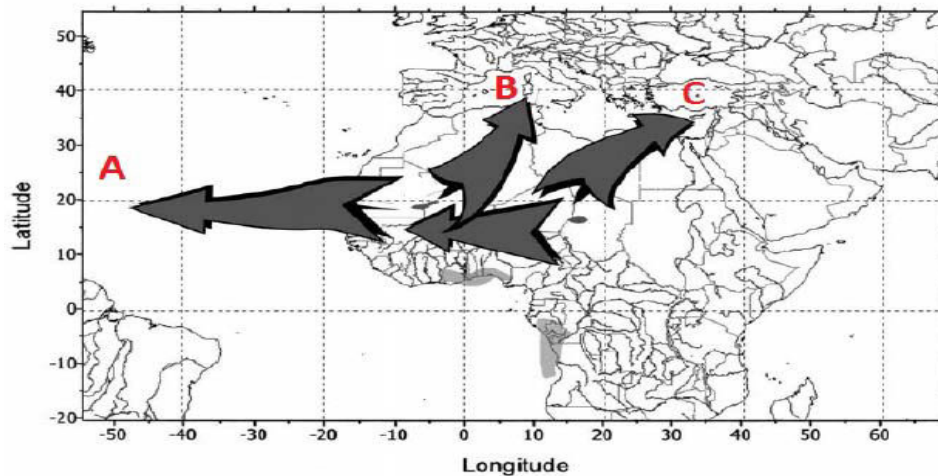


Figure 6 : Identification des principales trajectoires de particules désertiques depuis les zones sources nord-africaines (BEGUE, 2012).

disponibles au **transport longue distance**. Le transport des particules désertiques en provenance des zones sources nord-africaines se fait globalement vers trois régions bien identifiées (Figure 6) :

- **A : Les régions transatlantiques.** Dans le détail les Etats-Unis et les Caraïbes en été, l'Amérique du Sud en hiver.
- **B : Les régions nord-méditerranéenne et européenne**
- **C : La région est-méditerranéenne et le Moyen-Orient**

Dans cette étude, nous nous intéresserons uniquement à la trajectoire transatlantique, qui est à l'origine des apports transfrontaliers de particules désertiques en Martinique et qui représente la principale voie de transport hors continent Africain. Toutefois, il faut noter que le transport B, bien qu'il soit moins fréquent, peut-être observé et à l'origine d'épisode brumeux sur le territoire métropolitain.

Il est important de noter que, selon la saison, le transport vers le continent américain des aérosols désertiques, ne se fait pas de la même façon comme cela est

schématisé sur la Figure 7. En effet, de manière générale, **deux grands systèmes de transports** ont lieu sur l'Afrique de l'Ouest (CHIAPELLO et al., 1997). Pendant **l'hiver**, les alizés agissent à environ 3km d'altitude et **emmènent les particules de toutes tailles d'est en ouest**.

L'été, un transport se fait à hautes altitudes dans la couche d'air saharienne (en anglais, Saharan Air Layer ou SAL) **entre 1,5 et 7km**

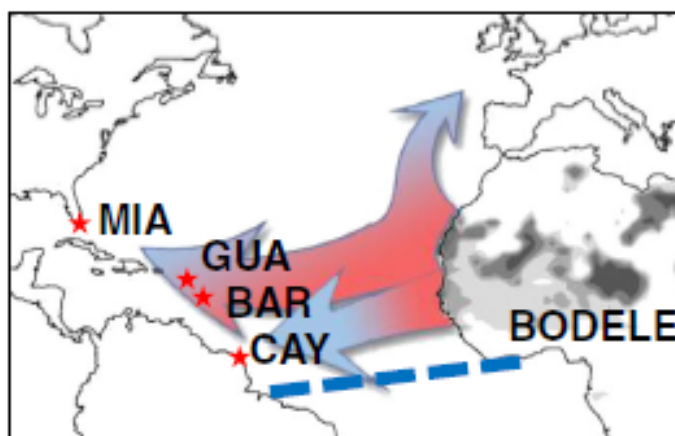


Figure 7 : Schéma du transport des particules désertiques depuis l'Afrique du Nord selon l'altitude et la saison : le transport vers les Caraïbes se fait durant le printemps/été à hautes altitudes, le transport vers l'Amérique du Sud se fait dans les basses couches de l'atmosphère durant l'hiver. La ligne en pointillés représente la position la plus au sud de l'ITCZ (issu de Prospero et al., 2014).

d'altitude, seules les grosses particules tombent suffisamment vite pour rejoindre la

surface. Les plus fines sont ainsi transportées sur de plus longue distance.

Il existe un lien ténu entre la position géographique de la Zone de Convergence Inter Tropicale et le maximum de concentration en particules observé entre mai et septembre en Martinique. **La Zone de Convergence Inter Tropicale**, couramment abrégée ZCIT, est une zone où se rencontrent les alizés, vents d'Ouest des régions intertropicales, des deux hémisphères Nord et Sud (www.meteofrance.fr). La variation géographique de cette zone est liée, entre autre, au **régime des moussons** (PARKER et al., 2005) et à la position de la **couche d'air saharienne** (couche de l'atmosphère extrêmement chaude et sèche qui peut se charger en particules désertiques et qui prévaut en Afrique du Nord) (WILCOX et al., 2010). En **janvier**, elle atteint sa position la plus basse (Figure 8), période où le maximum de particules à l'origine de l'Afrique atteint **l'Amérique du Sud**. A l'inverse, elle gagne sa position la plus haute en **juin**, où elle remonte sur **les Antilles et l'Amérique Centrale**. C'est au cours de cette période

ZCIT joue donc un rôle clé dans cette dynamique en limitant à une zone précise le déplacement des particules désertiques (EUPHRASIE-CLOTILDE, 2018).

- **Synthèse sur le mécanisme de transport transatlantique des particules désertiques**

La mobilisation des particules désertiques depuis les zones sources se fait donc en deux temps. Dans un premier temps, l'action mécanique du vent permet de soulever ou d'arracher du sol les particules afin de les rendre disponibles au transport en suspension. Selon leur taille, elles subiront ensuite un transport à plus ou moins longue distance, entraînées par les vents forts d'altitude, à une hauteur comprise entre 1 500m et 6 000m, selon la saison. Si une partie des particules désertiques sédimente au cours de leur transport, la convection des basses couches atmosphériques suffit à maintenir une quantité importante de matériaux en suspension qui achèveront leur cycle de vie dans une zone de dépôt transatlantique (Figure 9).

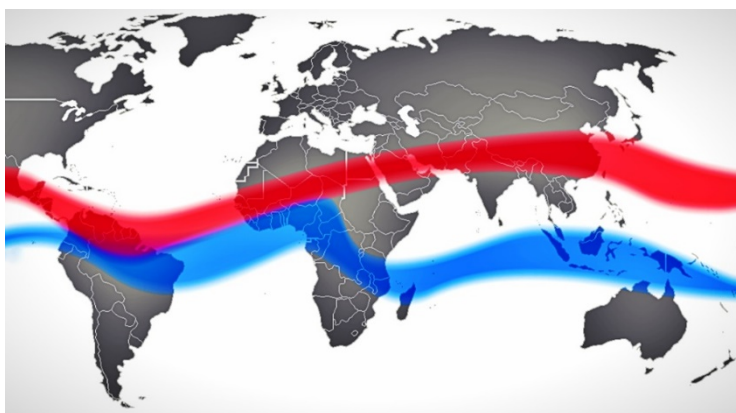


Figure 8 : Position de la Zone de Convergence Inter Tropicale en juin (en rouge) et en janvier (en bleu).

que la fréquence des épisodes de particules désertiques s'intensifie en Martinique. La

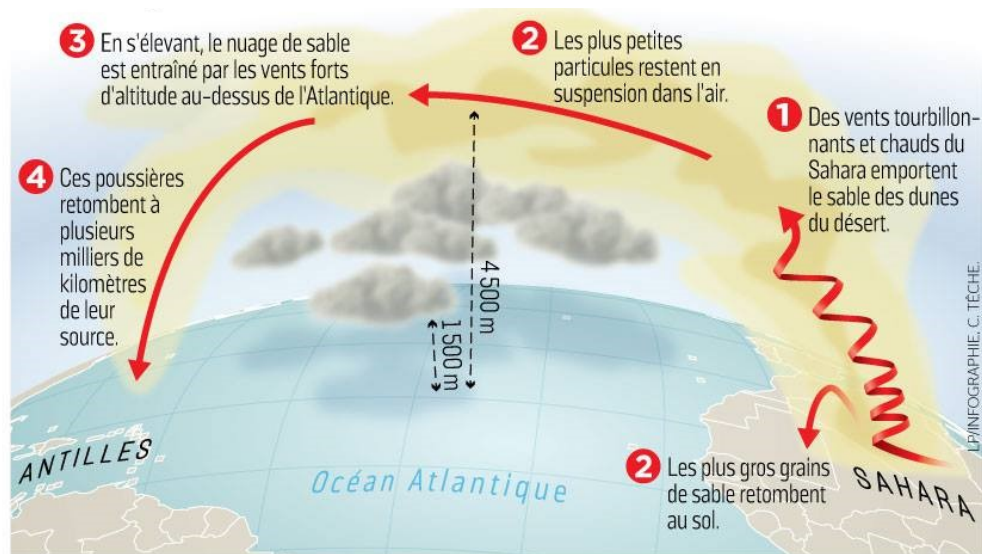


Figure 9 : Synthèse du transport particulaire transatlantique, Source : Météo France Antilles.

V.2.1.c La composition des particules désertiques


De manière générale, une particule désertique est composée majoritairement d'un **mélange de minéraux silicatés** comme du quartz, du feldspath et de l'argile, de potassium (K), d'**oxydes**, tels que le dioxyde de silicium (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), les oxydes ferreux (FeO) et ferrique (Fe_2O_3), l'oxyde de calcium (CaO) et de **carbonates**, à la fois de calcium (CaCO_3) et de magnésium (MgCO_3) (Institut de Veille Sanitaire, FAVEZ et al., 2020). Ce sont ces éléments qui sont pris en compte dans la *méthodologie d'estimation des concentrations en poussières sahariennes* décrite par le *guide Européen pour l'identification des dépassements d'origines naturelles*¹. Néanmoins, BOZLAKER et al., 2018, ont pu analyser également une cinquantaine d'éléments chimiques (Li, Be, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga,

As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, W, Pb, Th et U) dans les particules désertiques qui atteignent l'île de la Barbade.

Dans le détail, leur composition est fortement **dépendante de la zone source**. KLAVER et al., (2011) ont mis en évidence une plus grande proportion d'oxydes de fer dans les particules sahéliennes que dans celles provenant des sources sahariennes. Ce sont ces oxydes qui donnent leur couleur ocre aux particules désertiques. Par ailleurs, une plus grande abondance de carbonates est, par exemple, retrouvée dans le nord-ouest de l'Afrique de l'Ouest que sur le reste du territoire (SCHEUVENS et al., 2013). Le fer, le vanadium ou encore le titane sont des éléments chimiques fréquemment retrouvés dans les particules sahariennes (PEREZ et al., 2008). En outre les éléments de la famille des terres rares ou les isotopes radioactifs (tels que le plomb, le strontium ou le

1

https://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/pdf/sec_2011_0208.pdf



néodyme) en quantités de trace dans les particules sahariennes sont des éléments discriminants efficaces pour distinguer les différentes sources (BOZLAKER et al., 2018 ; LE QUILLEUC, 2019). A titre d'exemple, BOZLAKER et al., 2018, ont démontré grâce à l'apport des isotopes radioactifs du plomb, que **la dépression de Bodélé** (dépression topographique située au nord du Tchad), pourtant considérée comme la plus importante source de particules désertiques au monde, ne participe que **peu à l'apport transatlantique de particules mesurées à la Barbade en période estivale**. En effet, la dépression du Bodélé est une source plus importante pour l'Amérique du Sud par le transport durant l'hiver dans les basses couches de l'atmosphère apportant ainsi des éléments nutritifs tels que le fer ou le potassium au niveau de la forêt amazonienne (ABOUCHAMI et al., 2013).

Une fois dans l'atmosphère, les particules peuvent subir une modification de leur composition originelle, par exemple, par la dissolution des carbonates (AL MOMANI et al., 2007) ou encore par réactions chimiques entre les éléments constitutifs des particules et les composants présents dans l'atmosphère. Par ailleurs, la composition chimique étant liée à la taille des grains des particules, une **différence de composition peut être observée selon la taille des grains étudiés**. Il a été identifié, par exemple, des rapports isotopiques du strontium plus élevés dans les fractions fines (MEYER et al., 2011). Cependant, l'état des connaissances sur tous ces mécanismes n'est que partiel. Ce constat explique **la complexité à définir la composition chimique d'une particule**, et


justifie l'importance et la pertinence de l'étude de la pollution particulaire.

V.2.1.d Les impacts des particules désertiques

- Les impacts sanitaires

A titre d'exemple, des études menées à Trinidad ont permis d'établir un lien entre l'augmentation du nombre de cas d'hospitalisation pour asthme et l'occurrence d'épisodes de brume de sable en Afrique (GYAN et al., 2005). De nombreuses études épidémiologiques corroborent cette association à court terme entre le **niveau ambiant de particules atmosphériques** et différents **effets sanitaires** tels que les admissions hospitalières, mais également la mortalité, la médication et les consultations médicales, ainsi qu'une augmentation des réactions inflammatoires pulmonaires et la survenue de symptômes respiratoires (BLATEAU et al., 2012).

Toutefois, PROSPERO et al. 2008 apportent par leurs travaux un peu de nuance à ces études. Ils soulignent que la plupart d'entre elles sont réalisées en **milieux urbanisés** et qu'un lien direct entre la prévalence d'asthme et les épisodes de brume n'est pas judicieux dans un tel contexte puisqu'il faut prendre en compte l'impact possible d'autres polluants et en particulier les **véhicules diesel**. Ils ont donc, de leur côté, réalisé une étude de deux ans à la Barbade sur la relation entre les concentrations quotidiennes de particules désertiques (prélevées dans une zone sans influence anthropique) et les taux de fréquentation pour l'asthme pédiatrique. Il n'a été dressé **aucune relation évidente**




entre les deux facteurs bien qu'ils admettent qu'ils puissent exister des liens plus subtils. Cependant, les concentrations de particules inférieures à 2,5 µm de diamètre sont suffisamment élevées pour **dépasser les normes de l'agence de protection de l'environnement des Etats-Unis**. Les particules désertiques d'Afrique du Nord collectées à la Barbade peuvent donc constituer une menace pour la santé en produisant des symptômes différents de ceux de l'asthme. Néanmoins, le rapport d'expertise collective sur les *Effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie*, publié en 2019 par l'ANSES, met en avant le fait que la seule publication qui ait examiné les effets délétères d'une exposition aiguë aux particules désertiques (WILFONG et al., 2011) présente des **preuves limitées** uniquement obtenues chez des animaux sains. Par conséquent, à concentration équivalente, le risque associé aux particules désertiques serait très probablement plus faible que celui des particules dérivées de la combustion ou des métaux de transition solubles, par exemple.

Plusieurs études espagnoles ont, par ailleurs, mis en avant que la toxicité des PM10 est deux fois plus importante durant les jours avec épisodes de particules désertiques que sans. Cependant, il a été démontré que cette toxicité est liée aux composés anthropiques dont la concentration augmente également pendant les épisodes de particules désertiques et non aux particules minérales désertiques. Cela s'observe toujours même trois jours après la fin de l'épisode de particules désertiques. En effet, les épisodes de particules désertiques à Barcelone, où s'est déroulée cette étude, cause une réduction de l'épaisseur de la couche limite ayant comme conséquence l'accumulation

de polluants locaux anthropiques expliquant l'augmentation des effets nocifs des PM10 sur la santé (Querol et al., 2019). Par ailleurs, la quantité importante de particules désertiques peut favoriser la formation de polluants secondaires, les événements de particules désertiques étant plus intenses en Espagne durant l'été quand la capacité de l'atmosphère à produire des polluants particuliers secondaires est plus importante que durant les autres saisons (Querol et al., 2019).

La majorité des études menées sur l'impact sanitaire des épisodes de particules désertiques s'intéresse aux effets sur l'appareil cardio-respiratoire. Le projet BrumiSaTerre, financé par l'ANSES dans le cadre du PNR-EST (Programme National de Recherche Environnement Santé Travail) mis en place par l'IRSET, le LERES, Gwad'air, l'institut Pasteur de Guadeloupe et l'Université de Bogota, élargi le champ d'étude en développant un sujet encore peu documenté : **l'influence des épisodes de particules désertiques sur la croissance fœtale** en Guadeloupe. Le nombre important d'issues défavorables de grossesses dans les Antilles françaises, l'occurrence avérée d'épisodes de brume de sable sur les Caraïbes et le lien attesté entre une croissance fœtale à risque et l'exposition à certains métaux, présents naturellement dans les particules désertiques et/ou d'origine anthropique et véhiculés par la brume de sable, sont autant d'arguments qui ont initié cette étude. Si l'ensemble des conclusions n'est pas encore disponible, les premiers résultats démontrent une corrélation entre l'exposition aux particules atmosphériques durant la grossesse et l'augmentation du risque de naissances prématurées (VIEL et al., 2019).



Enfin, l'Institut de Veille Sanitaire a recensé plusieurs études européennes montrant une augmentation de l'activité de certains éléments radioactifs comme le ^{137}Cs (Césium 137) et le ^{40}K (Potassium 40) au cours d'épisodes de brumes de sable. Cependant, les **faibles taux de radioactivité dans l'air ambiant**, associés à ces pics d'activités ne permettent pas d'envisager un impact sanitaire lié à l'inhalation de ces radionucléides exogènes (KARLSSON et al., 2008 ; HERNANDEZ et al., 2005a ; HERNANDEZ et al., 2005b). En effet, la radioactivité est un **phénomène physique naturel** issu des propriétés de certains atomes présents sur Terre. L'homme est ainsi exposé quotidiennement à cette source radioactive naturelle dont l'impact, bien qu'il soit variable à l'échelle du globe en fonction de la nature des sols, reste **négligeable pour la santé**.


- **Les impacts environnementaux**

Les particules désertiques ont aussi un impact sur **les cycles biogéochimiques**. En effet, ils sont une source importante de **micro-nutriments** dans l'océan (notamment le fer présent dans les aérosols désertiques) (PARIS et al., 2010) et dans les sols (BRISTOW et al., 2010).

L'influence des particules sur la végétation et les sols peut être variable. Dans le cas de dépôts enrichis en nutriments, comme le phosphate et le nitrate, l'impact peut être **bénéfique pour la croissance végétale** (TYSON et al., 2002). Une récente étude a ainsi démontré le rôle des particules sahariennes dans la productivité de la forêt amazonienne. Cet immense écosystème, dont le rôle prépondérant dans le maintien de l'équilibre climatique planétaire n'est plus

à démontrer, nécessite un apport en nutriments pour maintenir son équilibre. La productivité de la forêt amazonienne est en réalité fortement conditionnée par la disponibilité en phosphate dans les sols. Or, en raison des fréquentes pluies, les sols du bassin amazonien en sont dépourvus. Aussi, YU et al. 2015, ont démontré, sur une période d'étude de 7 ans, qu'il existe un apport annuel moyen de 27,7 millions de tonnes de particules désertiques (avec toutefois une forte variabilité interannuelle) dont 22 000 tonnes de phosphate, d'origine saharienne. Cet **apport transatlantique permet ainsi de compenser la perte en nutriments liée aux lessivages des sols**.

Enfin les particules désertiques contribuent au **développement de l'écosystème marin** tel que les phytoplanctons, à travers le dépôt d'éléments nutritifs tel que le fer (PARIS et al., 2010). Cependant, cet apport d'éléments nutritifs tend également à **stimuler la production d'algues toxiques** faisant l'objet d'un problème de santé publique dans les environnements côtiers (GOUDIE, 2013). Plusieurs hypothèses ont été dressées à propos de la récente présence d'algues sargasses dans les Caraïbes ; telles que la **diminution de cyclones** au cours de la dernière décennie qui semble créer des conditions optimales pour la croissance des algues ou la déviation du Gulf Stream vers le sud qui favoriserait un afflux d'algues dans les Caraïbes (LOUIME et al., 2017). Les éléments nutritifs présents dans les particules sahariennes mais également dans les sédiments résultant de la déforestation du bassin amazonien au Brésil peuvent **contribuer à faciliter la croissance de ces algues** (LOUIME et al., 2017). Les **inondations du fleuve Amazone** ainsi que des **ouragans d'une intensité extrême**



peuvent aussi être la source de nutriments initiant la formation de sargasses (OVIATT et al., 2019).

V.2.2 Autres sources transfrontalières potentielles

Les zones sources d'émission de particules désertiques à destination de la Martinique sont aujourd'hui bien identifiées. Dans ce contexte, en connaissance des mécanismes de transport, il apparaît intéressant de rechercher d'autres sources de production de particules, notamment anthropiques, entre autres à proximité de ces mêmes zones sources, susceptibles d'impacter la Martinique.

Ainsi, dans cette section, nous aborderons les autres apports transfrontaliers potentiels de particules à travers un inventaire non exhaustif des sources de production de particules en Afrique de l'Ouest et ailleurs. L'objectif final est de mieux appréhender la **composition chimique des particules récoltées en Martinique** et d'identifier des éléments spécifiques de ces activités transfrontalières permettant de qualifier, au mieux de quantifier, l'apport en particules externe à la Martinique.

V.2.2.a Les particules de carbone suie transfrontalières


En Afrique, il existe trois principales sources d'émission de particules de combustion, majoritairement anthropiques et donc en

constante augmentation étant donné le contexte d'expansion démographique : (ASSAMOI, 2011)

- **Les feux de biomasse ou de végétation**, liés aux pratiques culturelles et agricoles ainsi qu'à la déforestation,
- **Les biofuels**, par combustion de bois, de charbon de bois ou encore de résidus agricoles, à la fois pour une utilisation industrielle et domestique. En effet, « *le charcoal making* » est très répandu en Afrique dans le secteur domestique, il s'agit d'un procédé de fabrication de charbon de bois à partir de bois. La combustion mal contrôlée est incomplète et donc fortement émettrice de particules (ASSAMOI, 2011).
- **Les combustibles fossiles**, principalement utilisés dans les secteurs du trafic routier, des industries et du domestique.

Concernant les feux de biomasse, CALABRI et al., (1992), estiment que sur les 750 millions d'hectares de végétation brûlés chaque année, près de la moitié peut être attribuée à l'Afrique, générant ainsi 46% des émissions de carbone suie et 55% des émissions de carbone organique primaire à l'échelle mondiale (LIOUSSE et al., 1996).

En 2000, le pourcentage de carbone suie par la biomasse représentait 230 000 tonnes face à 44 000 tonnes pour les



biofuels et 20 000 tonnes pour les combustibles fossiles (JUNKER et al., 2008).

La première section de cette partie, concernant les particules désertiques arrivant en Martinique, a permis d'identifier l'Afrique de l'Ouest comme principale région émettrice. Nous proposons donc de détailler l'inventaire des émissions de carbone suie et de carbone organique primaire dans cette région, inventaire établi par ASSAMONI, 2011.


L'Afrique de l'Ouest était, en 2005, la région la plus émettrice de carbone suie. La majorité des émissions est attribuée au **secteur domestique** et au **trafic routier**. Par ailleurs, le Nigéria est le premier pays producteur et exportateur de pétrole d'Afrique de l'Ouest, responsable de plus de la moitié des émissions globales de cette région. Quatre combustibles ont été identifiés comme particulièrement impliqués dans la production de ces émissions : les déchets animaux, le bois, le diesel et le bois pour la production domestique de charbon de bois. Concernant la production de carbone organique primaire, et toujours en considérant les chiffres de l'année 2005, l'Afrique de l'Ouest se place à nouveau comme la région la plus émettrice.

Entre les feux de biomasse et les activités anthropiques, l'Afrique de l'Ouest constitue une région fortement **émettrice de particules de combustion**. La recherche de ces composés, carbone suie et carbone organique primaire, doit se poursuivre afin de mieux comprendre la composition chimique des particules en Martinique.

V.2.2.b Les microorganismes

Les systèmes météorologiques permettant le transport des particules désertiques depuis l'Afrique de l'Ouest jusque dans les Caraïbes, peuvent aussi servir de mécanismes pour permettre le **transport rapide de microorganismes** qui peuvent être transportés sur plusieurs centaines de kilomètres (PROSPERO et al., 2005). Sont définis par microorganismes des êtres vivants microscopiques tels que les **bactéries**, les **virus** et les organismes vivants unicellulaire comme les **champignons unicellulaires** (levures). Dans leur étude PROSPERO et al. (2005) ont donc procédé à des mesures d'aérosols inorganiques incluant les particules désertiques, ainsi qu'à des mesures de bactéries et de champignons afin d'améliorer les connaissances sur les conditions et les facteurs influençant le transport de microorganismes viables depuis l'Afrique de l'Ouest jusque dans les Caraïbes. Cette étude a été mise en place à la Barbade avec un échantillonnage en haut d'une tour de 17 mètres localisée sur la côte la plus à l'est de l'île afin de s'affranchir de toute contribution locale.

Les résultats ont révélé des concentrations en bactéries et en champignons proches de zéro durant l'hiver. Ces concentrations augmentent au printemps et demeurent **relativement élevées durant l'été** avant de diminuer en automne. Bien que les pics de concentrations en bactéries et en champignons soient relativement proches, ils ont quand même pu observer des différences et **aucune corrélation n'a pu être observée entre les concentrations de bactéries et de champignons**.



Ces concentrations montrent tout de même un cycle saisonnier similaire à celui des particules désertiques : extrêmement basse en hiver, hautes en été. En revanche, bien que les concentrations en microorganismes soient associées à celles des particules désertiques, aucune corrélation n'a pu être observée. Cependant, les variations saisonnières de concentrations de particules désertiques et de microorganismes étant proches, cela suggère que ces derniers proviennent également **d'Afrique du Nord**. Cette hypothèse a été confirmée par l'étude de rétro-trajectoires faites à partir du modèle Hysplit du NOAA. Néanmoins, les concentrations de microorganismes déterminées lors de cette étude se sont révélées **100 à 1000 fois plus faibles que les valeurs typiques continentales**.


Pour confirmer les valeurs particulièrement basses des échantillons transportés par les alizés depuis l'Afrique du Nord, PROSPERO et al. ont comparé ces échantillons avec des échantillons collectés à l'intérieur de la Barbade. Ces échantillons ont révélé des concentrations en microorganismes beaucoup plus élevées que ceux prélevés sur la côte est de la Barbade (et ce avec un prélèvement de 15 minutes tellement les concentrations étaient élevées – les échantillons prélevés sur la tour étaient eux prélevés sur 24 heures). Les concentrations de microorganismes provenant d'Afrique du Nord sont donc beaucoup plus basses que les microorganismes issus de la végétation et des sols locaux.

Bien que cette étude montre que des microorganismes sont trouvés en présence de particules désertiques, il n'est pas possible de déterminer si ces organismes sont directement associés à ces particules ou s'ils sont indépendamment en suspension dans l'atmosphère. Si ces organismes étaient

associés à des particules désertiques, cela suggérerait qu'ils dérivent directement des sols sur lesquels les particules ont été mobilisées par le vent. Bien que ces organismes aient été retrouvés dans des sols, peu d'informations sur les sols des sources de particules désertiques d'Afrique du Nord existent, et le peu de données existantes montrent des **différences entre les organismes collectés dans l'atmosphère et ceux présents dans les sols**.

Cette étude n'exclut donc pas la possibilité que ces microorganismes puissent dériver de sources complètement différentes de celles des particules désertiques. Ces organismes pourraient avoir été advectés au-dessus de régions source de particules désertiques et être ensuite mélangés aux particules. Sinon, les organismes pourraient être injectés dans une masse d'air poussiéreuse alors qu'ils passaient au-dessus de l'Afrique de l'Ouest sur leur chemin vers l'Océan Atlantique. Ces deux scénarios seraient cohérents avec les observations réalisées pendant cette étude : les concentrations de bactéries et de champignons ne sont pas corrélées avec celles des particules désertiques. Par ailleurs, même dans des régions arides, les plantes sont connues pour être les sources majeures de champignons aéroportés.

Une autre étude réalisée par GRIFFIN et al. (2001) a été réalisée sur un type d'échantillonnage et de culture similaires à ceux de PROSPERO et al. (2005). Ils ont mesuré des concentrations en microorganismes beaucoup plus élevées dont des variétés différentes de PROSPERO et al. (2005), associées à la présence de particules désertiques. Cependant, ils n'ont effectué aucune mesure de particules désertiques, se basant uniquement sur le produit satellitaire TOMS qui montre des



résultats ambigus au-dessus de l'océan. Par ailleurs, leur site d'étude se situait à la pointe ouest de l'île de Saint John. Donc dans des conditions d'alizés typiques d'été, les vents traversent les 15km de largeur de l'île ainsi que plusieurs îles à l'est de Saint John. Leurs échantillons étaient donc **fortement influencés par les sources locales**. Les résultats étaient, d'ailleurs, comparables à ceux obtenus par PROSPERO et al. (2005) au niveau de leur site à l'intérieur de l'île.

Malgré des concentrations en microorganismes particulièrement basses, la question suivante peut être soulevée : Pourquoi les microorganismes associés aux particules désertiques sont toujours viables après une semaine de transport dans l'atmosphère ?

PROSPERO et al. ont répertorié plusieurs études suggérant que l'exposition aux UV durant le transport pouvait avoir un impact sur les probabilités de survie des microorganismes. Les sources de particules désertiques se situant dans des régions arides, il serait attendu que ces spores soient **relativement résistantes à ce stress**. Par ailleurs, il est possible que l'épais nuage de particules désertiques atténue le flux UV qui, autrement, pourrait tuer les microorganismes ou qu'une partie du transport se fasse dans la couche limite marine où l'**humidité relative est autour de 70%** minimisant les effets de dessiccation des microorganismes.

Par ailleurs, la présence attestée de bactéries, virus et champignons en parallèle des poussières désertiques d'origine nord-africaine conduit à étudier l'**impact de ces populations potentiellement pathogènes sur la santé humaine**. L'association la plus tenue qui ait été faite entre épisodes brumeux et la survenue de maladie d'origine microbienne sont les foyers de méningites

qui se développent en Afrique du Nord entre les mois de février et de mai, caractérisés par un air sec et de fréquentes tempêtes de sable. L'hypothèse qui prévaut n'est pas tant l'infection directe par l'inhalation de ces populations microbiennes que l'**abrasion des muqueuses par les particules**, favorisant ainsi le passage dans les tissus sous-jacents des bactéries impliquées dans l'apparition de méningites. De plus, des militaires déployés dans les régions arides du Golfe Persique se sont montrés sensibles au développement de pneumonie, d'étiologie cependant inconnue.

D'après GRIFFIN et al., 2007, si de nombreuses études ont pu confirmer la présence de bactéries dans l'atmosphère en concordance avec les panaches de poussières désertiques et démontré leur caractère pathogène, **aucun lien clair n'a pu être établi entre l'occurrence de ces épisodes et la prévalence de maladies**. Si les études épidémiologiques attirent l'attention sur le risque pour la santé humaine associée à l'exposition d'éléments pathogènes retrouvés en parallèle de poussières désertiques, particulièrement les jeunes, les personnes âgées et les immunodéprimés, des études complémentaires en cours sont nécessaires afin d'obtenir des conclusions mondiales cohérentes.

Pour conclure, il est important de noter que bien que la présence de microorganismes venant d'Afrique a pu être observée, **aucun lien direct entre la brume de sable et la présence de ces organismes n'a pu être identifié**. Aucun microorganisme issu de matière fécale n'a été détecté durant les études réalisées.



V.2.2.c Les cendres volcaniques

traversant l'Atlantique, majoritairement à haute altitude.

Les **éruptions volcaniques** sont également impliquées dans la formation de **particules secondaires** de sulfates par l'oxydation du dioxyde de soufre, émis en grande quantité dans l'atmosphère au cours d'un épisode volcanique (THOMAS et al., 2009).

Par ailleurs beaucoup d'éléments chimiques bien identifiés sont associés aux éruptions volcaniques. Il faut citer, l'aluminium (Al), le silicium (Si), le soufre (S), le chlore (Cl), le potassium (K), le calcium (Ca), le titane (Ti), le manganèse, (Mn), le fer (Fe), le cuivre (Cu), ou encore le zinc (Zn) (ALLARD et al., 2000).

En Martinique, en raison de sa nature et de son inactivité actuelle, le volcan ne constitue pas une source d'émission de particules. En revanche, le territoire a pu être impacté par des **événements naturels exceptionnels de proximité** telle que l'éruption, le 11 février 2010, du volcan de Montserrat, situé au nord-ouest de l'archipel de la Guadeloupe et dont le rejet d'une quantité importante de cendres volcaniques dans la haute troposphère a entraîné des répercussions sur toute la Caraïbe (EUPHRASIE, 2018).

En 2021, durant les éruptions des volcans de l'île de Saint-Vincent, des dépôts de cendre ont été observés sans pour autant engendrer une augmentation des concentrations dans l'air en PM10 ou PM2,5. Lors des éruptions du volcan de l'île de Las Palmas dans les Canaries, on a pu observer un ciel voilé sur la Martinique et une légère augmentation des concentrations en PM10 et PM2,5. Les particules responsables de cette augmentation semblent être des particules de sulfates, propulsées par les éruptions et



VI. Réglementation et évaluation des particules

VI.1 Cadre réglementaire

Les principaux polluants à effets sanitaires sont soumis à des **normes environnementales** définies dans les directives européennes 2008/50/CE et 2004/107/CE, ainsi que dans l'arrêté 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant.

Ces valeurs ne sont définies actuellement que pour les particules fines PM10, PM2,5, les métaux lourds (arsenic, cadmium, nickel et plomb) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (notamment le benzo(a)pyrène). Les critères nationaux proviennent du décret n° 2010-1250 du 21 octobre 2010 et des directives 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 et 2004/107/CE du 15 décembre 2004.

VI.1.1 Seuils réglementaires

Ces directives et arrêtés nationaux et européen définissent des **valeurs limites** ou **valeurs cibles**, ainsi que des **seuils** horaires, journaliers et annuels à ne pas dépasser. La situation du territoire vis-à-vis de ces valeurs limites ou valeurs cibles définit la stratégie de surveillance de la qualité de l'air, mais peut également être à l'origine de la mise en contentieux d'un territoire vis-à-vis de l'Union Européenne en cas de dépassement. Dans ce cas, ce territoire doit ensuite définir des zones où mettre en place des actions prioritaires en vue d'une diminution progressive à moyen et long terme des concentrations en polluants mesurées.

Pour la gestion du quotidien, il existe des **seuils d'information et de recommandations** et des **seuils d'alerte**, définis par arrêté ministériel et repris dans des arrêtés préfectoraux, dont le non-respect déclenche une procédure d'alerte à la population et, le cas échéant, des mesures d'urgence préfectorales pour réduire à très court terme le pic de pollution, et limiter l'exposition aiguë de la population.

Pour les particules PM10, le seuil d'information et de recommandations est fixé à **50 µg/m³** et le seuil d'alerte est fixé à **80 µg/m³**.

Les seuils réglementaires sont synthétisés dans les tableaux en annexe 2 (XI.2).

VI.1.2 Seuils d'évaluation

Par ailleurs, il existe également des seuils d'évaluation annuelle permettant d'établir le **risque de dépassement** des normes environnementales pour une mesure effectuée en continu toute l'année. Ces seuils permettent de cibler le risque de dépassement de la valeur limite annuelle du polluant considéré et ainsi de mettre en place la **stratégie de surveillance** adaptée et définie réglementairement.

Ainsi ces seuils sont basés sur des valeurs limites ou valeurs cibles et sont définis dans l'arrêté du 16 avril 2021.

Si les niveaux sont inférieurs au seuil d'évaluation minimal, l'évaluation de la qualité de l'air peut se borner à l'emploi de **techniques de modélisation** ou **d'estimation objective**.

Si les niveaux sont compris entre le seuil d'évaluation minimal et le seuil d'évaluation maximal, l'évaluation peut être réalisée par **combinaison** de mesures fixes en continu



selon la **méthode de référence** et de techniques de **modélisation**.

Enfin, si les niveaux sont supérieurs au seuil d'évaluation maximal, l'évaluation est obligatoirement réalisée par des **mesures fixes en continu selon les méthodes de référence** indiquées dans les directives filles, et les techniques de modélisation peuvent être utilisées en complément.

Les seuils d'évaluation sont synthétisés dans les tableaux en annexe 3 (XI.3).

VI.2 Les méthodes d'évaluation des particules

Suivant le composé à mesurer, il existe différentes méthodes de mesure des particules. En France, une réglementation concernant les mesures environnementales encadre uniquement la mesure quantitative des particules.

Cependant, bien que la réglementation française n'impose pas une spéciation chimique des particules mesurées, de plus en plus d'observatoires de la qualité de l'air s'équipent de techniques pour qualifier les particules afin d'identifier la source. Les méthodes existantes demandent toutefois une expertise sur l'exploitation, notamment dans l'identification des sources.

Ainsi, les paragraphes suivants traiteront des différentes **méthodes de mesure des particules** utilisées en Europe mais aussi en France.

VI.2.1 Mesure quantitative

VI.2.1.a La méthode normée : la méthode gravimétrique

La **méthode gravimétrique** est définie comme la méthode de **référence**, en Europe, pour la mesure des particules. Cette méthode suit la norme EN12341 [Norme EN 12341]. Elle consiste à prélever les particules fines (seuil de coupure de la tête de prélèvement à 10 μm de diamètre) sur un filtre à l'aide d'un préleveur actif (aspiration d'air), puis à envoyer les filtres à l'analyse. Le filtre utilisé est pré-pesé, puis à nouveau pesé après prélèvement. La différence de masse permet de définir la masse de particules capturée durant le prélèvement, et permet de recalculer **une concentration en PM10** dans l'air suivant le volume d'air de prélèvement.

Pour permettre la pesée des filtres, l'analyse doit être réalisée par un **laboratoire accrédité**. Cette analyse différée suggère une logistique qui ne permet pas la mesure et l'information en continu et en temps réel des concentrations en particules dans l'air. Pour pallier cela et répondre aux exigences nationales de mesure et d'information de la qualité de l'air en continu et en temps réel, d'autres méthodes, conformes à cette méthode de référence ont été développées et testées par le laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA), référent technique des AASQA.



VI.2.1.b Les autres méthodes : homologuées et conformes

En France, des méthodes conformes à la méthode de référence européenne existent. Ces méthodes permettent un **suivi en continu et en temps réel** des concentrations en particules. Elles permettent ainsi de quantifier, notamment les particules fines PM10 et PM2,5 dans l'air.

- **Méthode par absorption de rayonnement bêta**

Cette méthode de mesure consiste à collecter par aspiration sur un filtre en fibre de verre des particules fines. La mesure des quantités de particules fines s'obtient par la différence d'absorption des rayons bêta entre le filtre vierge et le filtre contenant les dépôts de particules. En France, c'est la jauge bêta qui est utilisée et homologuée comme **conforme à la méthode de référence**.

- **Méthode par microbalance oscillante**

La méthode par microbalance oscillante consiste à évaluer la masse des particules grâce aux variations de fréquence d'oscillation lors du dépôt des particules sur un élément vibrant. Par la suite, on obtient la concentration en particules en mesurant le débit volumique.

Utilisée par les réseaux de surveillance jusqu'en 2008, cette technique peut toutefois sous-estimer les concentrations à cause du chauffage à 50°C de la microbalance générant un phénomène de


volatilisation de certains composés. Utilisée en France par le biais de l'analyseur TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance), mais non conforme à la méthode de référence, elle a été abandonnée et remplacée par une nouvelle technique permettant de mesurer la fraction volatile. Cette technique a été développée pour corriger le problème de volatilisation de particules semi-volatiles du TEOM. Le chauffage de cette même microbalance est ainsi ramené à 30°C afin de limiter le phénomène de volatilisation. De plus, un déshumidificateur est installé afin de réduire l'humidité relative de l'échantillon analysé. En France, l'analyseur TEOM FDMS (Tapered Element Oscillating Microbalance Filter Dynamics Measurement System) utilise cette méthode.

Ainsi, cette technique est couramment utilisée dans les AASQA et **conforme à la méthode de référence**.

- **Méthodes optiques (US)**

Les particules sont analysées en temps réel dans un spectromètre à l'aide d'un faisceau laser ou LED à haute intensité lumineuse. En fonction de l'intensité mesurée, il est possible de déterminer la quantité de particules traversant le dispositif. Cette intensité lumineuse est alors convertie en concentration massique. Ce principe de mesure est retrouvé dans le FIDAS, appareil de mesure **conforme à la méthode de référence en France sur les sites urbains ou périurbains de fond**.

Cette technique remplace peu à peu la technique de microbalance dans les AASQA.



Son principal intérêt est qu'elle permet de mesurer simultanément les PM10 et PM2,5.

VI.2.2 Mesure qualitative

L'approche qualitative de la particule permettant d'étudier sa **composition chimique**, peut être réalisée par un prélèvement gravimétrique conforme à la réglementation, accompagnée d'une analyse différée de la particule en laboratoire. De plus, certaines techniques de mesure permettent de qualifier automatiquement la particule, c'est-à-dire de définir la composition de certains paramètres chimiques de la particule. Le traitement brut de l'analyse permet, dans certains cas, d'**identifier la source** de la particule ou sa provenance géographique.

L'objectif de cette identification de source est d'apporter une **aide à la décision aux institutions locales** afin d'actionner les bons leviers pour améliorer la qualité de l'air des territoires concernés par des pics de pollution en particules. Ces techniques se développent et sont utilisées dans les AASQA. Elles nécessitent une expertise technique et un traitement des données approfondi, notamment lors des pics de pollution.

VI.2.2.a Analyse différée des filtres prélevés

Le prélèvement des particules est réalisé suivant la méthode gravimétrique (méthode de référence citée en VI.2.1.a), par prélèvement bas ou haut débit. Ainsi, les particules PM10 ou PM2,5 selon le type de recherche souhaitée, sont collectées sur des filtres qui sont ensuite envoyés en

laboratoire accrédité qui réalise l'analyse chimique des particules prélevées.

Ces prélèvements permettent l'analyse d'une multitude de polluants. Le protocole d'échantillonnage s'adaptera aux composés recherchés. Ainsi, en fonction des composés recherchés, le type d'appareil ou de filtre, le conditionnement, le type d'analyse ou encore la stratégie d'échantillonnage peuvent fortement varier.

VI.2.2.b La méthode optique pour la recherche du carbone suie

Le principe de mesure de cette méthode repose sur l'atténuation de l'intensité d'un faisceau lumineux traversant un échantillon de particules déposé sur le filtre. La mesure de l'absorption se fait pour différentes longueurs d'onde. En fonction de la longueur d'onde, il est possible de déterminer la source et donc d'estimer la **part de Black carbon** issue de la combustion du trafic ou celle de la biomasse. Il existe des analyseurs automatiques, tel que l'aethalomètre AE33 qui mesure en continu les concentrations en Black Carbon par méthode optique, ou l'*Aerosol Chemical Speciation Monitor*, ACSM, qui mesure directement la composition chimique des particules.

VI.2.3 Prédiction et modélisation

Afin d'anticiper les pics de pollution en particules atmosphériques et, le cas échéant, de déclencher les procédures d'information ou d'alerte à la population avant qu'un dépassement de seuil ne soit constaté de manière effective, Madinair travaille par **approche prévisionnelle**. Ces prévisions s'appuient sur les **données des stations fixes** de surveillance de la qualité de l'air, mais

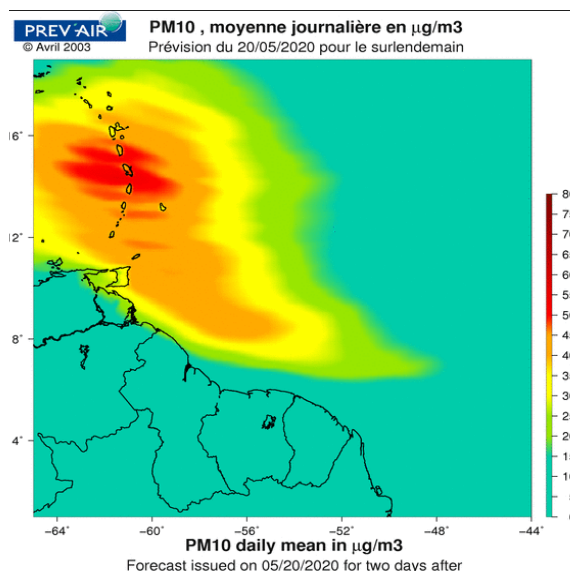


Figure 10 : Prédiction de dispersion de la poussière désertique modélisée par PREV'AIR pour le 22/05/2020 sur l'arc antillais.

également sur des **outils de modélisation internationaux**, des prévisions météorologiques et l'**expertise de ses prévisionnistes**.

Pour cette approche prévisionnelle, la surveillance des particules atmosphériques en continu présentées précédemment constituent des outils primordiaux pour fournir une base de données précise permettant aux modèles d'effectuer leur travail. En effet, une évaluation permet de

déterminer précisément, en un lieu donné et à un instant défini, la concentration d'un polluant donné. Cependant, cette approche quantitative ne permet pas de couvrir les quatre dimensions spatio-temporelles (les trois dimensions de l'espace, x, y, z et une pour le temps, t), c'est pourquoi, en complément de ce premier outil, Madinair utilise des **modèles de la qualité de l'air**.

Il existe un large panel d'outils de modélisation adaptés au processus étudié. De manière générale, un modèle de la qualité

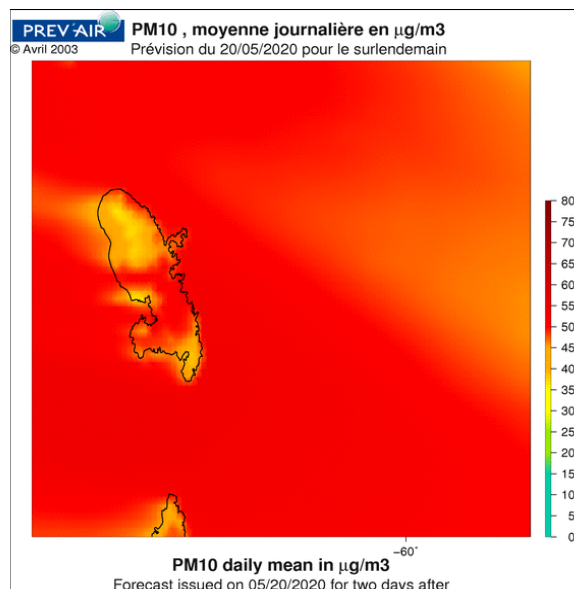



Figure 11 : Zoom de la prévision de la figure 10 sur le territoire de la Martinique.

de l'air est un programme informatique dont l'algorithme calcule le plus fidèlement possible **l'évolution temporelle des concentrations en différents polluants sur une zone géographique donnée**, à partir d'équations physiques et chimiques (GUTH, 2015).

Pour réaliser quotidiennement les prévisions de la qualité de l'air à court terme, J (le jour J), J+1 (le lendemain) et J+2 (le surlendemain), Madinair utilise les sorties du modèle de transport et de dispersion des polluants, le modèle CHIMERE, co-



développé par l'INERIS et l'IPSL. Ce modèle CHIMERE (Modèle de Chimie Atmosphérique de Grande Echelle), est un modèle de Chimie-Transport qui permet de décrire d'une part l'évolution de la composition de l'atmosphère, c'est-à-dire les processus de formation et de modification chimique des polluants réglementés, à la fois en termes de constituants gazeux et de particules atmosphériques, et d'autre part leur évolution dans le temps et dans l'espace tridimensionnel (INERIS). Les Figure 10 et Figure 11 illustrent des cartes de prévision de la concentration en PM10 obtenues par simulations numériques effectuées à l'aide du modèle de Chimie-Transport décrit précédemment. Pour obtenir des telles cartes, d'autres paramètres d'entrée sont nécessaires comme les prévisions météorologiques, fournies par Météo-France.

VI.3 La surveillance et l'évaluation des particules par Madinainair en Martinique

Depuis l'adoption de la Loi sur l'Air citée en préambule, Madinainair, observatoire régional agréé pour la surveillance de la qualité de l'air en Martinique, assure la surveillance et l'évaluation des polluants atmosphériques afin de répondre aux exigences nationales ou européennes. La structure est aujourd'hui ISO9001 mais aussi accréditée COFRAC 17-025 pour ses étalonnages.

Depuis 2001, les stations de mesure de Madinainair, réparties sur l'ensemble de la Martinique, enregistrent en continu et en temps réel, l'évolution des concentrations en particules fines. Les concentrations en

PM10 sont actuellement enregistrées dans 8 stations de mesures, et celles en PM2,5 dans 4 de ces stations. Ces stations surveillent depuis plus de 20 ans, les concentrations en particules fines en continu et en temps réel, et chaque année, enregistrent un certain nombre d'épisodes de pollution par les particules. Ces 20 ans de mesure d'épisodes de pollution génèrent diverses interrogations et permet d'analyser quelles sont les principales périodes concernées, s'il existe des tendances, mais aussi la composition de ces particules ou encore la contribution des différentes sources de particules (sources anthropiques ou naturelles).

VI.3.1 Présentation du réseau de surveillance de Madinainair

La Martinique, conformément à l'arrêté ministériel du 26 décembre 2016 relatif au découpage des régions en Zones Administratives de Surveillance de la qualité de l'air (ZAS), est divisée en deux ZAS (https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf?id=C4Tpg59OxDCa-WEgJ6EaEv_pik3NODSsWVUey25O64c=)

:

- La Zone à Risques (ZAR), composée des communes suivantes : Bellefontaine, Le Carbet, Case-Pilote, Ducos, Fort-de-France, Le François, Le Lamentin, Rivière-Salée, Le Robert, Saint-Joseph, Saint Pierre, Schoelcher et La Trinité.
- La Zone Régionale (ZR) s'étendant sur le reste du territoire martiniquais.

Ainsi, Madinair compte 8 sites de mesures fixes de PM10, dont 4 mesurant également les PM2,5, dans les deux ZAS.

Ces stations fixes sont de quatre types :

- **Stations de fond (urbaine et périurbaine) :** stations de mesures

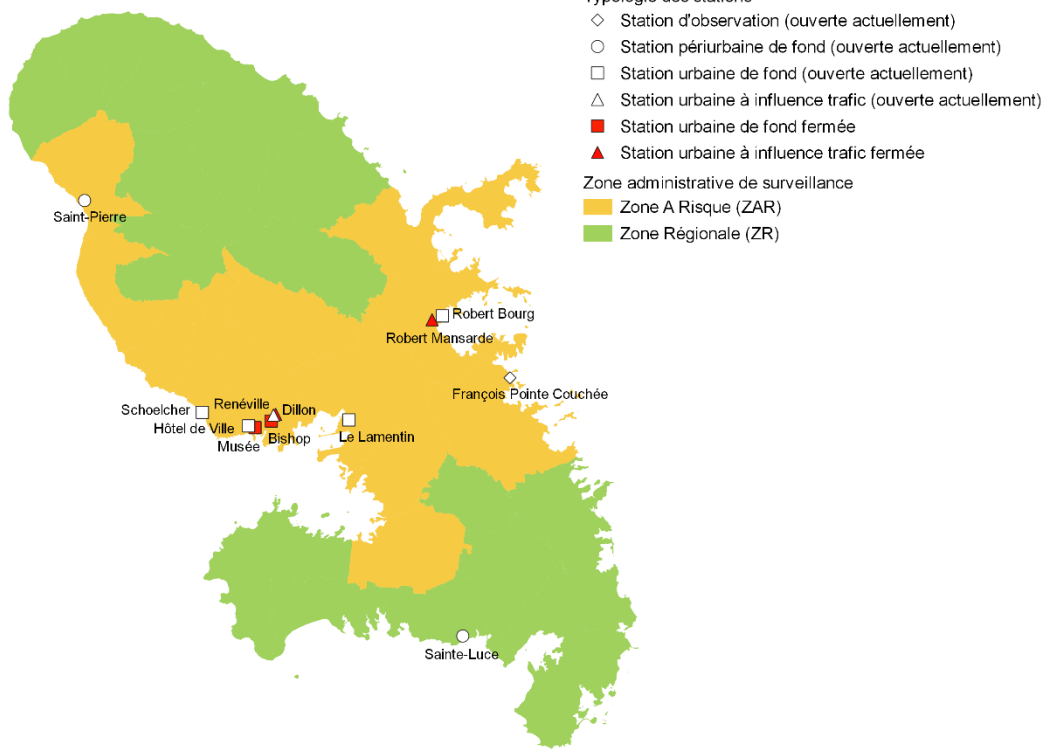


Figure 12 : Localisation et typologie des stations de mesures mises en place depuis 2001 et utilisées pour cette étude et localisation des zones administrative de surveillance.

implantées dans les zones urbaines ou péri-urbaines. On en compte 6.

- **Stations à influence trafic :** stations fixes placées en bordure des axes routiers afin d'évaluer l'influence de la pollution automobile sur la qualité de l'air. On en compte 1.
- **Station « observation » :** station d'observation permettant de

mesurer l'apport transfrontalier des particules désertiques véhiculées par les brumes de sable. On en compte 1.

Comme illustré sur la Figure 12, Madinair possède actuellement 8 stations de mesure des particules fines PM10, dont la station

d'observation située loin des sources anthropiques sur la côte atlantique, une station à influence trafic, et 6 stations de fond (urbain, péri-urbain) réparties sur le territoire, dont 4 stations de fond (urbaines et périurbaines) mesurant les particules fines PM2,5. La Figure 12 et le Tableau 1 présentent aussi les stations ayant fermé mais dont l'historique des données est également traité dans cette étude.

Stations de mesure	Typologie	Paramètres mesurés	Ouverture	Fermeture
Musée d'histoire Schoelcher	Urbaine de fond	PM10	26/06/2000	06/09/2013
Lamentin	Urbaine de fond	PM10	25/02/2003	
		PM2,5	21/06/2017	
Bishop	Urbaine de fond	PM10	26/02/2003	
		PM2,5	02/08/2019	
Robert Bourg	Urbaine de fond	PM10	28/02/2003	21/07/2016
		PM2,5	28/02/2003	01/02/2015
Hôtel de Ville	Urbaine de fond	PM10	08/06/2015	
		PM2,5	05/08/2019	
Sainte-Luce	Périurbaine de fond	PM10	08/02/2019	
		PM2,5	04/02/2015	08/02/2019
CDST	Périurbaine de fond	PM10	21/10/2015	
		PM2,5	21/10/2015	
Dillon	Périurbaine de fond	PM10	24/11/2015	
Renéville	Urbaine à influence trafic	PM10	23/04/2001	30/09/2008
Robert Mansarde	Urbaine à influence trafic	PM10	04/01/2010	
François Pointe Couchée	Urbaine à influence trafic	PM10	01/08/2012	01/07/2016
	Observation	PM10	08/06/2016	

Tableau 1 : Typologie, date d'ouverture et de fermeture des différentes stations PM10 et PM2,5 depuis 2001.

VI.3.2 Les méthodes utilisées au sein de Madinair

Madinair mesure depuis plus de 20 ans les particules fines PM10 sur le territoire martiniquais, par des méthodes équivalentes à la méthode de référence. En effet, ces méthodes validées nationalement par le référent technique des observatoires de la qualité de l'air (le Laboratoire Central de la Qualité de l'Air) certifie de leur **conformité face aux exigences réglementaires**. De plus, ces techniques de mesure nécessitent une maintenance et une vérification continue conforme aux normes CEN, normes européennes, pour garantir la fiabilité de la mesure communiquée.

Madinair, accrédité 17025 pour la mesure, assure cette qualité.

Ces différentes techniques de mesure réalisent la mesure quantitative des particules par un suivi en continu et en temps réel des concentrations en particules dans l'air.

VI.3.2.a La méthode par microbalance à élément oscillant

Cet analyseur mesure la **masse de particules** inférieures à 10 microns ou la masse de particules inférieures à 2,5 microns, suivant la tête de prélèvement utilisée (Figure 13).



Figure 13 : Analyseur TEOM FDMS.

Cette mesure de particules (PM10, PM2,5) est conforme à la norme EN 12341 : 2014².

VI.3.2.b La méthode optique



Figure 14 : Analyseur FIDAS.

Madinair dispose également d'analyseurs FIDAS (Figure 14), qui mesurent la masse de particules fines. La technique de mesure utilisée est la méthode optique permettant de déterminer la concentration des particules par conversion de l'intensité lumineuse. Cette mesure de particules (PM10, PM2,5, ...) est conforme à la norme EN 12341 : 2014.

VI.3.2.c La méthode par utilisation de préleveurs


Madinair possède trois types de préleveurs de particules : le Partisol (préleveur bas débit), le Leckel (préleveur moyen débit), et DA80 (préleveur haut débit). L'analyse quantitative se fait par une pesée gravimétrique des particules prélevées sur le filtre (Figure 15). C'est la méthode de référence expliquée au VI.2.1.a. En complément, ces techniques de mesure permettent la mesure qualitative des particules par une analyse différée de la composition des particules prélevées.



Figure 15 : Préleveur Partisol (à gauche), Leckel (au centre), DA80 (à droite).

Suivant les composés analysés (métaux lourds, carbones inorganiques, carbones organiques, hydrocarbures aromatiques polycycliques, pesticides, ...), les techniques et le protocole de mesure doivent être spécifiques et suivre les normes de prélèvement et d'analyse associées.

² NF EN 12341 : 2014 - Détermination de la fraction PM10 de matière particulaire en suspension



VII. Evaluation quantitative des particules fines de 2001 à 2020

VII.1 Le cas particulier de l'année 2020

VII.1.1 Confinement

Un confinement national a été mis en place sur le territoire du 17 mars au 11 mai 2020.

A la suite des mesures restrictives, **l'activité anthropique** a subitement été **réduite** à son minimum vital économique entraînant une **diminution des émissions** des activités polluantes. Il a, entre autres, été observé une réduction des émissions de NOx estimée de 30% soit 1466 tonnes de NOx tous secteurs confondus. Durant cette période, il a également été observé, au niveau des stations de fond, une **diminution des concentrations de PM10 de l'ordre de 3% par rapport à 2019**. En revanche, aucune comparaison n'a pu être établie pour les stations de proximité trafic puisque les mesures étaient en arrêt à la station de Renéville à la suite d'un incendie qui a détruit la station en 2019. Néanmoins, une **baisse de la concentration des NOx de 77% au niveau des stations de fond et de 55% au niveau des stations trafic** permet d'envisager que le confinement a également impacté les concentrations de particules fines PM10 d'origine anthropique au niveau des stations trafic.

Un second confinement a été mis en place durant l'intégralité du mois de novembre 2020. Cette fois-ci, les contraintes étant moins drastiques que lors du premier confinement, il a été observé des concentrations relativement similaires entre novembre 2019 et novembre 2020. Néanmoins, cette comparaison n'ayant pu

être faite que sur les stations de fond, il est difficile de distinguer la part naturelle de la part anthropique dans les concentrations de PM10.

VII.1.2 Focus sur l'évènement de particules désertiques de juin 2020

A partir du 17 juin 2020, la Martinique a connu un **épisode de brume de sable exceptionnel** en termes de quantité de particules dans l'air. En effet, cette période, qui s'est étendue sur **12 jours consécutifs**, du 17 au 28 Juin 2020, a enregistré plusieurs records de concentrations journalières maximales en particules fines PM10.


La **concentration journalière maximale record a été mesurée le 22/06/2020** sur la station de mesure dans la commune du Robert et a atteint **282,7 µg/m³** avec un maxima horaire de **355,1 µg/m³**.

A titre de comparaison, on retrouve ci-dessous l'historique des 5 concentrations journalières maximales enregistrées sur les 20 dernières années de mesure en Martinique :

DATE	Concentrations journalières maximales
22/06/2020	282,7
23/06/2020	196,7
21/06/2020	195,3
20/09/2018	189
15/05/2007	180

Tableau 2 : Concentrations moyennes journalières maximales en PM10 mesurées depuis 2001.

L'épisode exceptionnel de 2020 a donc enregistré 3 concentrations journalières maximales désormais présentes dans le top 5



des records territoriaux : le 21, le 22 et le 23 juin 2020.

Cet épisode exceptionnel ayant été enregistré au niveau de tout l'arc des Antilles jusqu'en Floride, des études telles que celles de FRANCIS et al. (2020) et de YU et al. (2021), portant sur les **facteurs atmosphériques responsables** de cet important épisode de particules désertiques provenant du Sahara, ont été publiées.

L'étude de FRANCIS *et al.* (2021), analyse les anomalies de circulation atmosphérique à basse et haute altitude et répertorie une anomalie suggérant un déplacement vers le sud du Jet Stream au niveau de la côte ouest africaine. Ce déplacement a, également, été retrouvé au-dessus du Pacifique indiquant **des anomalies à grande échelle** pendant tout le mois de juin 2020. Par ailleurs, des anomalies thermiques plus fortes que la normale au-dessus du Sahara ainsi qu'une zone de haute pression au large de l'Afrique de l'Ouest ont été observées durant tout le mois de juin.

L'étude de YU et al. (2021) avance que la présence d'un anticyclone exceptionnellement intense et méridional dans l'océan Atlantique, couplé avec une dépression sur les Açores ont entraîné une circulation atmosphérique fermée sur l'Afrique de l'Ouest pendant plusieurs jours précédant l'épisode. Cette absence de ventilation a eu pour conséquence la **très forte accumulation de particules sahariennes dans l'atmosphère piégées le long des côtes d'Afrique de l'Ouest** du 13 au 15 juin. Durant cette période, l'occurrence d'un fort vent de surface au-dessus du Sahara, couplé à d'intenses « haboobs » (orages désertiques se développant par l'association de la chaleur du soleil et de l'air humide transporté du Golfe de Guinée vers le nord par le flux sud

de la mousson) qui ont balayé le couloir Niger-Mali-Mauritanie aurait contribué de manière significative à la mise en suspension et l'ascension de particules désertiques à des **altitudes de l'ordre de 6 à 8km** soit bien supérieures aux altitudes normales (inférieures à 5km) pour des phénomènes estivaux de cet ordre.

En ce qui concerne le transport de ce panache, les deux études s'accordent sur le fait que l'affaiblissement et le déplacement vers le sud de l'anticyclone Nord Atlantique aurait ensuite permis aux vents du courant Est-Africain (African Easterly Jet, ou AEJ), un puissant courant dans la haute troposphère avec des vents supérieurs à 20 m/s, d'emporter ces panaches de poussières à travers l'Atlantique jusqu'aux Caraïbes. Selon FRANCIS et al. (2020) les conditions liées au gradient de pression présent dans cette région ont contribué à **accélérer la vitesse du vent** durant cette période. La localisation du système de haute pression a aidé à transporter rapidement les particules désertiques des régions source vers l'Océan Atlantique Tropical. Ces caractéristiques spécifiques expliqueraient donc l'intensité de cet événement. Néanmoins, celles-ci sont généralement associées à des événements hivernaux. Il est donc difficile de comprendre la cause responsable de la mise en place de ces caractéristiques à cette période. Les « haboobs » présentés par YU et al. (2021) ne faisant pas partie des systèmes météorologiques à grande échelle analysés par FRANCIS et al. (2020), les conclusions montrent qu'il est important de développer des modèles qui décrivent de façon plus précise les systèmes convectifs à échelle locale ceux-ci contribuant à l'élévation des panaches de poussière dans les hautes couches de la troposphère.

En outre, en juin 2020, FRANCIS et al. (2020) notent que la couverture de glace était faible (niveau le plus bas sur la période de 1981 à aujourd'hui obtenu par observation satellitales), ils expliquent que cela peut avoir contribué au modèle d'anomalies observé à grande échelle. Si de telles anomalies devenaient plus courantes dans un monde avec des températures de l'atmosphère plus élevées, il serait possible que de tels évènements extrêmes se reproduisent et deviennent plus courants.

deux confinements qui ont eu lieu, réduisant l'activité économique, et d'autre part en raison de l'épisode de brume de sable exceptionnel durant le mois de juin. Il semble donc difficile d'analyser les données de PM10 de l'année 2020 en parallèle de toutes celles acquises depuis 2001. L'année 2020 sera donc seulement étudiée dans la partie concernant l'intensité des concentrations obtenues durant les épisodes particuliers en raison de l'épisode de brume de sable intense de juin 2020.

VII.1.3 Conclusions

L'année 2020 a été une année particulière d'une part en raison de la crise sanitaire et les

VII.2 Evolution pluriannuelle des concentrations en PM10 selon les typologies des stations entre 2001 et 2019

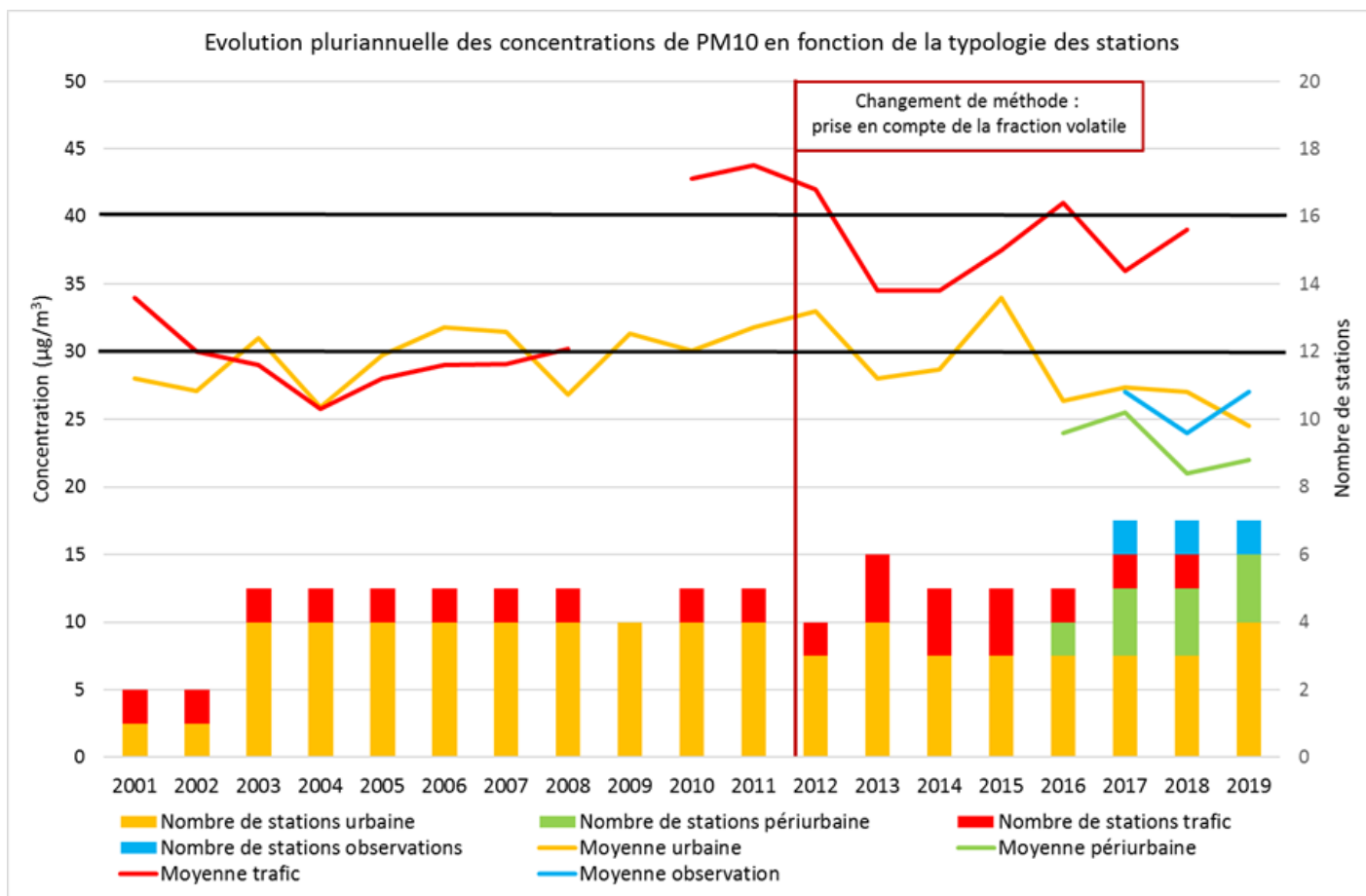


Figure 16 : Evolution pluriannuelle des concentrations de PM10 en fonction de la typologie des stations et nombre de stations de mesures par typologie depuis 2001. Les traits noirs indiquent la valeur limite annuelle et l'objectif de qualité annuelle ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle).

La Figure 16 présente l'évolution pluriannuelle depuis 2001 des concentrations de PM10 en fonction de leur typologie : urbaine et périurbaine (considérées comme les stations de fond), trafic et d'observation, ainsi que le nombre de stations de mesure pour chaque typologie et chaque année. Sont présentés également sur ce graphique la valeur limite annuelle de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et l'objectif de qualité à atteindre de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle définis selon la directive européenne 2008/50/CE, ainsi que dans l'arrêté 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant.

VII.2.1 Stations urbaines

Les concentrations moyennes annuelles en PM10 des stations urbaines sont **relativement stables** depuis 2001. Celles-ci sont globalement entre 25 et 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ depuis 20 ans. On observe, néanmoins, des variations d'une année sur l'autre. Il serait donc intéressant de déterminer l'origine de ces augmentations ou diminutions.

Pour commencer l'augmentation de la moyenne annuelle des stations urbaines en 2003, provoquant un dépassement de l'objectif de qualité, s'explique par la **mise en place de trois nouvelles stations** par rapport aux deux années précédentes. Les stations Lamentin, Schoelcher et Bishop sont venues s'ajouter à la station Musée. Tandis que la station de Schoelcher présente une concentration moyenne

annuelle similaire à celle de la station Musée (28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), les stations du Lamentin et de Bishop ont des concentrations plus élevées (34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) faisant augmenter la moyenne globale de concentrations des stations urbaines.

Il faut savoir que les stations sont mises en place à la suite d'une **évaluation du territoire**, revue tous les 5 ans, afin de déterminer si les sites pouvant être les plus impactés par les polluants réglementaires sont étudiés. Une **spatialisation de la pollution et du risque** pour la population est réalisée et si un site présente un **risque modéré à élevé** de dépasser le seuil d'évaluation supérieur (cf. V.1), une station de mesure est mise en place. L'emplacement de la station est alors choisi en suivant les critères d'implantation du guide « Conception, implantation et suivi des stations françaises de surveillance de la qualité de l'air » (LCSQA, 2017). C'est pourquoi les stations du Lamentin, de Schoelcher et de Bishop ont été ajoutées au réseau de mesure.

En 2004, la moyenne annuelle des stations urbaines atteint une concentration plus

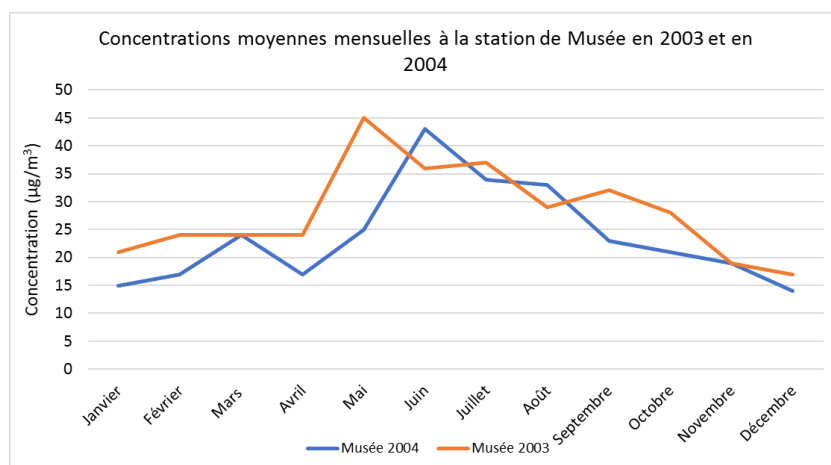


Figure 17 : Concentrations moyennes mensuelles à la station de Musée en 2003 et en 2004.

basse que celles mesurées depuis le début des mesures. Cela s'explique par une **baisse des concentrations annuelles sur l'ensemble des stations** par rapport à 2003 (de -11% à Bishop à -25% au Lamentin). En effet, quelque soit la station, les concentrations moyennes mensuelles sont globalement toutes plus élevées en 2003 qu'en 2004 comme on peut le voir sur la Figure 17 qui montre les concentrations moyennes mensuelles en 2003 et en 2004 à la station de Musée, à titre d'exemple.

Les roses des vents calculées à la station Lycée Schoelcher pour 2003 et 2004 (Figure 18) indiquent une prédominance de vent du sud-est en 2003 et en 2004. En 2004, des vents de nord-est sont également identifiés. Les vents les plus forts proviennent du sud-sud-est en 2003 et du sud-est en 2004. La direction du vent ne permet donc pas d'expliquer les concentrations plus faibles mesurées en

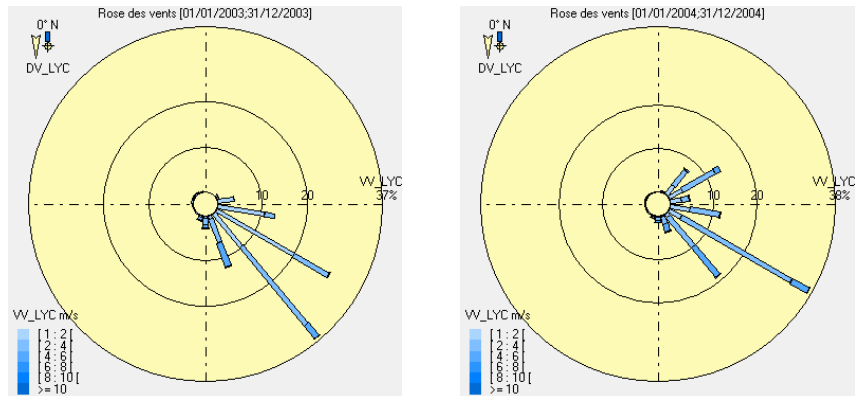


Figure 18 : Roses des vents à la station de Lycée Schoelcher pour les années 2003 et 2004.

2004 par rapport à 2003. Toutefois des vents plus forts mesurés en 2004, pourraient expliquer une meilleure dispersion des polluants et ainsi, une baisse des concentrations moyennes.

Il est possible que cette baisse de la concentration moyenne annuelle en 2004 par rapport à 2003 soit lié à une **diminution d'épisodes de brume de sable en 2004**. Ce point sera éclairci plus tard dans le rapport. La concentration moyenne annuelle en 2005 atteint le niveau de 2003 et il est également mesuré une concentration similaire en 2006 et 2007 laissant envisager que l'évènement particulier se situe en 2004. **L'objectif de qualité est alors dépassé jusqu'en 2008.**

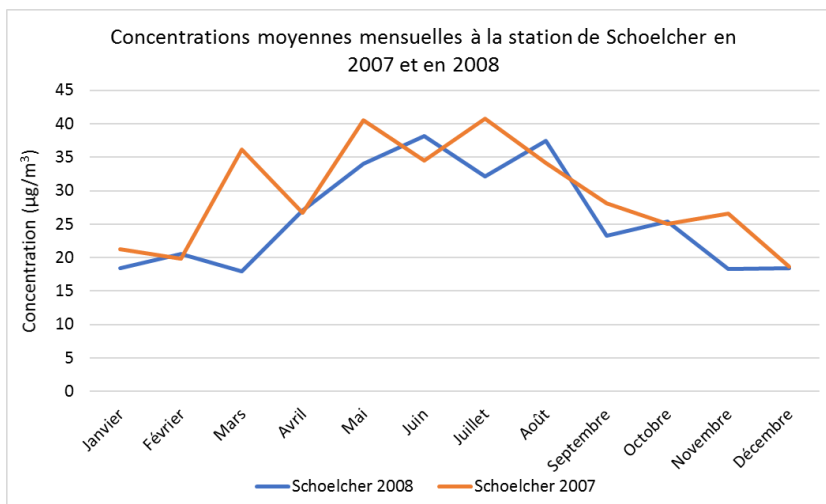



Figure 19 : Concentrations moyennes mensuelles à la station de Schoelcher en 2007 et en 2008.

En 2008, il est de nouveau observé une baisse de la concentration moyenne annuelle de l'ordre de 15% par rapport à 2007. En effet, les concentrations moyennes annuelles aux stations diminuent de 9% (à Bishop) à 23% (au Lamentin) par rapport à celles mesurées en 2007. On peut observer, comme en 2004, que la



diminution la plus importante est observée au Lamentin.

Comme en 2004, la diminution des concentrations est observée sur quasiment tous les mois de l'année 2008 par rapport à ceux de 2007. Les mois de juin et août font figure d'exception puisque pour les quatre stations, leurs concentrations sont plus élevées qu'en 2007. Figure 19, un exemple présentant les concentrations moyennes mensuelles à la station de Schoelcher en 2007 et en 2008. Comme en 2003 et 2004, les roses des vents à partir de Lycée Schoelcher de 2007 et 2008 indiquent majoritairement des vents de sud-est ne permettant pas de montrer de différences qui expliqueraient ces différences de concentrations. Par ailleurs, les roses des vents de juin 2007 et de juin 2008 sont également très similaires. Comme entre 2003 et 2004, une étude précise des jours où des concentrations élevées sont mesurées serait pertinente afin d'investiguer plus précisément cette diminution des concentrations en 2008 par rapport à 2007. Entre 2009 et 2011, les mêmes stations sont concernées et **peu de changements dans la concentration moyenne annuelle** des stations urbaines sont à noter.

En 2012, une augmentation de seulement 4% est observée, cependant, plusieurs faits sont à noter. Tout d'abord, les mesures sont arrêtées au niveau de la station Musée. Et, par ailleurs, un **changement** est effectué dans la **méthode de mesures**, à partir de 2012, la fraction volatile est prise en compte. Enfin, la station de Schoelcher conserve la même concentration annuelle qu'en 2011, tandis que la station de Bishop observe une baisse de 10% par rapport à 2011. Au contraire, la station du Lamentin voit sa concentration moyenne annuelle augmenter de 10%. Des **événements particuliers**

d'origine **anthropique** semblent donc s'être produit au niveau des stations de Bishop et du Lamentin. Il est difficile de distinguer une explication à travers les moyennes mensuelles, celles-ci étant très variables et certains mois ne présentant aucune donnée. La **direction des vents** ne variant pas énormément comme cela a été montré précédemment, ce paramètre **ne peut pas expliquer cette variation**. Les données d'émissions de PM10 révèlent une **diminution des émissions de PM10 du secteur de l'énergie** à Fort de France entre 2011 et 2012. En effet, celui-ci passe de 210 tonnes émises en 2011 à 119 tonnes en 2012. Ce résultat pourrait participer à expliquer la baisse de la concentration moyenne annuelle mesurée à la station de Bishop en 2012. Au Lamentin, les émissions de PM10 sont relativement stables entre 2011 et 2012 (seul le secteur du transport routier voit ses émissions baisser légèrement et passer de 60 tonnes émises en 2011 à 58 tonnes en 2012), cela ne permet donc pas d'expliquer la hausse de la concentration annuelle de 10% par rapport à 2011. **Un dépassement de l'objectif de qualité est observé de 2009 à 2012.**

En 2013, la concentration moyenne annuelle à Schoelcher reste identique à 2011 et 2012. En revanche, la station de Bishop voit sa concentration continuer à diminuer et ce de 28%. La concentration à la station du Lamentin diminue également en 2013 (-15% par rapport à 2012) et atteint donc une concentration plus basse que celle mesurée en 2011 avant l'augmentation.

En 2014, une légère hausse est observée du fait d'une augmentation à la station de Bishop (15%) malgré une baisse de la concentration moyenne annuelle au Lamentin (-7%) et une concentration similaire à 2013 à Schoelcher. Les **émissions**

sur la commune de Fort-de-France où se situe la station de Bishop en 2014 **augmentent** fortement au niveau du secteur de l'énergie par rapport à 2013 (avec 87 tonnes émises en 2013 contre 183 tonnes en 2014). Les émissions des secteurs de l'industrie manufacturière et des modes de

émissions puisque celles-ci varient peu entre 2014 et 2015. Les roses des vents ne peuvent pas non plus expliquer cette variation puisque les roses des vents mesurées à la station Lycée Schoelcher indiquent systématiquement des vents du sud-est. N'observant pas de différences dans les

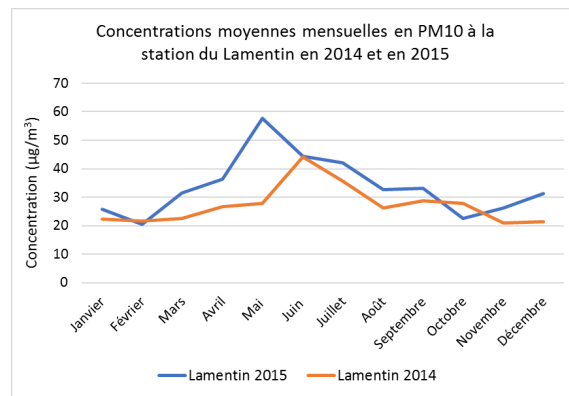
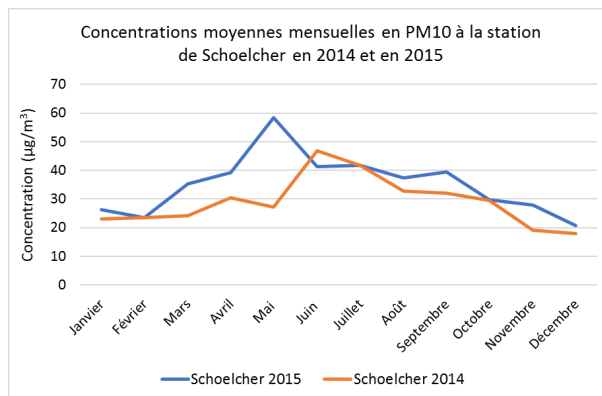



Figure 20 : Concentrations moyennes mensuelles aux stations de Schoelcher et du Lamentin en 2014 et en 2015.

transport autres augmentent également en 2014. Cela pourrait donc expliquer en partie l'augmentation de concentration observée en 2014 à la station de Bishop.

Une hausse est encore observée entre 2014 et 2015 (+19%) pour atteindre 34 µg/m³ en moyenne annuelle soit la **concentration la plus élevée** observée en station urbaine, dépassant l'objectif de qualité. En effet, les stations du Lamentin, de Schoelcher et de Bishop augmentent respectivement de 26, de 21 et de 10% par rapport à 2014. Ces augmentations sont dues à des concentrations plus élevées quasiment tous les mois de l'année par rapport à ceux de l'année 2014 comme le montre la Figure 20. Par ailleurs, il est parfaitement visible que ce sont pendant les mois de mars, avril et mai 2015 que les concentrations moyennes mensuelles augmentent le plus par rapport à 2014. En mai 2015, la concentration mesurée est plus de deux fois plus élevée qu'en 2014. Cette augmentation de concentration en 2015 ne peut pas s'expliquer par les

émissions et les données météorologiques de 2014 et de 2015, il est possible que l'augmentation de la concentration moyenne annuelle en PM10 soit liée à des **épisodes de particules désertiques plus fréquents et/ou plus denses**. Cette hypothèse sera développée et détaillée dans une prochaine partie.

Entre 2015 et 2016, la concentration moyenne annuelle diminue de 23% et une concentration plus faible que celle de 2014 est donc enregistrée, permettant de repasser **en-dessous de l'objectif de qualité**. En effet, les concentrations moyennes au niveau des stations du Lamentin et de Schoelcher diminuent respectivement de 21 et de 29% par rapport à 2015. La concentration moyenne annuelle au Lamentin est alors la même qu'en 2014 et à Schoelcher, elle est même plus basse qu'en 2014 de 14%. En effet, à part le mois de février, tous les autres mois présentent des concentrations plus faibles en 2016 qu'en 2015. Cela ne peut pas s'expliquer par une



variation des émissions qui restent assez similaires sur ces deux années au niveau du Lamentin et de Schoelcher ni par les données météorologiques. Si un nombre important d'épisodes de particules désertiques a eu lieu en 2015, il est possible que la **diminution des concentrations** en 2016 soit simplement liée à un nombre moins important et plus classique d'évènements de particules désertiques. Cette hypothèse sera confirmée plus loin dans le rapport. Par ailleurs, l'arrêt des mesures à la station de Bishop en juillet 2016 et la mise en place de la station de Robert Bourg en 2015, présentant une concentration moyenne annuelle en 2016 plus faible que celles mesurées généralement à Bishop, participent à diminuer la concentration moyenne annuelle des stations urbaines en 2016.


Comme expliqué précédemment, la station de Robert Bourg a été mise en place à la **suite d'une évaluation du risque sur le territoire**. Au contraire, les mesures ont été arrêtées à la station de Bishop car celle-ci **ne répondait plus aux critères d'implantation** d'une station urbaine, de la même façon que la station Musée d'histoire qui avait été fermée en 2013. En effet, avec l'**aménagement du TCSP**, l'évaluation du risque a diminué et la station Bishop n'était donc plus représentative.

L'année 2019 enregistre la **concentration moyenne annuelle en particules PM10 la plus basse toutes années confondues** sur les stations de fond urbaines. Une diminution de 9% est observée par rapport à 2018 et de 28% par rapport à 2015, année où la concentration moyenne annuelle était maximale. Durant l'année 2019, des mesures à la station Hôtel de Ville sont mises en place, à la suite d'une **mise à jour de l'évaluation du risque**, permettant de

déterminer une concentration moyenne annuelle de $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tandis que les concentrations au niveau des stations du Lamentin, de Schoelcher et de Robert Bourg diminuent respectivement de 17, 15 et 20% par rapport à 2018 expliquant cette concentration moyenne annuelle particulièrement basse. Les données météorologiques ne permettent pas d'investiguer sur ces variations. Par ailleurs, les inventaires d'émissions de 2018 et de 2019 n'étant pas encore disponibles, il n'est pas possible de déterminer si des variations dans les émissions pourraient expliquer les variations de concentrations. Au contraire, comme cela sera vu dans la partie suivante, la concentration moyenne annuelle des stations péri-urbaines augmente en 2019 par rapport à 2018. La diminution de la concentration moyenne annuelle des stations urbaines en 2019 ne peut donc pas s'expliquer par la diminution d'épisodes de brume de sable ou des épisodes moins intenses puisqu'il s'agit d'un phénomène régional qui devrait s'observer également sur les stations péri-urbaines. Il est donc possible qu'il se soit produit, en 2019, **moins d'épisodes de pollution locale** au niveau des stations urbaines qu'en 2018.

VII.2.2 Stations périurbaines

Les premières mesures au niveau de stations péri-urbaines ont été réalisées fin 2015 et cela au niveau des stations de Saint-Pierre et de Sainte-Luce. Une concentration moyenne annuelle de $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a alors été mesurée en 2016, représentative de la station de Saint-Pierre, la station de Sainte-Luce ne présentant pas un taux de fonctionnement suffisant pour être représentative.



En 2017, une légère augmentation de la concentration moyenne annuelle est observée (de 6%) avec les concentrations mesurées à la station de Sainte-Luce présentant une concentration moyenne annuelle de $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tandis que la station de Saint-Pierre enregistre une concentration moyenne de $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En 2018, une nette baisse de 18% est observée par rapport à 2017. En effet, une **diminution des concentrations est observée à Saint-Pierre et à Sainte-Luce** respectivement de l'ordre de 22 et 14% par rapport à 2017. Cette diminution est observable globalement sur tous les mois de l'année 2018. Il est, par ailleurs, intéressant de noter que des pics dans la concentration moyenne mensuelle semblent être associés, aussi bien en 2017 qu'en 2018, à des **épisodes de brume de sable**. En effet, des concentrations particulièrement élevées au niveau de l'ensemble des stations ont été mesurées les 25 et 26 mai et 18 et 19 octobre 2017. Par ailleurs, le modèle NAAPS³ semble indiquer l'arrivée d'un panache de particules désertiques en provenance d'Afrique de l'Ouest. Le même phénomène est observable aux dates du 6, 7 et 12 juin et du 20 et 29 septembre 2018.

En 2019, la concentration moyenne annuelle réaugmente de 5% par rapport à 2018 mais reste toujours 14% plus faible qu'en 2017. En effet, la concentration à Saint-Pierre réaugmente de 22% mais la concentration moyenne à Sainte-Luce continue de diminuer de 8% par rapport à 2018 et de 21% par rapport à 2017.


VII.2.3 Stations à influence trafic

De 2001 à 2008, des mesures ont été faites à la station Dillon. En 2001, la concentration moyenne annuelle mesurée est de $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$, soit une concentration **supérieure à l'objectif de qualité**. Une diminution progressive est ensuite observée de 2002 à 2004 pour atteindre $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ soit une baisse de 24% par rapport à 2001.

De 2005 à 2008, les concentrations moyennes annuelles réaugmentent atteignant $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2008 soit une augmentation de 17% par rapport à 2004. Ces variations peuvent s'expliquer, en partie, par les **développements urbains et paysagers** qui ont pu modifier la dispersion des polluants. Les concentrations moyennes annuelles ne remontant jamais au niveau de 2001, il pourrait également être intéressant de déterminer si les émissions liées au trafic ont diminué. Cependant, il n'existe pas d'inventaire des émissions pour cette période.

En 2010, c'est la station de Renéville qui a pris le relai au niveau des stations trafic puisque la station de Dillon a dû être déménagée et qu'elle **ne répondait plus aux critères d'implantation** d'une station trafic en raison des développements urbains. Il est déjà important de noter que les concentrations moyennes annuelles à la station de **Renéville** sont globalement **plus élevées** qu'à la station de Dillon et **systématiquement supérieure à l'objectif de qualité**. En effet, la station de Renéville est située **dans l'axe des vents dominants du carrefour, de l'entrée de l'autoroute et la sortie de la Rocade RD41**, ce qui n'était

³ Modèle des concentrations en particules (<https://www.nrlmry.navy.mil/aerosol/>)



pas le cas de la station Dillon. Cette nouvelle station respecte les critères d'implantation d'une station urbaine à influence trafic et est plus représentative de l'exposition des populations situées dans la zone.

Les concentrations moyennes annuelles en PM10 entre 2010 et 2012 sont assez stables, et supérieures à la valeur limite annuelle, puis une diminution de l'ordre de 18% est observée en 2013, permettant de passer **en-dessous de la valeur limite annuelle de 40 µg/m³**. En effet, la station de Renéville diminue de 14% par rapport à 2012 et la mise en place de la station de Robert Mansarde, à la suite d'une **mise à jour de l'évaluation des risques**, présentant une concentration moyenne annuelle de 33 µg/m³ amplifie cette baisse sur la concentration moyenne globale des stations trafic.

La station de Robert Mansarde présente une concentration moyenne annuelle relativement stable entre 2012 et 2014 puis son taux de fonctionnement n'est plus suffisant les années suivantes pour pouvoir calculer une moyenne annuelle. Elle est fermée en 2016 puisque des aménagements ont permis **de réduire le risque d'exposition de la population**.

La concentration moyenne annuelle à Renéville est assez stable en 2014 puis sa concentration réaugmente progressivement jusqu'en 2016 où elle atteint un niveau proche de celui mesuré les premières années, dépassant de nouveau la valeur limite annuelle. En 2017, une baisse de 17% est observée avant de réaugmenter en 2018. Néanmoins, la concentration moyenne annuelle obtenue en 2018 reste **inférieure à la valeur limite annuelle de 40 µg/m³**.


Enfin, l'absence de concentration moyenne annuelle des stations trafic en 2019 est due à l'incendie qu'il y a eu à la station de Renéville en avril 2019.

VII.2.4 Conclusions

Cette partie a permis de mettre en valeur les évolutions des concentrations moyennes annuelles en PM10 selon le type de typologie des stations étudiées. Il a également été mis en évidence que le **nombre de stations étudiées**, et donc l'arrêt ou la mise en place de nouvelles mesures, pouvaient **impacter la moyenne annuelle globale** et que les données doivent donc être interprétées en considérant ce facteur.

Les concentrations moyennes annuelles en PM10 sur stations urbaines sont **globalement stables et en-dessous des normes** depuis le début des mesures. Celles-ci ont même atteint la concentration la plus basse jamais mesurée en 2019. Néanmoins, il arrive que l'objectif de qualité à long terme soit dépassé en 2003, 2006, 2007, 2011, 2012 et 2015. Ces variations peuvent être liées à la **mise en place ou à la fermeture d'une station**, à la suite des évaluations du territoire et du risque d'exposition de la population tous les 5 ans, influençant la concentration moyenne annuelle globale ou, certainement, à la **présence** plus ou moins importante de **brume de sable** d'une année sur l'autre.

Néanmoins, il a aussi été noté des variations d'une année sur l'autre différentes entre les stations révélant la part **d'évènements anthropiques** dans la concentration moyenne annuelle mesurée au niveau de ces stations urbaines.



Les stations périurbaines ont également des concentrations relativement stables et **respectent les normes**. En revanche, les variations observées d'une année sur l'autre sont majoritairement associées à la mise en place ou l'arrêt d'une mesure ou à la présence plus ou moins importante de brumes de sable. Cela révèle une **influence anthropique moins importante** au niveau des stations périurbaine par rapport au stations urbaines.

En ce qui concerne les stations trafic, il est observé de **grandes variations** dans les concentrations moyennes annuelles. La station de Renéville présente des concentrations nettement plus élevées que la station de Dillon (représentant l'influence trafic de 2001 à 2008) provoquant des **dépassements réguliers de la valeur limite annuelle de 40 µg/m³**. La station de Renéville est bien plus représentative des critères d'implantation d'une station urbaine à influence trafic. En effet, cette station est située dans le quartier urbanisé, dans l'axe des vents dominants de l'entrée de l'autoroute et de la Rocade RD41.

Toutefois, il est important de rappeler que les stations trafic sont sous **l'influence d'une composante anthropique** sur laquelle des actions d'aménagement, de mobilité et de transport pourraient permettre d'abaisser les concentrations en particules fines dans l'air ambiant en dessous de la valeur limite annuelle, voire de l'objectif de qualité annuel (indépendamment des épisodes de brumes désertiques qui traversent le territoire).

VII.3 Evolution pluriannuelle des concentrations en PM_{2,5} selon les typologies des stations entre 2003 et 2019

La Figure 21 présente l'évolution pluriannuelle depuis 2003 (début des mesures de PM_{2,5}) des concentrations de PM_{2,5} en fonction de leur typologie : urbaine et périurbaine (considérées comme les stations de fond) ainsi que le nombre de stations de mesure pour chaque typologie et chaque année. Sont présentés également sur ce graphique la valeur limite annuelle de 25 µg/m³ et l'objectif de qualité à atteindre de 10 µg/m³ en moyenne annuelle définis selon la directive européenne 2008/50/CE,

ainsi que dans l'arrêté 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant.

Contrairement aux PM₁₀, aucune mesure en PM_{2,5} n'est effectuée au niveau de stations de proximité automobile. Seules des mesures au niveau de stations de fond, urbaine et périurbaines, sont réalisées, conformément aux exigences de surveillance, et vont être décrites dans cette partie.

VII.3.1 Stations urbaines

De 2003 à 2014, des mesures en PM_{2,5} n'étaient effectuées qu'au niveau de la station de Bishop à Fort de France. Les concentrations en PM_{2,5} sont relativement

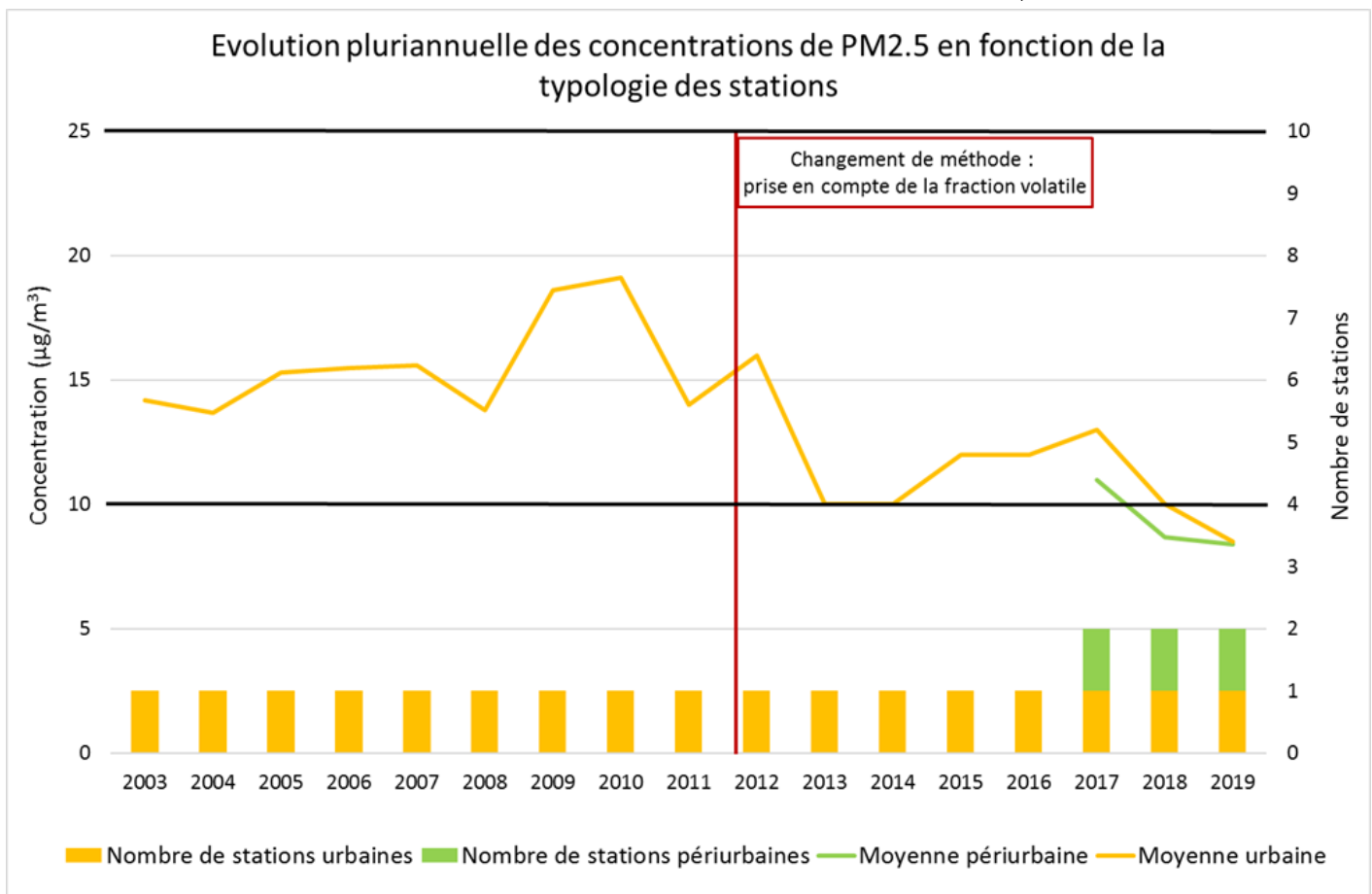



Figure 21 : Evolution pluriannuelle des concentrations de PM_{2,5} en fonction de la typologie des stations et nombre de stations de mesures par typologie depuis 2003. Les traits noirs indiquent la valeur limite annuelle et l'objectif de qualité annuelle (25 µg/m³ et 10 µg/m³ en moyenne annuelle).



stables de 2003 à 2008. En revanche, il est observé une **augmentation** de la concentration moyenne annuelle en **2009** avec une concentration atteignant $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$, soit une augmentation de 26% par rapport à 2008. A noter que la concentration moyenne annuelle en PM10 à Bishop augmente également entre 2008 et 2009. De plus, cette concentration en PM2,5 est également mesurée en 2010. En effet, les concentrations moyennes mensuelles de 2009 et de 2010 sont systématiquement plus élevées qu'en 2008.

En 2011, la concentration moyenne annuelle mesurée à Bishop diminue et revient au même niveau qu'en 2008. Les **concentrations moyennes annuelles en PM2,5 de 2009 et de 2010 étant les plus élevées jamais mesurées**, il est possible qu'il y ait eu des émissions plus importantes ces deux années-là. Cependant, l'inventaire des émissions étant fait à partir de 2010, cela n'est pas vérifiable pour 2009 et cela n'est pas observé en 2010 au niveau des émissions de Fort-de-France. Par ailleurs, il est intéressant de noter que cette remarque sur les concentrations en PM2,5 à Bishop ne s'applique pas sur les concentrations de PM10. Il s'agit donc d'une **source en particules fines inférieures à $2,5 \mu\text{m}$ de diamètre** qui impacte la station de Bishop en 2009 et en 2010.

Une forte diminution de la concentration moyenne annuelle en PM2,5 est observée en 2013 par rapport à 2012 (-37%) permettant d'atteindre pour la première fois l'**objectif de qualité fixé à $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$** . Cette concentration est mesurée à la station de Bishop jusqu'en 2014. Les concentrations moyennes mensuelles sont, en effet, systématiquement plus faibles ces deux années-là qu'en 2012. En effet, des travaux ont été entrepris à partir de 2013 pour la

construction de la ligne de TCSP ce qui a engendré une **diminution du trafic routier** à la suite de la déviation de la circulation.

En 2015, la **station urbaine au niveau de l'Hôtel de Ville** de Fort de France, présentant une concentration moyenne annuelle de $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, est mise en place à la suite d'une **évaluation du territoire**. Tandis que les mesures à la station de Bishop sont arrêtées par **manque de représentativité** aux critères d'implantation d'une station urbaine. La concentration moyenne annuelle des stations urbaines augmente donc très légèrement (à $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

La station de Hôtel de Ville voit sa concentration moyenne annuelle augmenter légèrement en 2017 par rapport à 2016 expliquant la légère augmentation de la concentration des stations urbaines.

Depuis 2018, la concentration moyenne annuelle des stations urbaines diminue permettant d'**atteindre de nouveau l'objectif de qualité** en 2018 et passer en-dessous en 2019. En effet, les mesures à la station Hôtel de Ville sont arrêtées, à la suite de problème d'alimentation électrique de la station, et depuis 2018 et une **évaluation du territoire**, des mesures PM2,5 sont effectuées à la station de Schoelcher présentant des **concentrations moyennes annuelles plus faibles qu'à Hôtel de Ville**.

La plupart des variations de la concentration moyenne annuelle en PM2,5 des stations urbaines depuis 2003 peuvent donc s'expliquer, en grande partie, par les **arrêts ou la mise en place des stations** liés aux évaluations du risque du territoire. Par ailleurs, il est important de noter que l'objectif de qualité à $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est respecté en 2013 et en 2014 et depuis 2018. La valeur limite de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est, quant à elle, respectée au niveau de l'ensemble des stations urbaines depuis 2003.



VII.3.2 Stations périurbaines

Des mesures de PM_{2,5} sont réalisées depuis 2017 à station de Sainte Luce. Celle-ci présentait une concentration moyenne annuelle de 11 µg/m³, **inférieure à la valeur limite mais supérieure à l'objectif de qualité**. Depuis les concentrations moyennes annuelles à Sainte Luce sont en constante diminution puisqu'une concentration de 9 µg/m³ est mesurée en 2018 et une concentration de 8 µg/m³ en 2019. Cette légère diminution des concentrations moyenne annuelle à Sainte Luce permet de passer **en-dessous de l'objectif de qualité de 10 µg/m³ depuis 2018**.

urbaine mais implantée dans un centre urbain dense, active jusqu'en 2015, présentait des concentrations plus élevées que les stations de Hôtel de Ville ou de Schoelcher présentant des valeurs plus proches de l'objectif de qualité.

Les stations périurbaines sont représentées par la station de Sainte Luce qui présente des concentrations moyennes annuelles en **constante diminution** depuis sa mise en place depuis 2017 et **proche ou en-dessous de l'objectif de qualité**.

VII.3.3 Conclusions

Cette partie a permis d'illustrer la variation interannuelle des concentrations de PM_{2,5} sur le territoire de la Martinique. Conformément à la **réglementation**, la surveillance des PM_{2,5} se fait sur les **stations de fond** urbaines ou périurbaines.

Les concentrations moyennes annuelles des stations urbaines **respectent la valeur limite mais dépassent généralement l'objectif de qualité**. Par ailleurs, il a été mis en avant que les variations de concentrations au niveau des stations urbaines pouvaient souvent être expliquées par la **mise en place ou l'arrêt d'une mesure à une station**. C'est, en effet, une évaluation du territoire et du risque d'exposition pour la population qui conditionne la mise en place ou l'arrêt d'une station. Lorsqu'une station **ne répond plus aux critères d'implantation** et ne présente plus qu'un risque faible, les mesures y sont arrêtées. Par exemple, la station Bishop,



VII.4 Analyse des PM10 de 2001 à 2019 par gamme de concentrations

Selon la directive européenne 2008/50/CE, ainsi que l'arrêté du 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant, un **épisode de pollution** particulaire correspond à une période (au moins un jour) où les **concentrations de particules dans l'air PM10 ne respectent pas ou risquent de ne pas respecter les niveaux réglementaires selon des critères prédéfinis**. Néanmoins, dans ce rapport, un épisode de pollution particulaire est défini comme un jour où un **dépassement de seuil est réellement constaté** par les mesures. Les risques de dépassement des seuils prévus mais non constatés ne sont pas comptabilisés.

Deux niveaux réglementaires sont définis :

- **Le niveau d'information et de recommandation** : Niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine de **groupes particulièrement sensibles** au sein de la population. Ce niveau rend nécessaire l'émission d'informations immédiates et adéquates à destination de ces groupes, et des recommandations pour réduire certaines émissions. Pour les PM10, la valeur supérieure ou égale à 50,5

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière ne doit pas être dépassée plus de 35 jours par an pour respecter également la valeur limite.

- **Le niveau d'alerte** : niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé de **l'ensemble de la population** ou un risque pour la dégradation de l'environnement, justifiant l'intervention de mesures d'urgence. Celui-ci est supérieur ou égal à $80,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière pour les PM10. Le **niveau d'alerte sur persistance** est déclenché lorsque le niveau d'information et recommandation est prévu pour le jour même et le lendemain (supérieur ou égal à $50,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

En complément de ces seuils réglementaires, il existe des **normes environnementales**. Ces normes sont définies pour les PM10 comme des valeurs limites à respecter pour protéger la population, mais également un objectif de qualité à ne pas dépasser. Ces normes sont définies à partir de concentrations moyennes journalières et annuelle.

Gamme de concentrations	Influence anthropique	Influence d'une brume de sable légère	Influence d'une brume de sable modérée	Influence d'une brume de sable dense
$30,5 \mu\text{g}/\text{m}^3 \leq x < 50,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$	X	X		
$50,5 \mu\text{g}/\text{m}^3 \leq x < 80,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$	X		X	
$x \geq 80,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$	X			X

Tableau 3 : Influence des principales sources de fond en PM10 selon la gamme de concentration étudiée.

Ainsi de ces normes, 3 niveaux sont définis :

- Le **niveau journalier de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$** qui ne doit pas être dépassé plus de 35 jours par an
- Le **niveau annuel de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$** représentant la valeur limite à respecter pour protéger la population
- et le **niveau annuel plus contraignant de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$** fixé par l'objectif de qualité.

Dans le but d'étudier la fréquence et l'évolution des concentrations en particules fines sur l'ensemble des stations, et de confronter les concentrations de fond aux concentrations sous influence trafic, **3 gammes de concentrations journalières ont été fixées** (Tableau 3) : entre 30,5 inclus et 50,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, entre 50,5 inclus et 80,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et supérieur ou égal 80,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ainsi, les moyennes journalières de chaque station ont été utilisées afin de déterminer la **moyenne journalière maximale** et **comptabiliser le nombre de jours enregistrant des concentrations comprises dans chaque gamme**. Les


stations de fond (urbaines et péri-urbaines) ont été étudiées d'une part et l'ensemble des stations (comprenant les stations à influence trafic) d'autre part permettant d'estimer la fraction de dépassements ayant lieu spécifiquement sur les stations trafic.

En Martinique, les sources influençant principalement les concentrations de PM10 dans l'atmosphère sont les **particules désertiques** et l'activité du **trafic routier**⁴. Néanmoins, sans analyse de la composition chimique il est difficile d'estimer la contribution de chacun des différents types de sources. Ainsi, lors des épisodes de particules dans l'atmosphère, il est admis que **les sources de ces épisodes peuvent être variées**, sans qu'elles puissent être, à ce jour, quantifiées précisément.

Cependant, il a été tenté dans ce rapport, à partir des concentrations en PM10, de déterminer quel type de sources pourrait avoir influencé les concentrations mesurées en situation de fond mais également à proximité du trafic.

En effet, les dépassements des niveaux définis plus haut peuvent être associés à une **influence anthropique** qui sera toutefois plus importante sur les stations à influence

⁴ Bulletin de Veille Sanitaire, 2012



trafic. En situation de fond urbain ou périurbain, on peut, en revanche, considérer **l'influence d'une brume de sable** légère lors d'un dépassement du niveau de $30\mu\text{g}/\text{m}^3$, modérée lors d'un dépassement de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ tandis que cette brume sera considérée comme dense lors d'un dépassement de $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ ⁵.

VII.4.1 Analyse annuelle par gamme de concentrations

Il est, tout d'abord, important de noter que durant la période d'étude, un **changement de méthode de mesure a été effectué en 2012** afin de prendre en compte la fraction volatile pouvant induire une augmentation dans les valeurs. Néanmoins, cette variation est considérée comme **négligeable** dans l'étude d'un tel jeu de données. Par ailleurs, il faut se rappeler que le nombre de stations de mesures n'est pas constant au cours des années et que des variations dans les concentrations moyennes annuelles peuvent avoir lieu du fait de l'arrêt de mesure à une station et/ou de la mise en place d'une mesure à une nouvelle station, comme cela a été évoqué lors de l'étude de l'évolution pluriannuelle des concentrations. En 2001 et en 2002, seule une station urbaine mesurant les PM10 était mise en place alors qu'en 2003, leur nombre est passé à 4. En revanche, en 2014 et 2015, les stations urbaines mesurant les PM10 sont passées au nombre de 2 avant de réaugmenter en 2016 avec la mise en place de stations périurbaines. C'est donc un critère également à prendre en compte dans l'étude de cette évolution.

VII.4.1.a Concentrations entre 30 et $50\mu\text{g}/\text{m}^3$

Les concentrations moyennes journalières en PM10 comprises entre $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ et $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été choisies pour **illustrer l'influence combinée de l'activité anthropique** (essentiellement liée au trafic automobile) et d'un **faible épisode brumeux sur les niveaux de fond**.

La Figure 22 illustre le nombre de jours pour lesquels la **concentration moyenne journalière d'au moins une station est comprise entre 30 et $50\mu\text{g}/\text{m}^3$** pour les stations de fond (urbaine et périurbaine) mais aussi pour l'ensemble des stations c'est-à-dire les stations de fond auxquelles s'ajoutent les stations à influence trafic, depuis 2001.

En moyenne, par an, il est observé **96 jours où les concentrations sont comprises entre 30 et $50\mu\text{g}/\text{m}^3$** sur les stations de fond. La moyenne est de **130 jours** lorsque l'on ajoute les **stations à influence trafic**. En effet, pour toutes les années depuis 2001, une part des concentrations entre 30 et $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ est associée aux concentrations mesurées au niveau des stations à influence trafic. La **contribution de la source anthropique** est donc bien vérifiée à travers l'étude de ce graphique.

L'évolution d'une année sur l'autre ne suit pas forcément la même tendance en ne considérant que les stations de fond ou l'ensemble des stations.

⁵ Bulletin de Veille Sanitaire, 2012

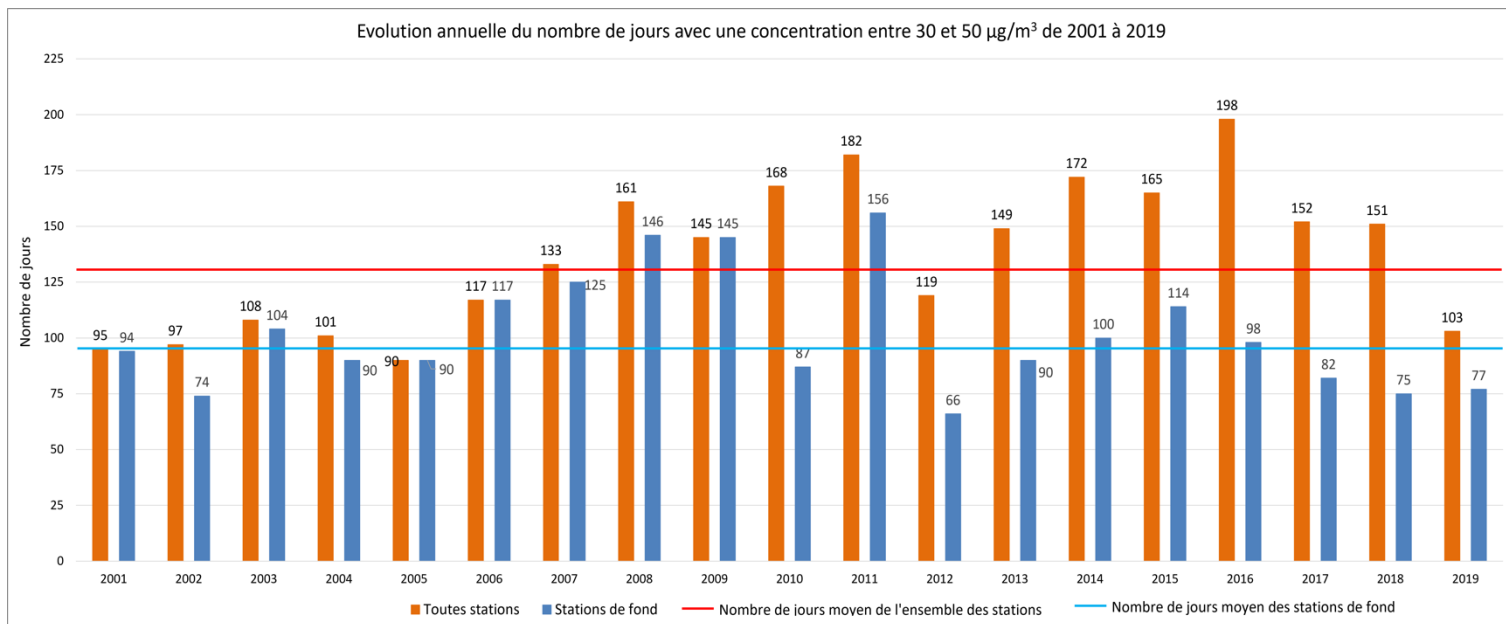



Figure 22 : Evolution annuelle du nombre de jours dans la gamme de concentrations de 30 à 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de 2001 à 2019.

	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum
Stations de fond	96	94	66 (en 2012)	156 (en 2011)
Toutes stations	130	145	90 (en 2005)	198 (en 2016)

Tableau 4 : Eléments statistiques de la gamme de concentration entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de 2001 à 2019 au niveau des stations de fond et de l'ensemble des stations.

- En 2009, le nombre de jours où la concentration est située entre 30,5 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ était le même que l'on considère que les stations de fond ou l'ensemble des stations : aucune mesure sur une station à influence trafic n'a été faite cette année-là en raison de l'arrêt des mesures à Dillon en 2008 et de la mise en place de la station de Renéville seulement en 2010. Ce sont donc les mêmes données qui sont observées.
- En revanche, en 2010, à partir du début des mesures sur la station à influence trafic de Renéville, le nombre de jours de dépassement au niveau de l'ensemble des stations a augmenté à 168 jours. Au niveau des stations de fond, il a diminué à 87. Il est donc visible dans cet exemple, qu'en 2010, les émissions de particules liées au **trafic** ont été **responsables de nombreux jours où la concentration moyenne était située entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** .
- A l'inverse, en 2015, une baisse est observée au niveau de l'ensemble des stations ; baisse qui n'est pas vérifiée au niveau des stations de fond puisque le nombre de jours de dépassement augmente en 2015. L'augmentation du nombre de jours de dépassement en 2015 est donc associée à des stations de fond et non aux stations trafic. A travers ces exemples, sont illustrés des **phénomènes complexes**. Cela se vérifiera à travers l'étude des dépassements des niveaux définis.



Il peut également être observé que les dépassements au niveau de l'ensemble des stations sont **supérieurs à la moyenne et à la médiane** (valeur qui coupe l'ensemble des valeurs en deux parties égales) depuis 2007 excepté en 2012, en 2019, et en 2007 pour la médiane (Figure 22 et Tableau 4). A noter que cela peut s'expliquer en 2019, du fait qu'il n'existe pas de données issues de stations à influence trafic, à la suite de l'incendie de Renéville. Les écarts de jours de dépassement entre les stations de fond et l'ensemble des stations, et donc Renéville, étant importants les années précédentes, il peut être envisagé que si des mesures avaient pu être réalisées toute l'année, le nombre de jours de dépassement sur l'ensemble des stations, en 2019, serait supérieur à la moyenne.

Pour les stations de fond, les dépassements sont **supérieurs à la moyenne** de manière **moins systématique**. En effet, le premier dépassement à la moyenne est observé en 2003 mais un nombre de jours de dépassement inférieur à la moyenne est observé en 2004, 2005, 2010, 2012, 2013, et depuis 2017. Cette information renforce donc l'idée que les stations trafic peuvent jouer un rôle important dans le nombre de jours de enregistrant des concentrations entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En outre, en considérant **l'ensemble des stations**, le maximum de jours avec une concentration entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a été observé **en 2016** avec **198 jours**. En revanche, en ne considérant que les **stations de fond**, le maximum est observé **en 2011** avec **156 jours**. Ce nombre de jours est supérieur à la moyenne et à la médiane de l'ensemble des stations révélant une année particulièrement importante en termes de dépassement du niveau de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur les

stations de fond. Cela est également observé en 2008 et 2009 avec respectivement 146 et 145 jours avec une concentration supérieure à 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière. L'année 2016 a donc été particulièrement influencée par des concentrations supérieures à 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau des stations trafic. Tandis qu'en 2011, mais aussi en 2008 et en 2009, de nombreux dépassements ont été observés au niveau des stations de fond.

A partir de ce graphique et au vu des éléments qui ont été évoqués, il reste difficile de dégager une tendance claire depuis 2001 sur l'évolution du nombre de jours où la concentration est comprise entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aussi bien au niveau des stations de fond qu'au niveau de l'ensemble des stations. C'est aussi une conclusion qui a été faite dans la note technique « *Analyse des données de mesure de PM en Martinique : Evolution des concentrations entre 2000 et 2018* » du LCSQA (Salomon, 2020) en étudiant également les données journalières. Toutefois, la Figure 22 montre bien **l'influence des sources anthropiques**, notamment des sources trafic sur la gamme des concentrations en particules fines PM10 entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

VII.4.1.b Concentrations entre 50 et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

La Figure 23 présente le nombre de jours pendant lesquels la **concentration moyenne journalière en PM10 au niveau au moins d'une station est comprise entre 50 et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** . Ce niveau de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a été retenu car il correspond à la valeur limite journalière pour la protection de la santé, à ne pas dépasser plus de 35 jours par an, et au seuil d'information et de recommandation déclenché pour une journée en cas de pic de pollution. Ainsi, dès qu'une concentration supérieure ou égale à 50,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, il est entendu qu'il s'agit d'un dépassement du seuil réglementaire journalier de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette gamme devrait également pouvoir permettre d'estimer **l'influence**

anthropique et/ou d'une brume de sable modérée sur les concentrations en PM10.

Il est observé, **en moyenne, 39 jours** (soit 11% de l'année) de dépassement du niveau de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ **sur les stations de fond** et **50 jours** (soit 14% de l'année) de dépassement au niveau de **l'ensemble des stations**.

Comme vu lors de l'analyse de la gamme de concentrations entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, le nombre de jours de dépassement de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau de l'ensemble des stations est généralement plus élevé qu'au niveau des stations de fond montrant **l'influence des stations trafic**. Cette influence peut aller jusqu'à concerner au maximum **46% des jours de dépassements sur l'ensemble des stations en 2016**.

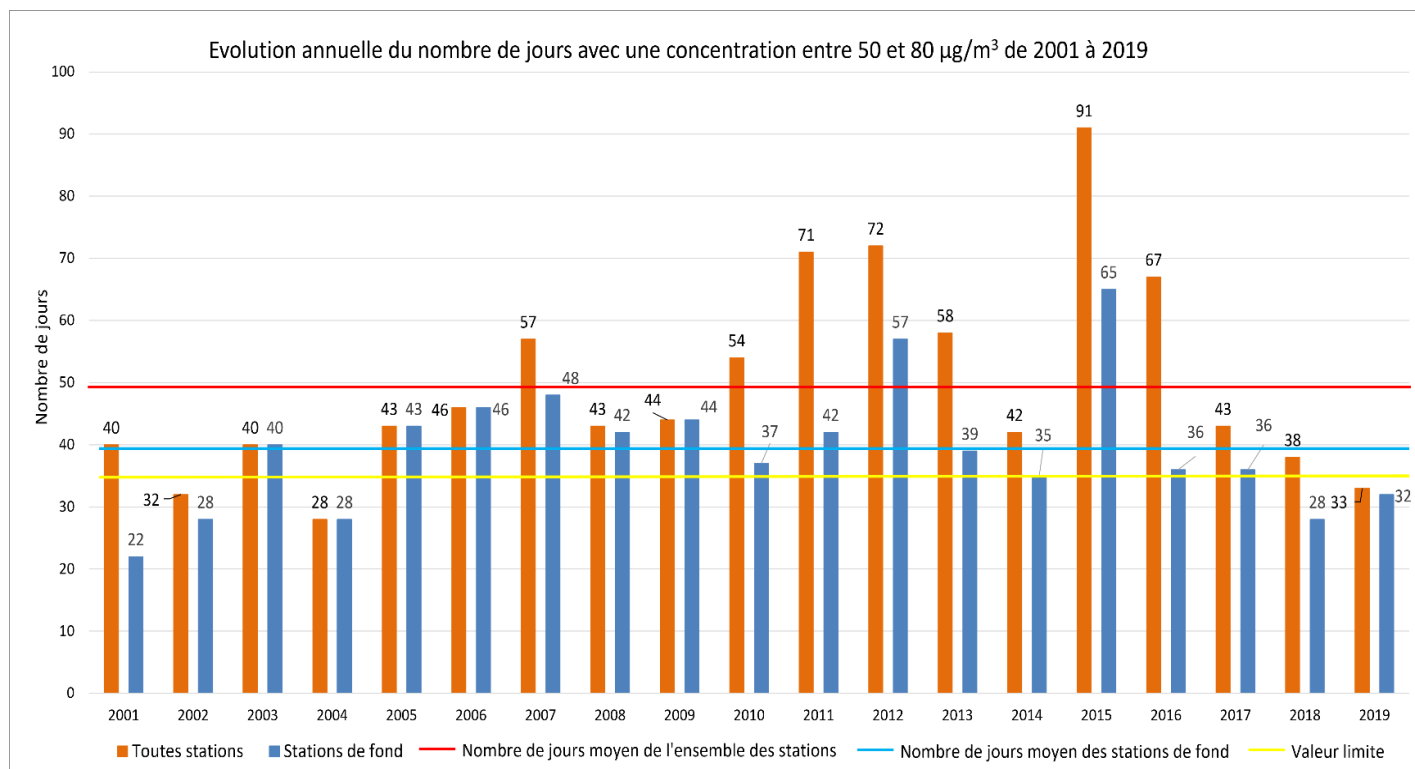


Figure 23 : Evolution annuelle du nombre de jours dans la gamme de concentrations entre 50 et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de 2001 à 2019.

	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum
Stations de fond	39	39	22 (en 2001)	65 (en 2015)
Toutes stations	49	43	28 (en 2004)	91 (en 2015)

Tableau 5 : Eléments statistiques de la gamme de concentrations entre 50 et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de 2001 à 2019 au niveau des stations de fond et de l'ensemble des stations.

Quelques remarques peuvent être faites :

- En 2003 et 2004 (mais aussi 2005 et 2006 pour lesquelles le phénomène s'observait aussi pour la gamme de 30,5 à 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), le nombre de jours de dépassement est identique pour l'ensemble des stations et pour les stations de fond. En effet, les **mesures à Dillon n'étaient plus représentatives de l'influence trafic de la zone**. Les aménagements urbains dans la zone ont obstrué la mesure, à l'origine d'une sous-estimation des concentrations pouvant être mesurées les dernières années.
- Depuis 2010 et la mise en place des mesures à Renéville (excepté 2019 où les mesures à Renéville se sont arrêtées en cours d'année du fait de l'incendie), entre **16** (en 2017) et **46%** (en 2016) des jours de dépassement sont imputables aux **stations à influence trafic**.

En outre, la valeur de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ étant une valeur réglementaire à ne pas dépasser plus de 35 jours par an pour respecter la valeur limite, il est intéressant d'étudier les données vis-à-vis de cette réglementation. En considérant l'ensemble des stations, **le nombre de jours de dépassement a été supérieur à 35 jours tous les ans depuis 2001 excepté en 2002, 2004 et 2019** (année non complète du fait de l'incendie de la station de Renéville, le nombre de jours de

dépassement pourrait donc être plus important). La même observation peut être faite au niveau des stations de fond à cela près que la valeur limite n'a également pas été dépassée en 2001 et en 2018, indiquant, encore une fois, que les stations trafic exercent une influence dans les dépassements des niveaux étudiés.

Le nombre de jours de dépassement de la valeur limite atteint un maximum de 91 en 2015, soit 25% de l'année (65 jours de dépassement pour les stations de fond seules).

Par ailleurs, à partir de 2010, dès l'implantation de la station trafic de Renéville, l'influence des stations trafic est bien vérifiée avec des nombres de jours de dépassement supérieurs à la moyenne plus fréquent qu'au niveau des stations de fond seulement (Figure 23, Tableau 5).

Pour finir, il n'est observé aucune tendance à la hausse ou à la baisse que ce soit au niveau de l'ensemble des stations ou seulement des stations de fond. A part quelques pics particuliers (en 2012 et en 2015 pour les stations de fond et en 2007, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015 et 2016 pour l'ensemble des stations), **le nombre de jours de dépassement du niveau de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ est proche de la médiane** (Tableau 5). La médiane représentant la valeur séparant l'ensemble des valeurs en deux parties égales.

VII.4.1.c Concentrations supérieures à 80 µg/m³

La Figure 24 présente le nombre de jours de dépassement pendant lesquels au moins une station présente une concentration supérieure à 80 µg/m³ en moyenne journalière correspondant à un dépassement strict du seuil d'alerte de 80 µg/m³ en cas de pic de pollution, au niveau de l'ensemble des stations mais également au niveau des stations de fond. Ces dépassements du seuil d'alerte devraient également pouvoir permettre d'estimer l'influence d'une pollution anthropique et/ou d'une brume de sable dense sur les concentrations en PM10.

et **11 jours** (soit 3% de l'année) de dépassement au niveau de **l'ensemble des stations**.

Quelques remarques :

- De 2001 à 2009 (excepté en 2002), le nombre de jours de dépassement était identique que l'on considère seulement les stations de fond ou l'ensemble des stations. Il n'y avait, en effet, pas de mesures au niveau d'une station à influence trafic en 2009. Durant les années précédentes, les dépassements du niveau de 80 µg/m³ n'ont jamais été dus à la seule activité du trafic. Les mesures, pendant cette période, se

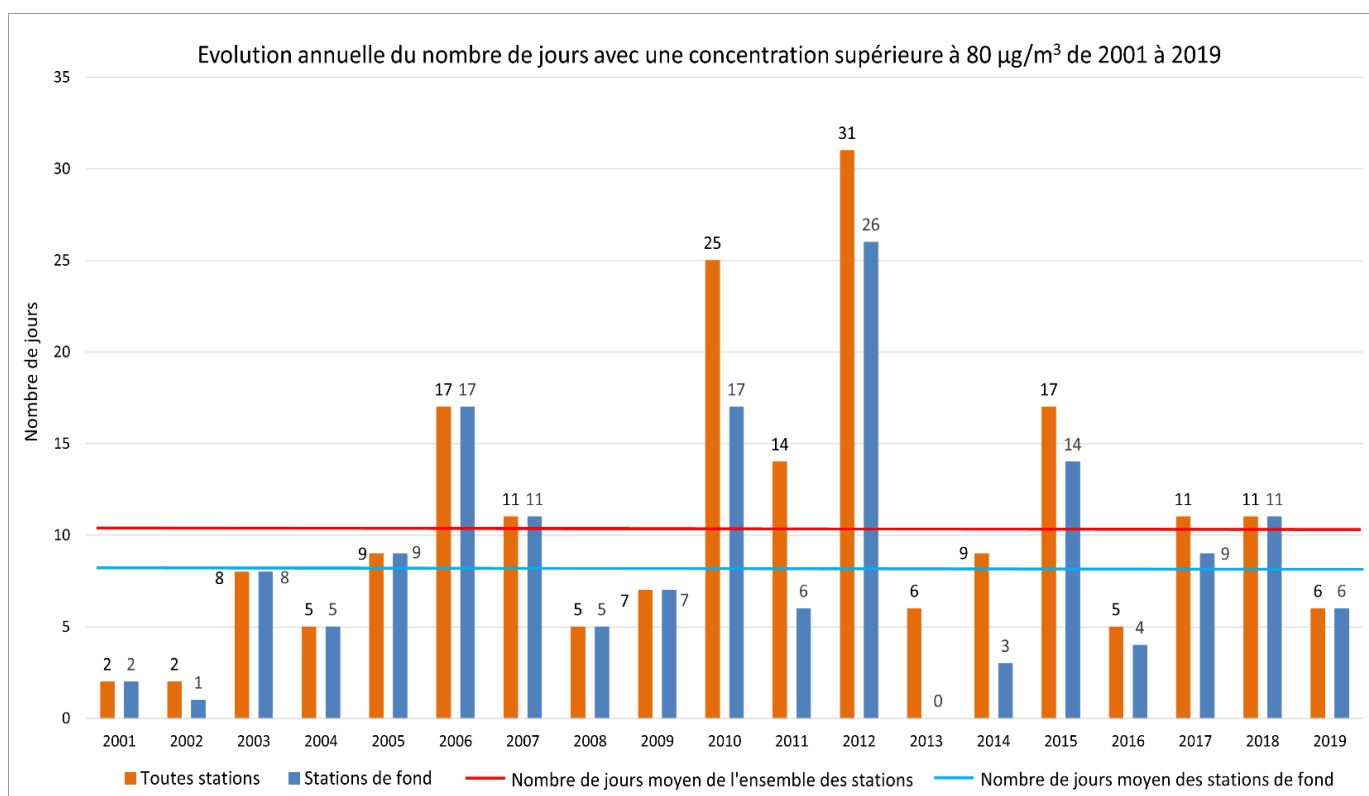


Figure 24 : Evolution annuelle du nombre de jours dans la gamme de concentrations supérieure à 80 µg/m³ de 2001 à 2019.

Il est observé, en moyenne, **8 jours** (soit 2% de l'année) de dépassement de la valeur du seuil d'alerte au niveau **des stations de fond**

faisant à Dillon, il apparaît qu'il n'y a quasiment jamais eu de



	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum
Stations de fond	8	7	0 (en 2013)	26 (en 2012)
Toutes stations	11	9	2 (en 2001 et 2002)	31 (en 2012)

Tableau 6 : Eléments statistiques de la gamme de concentration supérieure à $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de 2001 à 2019 au niveau des stations de fond et de l'ensemble des stations.

dépassement de la valeur de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ spécifique à cette station.

- A partir de 2010, le nombre de jours de dépassement au niveau de **l'ensemble des stations est plus important qu'au niveau des stations de fond** (à part en 2018 et en 2019 où les mesures à Renéville se sont arrêtées en avril) révélant **l'influence de la station à influence trafic de Renéville** (et de la station Robert Mansarde entre 2012 et 2016) dans le nombre de jours de dépassement du niveau de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette influence concerne **entre 16 (en 2012) et 100% (en 2013) des jours de dépassement**.


Il est intéressant de noter que le nombre de jours de dépassement du seuil d'alerte à $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ peut passer du simple au double d'une année à l'autre. Par exemple, l'année 2006 présente 17 jours de dépassement en général alors qu'il n'y en avait que 9 et 11 en 2005 et en 2007. Ce phénomène étant observé sur l'ensemble des stations mais également sur les stations de fond seules, il est certain qu'il y a eu une **influence de brume de sable dense** plus importante en 2006.

De fortes hausses du nombre de jours de dépassement sont également observables en 2010 et en 2012 (année où l'on enregistre le plus grand nombre de jours de dépassement, 31 jours pour l'ensemble des stations soit 8% de l'année et 26 jours pour les stations de fond soit 7% de l'année), mais

ces augmentations sont moins importantes pour les stations de fond que pour l'ensemble des stations, révélant qu'une part de ces dépassements est **liée à la contribution d'une pollution anthropique**. Par ailleurs, en 2013, aucun dépassement n'est enregistré au niveau des stations de fond. Les six jours de dépassements enregistrés sur l'ensemble des stations sont donc dus à un **dépassement au niveau d'une station à influence trafic**.

Enfin, un **nombre de jours de dépassement supérieur à la moyenne** de l'ensemble des stations est observé en 2006, 2007, 2010, 2011, 2012, 2015, 2017 et 2018 (Figure 24 et Tableau 6). Le nombre de jours de dépassement supérieur à la moyenne des stations de fond est, lui, observé de 2005 à 2007, en 2010, 2012, 2015, 2017 et 2018. Ce phénomène est donc observé sur quasiment les mêmes années. Ces dépassements importants et supérieurs à la moyenne semblent donc être aussi bien associés à la contribution combinée de la pollution anthropique et d'un épisode de brume de sable dense puisqu'ils concernent aussi bien les stations de fond que l'ensemble des stations.

Comme pour les gammes de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, il est, ici, **difficile de dresser une tendance de l'évolution des jours où les concentrations sont supérieures au niveau de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ depuis 2001**. C'est aussi quelque chose qui a été observé par le LCSQA avec l'étude des données journalières (Salomon, 2020).



En effet, des variations importantes sont observées d'une année sur l'autre. Des nombres de jours de dépassement nettement supérieurs ou inférieurs à la moyenne et à la médiane sont observés aussi bien sur les stations de fond que sur l'ensemble des stations révélant des épisodes de brume de sable plus ou moins nombreux et intenses et des émissions anthropiques plus ou moins importantes.

VII.4.2 Analyse mensuelle par gamme de concentrations

Il apparaît nécessaire, dans le cadre de l'analyse du nombre de jours de dépassement des niveaux de concentrations étudiées, de descendre à **l'échelle mensuelle**, permettant d'étudier la récurrence potentielle des augmentations de concentrations de particules PM10 et de vérifier si un « **profil d'année type** » se dégage de l'analyse.

Cette évaluation permet de visualiser une potentielle tendance du comportement de chaque mois depuis 20 ans pour chaque niveau considéré.

VII.4.2.a Concentrations entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

La Figure 25 montre **l'évolution mensuelle moyenne du nombre de jours où la concentration journalière est comprise entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** de 2001 à 2019 pour les stations de fond et pour l'ensemble des stations.

- Aussi bien pour les stations de fond que pour l'ensemble des stations, le mois présentant le plus de jours où la concentration est comprise entre 30,5 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ est le mois de **juillet**.

Par ailleurs, **du mois de mai au mois d'août**, il peut être observé un nombre de jours **supérieur à la moyenne**, que ce soit au niveau des stations de fond ou de l'ensemble des stations. Cela souligne le rôle des **épisodes de brume de sable**, même légère, dans les concentrations comprises entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ces épisodes se produisant principalement durant cette période.

- Comme vu précédemment, les nombres de jours de dépassements de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sont toujours **supérieurs au niveau de l'ensemble des stations qu'au niveau des stations de fond**, rappelant **l'influence du trafic** dans les dépassements. Cette différence du nombre de jours avec une concentration entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre les stations de fond et l'ensemble des stations est, cependant, assez faible durant les mois de mai à juillet, période où les épisodes de brume de sable sont les plus importants et le trafic automobile moindre.

Ce graphique présente également les écarts types du nombre de jours moyen avec des concentrations entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mesuré chaque mois de l'année, illustrant ainsi la **disparité du nombre de jours enregistrant ces concentrations d'une année sur l'autre**. Ainsi, les mois qui enregistrent un écart-type important vont montrer une grande disparité du nombre de jours d'une année sur l'autre. Au contraire, les mois qui enregistrent un faible écart-

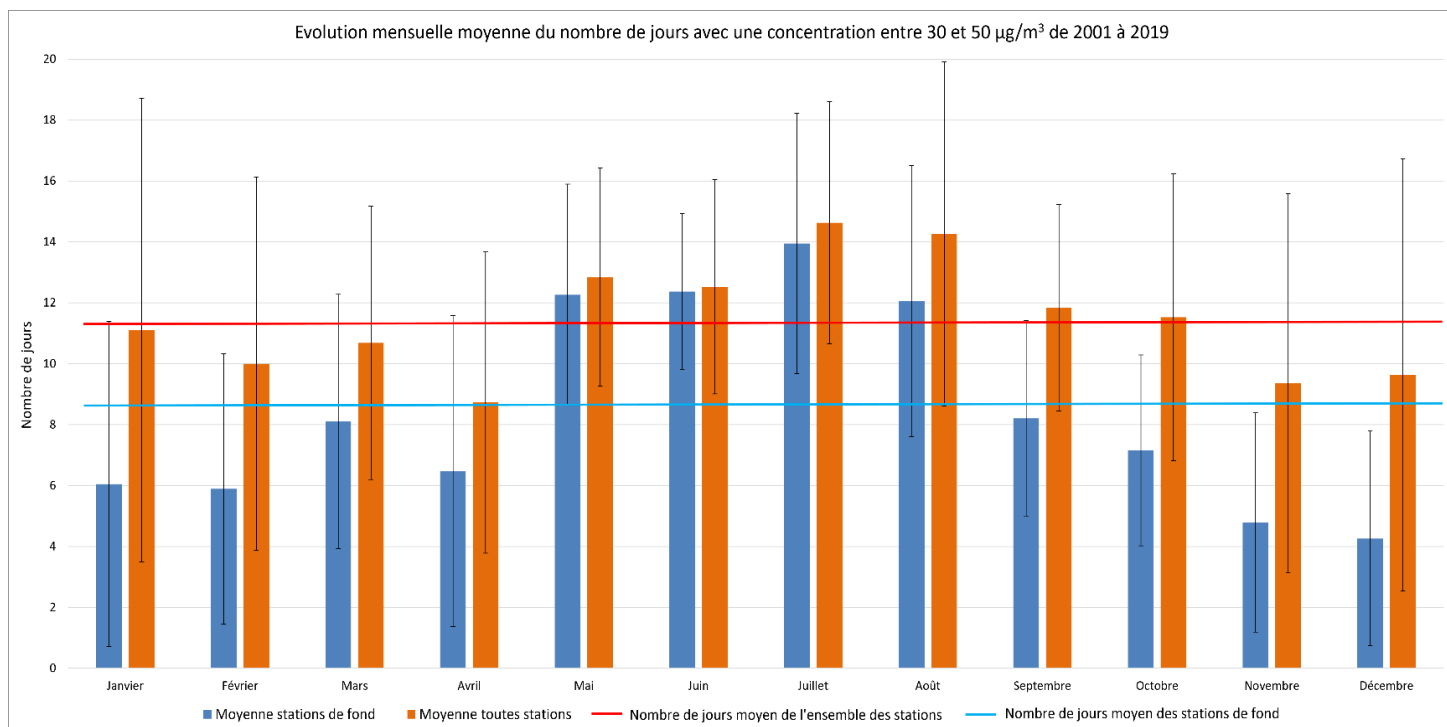


Figure 25 : Evolution mensuelle moyenne du nombre de jours dans la gamme de concentration entre 30 et 50 µg/m³ de 2001 à 2019. Les barres verticales représentent les écarts types pour chaque mois.

type, vont présenter un nombre de jours de jours d’une année sur l’autre relativement équivalent.

- Concernant les stations de fond, on enregistre des écarts types relativement élevés pour les mois de janvier à avril, et en juillet et en août. En effet, un nombre de jours où la concentration est comprise entre 30,5 et 50 µg/m³ particulièrement élevé est obtenu en 2009 et en 2011 : par exemple 18 et 19 jours en janvier et février 2011, 22 jours en avril 2011 et 24 jours en août 2009 ; lorsque les moyennes sont autour de 6 jours pour les mois de janvier à avril et de 13 jours en juillet et en août.
- Au niveau de l’ensemble des stations, un nombre de jours important est également retrouvé en 2009 et en 2011 augmentant l’écart type des mois déjà concernés au niveau des stations de fond. Néanmoins, ce sont

les mois de janvier, février, novembre et décembre qui présentent les écarts types les plus élevés (nombre de jours de concentration entre 30 et 50 µg/m³ importants en novembre et décembre 2015 et 2016 et en février 2015 ainsi qu’en janvier 2017 et 2018). Les mois de novembre à février représentent **les mois de la plus forte affluence de trafic automobile**, ainsi, l’écart-type important sur ces stations illustre **l’influence importante des pics du trafic automobile** variant d’une année sur l’autre.

Au vu de certains des écarts types calculés assez importants, il a semblé pertinent d’étudier l’évolution mensuelle du nombre de jours de dépassement pour chaque année de mesure. La Figure 26 présente donc sous forme d’histogramme le nombre de jours

annuel où la concentration est comprise entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau des stations de fond tel que présenté dans la partie VII.4.1; au sein de ces histogrammes, un découpage est effectué afin de pouvoir visualiser **le nombre de jours mesuré pour chaque mois**.

- De manière général, le nombre de jours où la concentration est comprise entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ observé chaque mois **ne varie pas énormément d'une année sur l'autre**.
- Des variations importantes peuvent, tout de même, être observées d'une année sur l'autre spécifiquement en 2009 et en 2011. Un nombre de jours plus élevé qu'en 2008 est, en effet, mesuré en 2009 durant les mois de janvier, mars, avril, mai et août avec un nombre relativement élevé en janvier et en août. En 2011, cette augmentation s'observe tous les

premiers mois de l'année jusqu'au mois d'août inclus et les nombres de jours sont particulièrement élevés entre janvier et avril ainsi qu'en juillet.

Ces nombres de jours de concentration entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ relativement importants (jusqu'à 24 jours en août 2009, soit le maximum mensuel observé pour l'ensemble des années d'étude) pourraient être lié au **phénomène El Niño**.

El Niño désigne à l'origine un courant côtier saisonnier chaud au large du Pérou et de l'Equateur. Le terme fait maintenant référence par extension au **phénomène climatique particulier**, différent du climat usuel, qui se caractérise par des températures anormalement élevées de l'eau dans la partie est de l'Océan Pacifique Sud. Une corrélation entre ce phénomène et des changements climatiques planétaires à court terme a été démontrée telle que la

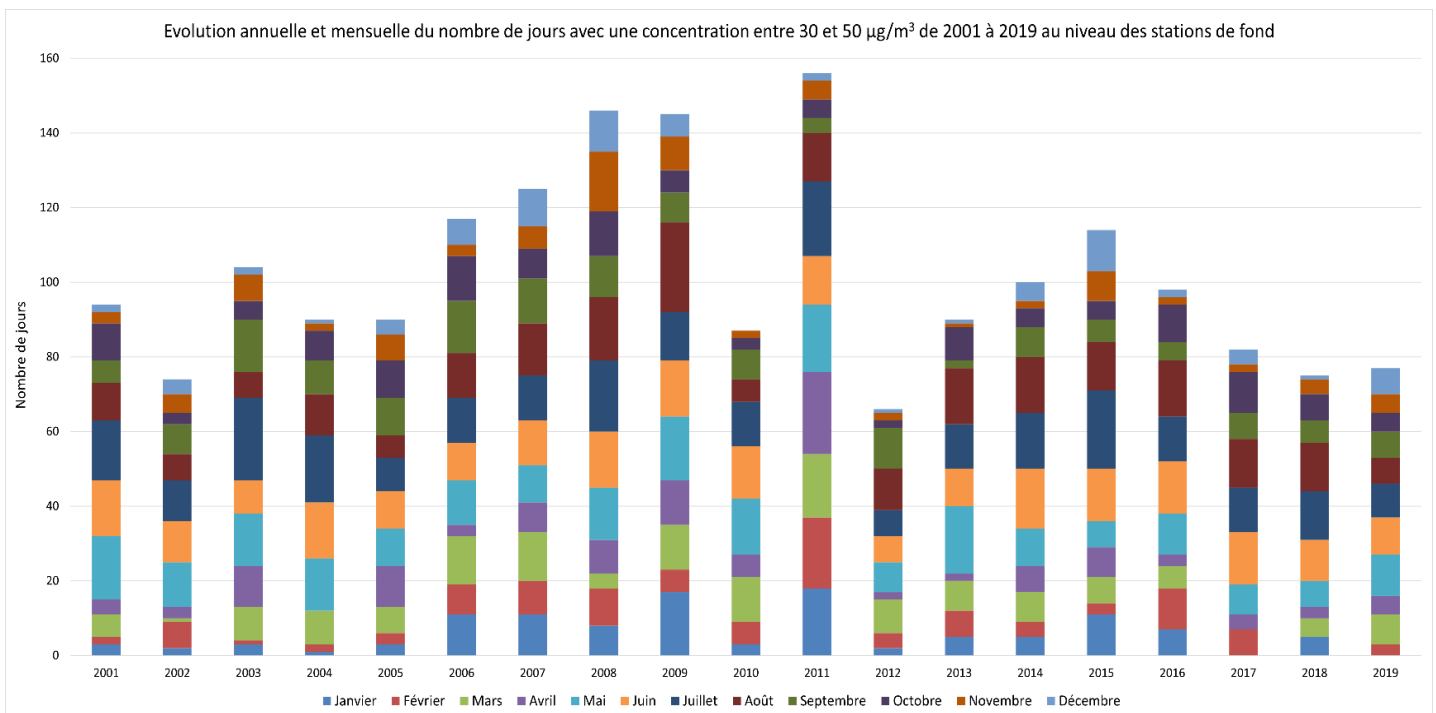



Figure 26 : Evolution annuelle et mensuelle du nombre de jours dans la gamme de concentration entre 30 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de 2001 à 2019 au niveau des stations de fond.



mise en suspension dans l'atmosphère de particules désertiques du Sahara (PROSPERO et al., 2006 ; AMATO et al., 2016).

Des évènements « El Niño » ont été enregistrés en 2006-2007 et en 2009-2010 ce qui pourrait, en partie, expliquer l'augmentation du nombre de jours de dépassement de la concentration de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2009 et en 2011. En effet, des **conséquences de El Niño** peuvent se produire au niveau de l'Océan Atlantique un à deux ans après la fin du phénomène El Niño dans l'Océan Pacifique.

Par ailleurs, l'augmentation du nombre de jours de concentrations entre 30 et $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2009 et en 2011 s'observe notamment durant les mois où la Martinique est **sujet à des épisodes de brume de sable**. Néanmoins, il reste difficile de quantifier clairement l'impact de El Niño sur la mise en suspension de particules désertiques dans l'atmosphère : cela reste donc au **stade de l'hypothèse**. Cette hypothèse pourra se consolider si la même observation est faite à la suite de futurs phénomènes El Niño.

VII.4.2.b Concentrations entre 50 et $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Le nombre de jours mensuel moyen de dépassement du niveau de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur les stations de fond et de l'ensemble des stations de 2001 à 2019 est présenté en Figure 27.

- Le nombre de jours de dépassement maximal est observé en **juin** aussi bien pour les stations de fond que pour l'ensemble des stations.
- Par ailleurs, un nombre de jours de dépassement **supérieur à la moyenne** est observé pour toutes

les typologies de stations **du mois de mai au mois de septembre**. Comme pour les jours où la concentration est comprise entre 30 et $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, cela souligne la **contribution des épisodes de brume de sable** dans les dépassements, les épisodes de brume ayant lieu à cette période.

- A noter que le mois de septembre fait partie des mois dont le nombre de jours de dépassement est supérieur à la moyenne alors qu'il n'était pas concerné dans la gamme de 30 à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cela laisse supposer que les mois de septembre sont plus **sujets à des épisodes de brume de sable modéré que léger**.
- Comme pour les dépassements de la concentration de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, les stations de fond présentent un **nombre de jours de dépassement plus faible que l'ensemble des stations**, laissant apercevoir l'influence des stations trafic dans les dépassements du niveau de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Néanmoins, la répartition des jours de dépassement au cours des mois de l'année se fait en suivant une distribution de forme gaussienne : les mois **de mai à août rassemblent 63 et 65% du nombre moyen de jours de dépassement dans une année** des stations de fond et de l'ensemble des stations respectivement. Ces mois correspondant à la période où les épisodes de brume de sable sont les plus fréquents, ce graphique indique que les dépassements du niveau de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seuil d'information et de

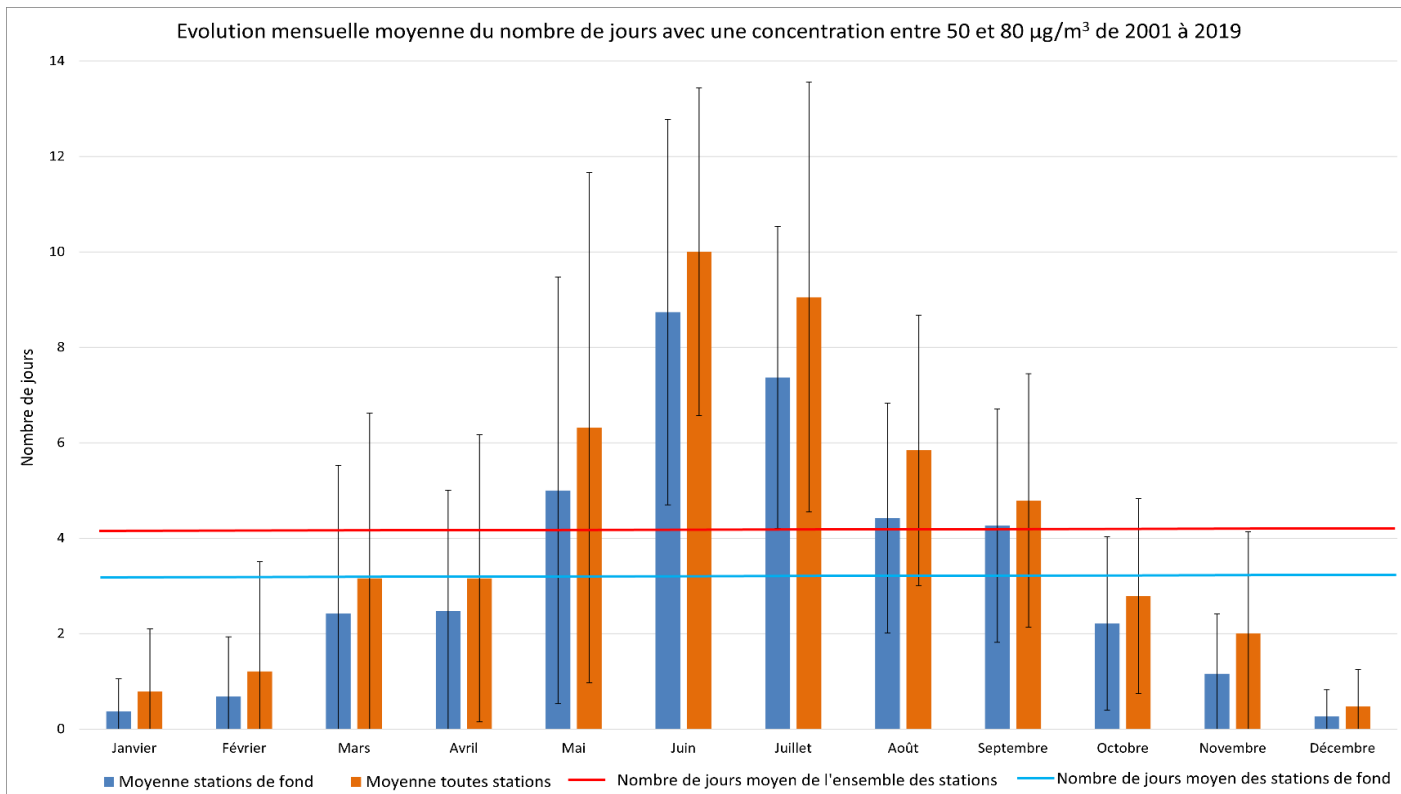


Figure 27 : Evolution mensuelle moyenne du nombre de jours dans la gamme de concentration entre 50 et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les barres verticales représentent les écarts types pour chaque mois.

recommandations, peuvent souvent être **associés à des épisodes de particules désertiques**.

- Pour finir, les **écarts types sont globalement moins dispersés** que pour les dépassements de la concentration de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En effet, les écarts types les plus élevés sont mesurés sur les mois de mai, juin et juillet aussi bien pour les stations de fond que pour l'ensemble des stations. Ces valeurs sont mesurées sur les mois où des épisodes de brume de sable ont lieu, cela laisse supposer que cette grande variabilité est **due à la présence ou non de brume de sable**.

En étudiant l'évolution mensuelle des jours de dépassement de 2009 et 2011 (Figure 28), années pour lesquelles des variations

importantes du nombre de jours de dépassement étaient observées par rapport aux années précédentes pour les concentrations supérieures à 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, il est visible que le nombre de jours de dépassement augmente au niveau des mois de mai, juillet et septembre en 2009 et de mai et septembre en 2011. Cette information vient consolider l'hypothèse de **l'influence possible de El Niño** puisque l'augmentation a lieu essentiellement sur les mois sujets à des épisodes de brume de sable.

Par ailleurs, c'est en 2012 et en 2015 que sont observés les maximums de jours de dépassement du niveau de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La Figure 28 permet d'identifier que le nombre de jours de dépassement a augmenté en 2012 durant les mois de mars, juillet, août et septembre et en 2015 durant les mois de mars, mai, août et septembre.

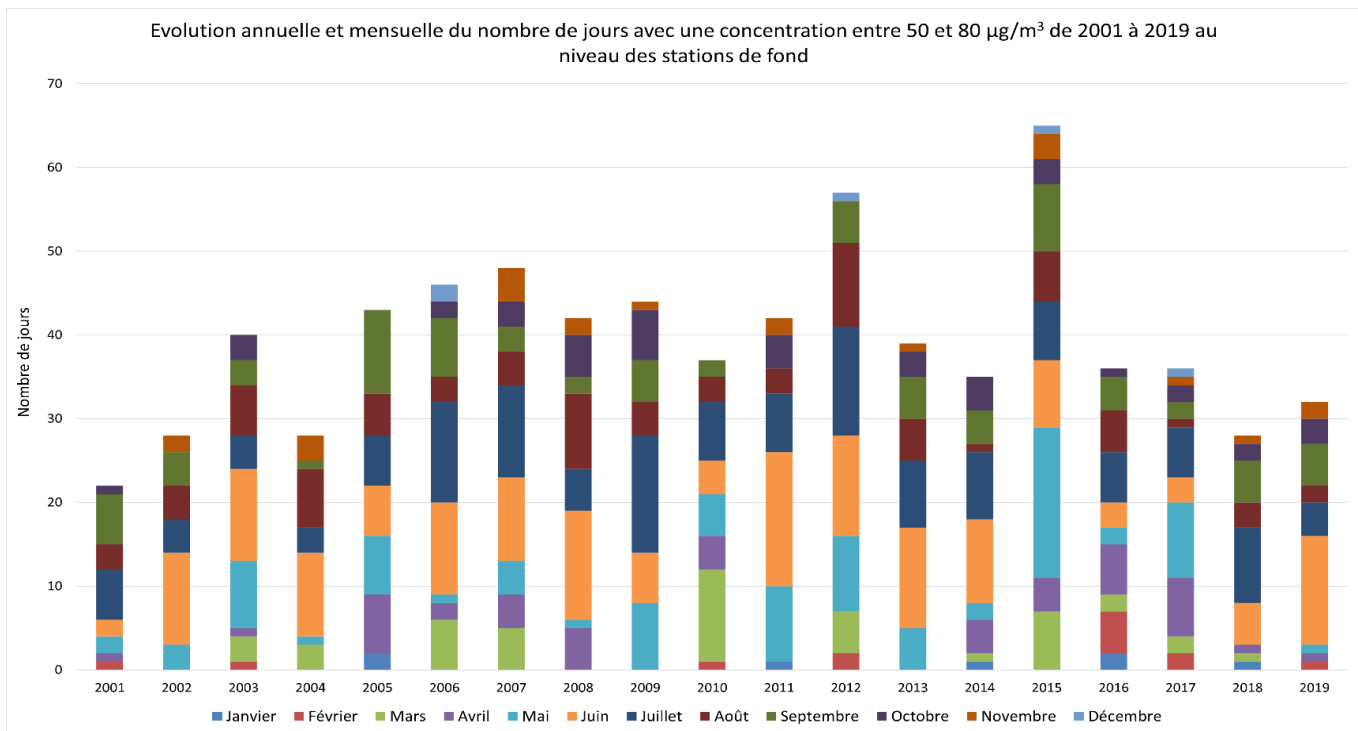


Figure 28 : Evolution annuelle et mensuelle du nombre de jours dans la gamme de concentration entre 50 et 80 µg/m³ de 2001 à 2019 au niveau des stations de fond.

La Figure 28 met en évidence que **l'influence du trafic** jouait un rôle relativement important ces deux années-là. Néanmoins, il est également possible que les El Niño de 2009-2010 et de 2014-2016 aient contribué à la mise en suspension et au transport des particules désertiques depuis l'Afrique de l'Ouest et, par extension, à l'augmentation du nombre de jours de dépassement durant les mois estivaux des années 2012 et 2015.

VII.4.2.c Concentrations supérieures à 80 µg/m³

Le nombre de jours mensuel moyen de dépassement du niveau de 80 µg/m³ sur les stations de fond et sur l'ensemble des stations de 2001 à 2019 est présenté en Figure 29.

- Le nombre de jours de dépassement du seuil d'alerte maximal est

observé, aussi bien pour les stations de fond que pour l'ensemble des stations, durant le mois de **juin**, tel que cela était observé pour les dépassements du niveau de 50 µg/m³.

- De même que pour les dépassements du niveau de 50 µg/m³, le nombre de jours de dépassement, au niveau des stations de fond mais aussi de l'ensemble des stations, est **supérieur à la moyenne de mai à septembre**. Une différence est, toutefois, à noter : le mois de mars présente également un nombre

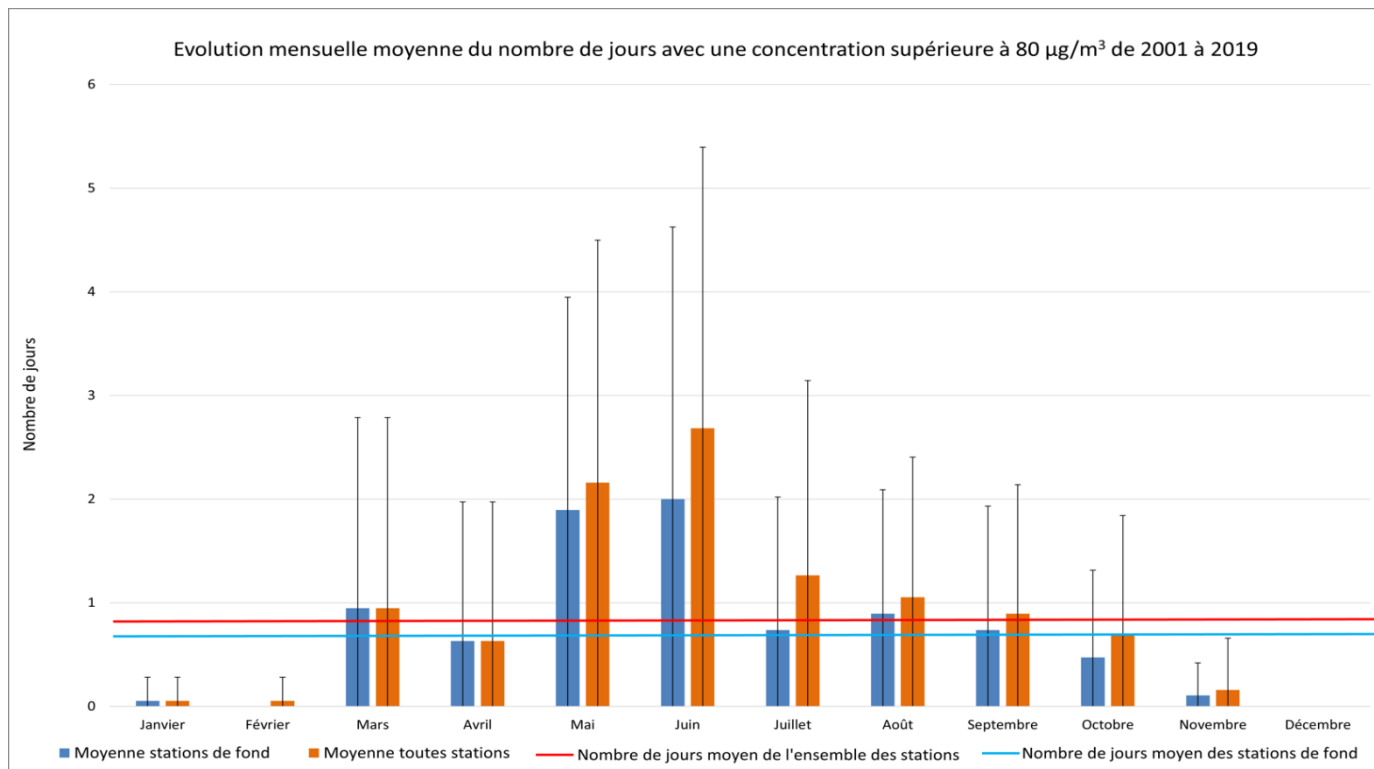


Figure 29 : Evolution mensuelle moyenne du nombre de jours dans la gamme de concentrations supérieures à $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les barres verticales représentent les écarts types pour chaque mois.

de jours de dépassement supérieur à la moyenne.

- Aucun jour de dépassement du seuil d’alerte n’est recensé en décembre, ni en février au niveau des stations de fond.
- A part en mars et en avril durant lesquels le nombre de jours de dépassement est identique au niveau des stations de fond et de l’ensemble des stations, tous les autres mois présentent un nombre de jours de dépassement plus important sur l’ensemble des stations rappelant la **contribution des émissions du trafic** sur les dépassements du niveau de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Les stations à influence trafic n’influencent pas sur le nombre de jours de dépassement en mars et en avril. Il est donc possible que ces dépassements du niveau de 80

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ soient liés **au début de la période des brumes de sable**, mais que ces épisodes ne soient que des épisodes de brume dense, puisqu’il n’est pas observé la même chose pour les dépassements du niveau de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Comme attendu, les écarts types les plus importants sont observés durant les mois de mai et juin puisqu’une grande partie des autres mois de l’année ne présente que peu ou pas de jours de dépassement. C’est **durant les mois d’avril à septembre qu’est observé la plus grande variabilité** dans le nombre de jours de dépassement du seuil d’alerte.

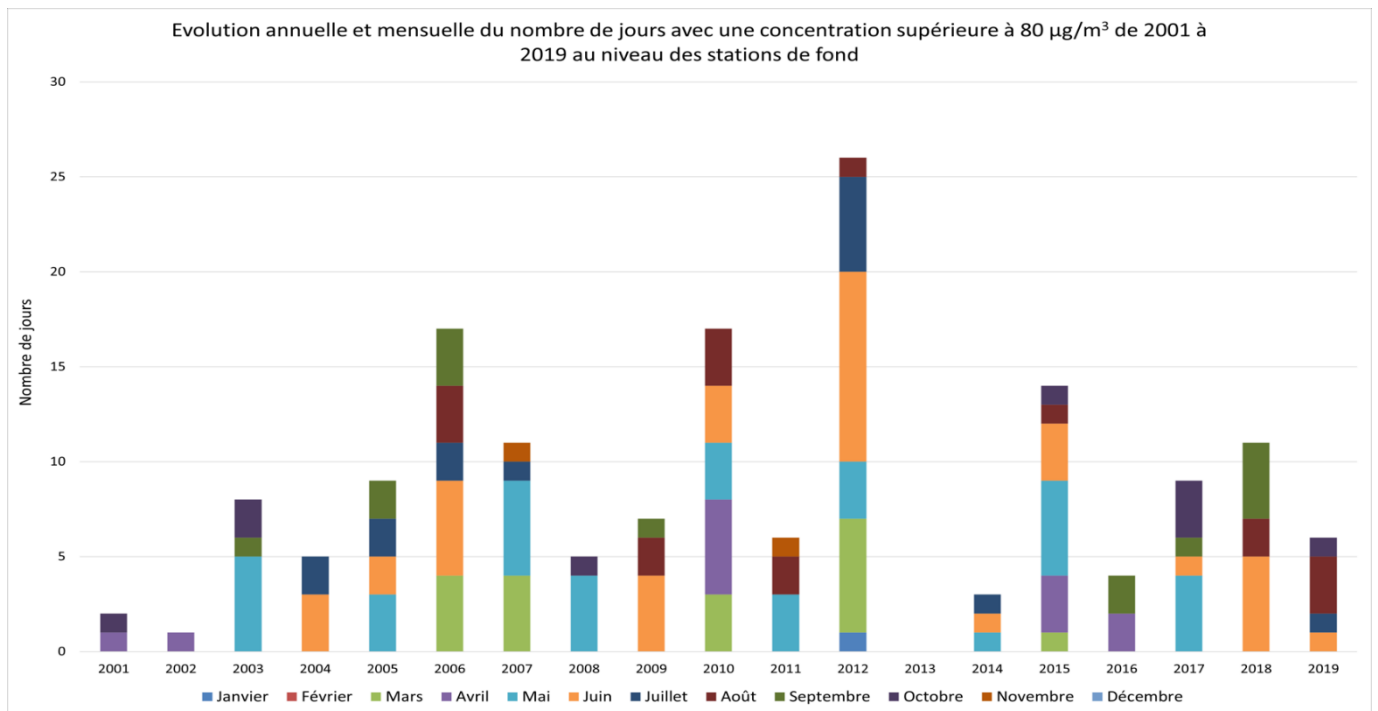


Figure 30 : Evolution annuelle et mensuelle du nombre de jours dans la gamme de concentrations supérieures à 80 µg/m³ de 2001 à 2019 au niveau des stations de fond.

L'influence de El Niño sur une éventuelle augmentation de l'intensité des brumes de sable en 2009 et en 2011 est difficile à distinguer au vu de l'évolution des mois durant lesquels se produisent les dépassements du niveau de 80 µg/m³ (Figure 30). En effet, en 2009, les dépassements ont eu lieu en juin, août et septembre, mois durant lesquels des épisodes de brume de sable ont lieu. Cependant, l'année précédente, en 2008, les dépassements avaient été enregistrés en mai et en octobre, période durant laquelle il peut également se produire des épisodes de brume de sable. Le même phénomène s'observe entre 2011 et 2012 ne permettant pas de mettre en avant l'influence de El Niño.

L'interprétation est, en effet, plus complexe au niveau des dépassements du niveau de 80 µg/m³ puisque ces derniers ne se produisent pas durant tous les mois de l'année. C'est durant le mois de **juin** que l'on retrouve le

plus fréquemment des dépassements (11 années sur 19), en cohérence avec le « pic » de la période de brume de sable.

VII.4.3 Exemple d'épisodes particuliers liés à la présence de brume de sable

Lors de l'étude de l'évolution des concentrations moyennes pluriannuelles présentée dans la partie VII.2, certains cas d'années particulières ont été évoqués tel que la diminution de la concentration moyenne annuelle des stations de fond sur une année du fait d'une baisse des concentrations moyennes annuelles sur l'ensemble des stations de fond. L'hypothèse évoquée était que ces années-là pouvaient avoir été sujettes à une **moins grande concentration de particules désertiques que les autres années.**

- En 2004, la concentration moyenne annuelle est plus basse qu'en 2003 du fait d'une baisse des concentrations moyennes annuelles au niveau de l'ensemble des stations de fond. L'étude réalisée dans la partie VII.4.1 montre, en effet, un **nombre de jours de dépassement, de tous les niveaux étudiés, plus faible qu'en 2003**. Une part des concentrations supérieures à $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ semble associée à l'influence du trafic aussi bien en 2003 qu'en 2004. Cependant, les **nombre de jours de dépassement de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ne sont pas associés au trafic ni en 2003, ni en 2004**. Pour expliquer cette diminution en 2004, il pourrait donc être fait l'hypothèse qu'il y a eu moins fréquemment des épisodes de brume de sable modéré et/ou dense.
- En 2008, l'ensemble des stations de fond voient leurs concentrations moyennes annuelles diminuer par rapport à 2007. Tandis que le nombre de jours avec des concentrations supérieures à $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ augmente en 2008 par rapport à 2007, les **nombre de jours de dépassement des deux niveaux de 50 et $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ diminuent en 2008**. Par ailleurs, des concentrations particulièrement élevées ont été mesurées durant les périodes du 17 mars 2007 et du 15 au 17 mai 2007, mois pour lesquels il était observé des pics. Ces concentrations élevées concernent l'ensemble des stations et le modèle NAAPS semble confirmer que ces concentrations élevées sont **liées à l'arrivée de particules désertiques**

comme l'illustre en exemple la Figure 31. Cet exemple et la comparaison avec les images du modèle NAAPS confirment que des pics dans les concentrations moyennes mensuelles peuvent s'expliquer par des épisodes de brume de sable.

NAAPS Dust Optical Depth for 12:00Z 17 May 2007
Contoured at 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 etc.

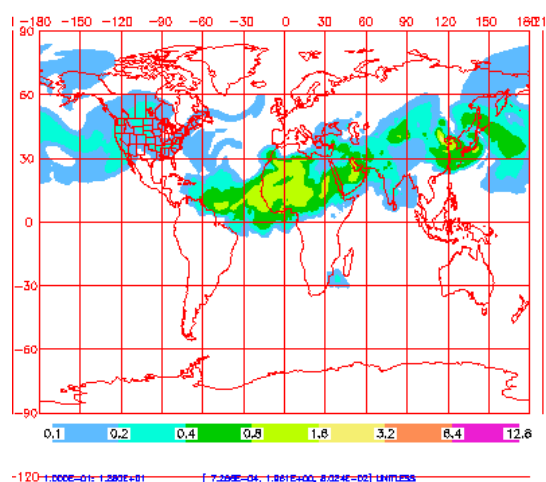


Figure 31 : Epaisseur optique d'aérosols désertiques issue du modèle NAAPS pour le 17 mai 2007, midi.

- En 2015, la **concentration moyenne annuelle de l'ensemble des stations est la plus élevée jamais mesurée** et le nombre de jours de dépassement de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est maximal. Il est possible que l'augmentation de la concentration moyenne annuelle en 2015 soit associée, en partie, à une plus grande occurrence d'épisodes de particules désertiques. En 2016, en revanche, l'ensemble des concentrations moyennes annuelles diminue. D'autre part, le nombre de jours de dépassement des niveaux de 50 et $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ diminue par rapport à 2015.



VII.4.4 Conclusions

Cette partie a permis d'étudier **l'évolution du nombre de jours de dépassement de 3 gammes de concentrations** en particules fines sur l'ensemble des stations depuis le début des mesures en 2001:

- 30 à 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,
- 50 à 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,
- supérieures à 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En moyenne, des concentrations supérieures à 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (y compris supérieures à 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sont mesurées **13% de l'année au niveau des stations de fond et 16% de l'année au niveau de l'ensemble des stations**. Il a été difficile de dresser une tendance globale sur l'évolution depuis 2001 comme cela a également été conclu par le LCSQA (SALOMON, 2020).

Néanmoins, l'étude de l'évolution mensuelle, malgré des écarts types relativement importants, permet d'évaluer que la période où les jours de dépassement sont les plus importants est entre avril et septembre.

Par ailleurs, il a été possible de déterminer **l'influence de la part anthropique**, liée au trafic, dans les nombres de jours de dépassement. Mais durant les mois d'avril à septembre, les jours de dépassement sont majoritairement associés aux épisodes de **brume de sable** comme cela a été montré dans ce rapport et dans celui du LCSQA (SALOMON, 2020). Cependant, une variabilité importante existe d'une année sur l'autre ne permettant pas de faire de ces informations une généralité. Cette variabilité peut certainement être principalement expliquée par la variation dans le nombre et l'intensité d'épisodes de

brume de sable d'une année sur l'autre comme cela a été vu dans la partie VII.2.

VII.5 Durée des épisodes de dépassement du seuil de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM10 de 2001 à 2019

Cette partie s'intéresse au nombre de jours consécutifs pendant lesquels la concentration moyenne journalière sur au moins une station dépasse les seuils réglementaires évoqués dans la partie VII.4. Cette information permet de déterminer et d'étudier l'évolution de la durée de ces épisodes de dépassement depuis 2001. Les graphiques présentés montreront la durée des épisodes dès qu'une concentration moyenne journalière dépasse 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les résultats au niveau des stations de fond puis au niveau des stations à influence trafic seront présentés distinctement.

VII.5.1 Au niveau des stations de fond

VII.5.1.a Evolution de la durée des épisodes de dépassement du seuil de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM10

La Figure 32 présente le nombre d'épisodes de dépassement de la valeur réglementaire de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ selon leur durée au niveau des stations de fond de 2001 à 2019.

Les épisodes d'une durée de 1 jour sont au nombre de 4 à 18 (en 2016) entre 2001 et 2019 et représentent 29 à 69% des épisodes de dépassement totaux. Les épisodes d'une durée de deux jours sont, eux, au nombre de 2 à 10 (en 2015) depuis 2001, soit 15 à 57% des épisodes de l'année.

Les épisodes de 1 et 2 jours expliquent donc 59 à 100% des épisodes de dépassement de chaque année. On observe, en effet, que l'année 2001 est constituée seulement d'épisodes de dépassement de 1 ou 2 jours. Mais en 2004 et 2010, les épisodes de 1 et 2

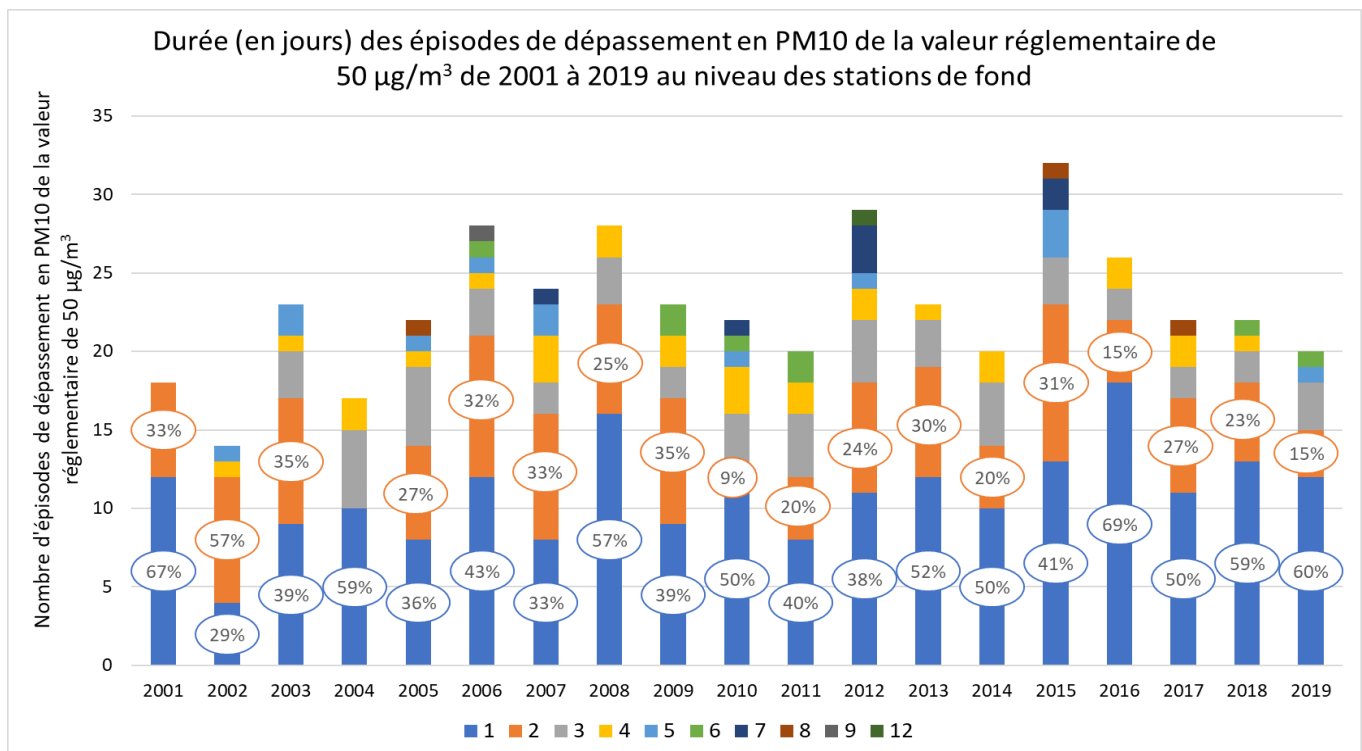


Figure 32 : Durée (en jours) des épisodes de dépassement en PM10 de la valeur réglementaire de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de 2001 à 2019 au niveau des stations de fond. Le nombre d'épisodes de 1 ou 2 jours est aussi indiqué en pourcentage.

jours ne représentent que 59% des épisodes de dépassement totaux. En 2004, 59% des épisodes durent 1 jour et aucun épisode ne dure 2 jours. En revanche, 5 épisodes ont une durée de 3 jours, soit **29% des épisodes**. En 2010, seulement 2 épisodes durent 2 jours, tandis qu'il est enregistré 3 épisodes de 3 jours et 3 épisodes de 4 jours représentant chacun **14% des épisodes de 2010**.

Les épisodes atteignent, **au maximum, une durée de 12 jours**. Seulement, cette durée n'est atteinte qu'en 2012 pour un épisode (sur la période du 11 au 22 juin). Par ailleurs, aucun épisode de 10 ou 11 jours n'a été enregistré depuis 2001 et un seul épisode de 9 jours a été enregistré en 2006 (du 4 au 12 juin).

2015, année où le plus grand nombre d'épisodes est enregistré. Plus de 70% des épisodes de 2015 sont expliqués par des épisodes de 1 ou 2 jours. Cependant, il est également enregistré 3 épisodes de 5 jours, 2 épisodes de 7 jours et 1 épisode de 8 jours.

VII.5.1.b Synthèse de la durée des épisodes de dépassement

Aucune tendance claire sur l'augmentation ou la diminution d'épisodes d'une certaine durée ne peut être faite. La Figure 33 synthétise donc la durée des épisodes de dépassement en PM10 du seuil réglementaire de 50 µg/m³ depuis 2001 au

niveau des stations de fond.

Ce graphique illustre que **les épisodes d'une durée de 1 jour représentent environ 48% des épisodes totaux**, tandis que **les épisodes d'une durée de deux jours représentent 26% des épisodes**, soit un total de 74%. **Des épisodes de 3 et 4 jours représentent respectivement 14 et 6% des épisodes de dépassement** depuis 2001. Pour finir, **8% des épisodes de dépassement de la valeur de 50 µg/m³ sont d'une durée de 5 jours ou plus**.

En outre, il a été noté que, depuis 2001, la grande

majorité des épisodes de dépassement de 5 jours ou plus est liée, **très certainement, à la présence d'une brume de sable** puisque les jours de dépassement concernés ont lieu sur

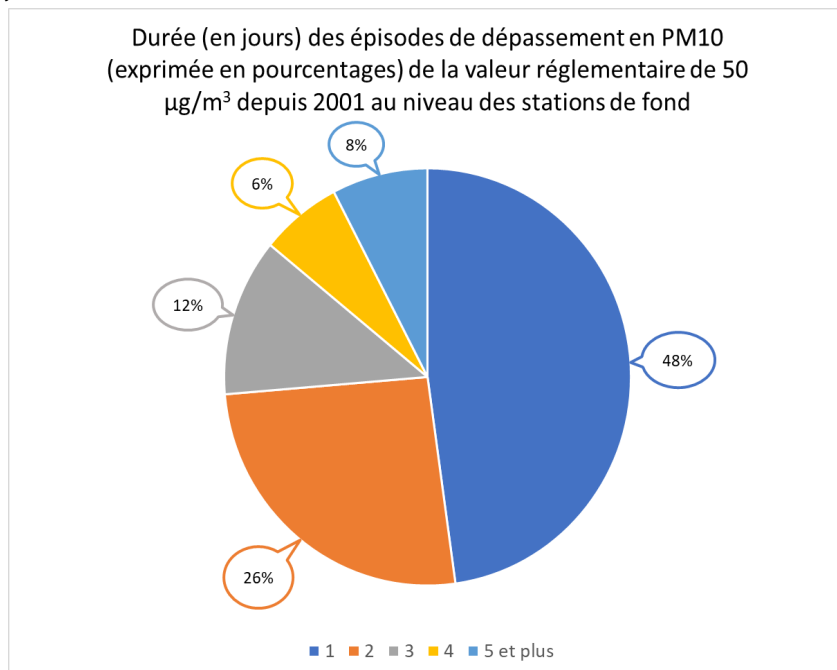


Figure 33 : Durée (en jours) des épisodes de dépassement en PM10 (exprimée en pourcentages) de la valeur réglementaire de 50 µg/m³ depuis 2001 au niveau des stations de fond (n = 433).

En outre, les épisodes de 5, 6 ou 7 jours sont rares : les épisodes de 5 jours et plus peuvent donc être rassemblés, représentant **0 à 19% des épisodes depuis 2001**. Le pourcentage maximal de ces longs épisodes est atteint en

l'ensemble des stations. Très souvent, seule la station de Bishop est en dépassement au début ou à la fin de l'épisode du fait d'une **pollution anthropique** à cette station additionnée à la brume de sable. La station de Bishop est, en effet, une station urbaine à proximité d'une activité trafic modéré (centre urbain). Quelques épisodes de dépassement de 5 jours ou plus sont aussi liés à la contribution d'une pollution anthropique particulière pendant la période des brumes de sable. Par exemple, l'épisode de 7 jours, du 29 mai au 4 juin 2012 qui n'a eu lieu qu'au niveau des stations de Bishop et du Lamentin mais également, l'**épisode unique de 12 jours, du 11 au 22 juin 2012, mesuré à la station de Bishop**. L'épisode du 23 au 27 juin 2015 a eu lieu au niveau de l'ensemble des stations sauf le quatrième jour où seule la station de Bishop est en dépassement. Un épisode de 5 jours, du 28 septembre au 2 octobre 2019, est également enregistré seulement au Lamentin. A l'inverse, l'épisode de 6 jours, du 16 au 21 juin 2019, ne concerne que la station de François Pointe Couchée, station d'observation pour les épisodes de brume de sable. Les autres stations ne sont pas en dépassement pendant toute la période illustrant **l'influence importante des brumes de sable sur la station de François Pointe Couchée**.

Durée	% moyen	Nombre max d'épisodes enregistrés sur une année
1 jour	48 %	18 (2016)
2 jours	26 %	10 (2015)
3 jours	12 %	5 (2004)
4 jours	6 %	3 (2007, 2010)
5 jours et +	8 %	6 (2015)

Tableau 7 : Récapitulatif de la durée des épisodes de dépassement en PM10 depuis 2001 au niveau des stations de fond.

VII.5.2 Au niveau des stations à influence trafic

Remarque: A noter qu'aucune donnée n'est présentée en 2009 car il n'y avait aucune station de proximité automobile, ni en 2019 car la station de Renéville ayant brûlé en avril, seul un jour de dépassement de la valeur de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a été mesuré.

VII.5.2.a Evolution de la durée des épisodes de dépassement du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM10

Comme la Figure 32, la Figure 34 présente le nombre d'épisodes de dépassement de la valeur réglementaire de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ selon leur durée de 2001 à 2019 mais cette fois pour les stations de proximité automobile. De 2001 à 2008, est étudiée la durée des épisodes de dépassement en PM10 au niveau de la station de Dillon puis de 2010 à 2018 au niveau de la station de Renéville et, de 2012 à 2016 de Robert Mansarde. Comme cela a déjà été noté, la station de Dillon présente moins d'épisodes de dépassement que les

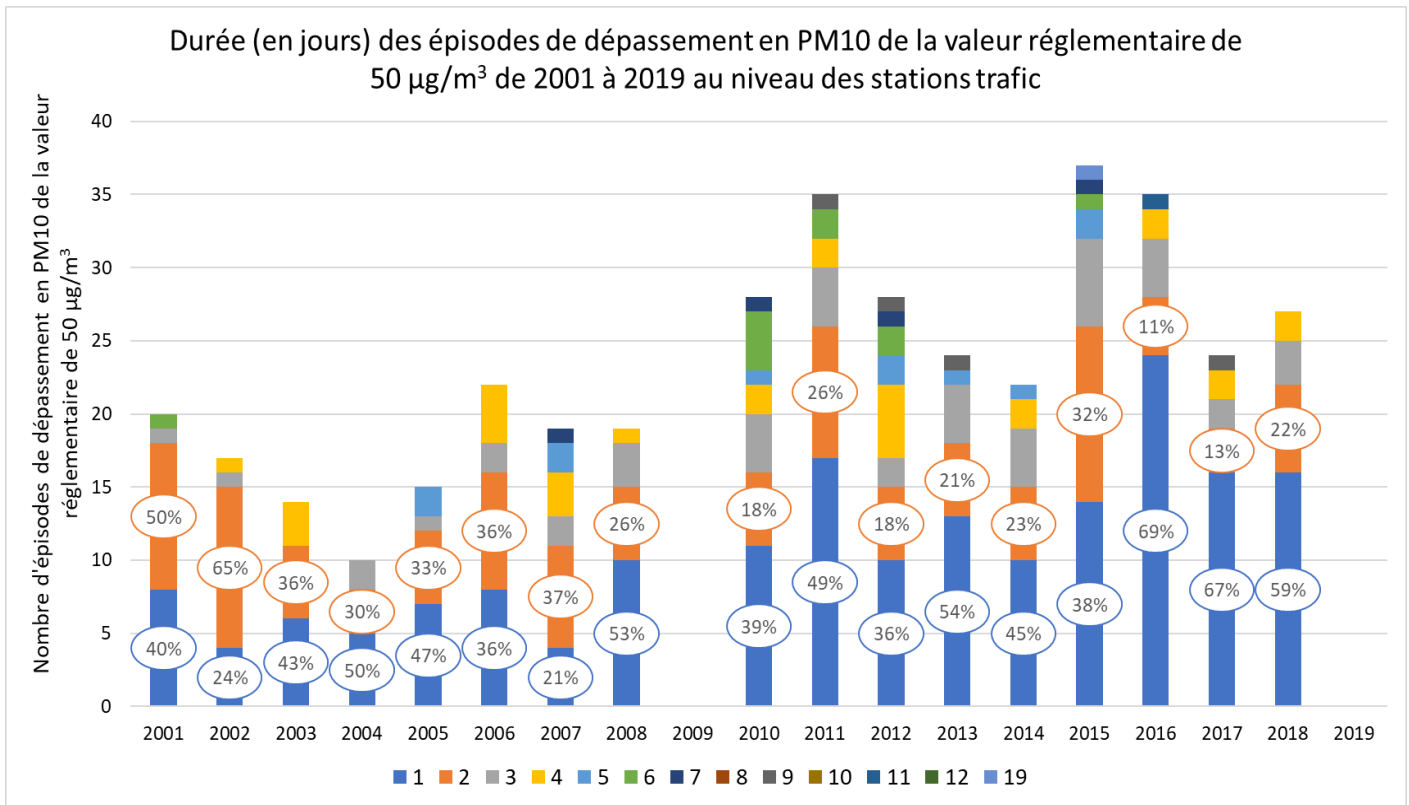


Figure 34 : Durée (en jours) des épisodes de dépassement en PM10 de la valeur réglementaire de 50 µg/m³ de 2001 à 2019 au niveau des stations trafic.

stations de Renéville et de Robert Mansarde. Par ailleurs, les **épisodes de 1 jour sont moins nombreux de 2001 à 2008** au niveau de la station de Dillon (21 à 53% des épisodes de dépassement) qu'entre 2010 et 2018 au niveau des stations de Renéville et de Robert Mansarde (34 à 67%). Au contraire, les épisodes de deux jours sont plus nombreux de 2001 à 2008 (30 à 65%) que de 2010 à 2018 (13 à 31%). Il est, aussi, intéressant de noter, que de 2001 à 2008, à Dillon, la durée des épisodes va de 1 à 5 jours et jusqu'à 6 jours en 2001 et 7 jours en 2007 ; tandis que **de 2010 à 2018, à Renéville et Robert Mansarde, la durée maximum des épisodes est plus importante** : de 4 en 2018 à 11 en 2016 (en mettant de côté l'épisode particulier de 2015). Comme au niveau des stations de fond, c'est en 2016 qu'est enregistré le plus grand

nombre d'épisodes d'un jour (23 épisodes de 1 jour), et en 2001 et en 2013 le plus grand nombre d'épisodes de deux jours (10 épisodes de 2 jours). Les épisodes de dépassement en PM10 de 1 ou 2 jours expliquent donc **55 à 90% de l'ensemble des dépassements**. En 2001, seuls des épisodes de 3 jours expliquent les 5 derniers % de l'ensemble des dépassements. En revanche, en 2012, 7 et 17% des dépassements sont dus à des épisodes de 3 et 4 jours et **les épisodes de 5 jours et plus représentent jusqu'à 21% de l'ensemble des dépassements**. Un épisode particulier, d'une **durée de 19 jours**, a eu lieu en 2015 (du 10 au 30 mai), année où le nombre d'épisodes de dépassement est le plus important. Cet épisode est également retrouvé parmi les stations de fond mais il se décompose en plusieurs périodes puisqu'il

n'y a pas de dépassement le 18 mai ni du 26 au 28 mai.

Une tendance à l'augmentation du nombre d'épisodes de dépassement d'une journée et des épisodes de 5 jours et plus, est observable à partir de 2010. Il faut néanmoins considérer cette augmentation avec précaution. En effet, comme cela a déjà été indiqué, peu de stations de proximité automobile effectuent des mesures de PM10 : celle de Dillon entre 2001 et 2008, celle de Renéville depuis 2010 et celle de Robert Mansarde entre 2012 et 2016. Ces données montrent donc surtout que la station de Renéville enregistre plus d'épisodes de dépassement en PM10 et des épisodes qui peuvent durer plus longtemps qu'au niveau de la station de Dillon.

VII.5.2.b Synthèse de la durée des épisodes de dépassement

Comme la Figure 33, la Figure 35 synthétise la durée des épisodes de dépassement en PM10 du seuil réglementaire de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ depuis 2001 au niveau des stations à influence trafic. Cette figure illustre une répartition de la durée des épisodes de dépassement similaire à celle des stations de fond : presque la moitié des épisodes a une durée de 1 jour (46%), un peu plus d'un quart ont une durée de 2 jours (27%), les épisodes de 3 jours

représentent 12% tandis que les épisodes de 4 jours et de 5 jours et plus représentent respectivement 7 et 8% de l'ensemble des épisodes de dépassement.

Néanmoins, il a été observé des différences dans le nombre et la durée des épisodes de dépassement entre 2001 et 2008 à Dillon, et entre 2010 et 2018 à Renéville et à Robert Mansarde. Il semble donc pertinent d'étudier la synthèse de la durée des épisodes de dépassement en PM10 d'une part pour la période de 2001 à 2008, période où les mesures étaient effectuées à Dillon, et, d'autre part, pour la période de 2010 à 2018, période de mesures à Renéville et à Robert Mansarde (Figure 36).

Sur la période de 2001 à 2008, les épisodes de dépassement en PM10 d'une durée d'un jour représentent une part moins importante qu'en considérant l'ensemble de la période (38%). En effet, il a été observé que les épisodes d'un jour étaient moins nombreux que ceux de deux jours à Dillon (le

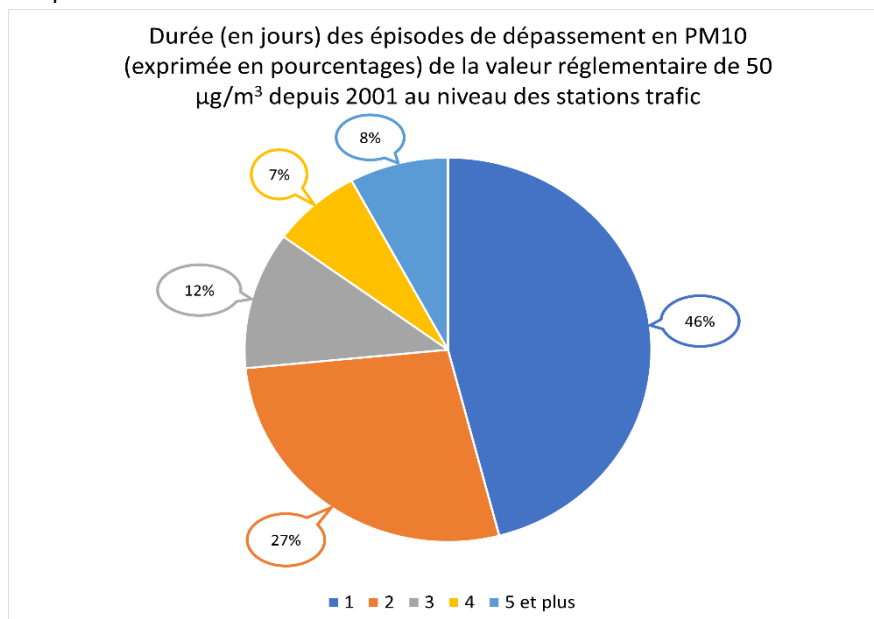


Figure 35 : Durée (en jours) des épisodes de dépassement en PM10 (exprimée en pourcentages) de la valeur réglementaire de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ depuis 2001 au niveau des stations trafic (n = 407).

Durée	Pourcentage moyen % - 2001-2008	Nombre maximal d'épisodes enregistrés sur une année – 2001-2008	Pourcentage moyen % - 2010-2018	Nombre maximal d'épisodes enregistrés sur une année – 2010-2018
1 jour	38 %	10 épisodes en 2008	50 %	23 épisodes en 2016
2 jours	40 %	10 épisodes en 2001	21 %	10 épisodes en 2013
3 jours	9 %	3 épisodes en 2008	13 %	7 épisodes en 2015
4 jours	9 %	4 épisodes en 2006	6 %	5 épisodes en 2012
≥ 5 jours	4 %	3 épisodes en 2007	10 %	6 épisodes en 2010, en 2012 et en 2015

Tableau 8 : Synthèse du nombre maximal d'épisodes sur la période 2001-2008 et sur la période 2010-2018.

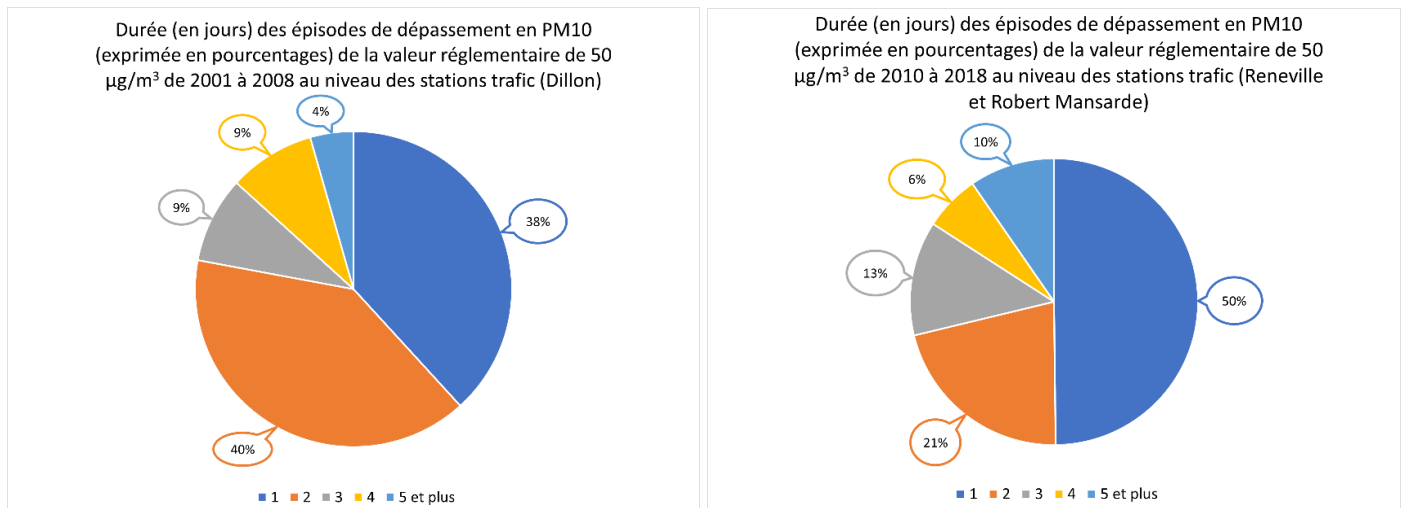



Figure 36 : Durée (en jours) des épisodes de dépassement en PM10 (exprimée en pourcentages) de la valeur réglementaire de 50 µg/m³ de 2001 à 2008 au niveau de la station trafic de Dillon (gauche, n = 136), de 2010 à 2018 au niveau des stations trafic de Renèveille et Robert

pourcentage passe à 40% quand il était de 27% sur l'ensemble de la période).

Au contraire, de 2010 à 2018, les épisodes de 1 jour augmentent et passent à 50%, tandis que les épisodes de deux jours passent à 21%. **Les épisodes de 3 jours sont plus importants sur la période de 2010 à 2018 (13%) que de 2001 à 2008 (9%), et c'est l'inverse pour les épisodes de 4 jours. Il est intéressant de noter que les épisodes de 5 jours et plus sont plus de deux fois plus fréquents sur la période de mesures de**

2010 à 2018 que de 2001 à 2008 (10% de 2010 à 2018, 4% de 2001 à 2008).

Il est donc possible qu'au cours des dernières années, la durée des épisodes de dépassement ait augmenté (épisodes de 5 jours et plus) mais également que le nombre d'épisodes isolés (d'une durée de 1 jour) soit plus important. Cependant, il est nécessaire de se rappeler que les **mesures ont été effectuées sur des stations différentes** au cours des deux périodes (2001-2008 à Dillon, 2012-2016 à Robert Mansarde et



2010-2018 à Renéville), il peut donc être envisagé que ces différences s'expliquent par une influence du trafic plus importante au niveau de la station de Renéville.

Pour finir, à noter que les épisodes de dépassement de 5 jours ou plus observés de 2001 à 2008 ou de 2010 à 2018 sont généralement les mêmes qu'au niveau des stations de fond. Ils peuvent, cependant, **concerner un nombre de jours plus important du fait de leur proximité avec le trafic automobile influençant les dépassements des seuils réglementaires en PM10**. Il est également enregistré des épisodes de dépassement supplémentaires au niveau des stations trafic qui ne sont pas enregistrés au niveau des stations de fond. Ces dépassements sont donc **seulement dus à l'influence du trafic**.

VII.5.3 Conclusions

Cette partie a permis d'investiguer sur la **durée des épisodes de dépassement** de la valeur seuil réglementaire de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM10.

Au niveau des stations de fond, presque 1 épisode sur 2 correspond à un épisode particulaire qualifié d'isolé, c'est-à-dire qui ne dure qu'un jour. Environ 1 épisode sur 4 est associé à un épisode d'une durée de deux jours. Le dernier quart des épisodes recensés au niveau des stations de fond concerne des épisodes de 3, 4 ou 5 jours et plus ; les épisodes de **5 jours et plus** représentant, tout de même, **8% de l'ensemble des épisodes**, et sont associés généralement à la **présence de brumes de sable**.

En ce qui concerne les stations à influence trafic, la **répartition** des jours de dépassement est **relativement similaire** que celle observée au niveau des stations de fond. Il est tout de même observé un pourcentage d'épisodes de 2 et 4 jours légèrement plus élevé au niveau des stations à influence trafic qu'au niveau des stations de fond révélant **l'influence trafic** sur les épisodes de dépassement.

Cependant, les périodes de 2001 à 2008 (Dillon seule station trafic) et de 2010 à 2018 (stations trafic de Renéville et de Robert Mansarde) présentant des différences importantes, les durées de leurs épisodes de dépassement ont été étudiées indépendamment. Cela a permis de mettre en évidence que, durant la période où la station de Dillon était la station trafic, les épisodes de 1 jour étaient moins fréquents que les épisodes de 2 jours, contrairement à la période où les stations de Renéville et de Robert Mansarde représentent les stations trafic. De 2001 à 2008, le pourcentage d'épisodes de 2 et 4 jours est plus important au niveau de la station à influence trafic qu'au niveau des stations de fond. De 2010 à 2018, les stations à influence trafic présentent un pourcentage d'épisodes de 1, 3 et 5 jours plus important qu'au niveau des stations de fond. Ces valeurs mettent en avant l'influence du trafic dans la durée des épisodes.

Par ailleurs, à travers cette étude, il a pu être illustré que les **longs épisodes** (5 jours et plus) étaient bien **plus fréquents sur la période d'étude de 2010 à 2018** que de 2001 à 2008 (le pourcentage d'épisodes de 5 jours et plus à Dillon, de 2001 à 2008, est même plus faible qu'au niveau des stations de fond).

VII.6 Analyse spécifique des épisodes de dépassement du seuil de 50 µg/m³ en PM10

La partie VII.5 a permis d'étudier la durée des épisodes de dépassement des seuils réglementaires en PM10 (définis dans les parties VI.1 et VII.4). Cette partie va maintenant se focaliser sur la **gamme de concentrations mesurées lors de ces épisodes de dépassement en PM10**. Les gammes de concentrations sélectionnées pour cette étude ont été choisies en se référant aux **seuils réglementaires existants** définis selon la directive européenne 2008/50/CE, ainsi que dans l'arrêté 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant.

Les seuils réglementaires en concentration journalière PM10 se situant à 50 et 80 µg/m³, il a été décidé de considérer, de façon distincte, les **concentrations supérieures à 50 µg/m³** de celles **supérieures à 80 µg/m³**.

Pour plus de précision, les concentrations entre 50 et 80 µg/m³ ont été séparées en deux gammes :

- Entre 50 et 60 µg/m³, présentant des concentrations légèrement supérieures au seuil d'information et de recommandation
- Entre 60 et 80 µg/m³.

Concernant les concentrations supérieures à 80 µg/m³, il a été choisi de créer des gammes suivant celles définies pour l'**indice ATMO** depuis le 1^{er} janvier 2021 selon l'arrêté du 10 juillet 2020 relatif à l'indice de la qualité de l'air ambiant. Ces gammes sont présentées dans le Tableau 9.

Les concentrations supérieures à 80 µg/m³ ont donc été découpées selon les gammes suivantes :

- Entre 80 et 100 µg/m³
- Entre 100 et 150 µg/m³
- Supérieures à 150 µg/m³

		BON	MOYEN	DÉGRADÉ	MAUVAIS	TRÈS MAUVAIS	EXTRÊMEMENT MAUVAIS
Moyenne journalière	PM2,5	0-10	10-20	20-25	25-50	50-75	> 75
Moyenne journalière	PM10	0-20	20-40	40-50	50-100	100-150	> 150
Max horaire journalier	NO ₂	0-40	40-90	90-120	120-230	230-340	> 340
Max horaire journalier	O ₃	0-50	50-100	100-130	130-240	240-380	> 380
Max horaire journalier	SO ₂	0-100	100-200	200-350	350-500	500-750	> 750

*Concentrations µg/m³

Tableau 9 : Tableau des seuils et qualificatifs du nouvel indice et des seuils de déclenchement d'un dispositif préfectoral (© Atmo Auvergne-Rhône-Alpes).

En résumé, dans la suite de cette partie, les dépassements de la concentration de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM10 seront étudiés selon les gammes de concentration suivantes :

Gammes de concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	≥ 50 et < 80		≥ 80		
	50 – 60	60 – 80	80 – 100	100 – 150	>150

Tableau 10 : Gammes de concentrations en PM10 utilisées pour étudier les dépassements du seuil réglementaire de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

VII.6.1 Au niveau des stations de fond

Remarque : Dans cette partie, l'année 2020 est également traitée, compte tenu du caractère exceptionnel de l'épisode de brume de sable mesuré en 2020.

VII.6.1.a Analyse annuelle des jours de dépassement du seuil de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ selon des gammes de concentrations définies

La Figure 37 illustre l'évolution annuelle du nombre de jours de dépassement du seuil de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau des stations de fond

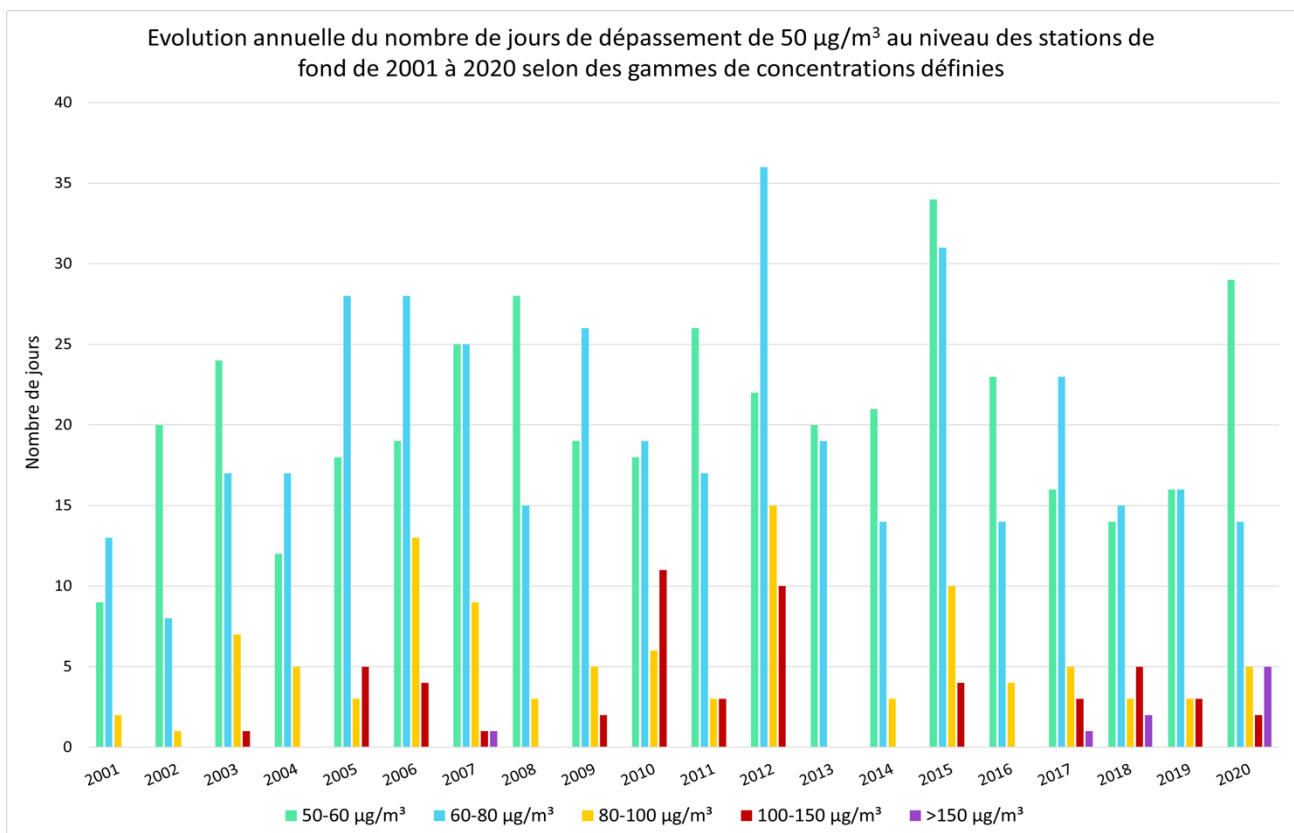


Figure 37 : Evolution annuelle du nombre de jours de dépassement du seuil de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau des stations de fond de 2001 à 2020 selon les gammes de concentrations définies.



depuis 2001 et **selon la gamme de concentrations définies.**

Tout d'abord, il est parfaitement visible que les différentes gammes de concentrations ne suivent **pas la même tendance depuis 2001.** Les jours de dépassement de concentrations entre 50 et 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ varient entre 9 en 2001 et 34 en 2015. Les concentrations entre 60 et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sont mesurées durant un nombre jour similaire : un minimum de 8 jours en 2002 et un maximum de 36 jours en 2012. Des concentrations entre 80 et 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sont moins souvent mesurées que les deux plus basses gammes : entre 0 jour en 2013 et 15 jours en 2012. Par ailleurs, aucun jour de dépassement ne mesure de concentration entre 100 et 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2001, 2002, 2004, 2008, 2013, 2014, et 2016, soit durant 37% des années étudiées. Lorsqu'une concentration est mesurée entre **100 et 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , cela se produit **entre 1 jour** (en 2003 et en 2007) et **11 jours** (en 2010). Pour finir, des concentrations **supérieures à 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** ne sont enregistrées que durant 1 journée **en 2007** puis 1 et 2 journées **en 2017 et 2018.** L'évènement de **juin 2020 amène un nouveau record** avec 5 jours, dont 3 jours consécutifs, de dépassement de concentrations supérieures à 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (sur 12 jours d'épisode).

Les dépassements des deux années présentant le plus de jours de dépassement au niveau des stations de fond (2015 et 2012) sont majoritairement **associés à des concentrations entre 50 et 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** (pour 2015) **et entre 60 et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** (pour 2012). Néanmoins, en 2015, des concentrations entre 80 et 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ont, également, été mesurées 10 jours, soit la 3^{ème} année la plus élevée pour cette gamme de concentrations. **En 2012**, le nombre de jours le plus important (15) est enregistré avec des

concentrations **entre 80 et 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** et les concentrations entre 100 et 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été mesurées le 2^{ème} plus grand nombre de jours de la série (10).

A travers ces chiffres, il apparaît donc que 2012 et 2015 étaient des années exceptionnelles en termes de **nombreux jours de dépassement du seuil de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** mais également sur **le niveau de concentrations élevées.** Le nombre de jours de dépassement pour l'année 2020 n'a pas été traité comme expliqué précédemment, cependant, il est visible à travers cette analyse que cette année a été exceptionnelle également en termes **de nombre de jours de dépassement de la concentration de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.** En effet, cette concentration a été **mesurée 5 jours en 2020** quand elle n'avait été mesurée qu'un ou deux jours en 2007, 2017 et 2018.

VII.6.1.b Synthèse de l'analyse annuelle

La Figure 38 illustre, en pourcentage, les gammes de concentrations lors des jours de dépassement du seuil de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ depuis 2001. Cette figure permet de déterminer que les gammes de concentrations entre 50 et 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 60 et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été obtenues globalement le même nombre de jours depuis 2001 (respectivement 42 et 40% des jours de dépassement depuis 2001). **Plus de 80% des jours de dépassement** présentent donc une concentration **inférieure au seuil d'alerte de 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , dont la moitié seulement dans la gamme de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au-dessus du seuil de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les 18% de jours de dépassement présentant des concentrations supérieures à 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été présentés de manière indépendante dans un deuxième graphique en secteur afin

Gammes de concentrations (en pourcentage) des jours de dépassement de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau des stations de fond depuis 2001 (avec 2020)

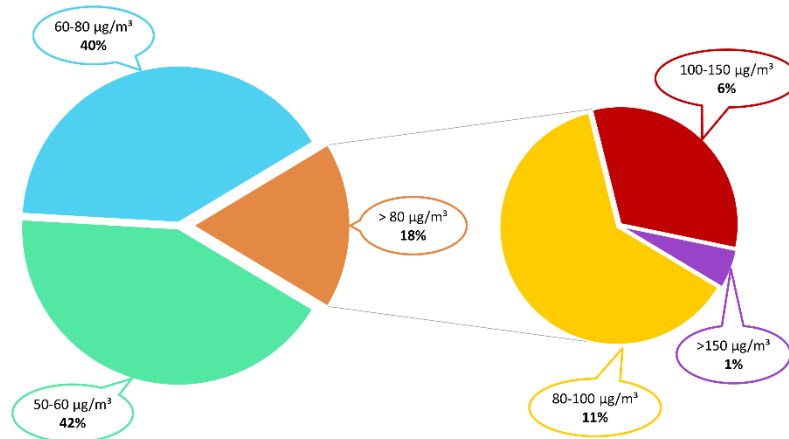


Figure 38 : Gammes de concentrations (en pourcentage) des jours de dépassement du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau des stations de fond depuis 2001 (avec 2020), $n = 976$.

de pouvoir visualiser correctement la répartition des différentes gammes de concentrations sélectionnées. Il apparaît donc que, parmi ces 18% de concentrations supérieures à $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 11% des jours de dépassement présentent une concentration entre 80 et $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Presque deux fois moins de jours de dépassement atteignent une concentration entre 100 et $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (soit 6%) et les dépassements de plus de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ concernent 1% des jours de dépassement. Cependant, au vu de l'importance de l'intensité de l'épisode enregistré en juin 2020, il est pertinent de présenter un graphique similaire en retirant l'année 2020 pour

déterminer l'impact de l'épisode sur l'intégralité des gammes de concentrations (Figure 39). Cette figure illustre qu'en retirant les données de 2020, cela ne change pas la proportion de jours de dépassement de concentrations inférieure à $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En revanche, la répartition des concentrations supérieures à $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est modifiée lorsque les données de 2020 sont retirées. En effet, la proportion de jours de concentrations

supérieures à $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ passe à 0,4% quand elle était de 1% avec 2020.

Cela montre donc l'impact important qu'a pu avoir ce seul épisode de juin 2020 sur les 20 ans de mesure (les concentrations supérieures à $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ n'étant mesurées en

Gammes de concentrations (en pourcentage) des jours de dépassement de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau des stations de fond depuis 2001 (sans 2020)

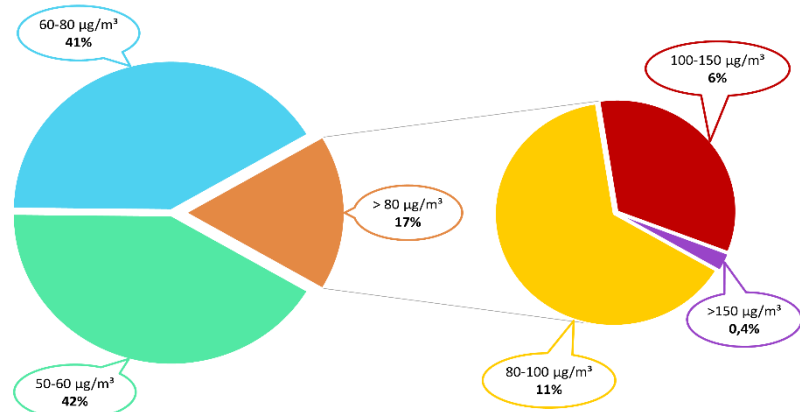


Figure 39 : Gammes de concentrations (en pourcentage) des jours de dépassement du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau des stations de fond depuis 2001 (sans 2020), $n = 921$.

2020 que durant cet épisode de juin). Néanmoins, le caractère unique de **cet épisode exceptionnel** ne permet pas de caractériser une augmentation des concentrations dans les épisodes particuliers.

VII.6.2 Au niveau des stations à influence trafic

A noter qu'aucune donnée n'est présentée en 2009 car il n'y avait aucune station à influence trafic pour la mesure des particules, ni en 2019 et 2020 car la station de Renéville ayant brûlé en avril 2019, seul un jour de dépassement de la valeur seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a été mesuré. Ainsi, la mesure de janvier à avril 2019 n'est pas représentative de l'année 2019 en milieu trafic. La mesure de Renéville ayant repris en janvier 2021, aucune donnée de particules PM10 n'est

disponible pour 2019-2020 sur les stations à influence trafic.

VII.6.2.a Analyse annuelle des jours de dépassement du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ selon des gammes de concentrations définies

Comme la Figure 37, la Figure 40 présente l'évolution annuelle du nombre de **jours de dépassement** du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ depuis 2001 et selon la **gamme de concentrations** mesurées pour ces jours de dépassement, mais cette fois pour les **stations trafic**. Au niveau des stations trafic, les concentrations entre 50 et $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sont mesurées au minimum 6 jours en 2004 et au maximum 46 jours en 2015. Les

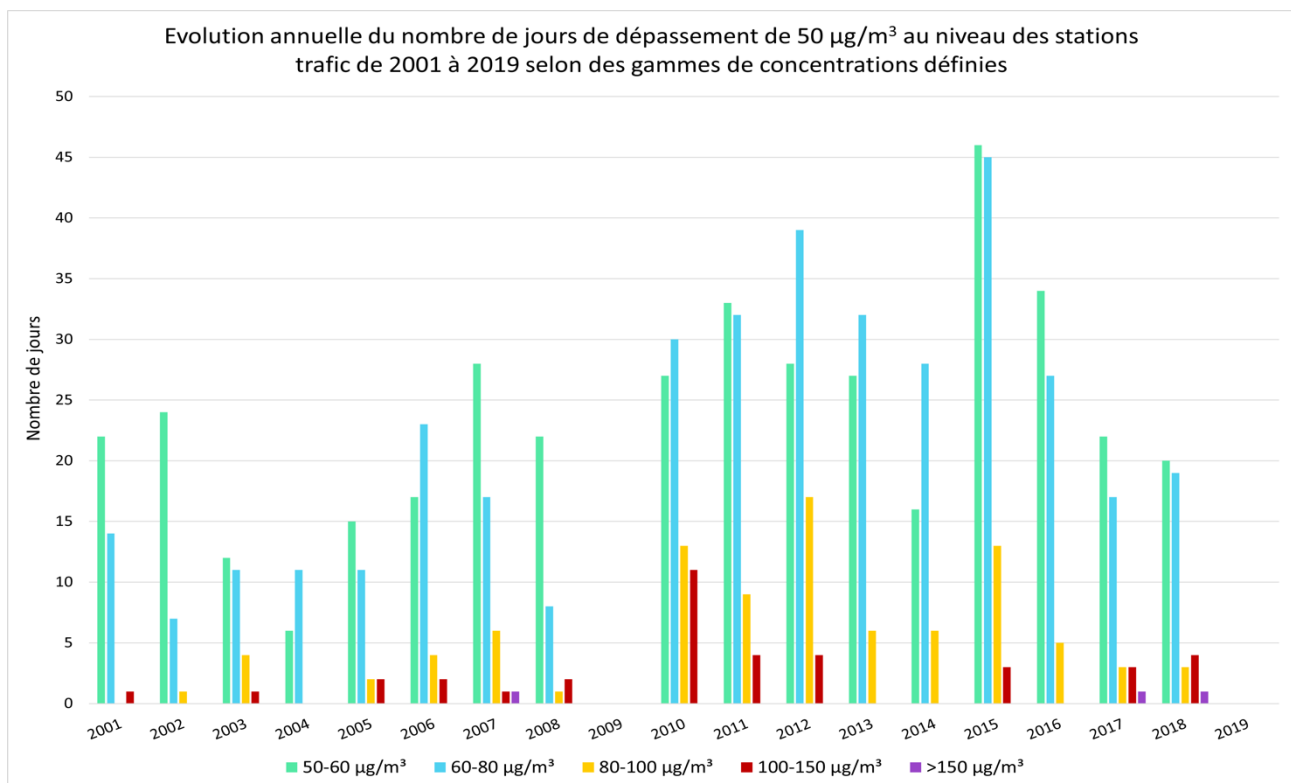


Figure 40 : Evolution annuelle du nombre de jours de dépassement du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau des stations de trafic de 2001 à 2019 selon des gammes de concentrations définies.

concentrations entre 60 et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sont également obtenues un maximum de jours en 2015 (45). Le minimum est quant à lui obtenu en 2002 avec 7 jours. Pour finir, 17 jours présentent des dépassements entre 80 et 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2012 alors qu'il n'y en a 0 en 2001 et en 2004. Ces trois gammes de concentrations sont donc mesurées durant un **nombre de jours plus important au niveau des stations trafic** qu'au niveau des stations de fond.

En revanche, la gamme de 100 à 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ est mesurée un maximum de jours **identique qu'au niveau des stations de fond** (11 jours en 2010) et 26% des années étudiées ne présentent aucun jour avec cette gamme de concentration. Comme pour les stations de fond, les concentrations supérieures à 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ne sont mesurées qu'en 2007, 2017 et 2018 pour un jour de dépassement.

Les dépassements essentiellement liés au **trafic** semblent donc être plutôt **associés à des concentrations entre 50 et 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$**

puisque un nombre de jours de dépassement plus important à ces concentrations est enregistré sur ces stations à influence trafic, qu'au niveau des stations de fond.

Il n'a pas été recensé plus de jours de dépassement avec des concentrations supérieures à 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ qu'au niveau des stations de fond, les épisodes de pollution liés au trafic ne sont donc pas associés à de telles concentrations. Ainsi, **dès que les concentrations dépassent le seuil de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, cela est imputable majoritairement à un épisode dense de brume de sable.**

VII.6.2.b Synthèse de l'analyse annuelle

La Figure 41 présente des résultats similaires à la Figure 38, concernant les stations de fond : depuis 2001, **plus de 80% des jours de dépassement présentent une concentration entre 50 et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** avec

un maximum entre 50 et 59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les concentrations entre **80 et 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** sont enregistrées durant **11%** des dépassements comme pour les stations de fond. Pour finir, les concentrations entre 100 et 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et supérieures à 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ présentent un pourcentage relativement identique qu'au niveau des stations de fond (4 et 0,3%).

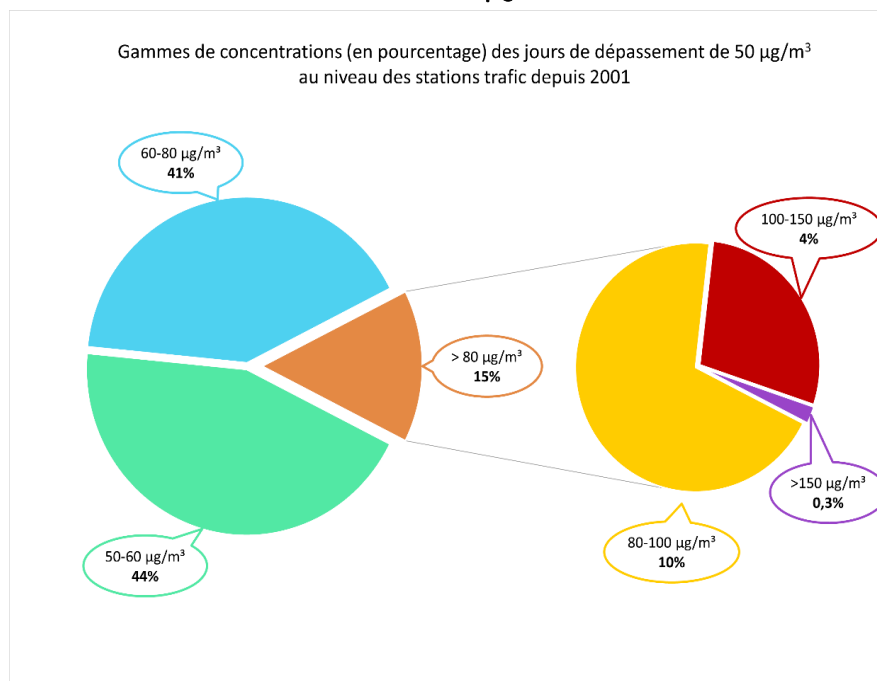


Figure 41 : Gammes de concentrations (en pourcentage) des jours de dépassement du seuil de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau des stations trafic depuis 2001 (n = 904).

Cependant, il est important de noter sur la Figure 40, tel que cela a déjà été vu dans les parties précédentes, que, pour chaque gamme de concentrations, les nombres de jours de dépassement sont moins importants entre 2001 et 2008, période où les mesures étaient effectuées à Dillon, qu'entre 2010 et 2018, période où les mesures étaient effectuées à Renéville et à Robert Mansarde. De la même façon que dans la partie VII.5, la Figure 42 présente donc, en pourcentage, les gammes de concentrations lors des jours de dépassement du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, d'une part de 2001 à 2008 à Dillon, et d'autre part, de 2010 à 2018 à Renéville et à Robert Mansarde. Il apparaît que la répartition des gammes de concentrations des dépassements entre 2001 et 2008 est légèrement différente de l'intégralité de la période d'étude. Au contraire, la période entre 2010 et 2018 présente des pourcentages relativement similaires à l'intégralité de la période. En effet, entre 2001 et 2008, les dépassements de concentrations entre 50 et $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ représentent un pourcentage plus important que sur l'intégralité de la période d'étude ou entre 2010 et 2018 (53% des dépassements alors qu'il n'y a que 40% entre 2010 et

2018), tandis que les concentrations entre 60 et $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et supérieures à $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ représentent une part moins importante (respectivement 37 et 10% à Dillon alors que ces gammes représentent 43 et 17% entre 2010 et 2018). Par extension, les gammes entre 80 et 100 et 100 et $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ diminuent, respectivement, à 7 et 3%. Cette

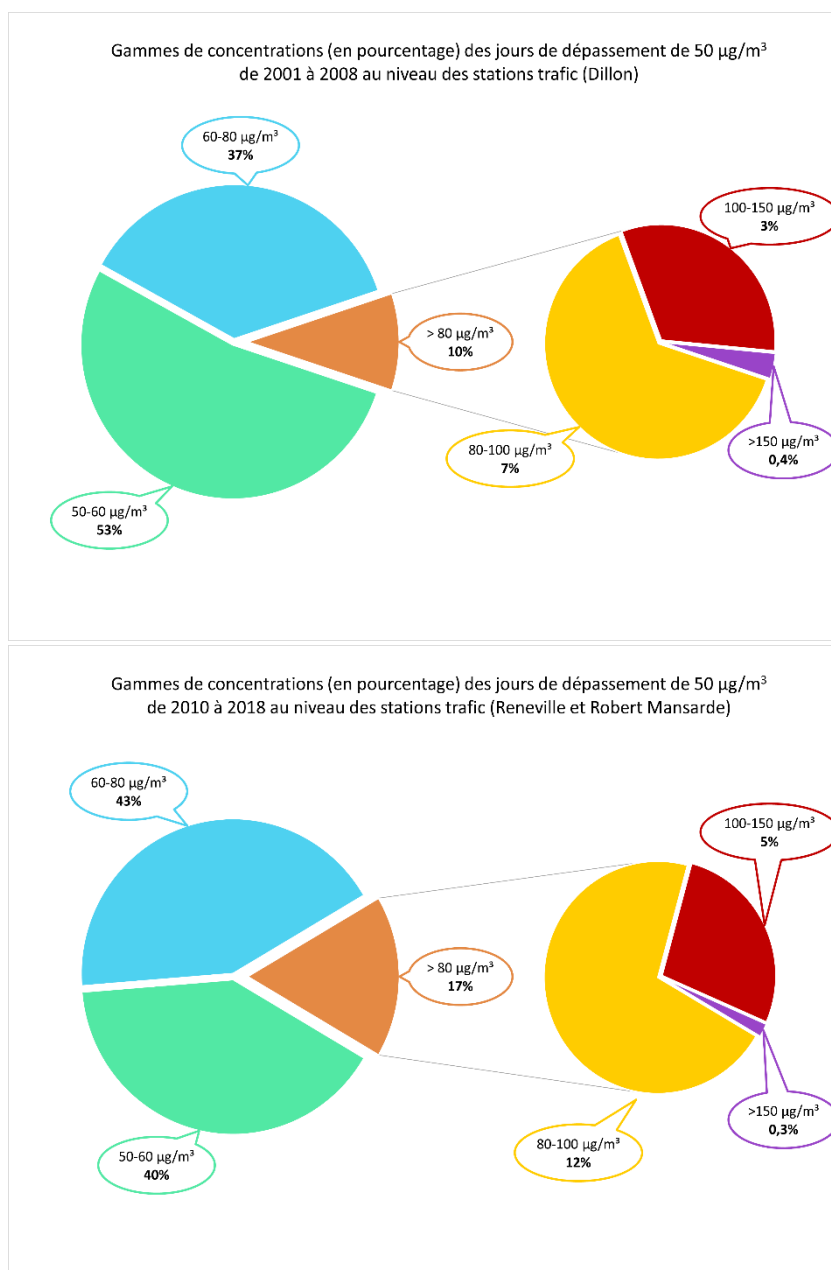


Figure 42 : Gammes de concentrations (en pourcentage) des jours de dépassement du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de 2001 à 2008 au niveau de la station de Dillon (en haut, $n = 276$) et de 2010 à 2018 au niveau des stations de Renéville et de Robert Mansarde (en bas, $n = 628$).




figure illustre donc que les **dépassements de 2001 à 2008** à Dillon étaient, majoritairement, de **concentrations moins élevées** que ceux mesurés de 2010 à 2018.

VII.6.3 Conclusions

Cette partie a permis de mettre en évidence que les dépassements du seuil de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ se situent **en majorité** (environ à 80%) dans une gamme de concentration **entre 50 et $100\mu\text{g}/\text{m}^3$** dont presque 50% entre 50 et $60\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces proportions s'observent aussi bien au niveau des stations de fond qu'au niveau des stations trafic.

Néanmoins, certaines différences sont à noter. Tout d'abord, les concentrations entre 50 et $100\mu\text{g}/\text{m}^3$, et en particulier entre 50 et $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ sont recensées durant un nombre un peu plus important de jours au niveau des stations trafic qu'au niveau des stations de fond; suggérant que les dépassements essentiellement **dus au trafic** sont associés à des **concentrations inférieures à $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ voire inférieures à $60\mu\text{g}/\text{m}^3$** .

En revanche, les concentrations les plus élevées au niveau des stations trafic (entre 100 et $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ et supérieures à $150\mu\text{g}/\text{m}^3$) représentent un pourcentage du même ordre de grandeur qu'au niveau des stations de fond et seules. Il peut donc être conclu que les concentrations **supérieures à $100\mu\text{g}/\text{m}^3$** sont imputables à des **épisodes de brume de sable dense**.

Par ailleurs, des différences ont été observées entre les concentrations obtenues à la station trafic de Dillon entre 2001 et 2008 et aux stations de Renéville et Robert Mansarde entre 2010 et 2018. En

effet, les dépassements mesurés **entre 2001 et 2008** sont **associés à des concentrations plus faibles** que ceux mesurés entre 2010 et 2018.

Pour finir, il est important de noter que l'ampleur de l'évènement de juin 2020 a provoqué un **nombre de jours de dépassement record des concentrations supérieures à $150\mu\text{g}/\text{m}^3$** . Les 5 jours (dont 3 jours consécutifs) enregistrant de telles concentrations ont fait passer de 0,4% à 1% le nombre de jours de concentrations supérieures à $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ depuis 2001. Néanmoins, le **caractère unique** de cet épisode exceptionnel ne permet pas d'en conclure une plus grande occurrence d'épisodes de concentrations très élevées. Ces évènements sont, toutefois, à surveiller et à étudier s'ils se reproduisent.

VIII. Evaluation qualitative des particules fines

VIII.1 Introduction

Afin d'affiner les connaissances sur les particules et sur leurs origines, il serait intéressant de se pencher sur l'aspect qualitatif des particules fines mesurées dans les stations de fond et à influence trafic afin de **comparer la composition chimique obtenue**. En effet, les particules d'origine naturelle et les particules d'origine anthropique n'ont pas la même composition chimique. De plus, la composition chimique diffère, également, entre différents types de particules naturelles ou anthropiques. Par ailleurs, l'étude quantitative effectuée sur les particules PM10 a permis de déterminer que les dépassements des seuils réglementaires de 50 et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pouvaient être dus à la présence d'une pollution anthropique et/ou d'une brume de sable modérée ou dense, **étudier la composition chimique de ces dépassements pourrait donc permettre d'identifier plus précisément leur source**.

Les particules fines PM10 sont prélevées, par Madinainair, sur des filtres en quartz. La Figure 43 montre des exemples de ce type

de filtre. Tandis que le filtre de gauche est un filtre vierge avant prélèvement de particules, les deux autres filtres ont été photographiés après prélèvement de particules. Il est parfaitement visible étant donné l'aspect des particules collectées sur ces deux filtres que leur contenu est différent. En effet, le filtre du milieu, de couleur beige est recouvert de particules **majoritairement issues d'une brume de sable**, tandis que le filtre de droite, de couleur noire, contient entre autres du **carbone suie originaire du trafic routier**.

VIII.2 Caractérisation chimique et détermination des sources des particules fines PM10 en Martinique

La Commission européenne a décidé de renvoyer, récemment, la France devant la Cour de justice de l'Union européenne pour "**non-respect de son obligation de protection des citoyens contre la mauvaise qualité de l'air**" en raison du dépassement des seuils de particules fines PM10 dans les zones de Paris et de la Martinique. Cependant, il est connu que les épisodes de **brume de sable en Martinique** influencent la concentration de PM10, et ce de manière

naturelle. Les épisodes de brume de sable étant un phénomène naturel, il n'est pas possible d'agir sur leur nombre et leur intensité. Il est donc possible qu'en



Figure 43 : Photos de différents filtres de prélèvement.

ne prenant pas en compte les épisodes dus à des brumes de sable, les épisodes de dépassement d'influence anthropique soient beaucoup moins nombreux.

Par ailleurs, le développement de cette partie du rapport va permettre d'informer la population sur la **composition chimique des particules mesurées et respirées en Martinique**.

VIII.2.1 Analyse de la composition chimique

Dans cette partie, vont être présentées la **composition chimique élémentaire et ionique** au niveau de plusieurs stations (Figure 44). Les données présentées sont issues de l'étude sur la **caractérisation**

chimique et la détermination des sources de particules en Martinique en 2018 du LCSQA (FAVEZ et al., 2020). Celles-ci correspondent donc à des échantillons prélevés au cours de l'année 2018 mais pas de manière continue. Afin de mettre en évidence les différentes sources de PM10 en Martinique, les graphiques ci-dessous présenteront les éléments chimiques les plus communs mesurés selon la « famille » de sources à laquelle ils appartiennent (voir annexe 6, XI.6). Ce sont les **concentrations moyennes lors de dépassement ou sans dépassement du seuil d'information et de recommandation** qui seront présentées.

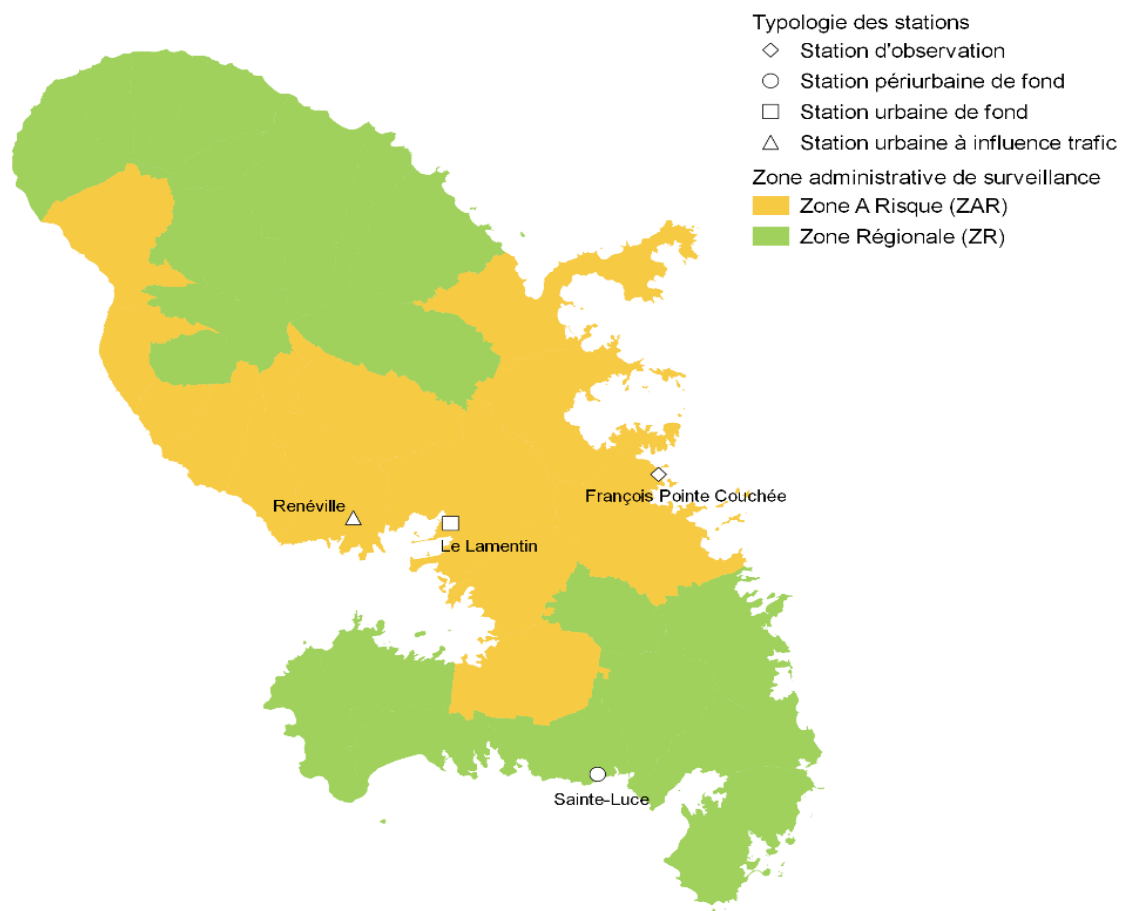


Figure 44 : Localisation et typologie des stations choisies pour l'étude de la variabilité de la composition chimique.



Les familles suivantes ont été choisies :

- La matière particulaire carbonée qui a été découpé en deux catégories :
 - o Le **carbone organique (OC)** correspond au carbone contenu dans la matière organique. Il peut être émis directement dans l'atmosphère (OC primaire), et aussi être formé par condensation ou nucléation de composés organiques volatils (OC secondaire).
 - o Le **carbone élémentaire (EC)** désigne la matière particulaire mesurée par analyse thermo-optique correspondant au carbone suie, composé purement primaire, apparenté à du graphite pur. Il est émis lors de **processus de combustion**.

En effet, l'OC et l'EC représentent à eux deux une proportion importante des PM10 mesurés.

- Les **particules minérales** dont font partie les particules **désertiques** amenées par les brumes de sable depuis la région du Sahara et du Sahel. Les composés majeurs de ces particules sont l'aluminium (Al), le calcium (Ca), le fer (Fe), le potassium (K), le magnésium (Mg), le sodium (Na) et le titane (Ti)
- Les **embruns marins** constitués de sels de mer tels que les ions chlorure Cl^- .

- Les **embruns marins + les particules désertiques**, certains ions tels que K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} ou Na^+ peuvent aussi bien être associés aux embruns marins qu'aux particules désertiques, c'est pourquoi ils ont été rassemblés dans une catégorie distincte.
- Les **ions inorganiques secondaires** tels que NO_3^- , SO_4^{2-} ou NH_4^+ , Ils sont formés à partir de **précurseurs gazeux** (e.g. le nitrate est formé à partir de NO_x gazeux).
- Et une catégorie « **Autre** » rassemblant des éléments d'origine pouvant être multiple, **naturelle ou anthropique**, présents à plus faible concentration. Le baryum (Ba), le cuivre (Cu), le manganèse (Mn), l'étain (Sn), le zinc (Zn) et le chrome (Cr) ont été considérés.

VIII.2.1.a Au niveau de la station de François Pointe Couchée

La Figure 45 présente les concentrations élémentaires et ioniques au niveau de la station François Pointe Couchée qui est la **station d'observation localisée sur la côte Atlantique afin d'étudier l'influence des brumes de sable**.

Hors jours de dépassement, les concentrations les plus élevées sont celles en **chlorure** et en **sodium** en raison de la présence de sels de mer. Il est également observé une concentration relativement

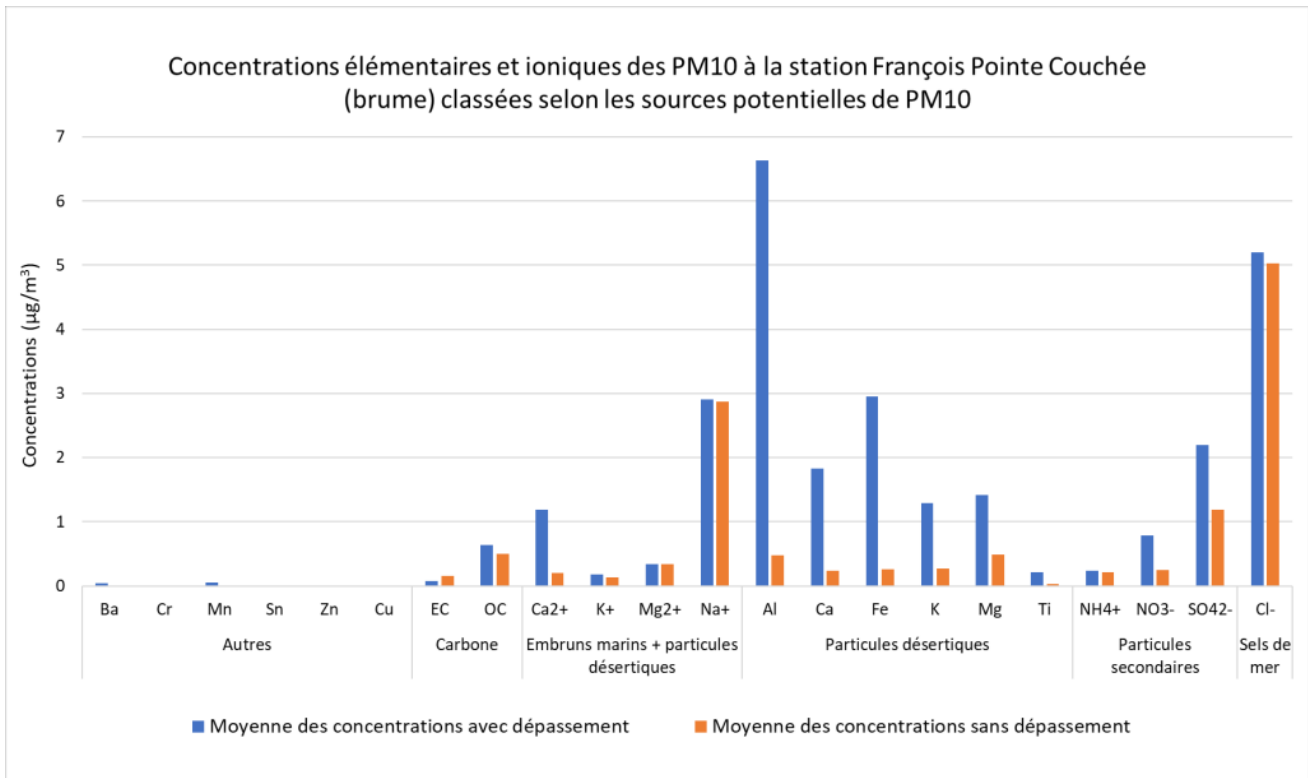


Figure 45 : Concentrations élémentaires et ioniques des PM10 à la station de François Pointe Couchée (brume) classées selon les sources potentielles de PM10.

élevée en SO_4^{2-} probablement formé par la réaction dans l'atmosphère du diméthyl sulfate émis par le phytoplancton ou du sulfate marin. En outre, il est également visible un **bruit de fond** présentant des **concentrations relativement faibles** des éléments constituant les **particules désertiques**. En effet, ces éléments font partie de la composition des particules minérales dont dépendent les particules désertiques. Ces particules minérales ont une composition correspondant à celle de la **croûte terrestre** puisque ce sont des particules terrigènes issues du sol. Il est donc observé une concentration de fond de ces éléments, associée aussi bien à des **épisodes ponctuels de brume de sable légère** qu'à la présence de ces éléments dans la **constitution du sol et du sable en Martinique**. C'est pourquoi ces concentrations hors jours de dépassement

seront observées au niveau de l'ensemble des stations.

Durant les jours de dépassement, les concentrations composant les particules désertiques augmentent de façon importante pour atteindre la concentration moyenne la plus importante parmi les éléments chimiques étudiés. Les **particules désertiques jouent donc un rôle important dans les dépassements enregistrés à la station de François Pointe Couchée**. Il est probable que les concentrations en sulfate, SO_4^{2-} , et en nitrate, NO_3^- , augmentent également durant les jours de dépassement en raison de leur transport en s'accrochant aux particules désertiques ou de leur formation par réaction entre les particules désertiques et des gaz. Ces ions sont formés initialement par **réactions entre différents composés tels que les sels de mer ou des**

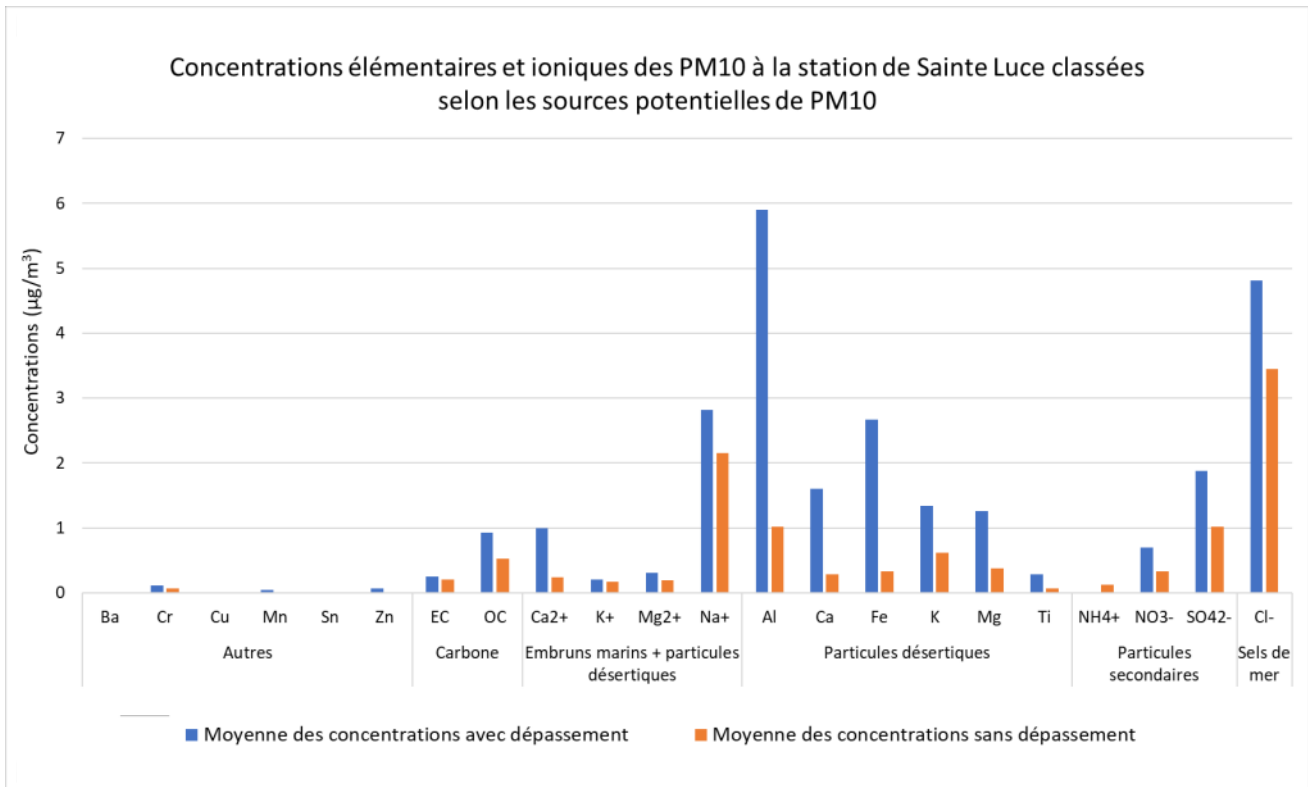


Figure 46 : Concentrations élémentaires et ioniques des PM10 à la station de Sainte Luce classées selon les sources potentielles de PM10.

composés gazeux issus du transport routier ou de l'industrie. Néanmoins, leurs **concentrations restent relativement faibles** vis-à-vis des éléments composant les particules minérales constituant les brumes de sable.

Il apparaît aussi que la concentration en carbone organique (OC) augmente légèrement durant les jours de dépassement celle-ci étant probablement **associée à de la matière organique transportée en même temps que les brumes de sable.** Au contraire, la concentration en carbone élémentaire (EC) est plus faible durant les jours de dépassement rappelant l'apport **anthropique négligeable dans les épisodes de brume de sable.** Celui-ci peut avoir des origines anthropiques extrarégionales diverses. Un apport de particules issues des feux de biomasse d'Afrique du Nord est, cependant, peu probable, ces derniers ayant lieu de novembre à avril, période où les

masses d'air sont transportées vers l'Amérique du Sud plus que vers la Caraïbe. Des apports ponctuels de particules issues des feux de biomasse ou d'autres sources d'Afrique du Nord peuvent, toutefois, certainement se produire. Néanmoins, il apparaît clairement que les concentrations restent très faibles.

VIII.2.1.b Au niveau de la station de Sainte-Luce

La station de Sainte Luce, station périurbaine, présente, comme au François, des **concentrations élevées en sels de mer lors des jours sans dépassement** (Figure 46).

Lors des jours de dépassement du seuil de 50 µg/m³, **l'influence des particules désertiques** est également observée avec des concentrations beaucoup plus élevées

que durant les jours sans dépassement. Une augmentation en sulfates, SO_4^{2-} , et en nitrates, NO_3^- , et en matière organique est également observée lors des jours de dépassement du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. L'augmentation des concentrations de ces composés à Sainte Luce durant les jours de dépassements peut être associée à la même origine qu'au François : une réaction entre des composés gazeux et/ou particulaires de sources diverses créant ces particules secondaires transportées ensuite avec et par les particules désertiques.

VIII.2.1.c Au niveau de la station du Lamentin

ioniques lors des dépassements du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ou sans dépassement.

Lors des jours sans dépassement du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, il est observé que les concentrations les plus importantes enregistrées à la station du Lamentin sont celles en ions chlorure (Cl^-) et sodium (Na^+) indiquant une **influence de la brise de mer** même en dehors des épisodes de dépassement, comme cela a été observé sur les autres stations, et sur la côte Caraïbe. Comme cela peut être attendu, les concentrations en ions sodium (Na^+) présentent également une concentration importante qui peut donc être associée à la présence d'embruns marins plus que de particules désertiques. En effet, les

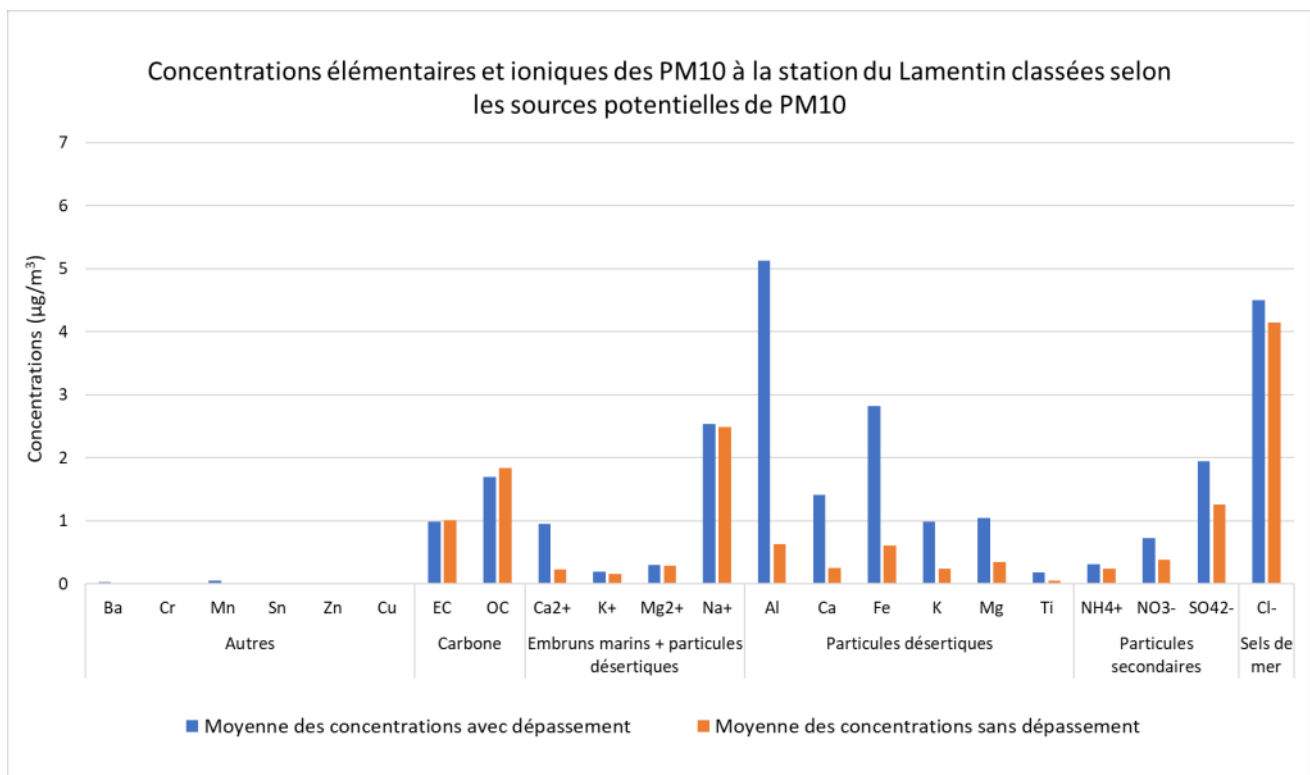


Figure 47 : Concentrations élémentaires et ioniques des PM10 à la station du Lamentin classées selon les sources potentielles de PM10.

Pour rappel, la station du Lamentin est une station urbaine. La Figure 47 présente les concentrations moyennes élémentaires et

éléments constituant les particules désertiques ne présentent pas de concentrations trop élevées hors épisodes de dépassement. Les concentrations

observées sur ces éléments proviennent seulement du bruit de fond évoqué dans la partie sur la station du François. Par ailleurs, les concentrations en **carbone organique (OC)** et en **carbone élémentaire (EC)**, associée majoritairement au trafic routier et à la combustion de biomasse, font également partie des **concentrations les plus élevées** à la station du Lamentin.

Les jours où les concentrations en PM10 dépassent le seuil de 50 µg/m³, la concentration en ion chlorure (Cl⁻) est toujours importante, mais une augmentation nette et particulièrement importante de la concentration en aluminium (et également en calcium, fer, potassium et magnésium) est observée. Ces augmentations indiquent que la plupart des dépassements observés à la station du Lamentin peut être **associée à des épisodes de brume de sable**. Une augmentation des concentrations de sulfate

(SO₄²⁻) et de nitrates (NO₃⁻) est également observé lors des jours de dépassement associée au transport par les particules désertiques comme cela a été évoqué précédemment. Toutefois, l'augmentation de ces composés permet d'envisager également une légère **influence du transport routier et de l'énergie**, secteurs principalement responsables de la formation de dioxyde de soufre (SO₂) et de dioxyde d'azote (NO₂) à la station du Lamentin (précurseurs de SO₄²⁻ et de NO₃⁻) dans les dépassements du seuil de 50 µg/m³.

VIII.2.1.d Au niveau de la station de Renéville

La station de Renéville est une station à influence trafic, situé dans le quartier de Renéville, à proximité de la Rocade qui traverse le centre-ville de Fort-de-France

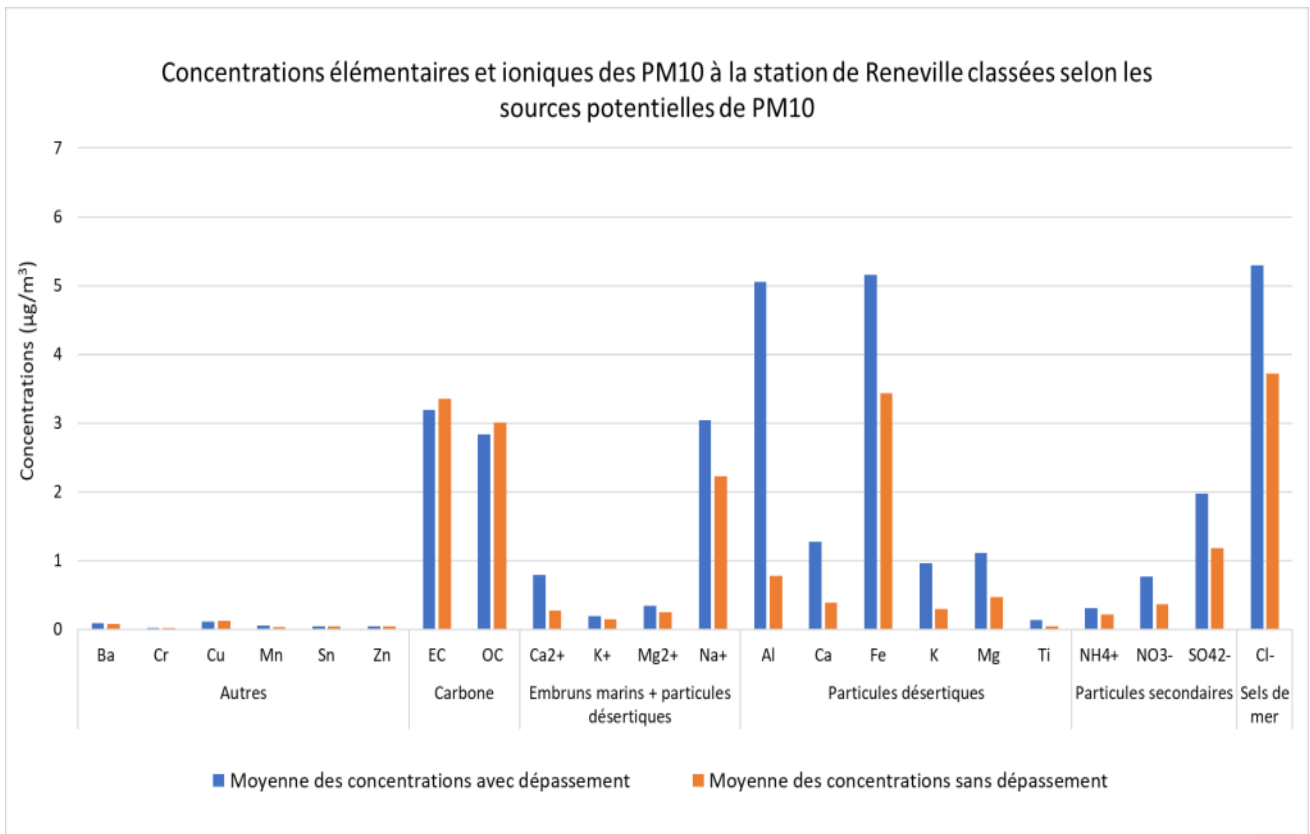



Figure 48 : Concentrations élémentaires et ioniques des PM10 à la station de Renéville classées selon les sources potentielles de PM10.



(axe enregistrant plus de 100 000 véhicules par jour).

Les concentrations les plus élevées, hors jours de dépassement, sont celles en ions chlorure, indiquant la **contribution des sels de mer** y compris sur la côte Caraïbes (Figure 48).

En revanche, des différences sont observées par rapport aux trois stations précédemment étudiées. En effet, des **concentrations élevées en carbone élémentaire et organique** ainsi qu'en fer sont mesurées. Ceci s'explique par les **sources anthropiques**, telles que le trafic routier, la combustion de biomasse et à plus faible proportion, les industries, émettrices de carbone élémentaire (émis lors des processus de combustion) ainsi que de carbone organique et de fer. Par ailleurs, même si les concentrations sont relativement faibles, des concentrations en cuivre et en baryum sont mesurées rappelant la source anthropique liée au trafic et à la combustion de biomasse de ces éléments. Les concentrations en composés constituant les particules désertiques sont associés, comme expliqué précédemment, au **bruit de fond de particules terrigènes issues du sol**.

Durant les jours de dépassement, des augmentations des concentrations moyennes des ions chlorure et sodium mais également d'aluminium, fer, calcium, magnésium et potassium révèlent la **contribution des particules désertiques** mais également **des sels de mer** lors des dépassements du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La même augmentation est observée sur les particules secondaires nitrate et sulfate qu'au niveau des autres stations révélant une origine similaire.

Il est intéressant d'observer que les concentrations en carbone élémentaire et organique sont légèrement plus faibles durant les jours de dépassement que durant les jours sans dépassement. La proportion d'éléments d'influence trafic est donc, en moyenne, moins importante durant les jours de dépassement. Cette information est à prendre avec précaution puisque les données observées sont des moyennes. Les concentrations en carbone durant certains jours de dépassement sont plus élevées que la moyenne permettant d'affirmer que certains dépassements sont également associés à des particules issues du trafic.

VIII.2.1.e Comparaison des concentrations obtenues à chaque station sur deux périodes distinctes

Les graphiques présentés sur la Figure 49 sont issus de l'étude sur la caractérisation chimique et la détermination des sources de particules en Martinique en 2018 du LCSQA (FAVEZ et al., 2020) permettant de mettre en évidence les différentes sources et espèces chimiques qui composent les particules sur le territoire.

Cette figure présente la proportion de famille ou composés chimiques analysés sur deux périodes précises de l'année 2018 en parallèle des concentrations en PM₁₀, au niveau de la station de François Pointe Couchée mais également de Renéville, du Lamentin et de Sainte Luce permettant une comparaison. Les deux périodes d'analyses présentées sont les suivantes :

- Du 28 novembre au 7 décembre 2018 lors de l'absence d'épisode de brume de sable
- Du 4 au 13 août 2018 lors d'un épisode important de brume de sable.

minérales est également quantifiées. Ces particules minérales peuvent provenir d'un apport diffus de particules désertiques mais également d'un apport local de particules terrigènes (envol de sable, érosion du sol).

Au niveau de la station du Lamentin, une part

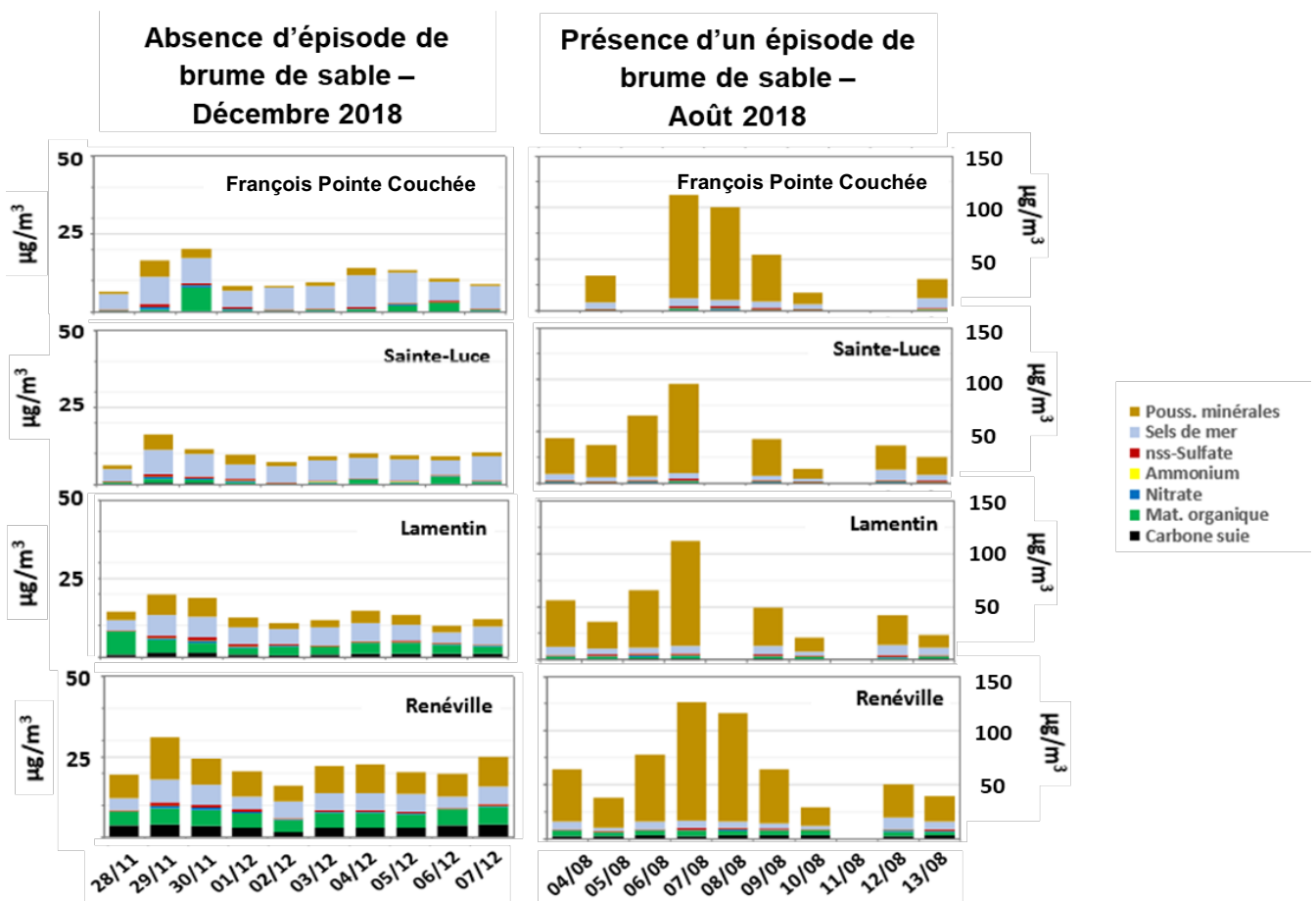



Figure 49 : Concentrations journalières des espèces chimiques majeures des PM10 du 28/11 au 07/12 2018 (absence de brume de sable) et du 04/08 au 13/08 2018 (fort épisode de brume de sable) issu de FAVEZ et al., 2020.

Durant la période de décembre 2018, **sans épisode de brume de sable**, les composés majeurs au niveau des stations de François Pointe Couchée et de Sainte-Luce, stations loin des sources anthropiques, sont les **sels de mer** et les **matières organiques**. Ce sont, en effet, des stations d'observation et périurbaine peu ou pas influencées par les activités locales anthropiques. A noter que sur ces stations, une part de particules

de matière organique importante s'ajoute aux sels de mer. La station du Lamentin est une station urbaine et donc **plus sous l'influence anthropique** que les stations de Sainte Luce et de François Pointe Couchée. Ainsi, on y observe également durant cette période l'**augmentation de la part de carbone suie**, principalement émis par la combustion de matière fossile et donc issue du trafic automobile. A noter également,



une augmentation des particules minérales sur cette station, pouvant être due à une **remise en suspension** des particules désertiques et autres particules minérales déposées sur le sol. Cette remise en suspension semble augmenter avec l'activité anthropique. En effet, le passage fréquent de véhicules peut engendrer une remise en suspension plus importante et donc une augmentation des concentrations en particules minérales sur ces sites urbains.

Ce même constat est d'ailleurs observé sur la station urbaine à influence trafic de Renéville, où la part de particules minérales (particules désertiques et terrigènes) déposées, augmentent davantage en raison d'un trafic dense. Cette station trafic ainsi enregistre les concentrations les plus élevées. Il est trouvé une part à peu près équivalente de sels de mer et de matière organique, ainsi que de carbone suie, traceur de l'activité liée au trafic automobile.

Lors de l'**épisode de brume de sable**, du 4 au 13 août 2018, il est tout d'abord intéressant de noter que les concentrations de matière carbonée (matière organique et carbone suie) sont plus faibles que durant le mois de décembre sur l'ensemble des stations (mais en particulier sur la station trafic de Renéville et sur la station urbaine du Lamentin). Cela peut s'expliquer par une **plus forte affluence de la circulation automobile en décembre** que durant le mois d'août, période des vacances scolaires avec une activité anthropique réduite. Par ailleurs, il peut être noté que les composés majoritaires retrouvés au niveau des stations François Pointe Couchée, de Sainte Luce sont les **particules minérales** qui composent majoritairement les particules désertiques. Ce même constat est observé sur la station urbaine du Lamentin et la station urbaine à influence trafic de Renéville. C'est au niveau

de la station trafic de Renéville que la part de particules minérales est la plus élevée probablement en raison de la **remise en suspension importante avec le trafic dense**. La part de matière organique et de carbone suie est également plus importante qu'au niveau des autres stations comme cela a été observé en décembre 2018, durant la période sans épisode de brume de sable. En effet, ces composés sont associés à des activités anthropiques en particulier le trafic automobile. Il est donc cohérent d'en observer une plus grande part au niveau de la station trafic. A noter qu'il n'est pas mesuré une telle concentration de matière organique et de carbone suie au niveau de la station de François Pointe Couchée indiquant une **source anthropique locale à la station de Renéville** et non une source anthropique lointaine.

VIII.2.2 Composition chimique des particules lors d'épisodes de brume de sable

Les brumes de sable étant une problématique régionale importante en Martinique et responsables d'une partie des dépassements des seuils réglementaires, un focus va être fait sur la composition chimique de celles-ci.

VIII.2.2.a Proportion des principaux composés chimiques

Pour mieux comprendre la composition chimique des particules lors d'un épisode de brume de sable, les données traitées dans cette partie seront celles de la station François Pointe Couchée (station d'observation). Cette station est protégée

de l'influence des activités anthropiques locales pouvant influencer sur les concentrations en PM10. Lorsque des données manquent, la station de Sainte-Luce, station périurbaine peu influencée par les activités anthropiques locales, a été utilisée.

La Figure 50 issue du rapport de FAVEZ et al. (2020) présente la proportion de famille ou composés chimiques analysés sur certaines périodes de l'année 2018 en parallèle des concentrations en PM10.

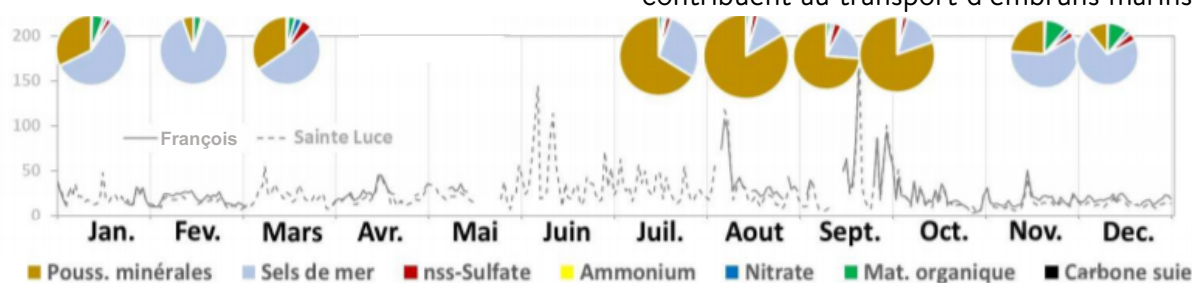



Figure 50 : Proportions des composés chimiques majeurs analysés à la station François Pointe Couchée et Sainte Luce en parallèle des concentrations en PM10 en 2018 issu de FAVEZ et al. (2020).

Bien qu'il n'y ait pas eu d'analyses durant les mois d'avril à juin correspondant au début de la période d'occurrence des épisodes de dépassement, il peut être noté que les analyses effectuées sur le reste de la période, de juillet à fin septembre, ont tout de même permis d'identifier des épisodes de **brumes de sable de diverse intensité**.

Des analyses chimiques ont été effectuées par le LCSQA sur certaines périodes de l'année 2018 sur des échantillons PM10 de la station d'observation François Pointe Couchée. Ces échantillons ont été prélevés durant des périodes sans apport transfrontalier de brumes de sable (novembre, décembre, janvier, février, mars) puis durant des périodes d'épisodes d'intensité variable de brumes de sable (juillet à fin septembre). Il est dans un premier temps visible que les éléments

chimiques constituant les particules désertiques sont observés toute l'année. En effet, ces particules sont composées **d'éléments minéraux**, issus du sol (appelées également particules minérales ou particules terrigène). Sur cette station loin des sources anthropiques, et parmi les échantillons analysés, il est observé, pour ceux collectés entre janvier et mars ainsi qu'en novembre et décembre (période hors épisodes désertiques), une part dominante des **sels de mer**. En effet, les alizés, d'est en ouest, contribuent au transport d'embruns marins,

en particulier sur une station telle que celle de François Pointe Couchée localisée en bordure marine sur la côte Atlantique. Durant cette période, le reste des composés analysés sont associés aux **particules minérales** majoritairement ainsi qu'à de la **matière organique**. En novembre et en décembre, la part de matière organique est plus importante qu'entre janvier et mars. Des particules minérales sont donc mesurées au niveau de la station d'observation brume en dehors de la période propice aux brumes de sable. Ces particules peuvent être liées à un apport transfrontalier diffus et/ou à des particules de terre et/ou de sable issues de Martinique. La matière organique peut, quant à elle, être originaire des activités naturelles autour de la station. Par ailleurs, la proportion de nss-sulfate (sulfate originaire d'autres sources



que les sels de mer) observée en mars, novembre et décembre peut être associée au sulfate formé dans l'atmosphère par la réaction du diméthyl sulfate émis par le phytoplancton marin.

La saison propice à l'arrivée de **brume de sable** se produisant généralement entre avril et octobre en Martinique, il est cohérent d'observer une part majoritaire de **particules minérales**, composant les particules désertiques dans les échantillons collectés entre juillet et fin septembre. C'est aussi durant ces mois-là que des **pics de concentrations** sont observés à la station de François Pointe Couchée. Durant cette période, les deuxièmes composés majeurs sont les sels de mer. De faibles concentrations de matière organique et de nss-sulfate sont également analysés sur les échantillons collectés pendant cette période. Leur origine peut être similaire aux concentrations mesurées durant l'autre période.

VIII.2.2.b Concentrations en métaux

Madininair mesure des métaux au sein de la station périurbaine de fond de Sainte-Luce. Une comparaison a donc été réalisée entre les concentrations obtenues en métaux réglementés entre les jours en dépassement du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et les jours sans dépassement sur les données de la station de Sainte-Luce.

Lors des jours de dépassement du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, une augmentation des concentrations moyennes pour le nickel, l'arsenic et le plomb est observée. L'augmentation est maximale pour le nickel passant de $0,38 \text{ ng}/\text{m}^3$ à $1,17 \text{ ng}/\text{m}^3$ suivi du

plomb passant de $0,32 \text{ ng}/\text{m}^3$ à $0,73 \text{ ng}/\text{m}^3$. L'arsenic quant à lui, passe d'une moyenne de $0,08 \text{ ng}/\text{m}^3$, à $0,25 \text{ ng}/\text{m}^3$ (Tableau 11). Ces augmentations peuvent être expliquée par une **augmentation des concentrations** en PM10 influencée par l'**arrivée d'une brume de sable**. En effet, la station de Sainte Luce est une station périurbaine peu influencée par des activités locales anthropiques et les brumes de sable sont composées de **particules terrigènes** issues du sol dans lequel des éléments, tels que ces métaux réglementés, sont présents.

La Figure 51 présente les concentrations moyennes mensuelles en arsenic, nickel et plomb (les concentrations de cadmium ne variant que très peu, elles ne sont pas présentées sur ce graphique) à la station de Sainte Luce pour plusieurs mois de 2017, 2018 et 2019. Il est intéressant de noter que les **pics de concentrations** ont lieu pendant les mois de mai à septembre, propice aux **épisodes de brumes de sable** et non pendant les mois d'hivernage pendant lesquels des prélèvements ont été effectués. En effet, les pics de concentrations en métaux ont été mesurés à des dates où des pics de concentrations en PM10 (relatif aux concentrations mesurées avant et après cette période) ont été mesurés à Sainte-Luce. Ces pics sont donc très certainement associés à la présence d'une brume de sable.

Bien qu'une augmentation des concentrations soit observée pendant les épisodes de brume de sable, les concentrations moyennes et les maximas obtenus sont **inférieurs aux valeurs limites pour la protection de la santé** et donc respectent les normes environnementales, pour tous les métaux lourds réglementés.

	As	Cd	Ni	Pb
Hors jours de dépassement du seuil de 50µg/m ³	0.08 ng/m ³	0.01 ng/m ³	0.38 ng/m ³	0.32 ng/m ³
Lors de jours de dépassement du seuil de 50µg/m ³	0.25 ng/m ³	0.01 ng/m ³	1.17 ng/m ³	0.73 ng/m ³
Valeur limite pour la protection de la santé et valeurs cibles	6 ng/m ³	5 ng/m ³	20 ng/m ³	500 ng/m ³

Tableau 11 : Concentrations moyennes des métaux réglementés lors de jours de dépassement du seuil d'information et de recommandation et hors jours de dépassement à la station de Sainte Luce. Valeurs limites et cibles de Pb, As, Cd et Ni.

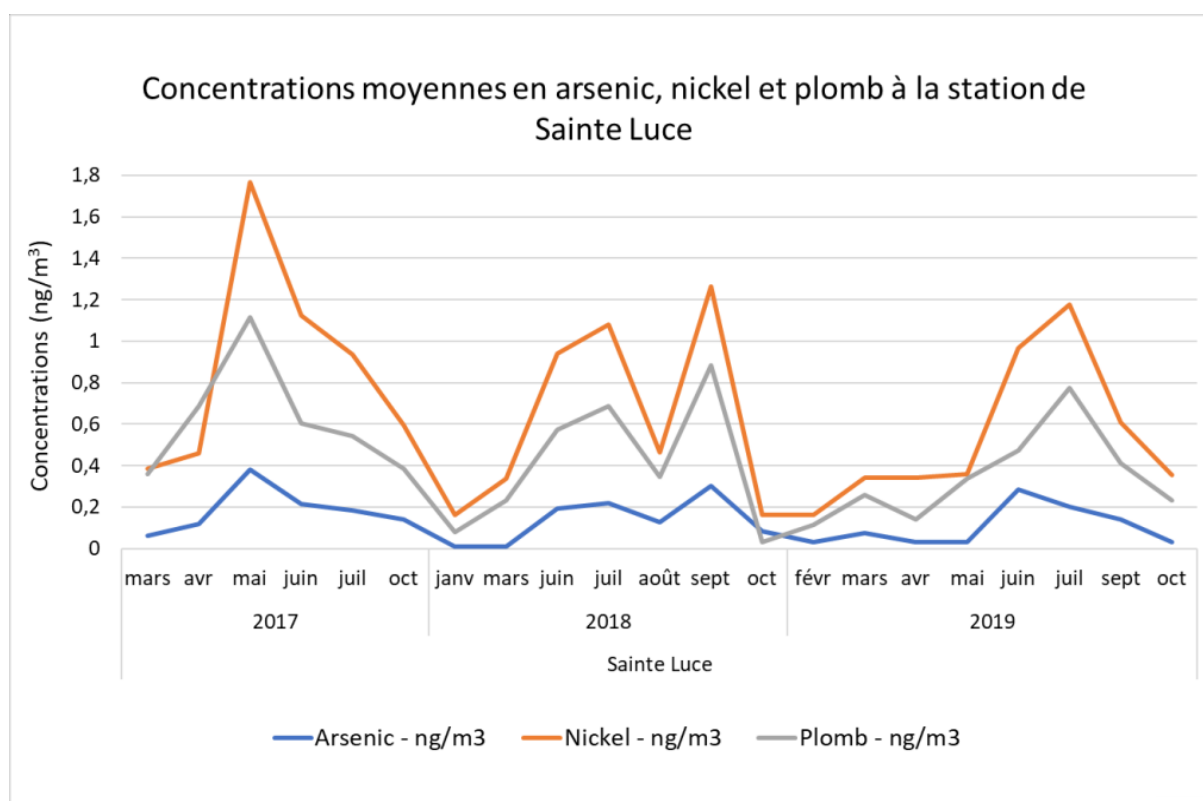


Figure 51 : Concentrations moyennes en arsenic, nickel et plomb à la station de Sainte Luce.

VIII.2.3 Composition chimique des particules associées au trafic automobile

Le trafic automobile est également une source importante de particules en Martinique. Il est donc intéressant d'étudier finement les composés chimiques traceurs de trafic automobile.

VIII.2.3.a Au niveau des stations de proximité automobile

- Proportion des principaux composés chimiques

La station Renéville est une station à influence trafic. Elle est sujette à toutes activités anthropiques, notamment le trafic

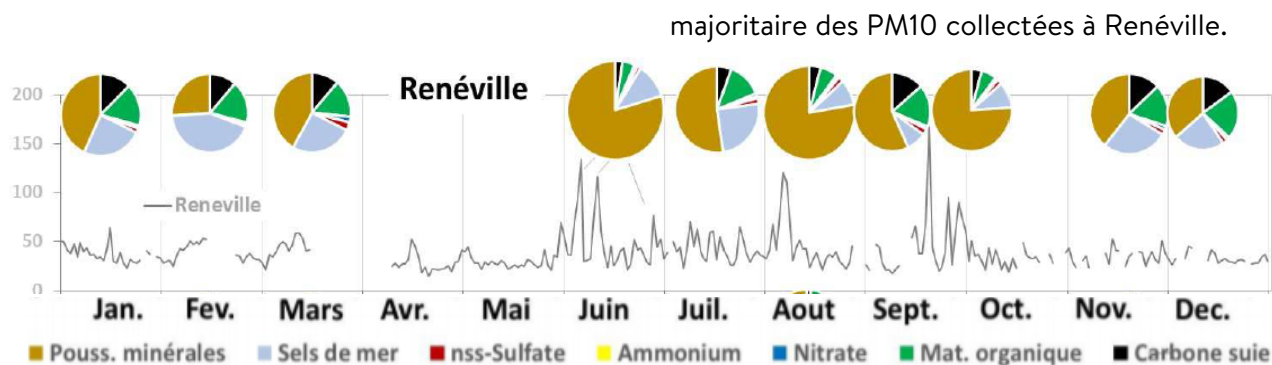


Figure 52 : Part de chaque source tout au long de l'année 2018 sur la station Renéville (FAVEZ et al., 2020).

automobile, pouvant impacter et **influer sur les concentrations en PM10**. Le graphique ci-dessous présente la contribution des diverses espèces chimiques sur les concentrations en PM10 pour la station Renéville (Figure 52) issue du rapport de FAVEZ et al. (2020). Dans ce rapport, la composition chimique de certains filtres PM10 collectés à Renéville en 2018 a été déterminée. Il peut être observé, de janvier à mars et en novembre et décembre une part moins importante de sels de mer qu'à la station de François Pointe Couchée. Tout d'abord, car la station de Renéville est sous une **influence moins directe des sels de mer**. Par ailleurs, les autres composés présents dans les PM10 collectés à Renéville sont plus divers qu'à François Pointe Couchée. Il y a, en effet, une part relativement importante de **carbone suie**, issu de la combustion, mais aussi de **carbone organique**, de sources multiples. En outre, une proportion assez importante de **particules minérales** est recensée bien que cette période ne corresponde pas à la période importante d'épisodes de brume de sable. Cela peut s'expliquer par la **remise en suspension** de particules déposées sur la chaussée.

En revanche, de juin à octobre, période propice aux épisodes de brume de sable, les particules minérales deviennent le composé

En effet, à la **remise en suspension** de particules du sol s'ajoutent les **épisodes de brume de sable** du Sahara. Les sels de mer mais aussi, contrairement à François Pointe Couchée, le carbone suie et le carbone organique sont également présents bien que dans des proportions plus faibles que durant l'hivernage. La présence de **composés carbonés**, y compris durant la période de brume de sable, confirme l'**influence anthropique**, et en particulier du trafic, qu'il y a au niveau de la station Renéville.

- **Concentrations en métaux**

Les **métaux réglementés** (arsenic, cadmium, nickel et plomb) sont également émis par des **sources anthropiques** telles que le trafic routier. Les concentrations en métaux lourds mesurées sur la station de Renéville sont ainsi comparées aux normes environnementales existantes pour le plomb, l'arsenic, le cadmium et le nickel dans le tableau ci-après.

Tout comme à la station périurbaine de Sainte-Luce, les concentrations en métaux lourds sur la station à influence trafic de Renéville semblent plus élevées lors des jours de dépassement du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que durant les jours sans dépassement (Tableau 12).

	As	Cd	Ni	Pb
Hors jours de dépassement du seuil de 50µg/m ³	0,3 ng/m ³	0,02 ng/m ³	3.5 ng/m ³	1,05 ng/m ³
Lors de jours de dépassement du seuil de 50µg/m ³	0,6 ng/m ³	0,04 ng/m ³	4,7 ng/m ³	2 ng/m ³
Valeur limite pour la protection de la santé et valeurs cibles	6 ng/m ³	5 ng/m ³	20 ng/m ³	500 ng/m ³

Tableau 12 : Concentrations moyennes des métaux réglementés lors de jours de dépassement du seuil de 50µg/m³ et hors jours de dépassement à la station de Renéville. Valeurs limites et cibles de Pb, As, Cd et Ni.

Ces concentrations peuvent être influencées par les **épisodes de brume de sable** mais aussi par les **émissions anthropiques** de métaux lourds liées au trafic routier. Toutefois, les concentrations obtenues en métaux sont bien **inférieures aux valeurs limites et aux valeurs cibles** pour la protection de la santé.

- **Concentrations en Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)**

Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) sont des composés formés de 4 à 7 noyaux benzéniques. Plusieurs centaines de composés sont générés par la **combustion incomplète des matières fossiles** (notamment par les moteurs diesels) sous forme gazeuse ou particulaire. Ces composés chimiques sont une part du carbone organique retrouvée dans la composition des particules fines. Le HAP le plus étudié et soumis à une valeur cible à ne pas dépasser est le benzo(a)pyrène (B(a)P). En effet, ce composé est **cancérogène de catégorie 1** avéré pour l'homme (ANSES, 2018).

Conformément à la réglementation, les HAP, ont été évalués sur le site le plus

susceptible d'être impacté pendant une durée de 5 ans. Cette évaluation n'a montré **aucun dépassement des normes environnementales** pour une mesure réalisée toute l'année. Ainsi, de 2010 à 2014, la mesure a été réalisée dans une station urbaine de fond implantée dans une zone urbanisée à trafic modérée (Tableau 13). Depuis, la surveillance des HAP s'est poursuivie par **estimation objective**.

	Benzo(a)pyrène
Hors jours de dépassement	0.07 ng/m ³
Lors de jours de dépassement	0.06 ng/m ³
Valeur cible	1.00 ng/m ³

Tableau 13 : Concentrations en benzo(a)pyrène (B(a)P) mesurées au niveau d'une station urbaine de fond implantée dans une zone urbanisée à trafic modéré en 2014. La valeur cible est indiquée pour comparaison.

Les concentrations en B(a)P sont équivalentes lors de jours de dépassement du seuil de 50 µg/m³ ou durant les jours sans dépassement. Par ailleurs, les concentrations sont nettement **inférieures** à la **valeur cible**. La concentration maximale est mesurée de façon isolée le 26 mars 2014 et atteint 0.29 ng/m³. Ainsi, les normes environnementales sont respectées et le risque de dépasser la valeur cible semble faible.

VIII.2.3.b Au niveau de l'ensemble des stations

- Concentrations en Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

Les HAP sont également mesurés à la station périurbaine de Sainte Luce. Le Tableau 14 présente les concentrations moyennes lors de jours de dépassement et hors jours de dépassement en 2017.

Les concentrations en B(a)P sont équivalentes lors de jours de dépassement du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ou durant les jours sans dépassement. De plus, il est clairement visible que les concentrations sont **inférieures à la valeur cible**. Ainsi, les normes environnementales sont respectées et le risque de dépasser la valeur cible semble faible.

	Benzo(a)pyrène
Hors jours de dépassement	$0.03 \text{ ng}/\text{m}^3$
Lors de jours de dépassement	$0.02 \text{ ng}/\text{m}^3$
Valeur cible	$1.00 \text{ ng}/\text{m}^3$

Tableau 14 : Concentrations en benzo(a)pyrène (B(a)P) mesurées à la station de Sainte Luce en 2017. La valeur cible est indiquée pour comparaison.

- Concentrations en matière carbonée

Comme cela a été décrit dans la partie VIII.2.1, la matière particulaire carbonée se décompose en deux éléments qui représentent une proportion importante des PM10 :

- Le **carbone organique** (OC) qui correspond au carbone contenu dans la matière organique. Il peut être émis directement dans l'atmosphère (OC primaire), et aussi être formé par condensation ou nucléation de composés organiques volatils (OC secondaire).
- Le **carbone élémentaire** (EC) qui représente la partie réfractaire de l'aérosol carboné représentant le carbone suie. Il est mesuré en laboratoire après prélèvement sur filtre. Composé purement primaire, apparenté à du graphite pur. Il est émis lors de processus de combustion incomplète des combustibles fossiles tels que le gazole, l'essence mais aussi lors de la combustion de biomasse

Le carbone élémentaire est donc notamment un **traceur de l'activité anthropique** particulièrement celui du trafic routier. Malgré son caractère **non réglementaire**, le carbone suie suscite l'intérêt d'un point de vue sanitaire suivant les recommandations de l'ANSES. En effet, dans son rapport de 2019, l'ANSES indique que l'OMS a classé, entre autres, la matière carbonée issue du trafic comme un composé **néfaste pour la santé**. Des études citées dans le rapport de l'ANSES établissent, par exemple, un lien entre les particules de carbone suie et l'altération de la santé cardiovasculaire et la mortalité prématurée tant pour les expositions à court terme que pour les expositions à long terme. Par ailleurs, le **ratio OC/EC** peut être un **indicateur de l'origine des particules atmosphériques**. Un ratio OC/EC petit indique que le site de mesure est proche des sources d'émissions qui influencent les

PM10, et vice-versa. Ce ratio est généralement inférieur à 2 pour les sites fortement influencés par le trafic routier. Il varie entre 2 et 9 pour les sites urbains de fond, et il augmente avec la diminution de la contribution des émissions anthropiques par rapport aux émissions biogéniques, atteignant des valeurs supérieures à 10 pour les sites ruraux (VIANA et al., 2006).

Renéville sont inférieurs ou égaux à 1 ce qui correspond à un site **fortement influencé par le trafic routier** tel que celui de Renéville. Le site du Lamentin, urbain, présente des rapports OC/EC plus élevés que ceux de Renéville, révélant une influence moins importante du trafic. Néanmoins, les rapports au Lamentin sont compris entre 2 et 2.3, soient des valeurs correspondant à des sites influencés par le

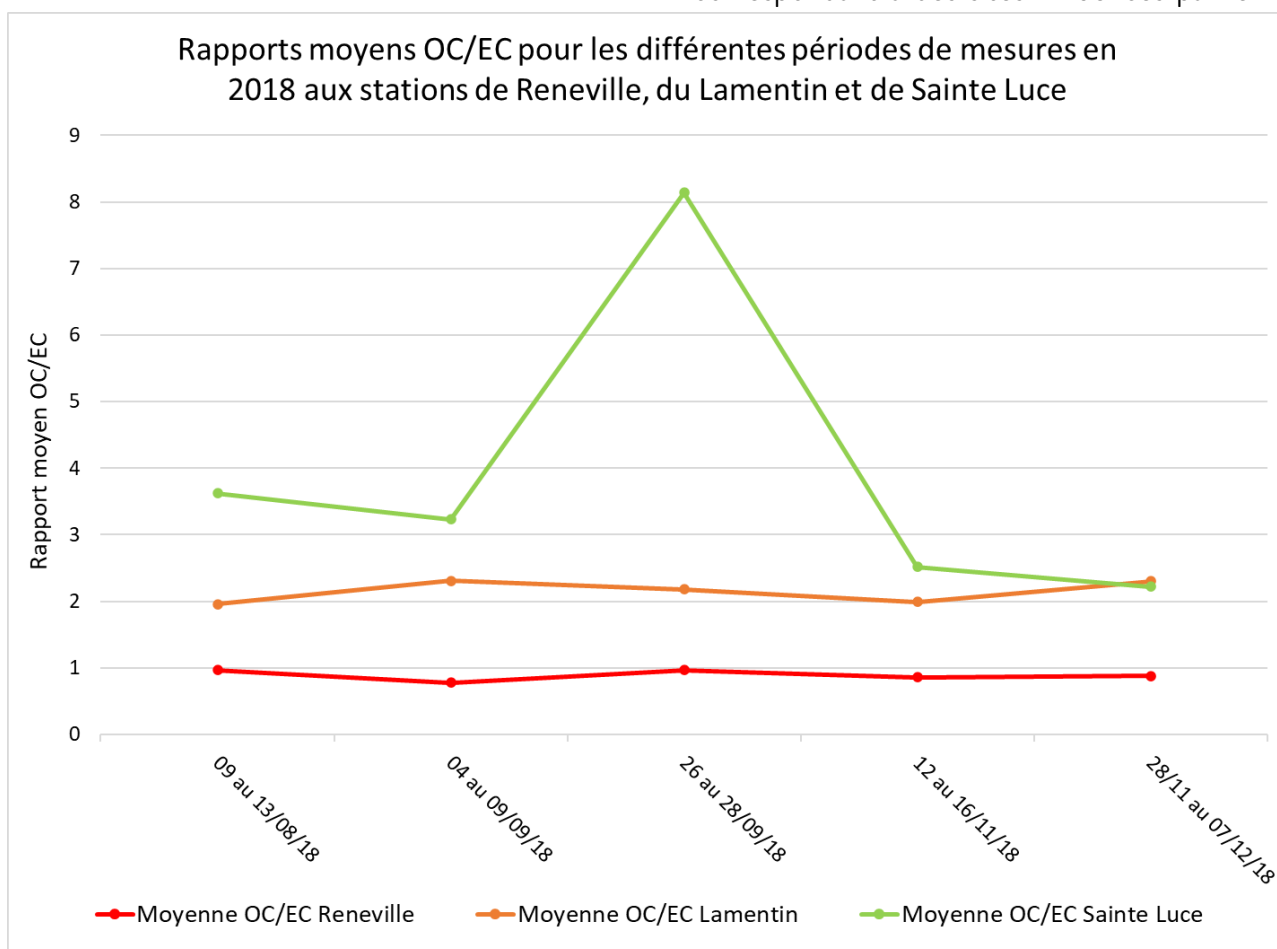


Figure 53 : Rapports moyens OC/EC pour les différentes périodes de mesures en 2018 aux stations de Renéville, du Lamentin et de Sainte-Luce.

La Figure 53 présente donc le rapport moyen OC/EC pour les différentes périodes de mesures effectuées en 2018 au niveau des stations de Renéville (trafic), du Lamentin (urbaine) et de Sainte Luce (périurbaine). La typologie des stations étudiées est cohérente avec les rapports moyens OC/EC de chaque station. Les rapports OC/EC de

trafic routier. Ce site est tout de même moins influencé par le trafic routier que celui de Renéville comme le révèle certains jours de mesures où les rapports OC/EC peuvent dépasser 3 (les données présentées sur le graphique correspondant aux rapports moyens). Pour finir, le site de Sainte Luce, périurbain, présente des rapports moyens

entre 2,2 et 8,1 avec une valeur maximale à 16,4. Certains jours, les rapports OC/EC à Sainte Luce descendent autour de 1 ou 2 suggérant une légère activité automobile. En effet, des concentrations en EC (carbone élémentaire) sont mesurées à la station de Sainte-Luce, tandis qu'à la station de François Pointe Couchée, ces concentrations sont plus faibles voire en-dessous de la limite de détection. Cela démontre un léger apport anthropique

concentrations en carbone élémentaire restent bien inférieures à celles obtenues à Renéville ou même au Lamentin. Par ailleurs, les rapports sont généralement supérieurs à 2, représentatifs d'un site **urbain de fond** et atteignent parfois des valeurs supérieures à 10 classant Sainte-Luce en site rural. Il peut également être intéressant de présenter la proportion de carbone élémentaire (EC) par rapport à la quantité totale de PM10 et leur évolution selon les

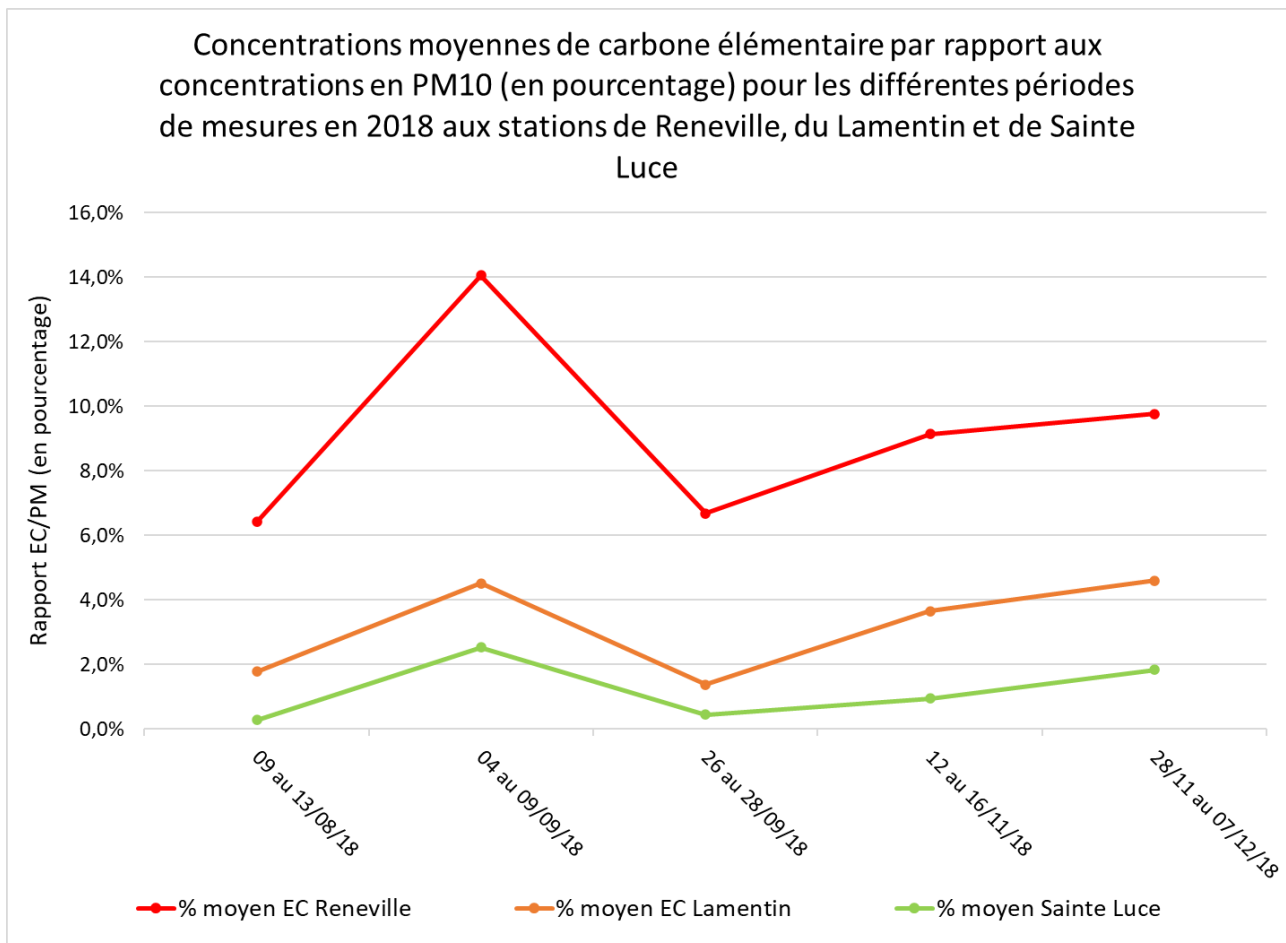



Figure 54 : Concentrations moyennes de carbone élémentaire par rapport aux concentrations en PM10 (en pourcentage) pour les différentes périodes de mesures en 2018 aux stations de Renéville, du Lamentin et de Sainte Luce.

seulement au niveau de la station de Sainte-Luce. En effet, si un apport anthropique était réalisé par les particules désertiques, cela s'observerait aussi au niveau de la station de François Pointe Couchée. Toutefois, les

périodes et selon la station étudiée (Figure 54).

Il est parfaitement visible que la proportion de carbone élémentaire dans les PM10 est plus importante au niveau de la station



urbaine à influence trafic de Renéville qu'au niveau de la station urbaine du Lamentin qui a, elle-même, une proportion de carbone élémentaire plus importante que la station périurbaine de Sainte Luce. Cela traduit effectivement l'**influence du trafic routier** sur les concentrations en PM10, en particulier des stations trafic.

Il est, par ailleurs, intéressant de noter que l'évolution temporelle est similaire entre les trois stations. En particulier, une proportion de carbone élémentaire relativement faible est observée durant le mois d'août au niveau des trois stations. Cela peut s'expliquer par une **baisse du trafic automobile** pendant la période des vacances scolaires. Au contraire, une **augmentation de la proportion de carbone élémentaire** est observée au niveau de l'ensemble des stations, début septembre, au moment de la rentrée des classes et donc d'une reprise intense du trafic routier, avant de reprendre une valeur intermédiaire à ces deux périodes particulières. Il est important de noter que l'on peut assigner ces variations aux variations du trafic routier puisqu'**aucun épisode de brume de sable** n'a été répertorié à ces dates.

En revanche, le rapport particulièrement bas mesuré durant la période du 26 au 28 septembre alors que l'activité scolaire a repris (rapport plus bas qu'en novembre et décembre), peut être lié à la présence d'une brume de sable diminuant la proportion de carbone élémentaire sur la concentration totale de PM10. En effet, des concentrations élevées sont observées au niveau de l'ensemble des stations les 26 et 28 septembre.

A noter que ces pourcentages ne sont pas plus élevés puisque les particules PM10 sont

également composées d'autres éléments que le carbone élémentaire.

Le carbone élémentaire n'étant pas réglementé, une comparaison des concentrations mesurées à la station urbaine du Lamentin a été réalisée avec d'autres stations urbaines et périurbaines du territoire français, afin d'évaluer le niveau mesuré au Lamentin (Tableau 15). Ce tableau rapporte également les populations des villes étudiées en 2018 selon l'INSEE. Les populations du 4^{ème} arrondissement de Marseille et du 13^{ème} arrondissement de Paris ont été sélectionnées puisque les stations urbaines se situent dans ces arrondissements.

La population a été choisie comme paramètre d'étude des stations urbaines puisque celui-ci influence l'**activité anthropique** et donc les **concentrations de carbone élémentaire**.

Tout d'abord, il peut être observé une **tendance à l'augmentation des concentrations** en carbone élémentaire avec une **augmentation de la population des villes** étudiées, excepté pour Nogent sur Oise. Celle-ci présente une concentration légèrement plus élevée qu'au Lamentin alors que sa population est deux fois moins importante. Il est possible que l'activité de la proche région parisienne influence la concentration mesurée à Nogent sur Oise. Néanmoins, les **concentrations** mesurées au niveau de ces différentes stations urbaines et périurbaines sont **relativement proches** alors que certaines de ces villes sont beaucoup plus peuplées que la ville du Lamentin. Par exemple, la station urbaine de Paris 13^{ème} ne présente qu'une concentration légèrement plus élevée que les autres alors

que sa population est environ 3 à 4 fois plus élevée que celles des autres villes étudiées.

Concernant les stations trafic, c'est le paramètre du **trafic moyen journalier**

Stations	Lamentin	Nogent sur Oise	Talence	Marseille Longchamp	Paris 13 ^{ème}
Concentrations en EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,01	1,1	1,2	1,6	1,7
Population des villes	40 581	20 298	42 701	49 281	180 632

Tableau 15 : Concentrations moyennes en carbone élémentaire (EC) en 2018 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) au niveau des stations urbaines ou périurbaines étudiées et population des villes sélectionnées selon l'INSEE en 2018.

Stations	Bvd Haussmann (Paris)	Kaddouzz (Marseille)	Renéville (Fort de France)	Bvd Périphérique (Paris)	Autoroute A1 (Paris)
Concentrations en EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2,4	2,4	3,3	6,6	10,9
Nombre de véhicules	27 000	66 660	72 000	181 000	216 800

Tableau 16 : Concentrations moyennes en carbone élémentaire (EC) en 2018 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) au niveau des stations trafic ou à proximité trafic étudiées et trafic moyen journalier annuel (TMJA) des sections routières les plus proches des stations trafic étudiées.

Le TMJA d'une section routière est obtenu en calculant la moyenne sur une année du nombre de véhicules circulant sur cette section tous sens confondus au cours d'une journée.

Il est observé une **concentration en carbone élémentaire qui augmente avec le TMJA**. En effet, il s'agit de stations trafic et le **carbone élémentaire** est principalement **émis par lors des processus de combustion**. Il est donc observé une concentration à Renéville légèrement plus élevée qu'à la station trafic de Marseille Kaddouzz. En effet, le TMJA au niveau de la station de Renéville est légèrement plus élevé qu'au niveau de la station Kaddouzz. Les stations du Boulevard Périphérique et de l'autoroute A1 à Paris présentent des TMJA ainsi que des

annuel (TMJA) d'une section routière proche des stations trafic étudiées qui a été comparé aux concentrations de carbone élémentaire (Tableau 16).

concentrations en carbone élémentaire plus élevés qu'à Renéville. En revanche, la station de Boulevard Haussmann présente une concentration en carbone élémentaire similaire à celle de Marseille Kaddouzz alors que son TMJA est presque 3 fois plus faible. Il est possible que la structure du Boulevard Haussmann ne permette pas une aussi bonne dispersion des polluants qu'à Marseille Kaddouzz entraînant l'accumulation de carbone élémentaire.

Par ces comparaisons, il apparaît intéressant d'approfondir nos connaissances des sources de carbone élémentaire.

VIII.2.4 Composition chimique des particules à proximité d'autres sources

VIII.2.4.a Source industrielle

Madininair assure également la surveillance des métaux réglementés dans sa Zone à risques (ZAR). La Figure 55 présente les moyennes des concentrations obtenues en métaux réglementés durant et hors des jours de dépassement depuis le début des mesures de 2016 à 2019 dans la ZAR, et donc à proximité industrielle. La figure ne présente

pas les concentrations en cadmium, celles-ci étant très faibles aussi bien durant les jours de dépassement que sans dépassement (Tableau 17).

Il peut être observé une **augmentation des concentrations** durant les jours de dépassement. Comme cela a été vu au niveau des autres stations (trafic et de fond), cette augmentation peut être liée à la **présence d'une brume de sable** dans laquelle les particules minérales la formant sont constituées naturellement de ces métaux. Un **apport anthropique** peut aussi contribuer à cette augmentation des

(ng/m ³)	As	Cd	Ni	Pb
Hors jours de dépassement	0,1	0,04	11,4	0,7
Lors de jours de dépassement	0,3	0,03	13,3	1,2
<i>Valeurs limites pour la protection de la santé et valeurs cibles</i>	6	5	20	500

Tableau 17 : Concentrations moyennes des métaux réglementés lors de jours de dépassement du seuil de 50 µg/m³ et hors jours de dépassement à proximité industrielle. Valeurs limites et cibles de Pb, As, Cd, Ni.

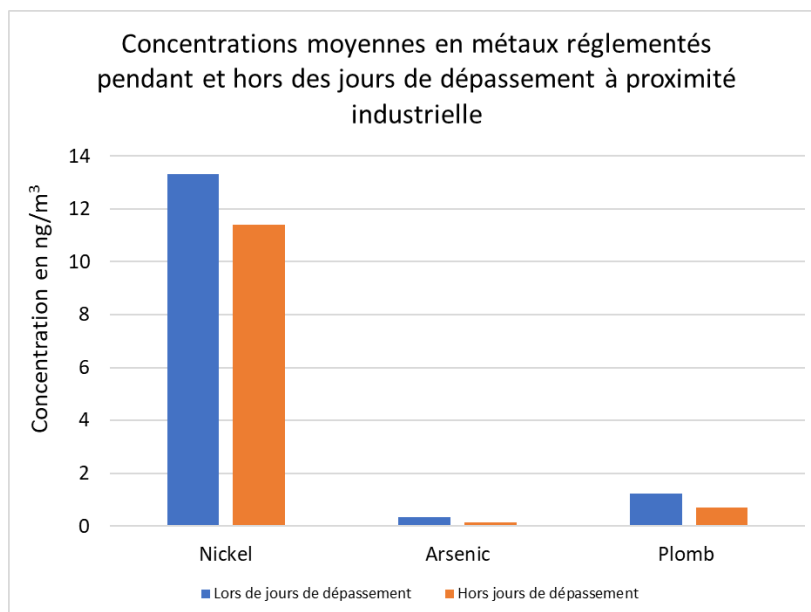



Figure 55 : Concentrations moyennes en nickel, arsenic et plomb pendant et hors des jours de dépassement à proximité industrielle.

concentrations en métaux lors des jours de dépassement.

Par ailleurs, les concentrations moyennes en nickel y compris hors jours de dépassement sont relativement élevées par rapport aux autres métaux certainement en raison de la **proximité industrielle**.

Toutefois, les concentrations moyennes et les maximas obtenus pour tous les métaux réglementés sont **inférieurs aux valeurs limites** pour la



protection de la santé et donc respectent les normes environnementales.

VIII.2.4.b Pesticides

Madininair a mesuré dans le cadre d'une étude nationale, une surveillance des pesticides dans l'air sur le site de Macouba en 2018. De juin 2018 à juin 2019, Madininair a effectué des prélèvements sur un site de la commune de Macouba, choisi pour son profil rural et arboricole. Cette surveillance s'est faite à partir d'une méthode similaire de mesure basée sur la récolte de particules sur des filtres qui sont ensuite analysés.

Les échantillons ont été envoyés à l'INERIS : 75 substances actives, présentes dans la composition de produits phytopharmaceutiques, de biocides, médicaments vétérinaires et antiparasitaires à usage humain, ont été analysées. Ces substances avaient été priorisées par l'ANSES sur la base de leurs caractéristiques de danger et de critères d'utilisation, d'émission et de persistance dans l'air. Contribuant à un échantillon national, les résultats recueillis sur le site de Macouba n'ont **pas vocation à dresser un bilan territorial représentatif de la région**. Cependant, ils permettent de compléter les connaissances et alimenter une **base régionale de résultats** (des mesures de pesticides ayant déjà été réalisées en 2012). En effet, sur ce site, **13 substances sur 75 recherchées ont été détectées** : 5 herbicides, 1 insecticide, 3 fongicides et 4 substances interdites ou non utilisées en France. Deux substances ont été quantifiées fréquemment (sur les 7 quantifiées) : deux herbicides utilisés principalement sur la canne à sucre, le maraichage et l'ananas. Parmi les substances interdites, seul le pentachlorophénol a été quantifié, les trois

autres substances interdites ont seulement été détectées : le lindane, le myrex et l'heptachlore. On soulignera, par ailleurs, l'absence de détection de cinq substances dont la chlordécone, composé peu volatil et donc peu retrouvé dans le compartiment air (comme d'ailleurs sur tous les autres sites DROM et métropole).

L'INERIS a, ainsi, exploité les données de la Martinique avec l'ensemble des territoires français pour établir un premier état des lieux des niveaux de contamination en résidus de pesticides dans l'air ambiant en France.

En outre, sur un an de mesures ponctuelles réalisées sur 16 semaines dans l'année, Madininair n'a relevé **aucune variation des concentrations** en pesticides pendant et en dehors des jours de dépassement.

Il est, cependant, important de se rappeler **qu'il n'existe pas encore de valeurs réglementaires pour les pesticides en air ambiant**.

VIII.3 Conclusions

Les particules fines en Martinique ont **différentes sources** : naturelles et anthropiques. Selon les sources, leur composition chimique diffère. Etudier leur composition chimique a donc permis, dans cette partie, d'**affiner les connaissances sur les sources** impliquées au niveau de chaque station de mesure et au moment des épisodes de dépassement des seuils réglementaires de 50 et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les sources majeures identifiées sont les suivantes :

- Les **embruns marins** constitués de sels de mer tels que les ions chlorure, potassium, magnésium, calcium ou sodium

- Les **particules minérales** (ou terrigènes) qui regroupent les **particules désertiques** originaires du Sahara et du Sahel mais également les **particules du sol et/ou de sable** de Martinique mises en suspension, composées d'aluminium, de calcium, de fer, de potassium, de magnésium, de sodium et de titane principalement
- La **matière carbonée** décomposée en **carbone organique** (de sources multiples, émis directement dans l'atmosphère ou par condensation ou nucléation de COV) et en **carbone élémentaire** (carbone suie émis lors de processus de combustion), et autres composés anthropiques
- Les **ions inorganiques secondaires** tels que les nitrates NO_3^- , les sulfates SO_4^{2-} ou l'ammonium NH_4^+ . Ils sont formés à partir de **précurseurs gazeux** (e.g. le nitrate est formé à partir de NO_x gazeux) d'origine naturelle ou anthropique.
- Les **autres composés** dont notamment les **métaux lourds** à moindre quantité. On retrouve de l'arsenic, du plomb, du nickel, du cadmium, etc.


Cette étude a permis de déterminer que quelle que soit la station d'étude (trafic, urbaine, périurbaine ou d'observation), des **particules minérales** et des **sels de mer** sont présents dans des concentrations plus ou moins élevées suivant la période de l'année. En effet, si les concentrations en sel marins

restent relativement constantes, la concentration en particules minérales augmentent lors des **dépassements du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$** et se caractérisent par la contribution des épisodes de **brume de sable**.

Ainsi, il est constaté une augmentation de la part des particules minérales (regroupant les particules désertiques mais également les particules terrigènes locales) lors des épisodes de brume de sable, sur l'ensemble des stations notamment lors des épisodes de brume de juillet à octobre 2018. Il n'a pas pu être démontré un dépôt progressif des particules constituant les brumes de sable entre la côte Atlantique et la côte Caraïbe mais il a été mis en évidence une **remise en suspension** des particules terrigènes à la station à influence trafic de Renéville.

Une différence se fait au niveau des stations du Lamentin et surtout de Renéville au niveau desquelles, les traceurs liés au **trafic automobile** peuvent également être observés, notamment sur les mois de circulation dense, en dehors des périodes de vacances scolaires. Ainsi, sur ces stations, il est observé l'ajout de la contribution anthropique locale, notamment celle du trafic routier. Sur ces stations, l'influence des **brumes de sable** mais aussi l'influence **anthropique** contribuent donc aux **dépassements des seuils réglementaires**.

Lors d'épisodes de brume de sable identifiés, il a pu être observé que les éléments chimiques constituant la particule minérale (aluminium, fer, calcium, potassium, magnésium, titane, etc.) augmentaient sur l'ensemble des stations de mesure (d'observation, périurbaine, urbain ou à influence trafic).



Ainsi, la **brume de sable** se compose majoritairement de **particules minérales**.

Une augmentation moindre peut être observée au niveau d'éléments tels que des particules secondaires (NO_3^- ; SO_4^{2-}) formés à partir de précurseurs gazeux (d'origine naturelle ou anthropique) et transportées par ou avec les particules désertiques. Ces dernières peuvent également **participer à la formation de ces particules secondaires** par réaction avec les précurseurs gazeux. Il a aussi pu être noté une augmentation des concentrations en **métaux réglementés** (arsenic, cadmium, nickel et plomb) ou autres (baryum, manganèse, chrome, zinc, cuivre, etc.) lors des jours de dépassement du seuil de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette augmentation, au niveau des stations de fond (François Pointe Couchée et de Sainte Luce), peut s'expliquer par la **présence naturelle** de ces éléments dans la brume de sable mais possiblement aussi par un **apport anthropique** de ces éléments véhiculés par la brume de sable. Toutefois les concentrations restent bien **en dessous des normes environnementales** pour les métaux lourds réglementés dans l'environnement et à de **faibles concentrations** pour les autres. L'origine d'une telle augmentation observée également à la station de Renéville peut avoir des sources multiples : naturelle, influencée par l'arrivée d'une **brume de sable**, ou anthropique, influencée par un **trafic important**. Une augmentation similaire des concentrations en métaux est observée durant les jours de dépassement à proximité industrielle certainement liée à l'apport par une brume de sable. Tandis que les concentrations mesurées hors jours de dépassement sont liées à la **proximité d'une industrie** et ses activités.


Les concentrations en benzo(a)pyrène sont, quant à elles, similaires lors des jours avec ou

sans dépassement du seuil réglementaire de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$. Son origine **anthropique** engendre, néanmoins, des concentrations plus élevées en **milieu trafic** qu'en situation de fond périurbaine. Toutefois, le benzo(a)pyrène mesuré pendant plus de 6 ans sur un site urbain proche d'un trafic dense, n'a révélé **aucun risque de dépassement** de la norme environnementale.

Enfin, il n'a été relevé aucune variation des concentrations en pesticides pendant et en dehors des jours de dépassement. Cette campagne ayant été effectuée sur un an à partir de mesures ponctuelles réalisées sur 16 semaines au niveau d'un site rural, il pourra être envisagé d'approfondir le sujet à travers une étude durant des périodes avec et sans influence de brumes de sable ou de dépassement ainsi que sur des sites d'influences diverses.

Concernant les stations urbaines et à influence trafic, ces stations enregistrent une concentration en particules fines PM10 sur les mêmes périodes de mesure plus élevées que sur les stations de fond d'observation ou périurbaine. Sur ces stations, outre les sels marins et les particules minérales qui augmentent lors des dépassements des seuils de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$, il est observé une **contribution anthropique** importante notamment par la mesure du carbone suie. En effet, ce composé issu de la combustion des matières fossiles (fuel, carburants, etc.) est un bon marqueur de la **pollution automobile**.

Le rapport OC/EC (Ratio entre quantité de Carbone Organique et quantité de Carbone Élémentaire) ainsi que les concentrations en carbone élémentaire se sont révélés des traceurs de trafic automobile efficaces. En



outre, il a également pu être observé une **variation temporelle** de ces traceurs avec une diminution durant les périodes de faibles trafics telles que les vacances scolaires.

Pour finir, les concentrations en carbone élémentaire ont pu être comparées à celles mesurées en d'autres sites du territoire français. Les concentrations mesurées à la station urbaine du Lamentin sont relativement **similaires** à celles mesurées au niveau d'autres sites urbains et voire plus faibles qu'au niveau de villes plus peuplées. Les concentrations relevées à la station trafic de Renéville sont **cohérentes** avec le trafic moyen journalier annuel (TMJA) qui augmente avec la concentration en carbone élémentaire.

Ces comparaisons ont permis de faire apparaître que de nombreuses inconnues persistent dans la connaissance des sources de carbone élémentaire en Martinique et qu'il serait donc nécessaire de les étudier plus en détail.



IX. Conclusion

En tant qu'observatoire régional de surveillance de la qualité de l'air en Martinique, Madinair assure la **surveillance de la qualité de l'air** au regard des différents polluants réglementés, dont les particules fines (PM10 et PM2,5). Afin d'évaluer la conformité aux seuils environnementaux Madinair a dimensionné, sur l'ensemble du territoire, un réseau de surveillance de la qualité de l'air basé sur des méthodes de mesures et analytiques normées et homologuées suivant les **exigences européennes**.

De manière récurrente, **Madinair enregistre depuis 2001 des dépassements des valeurs seuils en particules fines** (notamment PM10) auxquels la population locale, est donc exposée, ce qui soulève de nombreuses interrogations en termes d'origines, d'impacts sanitaires et d'actions.

La composition des particules en suspension mesurées sur le territoire est complexe à appréhender. En effet, celle-ci diffère selon les origines qui sont diverses, à la fois provenant de **sources d'émissions locales, naturelles** (embruns marins, particules minérales ou biogéniques) ou **anthropiques** (industrie, trafic routier, énergie ou encore agriculture) mais également de sources **transfrontalières**, telles que les particules désertiques, très souvent incriminées dans le dépassement des seuils entre avril et septembre.


Dans ce dossier, Madinair a donc pu, dans un premier temps, déterminer que les concentrations moyennes annuelles en PM10 au niveau de l'ensemble des **stations**

urbaines de fond sont **globalement stables** et systématiquement **en-dessous de la valeur limite annuelle depuis 2001**. La concentration moyenne annuelle la plus faible est atteinte en 2019 permettant de rester en-dessous de l'objectif de qualité atteint depuis 2016 (et ponctuellement lors d'années précédentes).

Pour les concentrations moyennes annuelles en PM10 au niveau des stations urbaines à influence **trafic**, des variations existent d'une année sur l'autre et des **dépassements de la valeur limite annuelle** en particules PM10 ont été enregistrés en 2010, 2011, 2012 et 2016 et **de l'objectif de qualité** en 2001, 2002, 2008 et tous les ans à partir de 2010.

Cependant, il est important de retenir que l'évolution du nombre de stations mesurant les PM10 peut impacter la moyenne annuelle globale. C'est notamment le cas de la moyenne annuelle des stations trafic qui augmente en 2010 en raison de l'arrêt des mesures à la station de Dillon, qui n'était plus représentative de l'influence trafic de la zone, et à la mise en place de la station de Renéville, correspondant mieux aux critères d'implantation d'une station urbaine à influence trafic et présentant des concentrations plus élevées. A noter également un manque de données sur les concentrations en particules fines PM10 en 2019 et 2020 en milieu trafic.

Au-delà des valeurs limites annuelles, la réglementation définit des seuils réglementaires journaliers pour les PM10 : le **seuil d'information et de recommandation** de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière et le **seuil d'alerte** de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Des dépassements du seuil de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sont



observés, en moyenne depuis 2001, 13% de l'année au niveau des stations de fond et 16% au niveau de l'ensemble des stations. Par ailleurs, **le seuil de 50 µg/m³ est donc dépassé plus de 35 jours par an de nombreuses années.** Il est donc important d'étudier précisément la distribution, la variabilité et la composition de ces dépassements.

Au niveau de l'évolution annuelle des dépassements de ces seuils, il est difficile d'observer une tendance à la hausse ou à la baisse en raison de la présence de pics certaines années qui vont venir masquer une potentielle tendance.

Néanmoins, il est observé un nombre de jours de dépassement plus important au niveau de l'ensemble des stations qu'au niveau des stations de fond illustrant l'influence des facteurs anthropiques localement dans ces dépassements.

Au niveau de l'évolution mensuelle des dépassements des seuils réglementaires, l'analyse confirme **l'influence du trafic automobile, facteur anthropique, sur le nombre de dépassements observés.**

Il est, également, observé des dépassements supérieurs à la moyenne **de mai à septembre**, avec un maximum atteint en juin suggérant une corrélation entre la période théorique d'occurrence d'épisodes de **brume de sable** dans les Antilles et l'augmentation des concentrations en PM10 en Martinique.

En effet, l'apport transfrontalier de particules désertiques issues des « hot spots » de l'Afrique de l'Ouest est fortement lié à la position de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) qui atteint sa localisation la plus septentrionale au mois de


juin. A l'inverse, le nombre minimum de dépassements des seuils est observé pour les mois de décembre et janvier, période théorique où la ZCIT se trouve sur l'Amérique du Sud.

La durée de ces épisodes de dépassement des seuils a également été étudiée afin de pouvoir déterminer s'il s'agit essentiellement d'épisodes brefs ou de plusieurs jours. Il faut, tout d'abord, noter que la **durée des épisodes est variable d'une année sur l'autre** aussi bien pour les stations de fond que pour les stations trafic. Il est donc difficile de dresser une tendance depuis 2001.

Cependant, en moyenne depuis 2001, il a été démontré, qu'au niveau des stations de fond, environ **50% des épisodes** sont d'une durée de **1 jour** et 26% d'une durée de 2 jours. Les épisodes de **5 jours et plus** représentent **8%** des jours de dépassements et peuvent être souvent attribués à des épisodes de **brume de sable** puisqu'ils sont observés généralement sur l'ensemble des stations.

Enfin, la gamme de concentrations des dépassements du seuil de 50 µg/m³ a été explorée afin de déterminer la proportion des dépassements dont les concentrations sont fortement au-dessus de ce seuil. Tout comme la durée des épisodes, il est difficile de dresser une tendance d'évolution depuis 2001.

En moyenne, pour les stations de fond comme pour les stations de proximité automobile, **80% des jours de dépassement** ont une concentration **entre 50 et 80 µg/m³** soit au-dessus du seuil d'information et de recommandation mais en-dessous du seuil d'alerte.



Depuis 2001, **des concentrations entre 80 et 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ représentent 10% des jours de dépassement** et des concentrations supérieures **entre 100 et 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ représentent 5% des jours de dépassement.**

Il est important de noter que l'**épisode intense et unique** mesuré en juin 2020 a fait monter la proportion de jours de dépassement de concentrations supérieures à 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à la proportion moyenne obtenue sur les 18 premières années de mesures. Des épisodes d'une telle intensité peuvent donc influencer grandement la distribution des concentrations des jours de dépassement. Néanmoins, un tel épisode n'avait jamais été mesuré auparavant, il est donc important de surveiller de près si un tel évènement venait à se reproduire.

Les données issues des mesures de spéciations chimiques réalisées par le LCSQA sur 321 filtres ainsi que l'apport de la synthèse bibliographique ont permis de mieux comprendre la **composition des particules atmosphériques** en Martinique. La caractérisation chimique des particules atmosphériques est un réel enjeu, puisque si l'impact sur la santé d'une particule est avant tout fonction de sa taille, des effets plus ou moins délétères s'ajoutent en fonction de leur composition. Dans un premier temps, il faut donc retenir que plus une particule est fine, plus elle pénètre profondément dans les voies respiratoires, puis dans le sang, et donc plus elle est dangereuse.

Une particule désertique est composée d'**éléments minéraux** constitutifs de la croûte terrestre supérieure, présentant donc une composition moins nocive en comparaison aux particules fines carbonées associées à un mélange complexe


d'**hydrocarbures** émises par le brûlage de biomasse ou encore le trafic routier. Si les liens entre particules fines, toutes origines confondues, et développement de maladies respiratoires, cardiovasculaires, de méningites ou encore de tuberculoses ont été démontrés de nombreuses fois, le lien entre occurrence de brumes de sable et prévalence de ces mêmes maladies est moins connu.

A l'issue des différentes études menées, il a pu être noté, qu'à l'échelle de la Martinique, les particules PM10 sont composées majoritairement de **particules minérales**, de **sels marins** et, dans une moindre mesure de **particules anthropiques**.

Sur la station à influence trafic, il est retrouvé de la matière carbonée principalement issue du trafic automobile. Durant les jours de dépassement, les composés présents dans les particules minérales, dont les particules désertiques, deviennent les composés majoritaires. Mais une part de composés carbonés peut rester importante également au niveau des stations les plus sensibles à l'influence du trafic automobile.

Par ailleurs, Madininair n'enregistre **aucun dépassement des normes** pour les composés réglementés dans l'air, à savoir l'arsenic, le cadmium, le nickel, le plomb et le benzo(a)pyrène. Et ce bien que les concentrations en métaux augmentent lors des jours de dépassement liés à la présence d'une brume de sable ou d'une augmentation des facteurs anthropiques.

L'analyse des matières carbonées utilisées comme **traceurs de l'activité anthropique** et, en particulier, du trafic routier, a montré des résultats intéressants avec des



concentrations plus élevées en carbone élémentaire au niveau des stations de proximité automobile ainsi qu'une variation temporelle. Par ailleurs, les concentrations relevées au niveau d'une station trafic sont **cohérentes d'une part** avec l'augmentation du trafic moyen journalier annuel (TMJA) et donc de la concentration en carbone élémentaire et **d'autre part** avec les valeurs mesurées sur d'autres sites du territoire français.

Actuellement, le carbone élémentaire n'est pas soumis à des normes environnementales. Toutefois, ce composé préoccupe les organismes sanitaires. Ainsi, l'ANSES a conclu dans un rapport d'expertise (2019) que **la survenue d'effets sur la santé respiratoire ou cardiovasculaire mais aussi des hospitalisations et des mortalités toutes causes chez l'Homme** peuvent être associées à des expositions aux matières carbonées tant sur le long terme que sur le court terme. Le rapport suggère aussi de possibles effets à long terme des particules de carbone suie sur **la santé périnatale et la santé neurologique, en particulier chez l'enfant.**


Dans la mesure où il est démontré que la **composante anthropique** joue un rôle non négligeable dans les évolutions de concentrations en particules sur le territoire et **contribuent aux dépassements des seuils réglementaires** de 50 et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, il peut être envisagé des actions pour **abaisser la quantité de particules fines émises localement et améliorer la qualité de l'air ambiant.** Ces actions peuvent notamment être orientées en fonction de la récurrence des pics de pollution. Pour cela, une amélioration des connaissances sur la

contribution des sources en particules lors des pics de pollution est à envisager.

Dans ce contexte et en accord avec les stratégies nationales de surveillance de la qualité de l'air, la mise en place d'un aethalomètre AE33 pour réaliser le **suivi en continu du Black Carbon** à l'abord du trafic constitue une des perspectives de Madinair. Ces mesures permettront de surveiller l'impact du trafic routier sur l'exposition de la population locale et **améliorer la connaissance de la contribution de l'apport anthropique** sur les pics de pollution.

En parallèle, Madinair souhaite également travailler à l'amélioration des connaissances sur les **particules ultrafines**, objectif clairement affiché aujourd'hui par les acteurs de la santé et de l'environnement et s'inscrivant dans les **enjeux nationaux** de surveillance de l'air.

Enfin, après analyse, il apparaît que les **brumes de sable** soient un élément majeur dans les **dépassements des seuils** réglementaires de 50 et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mais également responsables des concentrations très élevées (supérieures à 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière) en PM10. Il faut retenir qu'elles sont conditionnées par la circulation atmosphérique qui caractérise le mouvement à l'échelle planétaire des différentes masses d'air. Ainsi, si l'homme peut être incriminé dans l'**intensification** des processus de désertification et, donc, dans l'augmentation des émissions de particules désertiques, il s'agit avant tout d'un **phénomène global naturel** impossible à réguler. Toutefois, l'influence anthropique locale participe fortement à la **remise en suspension** de ces particules dans l'air. Ainsi, maîtriser et limiter l'activité anthropique permettront de **réduire l'exposition des**




populations urbaines aux dépassements liés à ces particules terrigènes locales et désertiques.





X. Références bibliographiques


- Abouchami, W., NÄTHE, K., KUMAR, A., GALER, S. J. G., JOCHUM, K. P., WILLIAMS, E., ... ANDRAE, M. O. (2013). Geochemical and isotopic characterization of the Bodélé Depression dust source and implications for transatlantic dust transport to the Amazon Basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 380, 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.08.028>
- ACKERMAN, A. S., TOON, O. S., STEVENS, D. E., HEYMSFIELD, A. J., RAMANATAHN, V. and WELTON, E. J., (2000) - Reduction of tropical cloudiness by soot. *Science*. Vol. 288, pp. 1042-1047.
- AIR PARIF (2018) - Bilan de la qualité de l'air Année 2018. Consulté à l'adresse http://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/bilan-2018.pdf
- ALVES, C., VICENTE, A., MONTEIRO, C., GONÇALVES, C., EVTYUGINA, M., PIO, C., (2011a) - Emission of trace gases and organic components in smoke particles from a wildfire in a mixed-evergreen forest in Portugal. *Sci. Total. Environ.* 409, 1466–1475.
- ALLARD P., AIUPPA A., LOYER H., CARROT F., GAUDRY A., PINTE G., MICHEL A., DONGARRA G, (2000) - Acid gas and metal emission rates during long-lived basalt degassing at Stromboli Volcano. *Geophys Rec. Lett.* 27, 1207-1210.
- AL-MOMANI, I. F., MOMANI, K. A., JARADAT, Q. M., MASSADEH, A. M., YOUSEF, Y. A., & ALOMARY, A. A. (2007). Atmospheric deposition of major and trace elements in Amman, Jordan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1–3), 209–218. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9676-4>
- ANSES (2020) – Campagne nationale exploratoire des pesticides dans l'air ambiant, Premières interprétations sanitaires. Rapport d'appui scientifique et technique révisé, Octobre 2020.
- ANSES (2019) - Particules de l'air ambiant extérieur, Effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie, Rapport d'expertise collective, Edition Scientifique.494 p.
- ANSES (2018) - NOTE d'appui scientifique et technique de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relative à l'identification de nouveaux procédés à inscrire à l'arrêté du 5 janvier 1993 fixant la liste des substances, préparations et procédés cancérogènes : Analyse du caractère cancérogène de quatre procédés identifiés par la Direction générale du travail en vue d'une inclusion dans l'arrêté de 1993 fixant la liste des substances, préparations et procédés cancérogènes. Appui scientifique et technique de l'Anses Demande n° 2017-SA-0237.32p.


- 
- Arrêté du 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant – (2021) <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043388197>
 - Arrêté du 16 juillet 2020 relatif à l'indice de la qualité de l'air ambiant – (2020) https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf?id=Qj4oU_ZmV7cVzgR0RFst3oOIURU_fHHytH0XV8CIOKk=
 - ASSAMOI A., (2011) – Emissions anthropiques d'aérosols carbonés en Afrique en 2005 et en 2030 : élaboration d'inventaires et évaluation. Thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'université de Toulouse, Physique-Chimie de l'Atmosphère, 259p.
 - ATMO GRAND EST. (s. d.). *Mes atmo grand est annuel poll princ.* Consulté le 11 avril 2020, à l'adresse <https://data-atmograndest.opendata.arcgis.com/datasets/mes-atmo-grand-est-annuel-poll-princ?geometry=10.631%2C46.166%2C22.745%2C51.235&selectedAttribute=influence>
 - ATMO Hauts de France (2019) – Rapport d'étude : Caractérisation des particules PM10 dans la région Hauts-de-France. https://www.atmo-hdf.fr/joomlatools-files/docman-files/Rapport_et_synthese_etudes/Rapport_CARA_2018_VF.pdf
 - ATMO Nouvelle Aquitaine (2019) – Les particules. Bilan annuel 2018. https://www.atmo-nouvelleaquitaine.org/sites/aaq/files/atoms/files/rapportatmona_rd_int_19_010_puf_verseionfinal_2019-07-23.pdf
 - ATMO OCCITANIE. *Mesure annuelle Région Occitanie Polluants Principaux.* Consulté le 16 avril 2020, à l'adresse http://data-atmo-occitanie.opendata.arcgis.com/datasets/e0f26f918c504608b10d128f65ce0efc_0?geometry=-6.005%2C42.088%2C10.683%2C44.877
 - ATMO SUD. (2018a) - Black Carbon - Bilan des mesures de l'année 2018 p23. Consulté à l'adresse https://www.atmosud.org/sites/paca/files/atoms/files/191205_atmosud_rapport_bc_2018.pdf
 - ATMO SUD. (2018b) - *Mesures annuelles des polluants principaux en région Sud.* Consulté le 16 avril 2020, à l'adresse <https://trouver.datasud.fr/dataset/mesures-annuelles-des-polluants-principaux-en-region-sud>
 - BEGUE N., (2012) – Evolution des propriétés physico-chimiques des aérosols désertiques issus de l'outflow africain, Thèse de doctorat pour le grade de docteur de l'Université de la Réunion, Ecole doctorale sciences, technologie et sante, Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (LACy, UMR 8105), 255p.

- 
- BESSAGNET B., MELEUX F., FAVEZ O., BEAUCHAMP M., COLETTE A., COUVIDAT F., ROUIL L., (2016) – Concentration en particules dans l’atmosphère et l’apport de la modélisation. Pollution atmosphérique, numéro spécial, septembre 2016.
 - BLATEAU A., YOUSOUF A M., CORSO M., PASCAL M., GANDAR S., LEDRANS M., Cellule de l’InVS en Région Antilles Guyane, Fort de France, Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique, Rennes, Institut de Veille Sanitaire, Saint Maurice, Madininair, Fort de France (2012b) - Pollution atmosphérique urbaine en Martinique : première évaluation d’impact sanitaire sur l’agglomération foyalaïse pour la période 2003-2008. Bulletin de veille sanitaire, N°3/Mars 2012, Air et santé : quelques aspects de la problématique en Martinique. 28p.
 - BLATEAU A., BOUOPDA D., LE TERTRE A., GANDAR S., QUÉNEL P., Cellule de l’InVS en Région Antilles Guyane, Fort de France, Centre Hospitalier Hôtel Dieu, Pont l’Abbé, institut de Veille Sanitaire, Saint Maurice, Madininair, Fort de France, Institut Pasteur de la Guyane, Cayenne (2012b) - Effets sanitaires des brumes de sable désertique à la Martinique, 2001-2006. Bulletin de veille sanitaire, N°3/Mars 2012, Air et santé : quelques aspects de la problématique en Martinique. 28p.
 - BOLAND J., KOOMEN I., VAN LIDTH DE JEUDE J., OUDEJANS J., (2004) - Les pesticides : composition, utilisation et risques. Fondation Agrosmissa.
 - BOZLAKER A., PROSPERO JM., PRICE J., SHANKARARAMAN C., (2018) - Linking Barbados mineral dust aerosols to North African sources using elemental composition and radiogenic Sr, Nd, and Pb isotope signatures. Journal of Geophysical research: Atmospheres. 17p.
 - BRISTOW, C. S., HUDSON-EDWARDS, K. A., & CHAPPELL, A. (2010). Fertilizing the Amazon and equatorial Atlantic with West African dust: African Fertilizer for Amazon and Atlantic. Geophysical Research Letters, 37(14), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2010GL043486>
 - BROOK RD et al. (2010) - Particulate matter air pollution and cardiovascular disease, an update to the scientific statement from the American Heart Association. Circulation 2010; 121: 2331-78.
 - Bulletin de Veille Sanitaire (2012) – Air et santé : quelques aspects de la problématique en Martinique.
 - CALABRI, G. and CISELA, W. M., (1992) - Global wildland fire statistics. FO Misc/92/4, FAO, Rome, 48 p
 - CALVO A. I., ALVES C., CASTRO A., PONT V., Vicente A.M, FRAILE R., (2013) – Research on aerosol sources and chemical composition: Past, current, emerging issues, 28 p.

- 
- CHIAPELLO, I., BERGAMETTO, G., CHATENET, B., BOUSQUET, P., DULAC, F., & SOARES, E. S. (1997). Origins of African dust transported over the northeastern tropical Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D12), 13701–13709. <https://doi.org/10.1029/97JD00259>
 - CONTINI, D., COSTABILE F. (2020). Does air pollution influence COVID-19 outbreaks ? *Atmosphere* 2020, 11, 377 ; doi:10.3390/atmos11040377
 - DEFLORIO, M.J., GOODWIN, I.D., CAYAN, D.R. et al. Interannual modulation of subtropical Atlantic boreal summer dust variability by ENSO. *Clim Dyn* 46, 585–599 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2600-7>
 - DELFINO, R.J., BRUMMEL, S., WU, J., STERN, H., OSTRO, B., LIPSETT, M., WINER, A., STREET, D.H., ZHANG, TJOA, T. and GILLEN D.L., (2008) - The relationship of respiratory and cardiovascular hospital admissions to the southern California wildfires of 2003. *Occup Environ Med*. doi: 10.1136/oem.2008.041376.
 - DIRECTIVE 2008/50/CE DU PARLEMENT EUROPEEN ET DU CONSEIL du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe – (2008) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0050-20150918&from=PL>
 - DIRECTIVE 2004/107/CE DU PARLEMENT EUROPEEN ET DU CONSEIL du 15 décembre 2004 concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant – (2004) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0107&from=FR>
 - ENGELSTAEDTER S., I. TEGEN, AND R. WASHINGTON (2006) - North African dust emissions and transport, *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 73–100.
 - EUPHRASIE-CLOTILDE L., (2018) - Climatologie du transport des aérosols désertiques au-dessus de l'atlantique vers la région Caraïbe, Thèse de doctorat en Science de l'Univers, Faculté des Sciences Exactes et Naturelles, Ecoles doctorale pluridisciplinaire, Université des Antilles, pôle Guadeloupe, 213p.
 - FAVEZ O., AUJAY R., ALLEMAN L., (2020) – Caractérisation chimique et étude de source des particules au cours de l'année 2018, Laboratoire Centrale de Surveillance de la Qualité de l'Air, 50p.
 - FRANCIS D., FONSECA R., NELLI N., CUESTA J., WESTON M., EVAN A., TEMIMI M. (2020) – The Atmospheric drivers of the major saharan dust storm in June 2020. Doi : 10.1002/2020GL090102.


- 
- GHIO A.J., (2014) - Particle exposures and infections, DOI 10.1007/s15010-014-0592-6. 9p
 - GINOUX, P., GARBUZOV, D., & Hsu, N. C. (2010). Identification of anthropogenic and natural dust sources using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Deep Blue level 2 data. *Journal of Geophysical Research*, 115(D5). <https://doi.org/10.1029/2009JD012398>
 - GINOUX P., M. CHIN, I. TEGEN, J. PROSPERO, B. HOLBEN, O. DUBOVIK, and S. J. LIN (2001) - Global simulation of dust in the atmosphere: Model description and assessment, *Journal of Geophysical Research*, 106, 20,255–20,273,
 - GORBUNOV, B. Aerosol Particles Laden with Viruses That Cause COVID-19 Travel Over 30m Distance. *Preprints* 2020, 2020040546 (doi: 10.20944/preprints202004.0546.v2).
 - GOUDIE A.S (2013) – Desert dust and human health disorders. *Environment International* 63 (2014) 101-113. 13p.
 - GOUDIE S.A, (2009) - Dust storms: Recent developments, *Journal of Environmental Management*, 90, 89-94.
 - GOUDIE A.S., and MIDDLETON N.J., (2001) - Saharan dust storms: nature and consequences, *Earth-Science Reviews*, 56 (1-4), 179-204.
 - GRIFFIN DW., (2007) – Atmospheric movement of microorganisms in clouds of desert dust and implications for human health. *Clin Microbiol Rev*, 20 (3) : 459-77.
 - GRIFFIN D.W., GARRISON V.H., HERMAN J.R. and SHINN E.A.: (2001), African desert dust in the Caribbean atmosphere: microbiology and public health. *Aerobiologia* 17 (3), 203–213.
 - GUTH J., (2015) - Modélisation des aérosols à l'aide du modèle de chimie-transport MOCAGE : application à la qualité de l'air dans le bassin méditerranéen, Thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'Université de Toulouse 243p.
 - GYAN K, HENRYW, LACAILLE S, LALOO A, LAMSEE-EBANKS C, MCKAY S, et al. (2005) - African dust clouds are associated with increased paediatric asthma accident and emergency admissions on the Caribbean island of Trinidad. *Int J Biometeorol* 2005; 49 :371–6.
 - HAMBLIN K., and CHRISTIANSEN H., (2001) - *Earth's Dynamic Systems*, chapitre 16, Eolian system, Tenth editions.


- 
- HANSEN, J., SATO, M. and RUEDY, R., **(1997)** - Radiative forcing and climate response. Journal of Geophysical Research. Vol 102, pp. 6831-6864
 - HERNANDEZ F., HERNANEZ-ARMAS J., CTALAN A., FERNANDEZ – ALDECOA JC, KARLSSON L., **(2005)** – Gross alpha, gross beta activities and gamma emitting radionuclides composition of airborne particulates samples in an oceanic island. Atmospheric Environment 39: 4057-4066.
 - HERNANDEZ F., ALONSO-PEREZ S., HERNANDEZ – ARMAS J., CUEVAS E., KARLSSON L., ROMERO-CAMPOS PM. **(2005)** – Influence of major African dust intrusions on the 137 Cs and 40K activities in the lower atmosphere at the island of Tenerife. Atmospheric Environment 39: 4111-4118.,
 - HJORTENKRANS, D.S.T., BERGBÄCK, B.G., HÄGGERUD, A.V., **(2007)** - Metal emissions from brake linings and tires: case studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005. Environ. Sci. Technol. 41, 5224–5230.
 - IAS, Italian Aerosol Society **(2020)** - Informativa sulla relazione tra inquinamento atmosferico e diffusione del COVID-19.
 - INERIS (**consulté en juillet 2020**) – CHIMERE et MOCAGE, deux logiciels de Chimie - Transport <https://www.inerismag.net/dossier/detail/chimere-et-mocage/>
 - INSEE **(2019)** -TEF - Régions Départements. Consulté à l'adresse <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3676564?sommaire=3696937#consulter>
 - INSEE. **(2019)** -TEF - Villes et Communes de France. Consulté à l'adresse <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3676564?sommaire=3696937#consulter>
 - ISRAELEVICH P.L., LEVIN, Z., JOSEPH, J.H and GANOR, E **(2002)** - Desert aerosol transport in the Mediterranean region as inferred from the TOMS aerosol index, J. Geophys. Res., 107(D21), 4572, doi: 10.1029/2001JD002011.
 - JANHÄLL, S., ANDREAE, M.O., PÖSCHL, U., **(2010)** - Biomass burning aerosol emissions from vegetation fires: particle number and mass emission factors and size distributions. Atmos. Chem. Phys. 10, 1427–1439.
 - JUNKER C., LIOUSSE C., **(2008)** - A global emission inventory of carbonaceous aerosol from historic records of fossil fuel and biofuel consumption for the period 1860-1997. Atmospheric Chemistry Physics, 8 pp. 1-13.
 - KARLSSON L., HERNANDEZ F., RODRIGUEZ S., LOPEZ-PEREZ M., HERNANDEZ-ARMAS J., ALONSO-PEREZ S., CUEVA E., **(2008)** – Using 137 Cs and 40K to identify





natural Saharan dust contribution to PM10 concentrations and air quality impairment in the Canary island. *Atmospheric Environment*, 42: 7034-7042.


- KLAVER, A., et al. (2011) - Physico-chemical and optical properties of sahelian and saharan mineral dust: in situ measurements during the gerbils' campaign, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(658), 1193–1210.
- LCSQA (2017) – Conception, implantation et suivi des stations françaises de surveillance de la qualité de l'air (https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/lcsqa2016-guide_stations_surveillance_qa.pdf).
- LE QUILLEUC. (2019). Caractérisation élémentaire et isotopique (Sr et Nd) des dépôts d'aérosols sahariens sur la marge sénégalaise. Implications pour la signature géochimique des sources. Thèse de doctorat en sciences de l'atmosphère, Université de Lille, Villeneuve d'Ascq, France.
- LINAK, W.P., YOO, J.I., WASSON, S.J., ZHU, W., WENDT, J.O., HUGGINS, F.E., CHEN, Y., SHAH, N., HUFFMAN, G.P., GILMOUR, M.I., (2007) - Ultrafine ash aerosols from coal combustion: characterization and health effects. *Proc. Combust. Inst.* 31, 1929–1937.
- LIOUSSE, C., PENNER, J. E., CHUANG, C., WALTON, J. J., EDDLEMAN, H. and CACHIER, H., (1996) - A global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols, *J. Geophys. Res.*, 101(D14), 432.
- LIU, G., NIU, Z., VAN NIEKERK, D., XUE, J., ZHENG, L., (2008) - Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from coal combustion: emissions, analysis, and toxicology. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 192, 1–28.
- LOBERT, J.M., KEENE, W.C., LOGAN, J.A., YEVICH, R., (1999) - Global chlorine emissions from biomass burning: reactive chlorine emissions inventory. *J. Geophys. Res.* 104, 8373–8389.
- LOUIME, C., FORTUNE J., GERVAIS G. (2017) – Sargassum Invasion of Coastal Environments : A Growing Concern. *American Journal of Environmental Sciences* 2017, 13 (1) : 58.64.
- MADININAIR (2018) - Concentrations annuelles de polluants dans l'air ambiant issues du réseau permanent de mesures automatiques en région Martinique.
- MADININAIR (2017) - Le brûlage des déchets vert ... Support de communication réalisé en collaboration avec la CACEM.
- MADININAIR (2017b) - Estimation de la population impactée par les dépassements de NO2 et PM10 en 2016.

- 
- MEYER, I., DAVIES, G. R., & STUUT, J.-B. W. (2011). Grain size control on Sr-Nd isotope provenance studies and impact on paleoclimate reconstructions: An example from deep-sea sediments offshore NW Africa: Grain size control on Sr-Nd isotope. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(3), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2010GC003355>
 - MIDDLETON NJ., GOUDIE AS., (2001) – Saharan dust: sources and trajectories<. *Trans Inst Br Geogr*, 26 (2): 165-181.
 - MORAWSKA, L. (2020). How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimized? *Environment International* 142 (2020) 105832. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105832>
 - MULITZA S, HESLOP D, PITTAUEROVA D, FISCHER HW, MEYUER I, STUUT JB, et al. (2010) Increase in African dust flux at the onset of commercial agriculture in the Sahel region. *Nature* 2010; 466:226–8.
 - Norme EN 12341 (1999) - Qualité de l'air – Détermination de la fraction PM10 de matière particulaire en suspension – Méthode de référence et procédure d'essai in situ pour démontrer l'équivalence à la référence de méthodes de mesurage
 - OROS, D.R., ABAS, M.R.B., OMAR, N.Y.M.J., RAHMAN, N.A., SIMONEIT, B.R.T., (2006) - Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning: part 3. grasses. *Appl. Geochem.* 21,919–940.
 - OVIATT C., HUIZENGA K., ROGERS C., MILLER W. (2019) - What nutrient sources support anomalous growth and the recent sargassum mass stranding on Caribbean beaches? A review. *Marine Pollution Bulletin* 145 (2019) 517-525.
 - PACYNA, J.M., (1998) - Source inventories for atmospheric trace metals. Harrison, R.M., Van Grieken, R.E. (Eds.), *Atmospheric particles: IUPAC Series on Analytical and Physical Chemistry of Environmental Systems*, vol. 5. Wiley, pp. 387–423.
 - PARIS, R., DESBOEUF, K. V., FORMENTI, P., NAVA, S., & CHOU, C. (2010). Chemical characterisation of iron in dust and biomass burning aerosols during AMMA SOP0/DABEX: Implication for iron solubility. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(9), 4273–4282. <https://doi.org/10.5194/acp-10-4273-2010>
 - PARKER, D. J., BURTON, R. R., DIONGUE-NIANG, A., ELLIS, R. J., FELTON, M., TAYLOR, C. M., ...TOMPKINS, A. M. (2005). The diurnal cycle of the West African monsoon circulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(611), 2839–2860. <https://doi.org/10.1256/qj.04.52>
 - PERREZ L., TOBIAS A., QUEROL X., KUNZLI N., PEY J., ALASTUEY A., VIANAM., VALERON., GONZALEZ-CABRE M., SUNYER J., (2008) – Coarse particles from Saharan dust and daily mortality. *Epidemiology*, 19(6): 800-7.

- 
- PÖSCHL, U., **(2005)** - Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. *Angew. Chem. Int. Ed.* 44, 7520–7540.
 - PÓSFAL, M., MOLNÁR, A., **(2000)** - Aerosol particles in the troposphere: a mineralogical introduction. *EMU Notes Mineral.* 2, 197–252.
 - PROSPERO J.M., E. BLADE., R. NAIDU., G. MATHISON., H. THANI., M.C. LAVOIE **(2008)** - Relationship between African dust carried in the Atlantic trade winds and surges in pediatric asthma attendances in the Caribbean. *Int J Biometeorol* DOI 10.1007/s00484-008-0176-1.
 - PROSPERO J.M. **(2006)** – Saharan dust impacts and climate change. *Oceanography*, Volume 19, Number 2, The Oceanography Society.
 - PROSPERO JM, BLADES E, MATHISON G, NAIDU R **(2005)** - Interhemispheric transport of viable fungi and bacteria from Africa to the Caribbean with soil dust. *Aerobiologia* 21(1):1–19
 - PROSPERO J.M., GINOUX P., TORRES O., NICHOLSON S.E and GILL T.E **(2002)** - Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product, *Rev. Geophys.*, 40(1), 102, doi:10.1029/2000RG000095.
 - QUEROL X., PEREZ N., RECHE C., EALO M., RIPOLL A., TUR J., PANDOLFI M., PEY J., SALVADOR P., MORENO T., ALASTUEY A., African dust and air quality over Spain: Is it only dust that matters?, *Science of The Total Environment*, Volume 686, 2019, Pages 737-752, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.349>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719324027>)
 - RAMGOLAM, K., FAVEZ, O., CACHIER, H., GAUDICHET, A., MARANO, F., MARTINON, L. and BAEZA-SQUIBAN, A., **(2009)** - Size-partitioning of an urban aerosol to identify particle determinants involved in the proinflammatory response induced in airway epithelial cells. *Particle and Fibre Toxicology* 2009, 6:10. doi:10.1186/1743-8977-6-10.
 - REID, J.S., KOPPMANN, R., ECK, T.F., ELEUTERIO, D.P., **(2005 b)** - A review of biomass burning emissions part II: intensive physical properties of biomass burning particles. *Atmos. Chem. Phys.* 5, 799–825.
 - RYU, S.Y., KWON, B.G., KIM, Y.J., KIM, H.H., CHUN, K.J., **(2007)** - Characteristics of biomass burning aerosol and its impact on regional air quality in the summer of 2003 at Gwangju, Korea. *Atmos. Res.* 84, 362–373.

- 
- SALOMON, M. (2020) – Analyse des données de mesure de PM en Martinique : Evolution des concentrations entre 2000 et 2018, LCSQA, 2020.
 - SCHEPANSKI K., TEGEN I. and MACKE A (2012) - Comparison of satellite-based observations of Saharan dust source areas, Remote Sensing of Environment, 123, 90-97.
 - SCHEPANSKI, K., TEGEN, I., TODD, M. C., HEINOLD, B., BÖNISCH, G., LAURENT B., & MACKE, A. (2009). Meteorological processes forcing Saharan dust emission inferred from MSG-SEVIRI observations of subdaily dust source activation and numerical models. Journal of Geophysical Research, 114(D10). <https://doi.org/10.1029/2008JD010325>
 - SCHEUVENS, D., SCHÜTZ, L., KANDLER, K., EBERT, M., & WEINBRUCH, S. (2013). Bulk composition of northern African dust and its source sediments—A compilation. Earth-Science Reviews, 116, 170–194. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.08.005>
 - SCHEYER A, MORVILLE S, MIRABEL (2008) - Gas/particle partitioning of lindane and current-used pesticides and their relationship with temperature in urban and rural air in Alsace region (east of France), Atmospheric Environment, vol. 42(33), October, p. 7695-7705.
 - SCHWANGHART, W., & SCHÜTT, B. (2008). Meteorological causes of Harmattan dust in West Africa. Geomorphology, 95(3–4), 412–428. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.07.002>
 - SEINDFELD J., PANDIS S., (1998) - Atmospheric Chemistry and Physics. Wiley Interscience Pub.
 - SHINDELL, D., FALUVEGI, G., (2010) - The net climate impact of coal-fired power plant emissions. Atmos. Chem. Phys. 10, 3247–3260.
 - SPPPI Côte d'Opale Flandre Dunkerque. (2015) - *Projet ECUME - Etude de la contribution des sources maritimes sur la teneur en PM10 en Région Nord-Pas de Calais [Diapositives]*. Consulté à l'adresse
 - <http://www.spppi-cof.org/Services-en-ligne/Espace-documentaire/Documents-a-telecharger/Documents-des-reunions/Air-odeurs-et-bruit/Reunions-de-la-commission/1er-juin-2015/Presentation-du-projet-ECUME-ULCO>
 - TANAKA T., and CHIBA M., (2006) - A numerical study of contributions of dust source region to the global dust budget, Global and Planetary changes, 52, 88-104.
 - TANNER S, KATRA I, HAIM A (2016) - Short-term soil loss by eolian erosion in response to different rain-fed agricultural practices, Soil and Tillage Research, vol. 155, January, p. 149-156.

- 
- TAYLOR DA., (2002) – Dust in the wind. *Environ Health Perspect*, 1110(2). A80-7.
 - THOMAS, H.E., WATSON, I.M., KEARNEY, C., CARN, S.A., MURRAY, S.J., (2009) - A multisensory comparison of sulphur dioxide emissions from the 2005 eruption of Sierra Negra volcano, Galápagos Islands. *Remote. Sens. Environ.* 113,1331-1342.
 - TOREN K, QVARFORDT I, BERGDAHL IA, JARVHOLM B. (2011) - Increased mortality from infectious pneumonia after occupational exposure to inorganic dust, metal fumes and chemicals. *Thorax.* 2011; 66:992-6. doi:10.1136/thoraxjnl-2011-200707.
 - TYSON P., ODADA E., SCHULTZE R. VOGEL C. (2002) – Regional change linkages: Southern Africa In *Global-Regional linkages in earth system, IGBP series*, 3-73.
 - Viana, M. et al., (2006) Organic and Elemental Carbon Concentrations in Carbonaceous Aerosols during Summer and Winter Sampling Campaigns in Barcelona, Spain,” *Atmospheric Environment* 40, no. 12 (April 1, 2006): 2180-93, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.12.001>.
 - VIEL J.F., MALLET Y., RAGHOUMANDAN C., QUÉNEL P., KADHEL P., ROUGET F., MULTIGNER L., (2019) – Impact of Saharan dust episodes on preterm births in Guadeloupe (French West Indies). *Occup Environ Med* 2019; 0: 1-5. doi:10.1136/oemed-2018-105405
 - WARREN et al (2007) - Dust-raising in the dustiest place on Earth, *Geomorphology*, 92, 25-37.
 - WEBB N.P., MCGOWAN H.A., PHINN S.R., MCTAINSH G. H., (2006) - AUSEM (AUStralien Land Erodability Model): a tool for identifying wind erosion hazard in Australia. *Geomorphology*, 78, 179-200.
 - WHITE, W.H., (2008) - Chemical markers for sea salt in IMPROVE aerosol data. *Atmos. Environ.* 42, 261-274.
 - WILCOX, E. M., LAU, K. M., & KIM, K.-M. (2010). A northward shift of the North Atlantic Ocean Intertropical Convergence Zone in response to summertime Saharan dust outbreaks: Saharan dust outbreaks and Atlantic ITCZ. *Geophysical Research Letters*, 37(4). <https://doi.org/10.1029/2009GL041774>
 - WINIWARTER, W., BAUER, H., CASEIRO, A., PUXBAUM, H., (2009) - Quantifying emissions of primary biological aerosol particle mass in Europe. *Atmos. Environ.* 43, 1403-1409.

- 
- WILFONG E.R., LYLES M., RIETCHECK R.L., ARFSTEN D.P., BOECKMAN H.J., JOHNSON E.W., DOYLE T.L., CHAPMAN G.D. (2011) - The acute and long-term effects of middle east sand particles on the rat airway following a single intratracheal instillation. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues* 74 (20):1351-1365. Doi: 10.1080/15287394.2010.516239.
 - YU, H., TAN, Q., ZHOU, L., ZHOU, Y., BIAN, H., CHIN, M., RYDER, C., ... HOLBEN, B., (2021) – Observation and modeling of a historic African dust intrusion into the Caribbean Basin and the southern U.S. in June 2020. *Atmospheric Chemistry and Physics*. <https://doi.org/10.5194/acp-2021-73>.
 - YU H., CHIN M., BIAN H., REMER L.A., PROSPERO J.M., OMAR A., WINKER D., YANG Y., ZHANG Y., ZHAO C., (2015) - The fertilizing role of African dust in the Amazon rainforest : A first multiyear assessment based on data from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations. *Geophysical Research Letters*
 - YU, H., CHIN, M., BIAN, H., YUAN, T., PROSPERO, J. M., OMAR, A. H., ... ZHANG, Z. (2015). Quantification of trans-Atlantic dust transport from seven-year (2007–2013) record of CALIPSO lidar measurements. *Remote Sensing of Environment*, 159, 232–249. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.12.010>
 - ZHANG, X. Y., S. L. GONG, T. L. ZHAO, R. ARIMOTO, Y. Q. Wang, and Z. J.
 - Zhou. 2003. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission. *Geophys. Res. Lett.* 30:2272.
 - ZHAO, Y., RICHARDSON, B., TAKLE, E. et al. Airborne transmission may have played a role in the spread of 2015 highly pathogenic avian influenza outbreaks in the United States. *Sci Rep* 9, 11755 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47788-z>
 - ZORAN, M., SAVASTRU, R., SAVASTRU, D., TAUTAN, M. Assessing the relationship between surface levels of PM2.5 and PM10 particulate matter impact on COVID-19 in Milan, Italy (2020) *Science of the Total Environment* 738 (2020) 139825. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139825>

XI. Annexes

XI.1 Annexe 1 : Localisation des principales régions émettrices de particules désertiques à l'échelle du globe.

Les neuf régions sources définies par PROSPERO et al. (2002) sont les suivantes :

- l'Afrique du Nord (a),
- l'Afrique du Sud (b),
- la péninsule Arabique (c),
- l'Asie centrale (d),
- la Chine de l'Est (e),
- la Chine de l'Ouest (f),
- l'Amérique du Nord (g),
- l'Amérique du Sud (h),
- l'Australie (i).

Parmi ces régions sources, la principale région émettrice de particules désertiques dans la troposphère est **l'Afrique du Nord**, particulièrement les régions **sahariennes et**

sahéliennes. Elles seraient à l'origine de plus la moitié de la quantité annuelle émise.

Avec les déserts de Gobi et du Taklamakan, **la Chine** représente la seconde région la plus émettrice de particules désertiques. Si la proportion de particules émise par l'Asie reste inférieure à celle de l'Afrique du Nord, la quantité annuelle ne cesse d'augmenter depuis une vingtaine d'année en raison de l'intensification du processus de désertification (ZHANG et al., 2003).

La troisième source émettrice significative est attribuée à la **péninsule arabe** qui abrite le désert d'Arabie et notamment le Rub al-Khali, un vaste bassin sédimentaire, considéré comme l'une des plus grandes étendues de sable au monde.

Enfin, le grand désert de sable australien et le lac Eyre en **Australie**, le désert de Namibie et du Kalahari en **Afrique du Sud**, la vallée de **l'Indus**, ainsi que les régions **sud et nord-américaine** avec la mer de Salton (Californie du Sud), la Patagonie (Chili et Argentine) et l'Altiplano (cordillère des Andes), sont

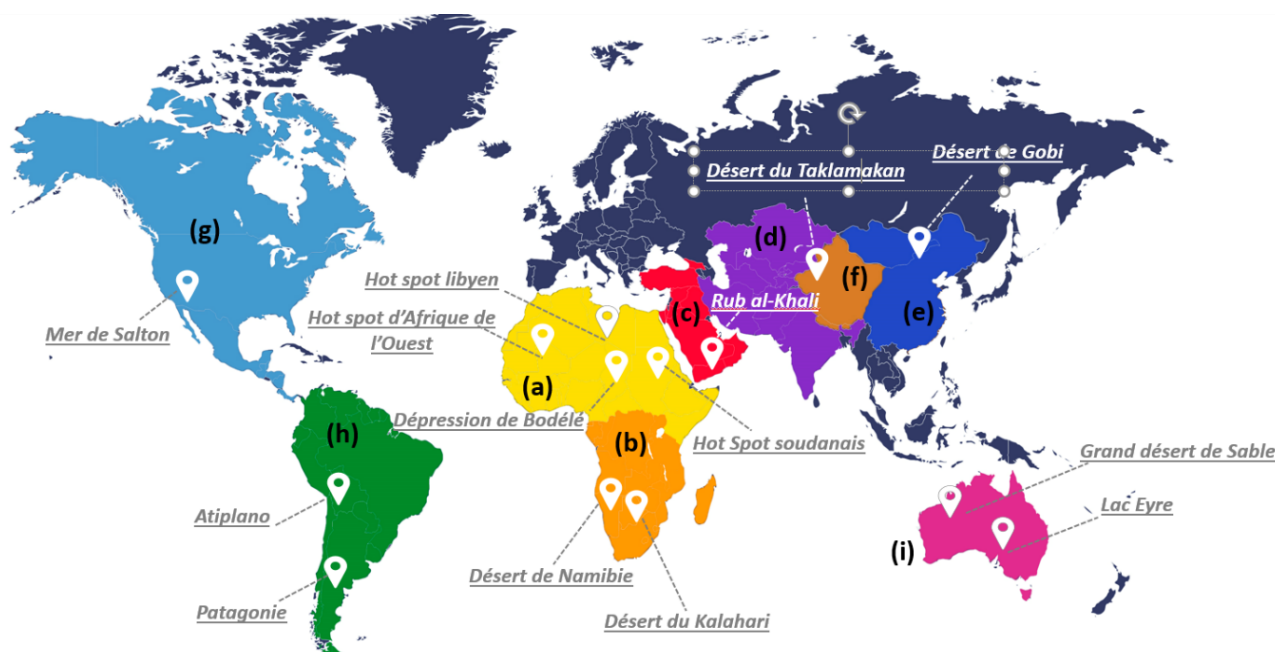



Figure 56 : Distribution géographique des principales zones source de poussière désertique d'après PROSPERO et al., (2002) et TANAKA et al., (2006).



identifiées comme des régions sources participant de manière bien moins significative aux émissions annuelles globales de particules désertiques (TAYLOR, 2002 ; BEGUE, 2012).

XI.2 Annexe 2 : Synthèse des seuils réglementaires pour la protection de la santé des différents polluants.

PM10 :

Période de base	Intitulé de la norme	Valeur ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Journalier (Santé)	Valeur limite journalière	50 (35 dépassements autorisés par an)
	Seuil d'information et de recommandation	50
	Seuil d'alerte	80
Année (Santé)	Valeur limite annuelle	40
	Objectif de qualité annuel	30

PM2,5 :

Période de base	Intitulé de la norme	Valeur ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Année (Santé)	Valeur limite annuelle (Depuis le 01/01/2015)	25
	Valeur cible annuelle	20
	Objectif de qualité annuel	10

Plomb :

Période de base	Intitulé de la norme	Valeur ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Année (Santé)	Valeur limite annuelle	0,5
	Objectif de qualité annuel	0,25

Métaux lourds (arsenic, cadmium, nickel) :

Période de base	Intitulé de la norme	Valeur (ng/m ³)
Année (Santé)	Valeurs cibles	arsenic : 6 cadmium : 5 nickel : 20

Benzo(a)pyrène :

Période de base	Intitulé de la norme	Valeur (ng/m ³)
Année (Santé)	Valeur cible	1

La **valeur limite** correspond au niveau à atteindre dans un délai donné, à ne pas dépasser et fixé sur la base des connaissances scientifiques afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble.

La **valeur cible** est le niveau à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné et fixé, afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé ou sur l'environnement dans son ensemble.

L'**objectif de qualité** est le niveau à atteindre à long terme et à maintenir, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une

protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble.

Le **seuil d'information et de recommandation** correspond au niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine, pour des groupes particulièrement sensibles au sein de la population et qui rend, alors, nécessaire l'émission d'information immédiates et adéquates à destination de ces groupes ainsi que des recommandations pour réduire certaines émissions.

Le **seuil d'alerte** est le niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé de l'ensemble de la population ou de dégradation de l'environnement, justifiant l'intervention de mesures d'urgence.

XI.3 Annexe 3 : Synthèse des seuils d'évaluation

Les seuils d'évaluation inférieur et supérieur permettent de définir la stratégie de surveillance à adopter sur une zone suivant

le risque de dépasser la valeur limite annuelle du polluant considéré. Ainsi, ces seuils sont basés sur des valeurs limites ou valeurs cibles et sont définis dans l'arrêté du 16 avril 2021. Ces seuils sont résumés pour chaque polluant dans les tableaux suivants :

Particules PM10 et PM2,5 :

	Valeur limite journalière PM10	Valeur limite annuelle PM10	Valeur limite annuelle PM2,5
Seuil d'évaluation supérieur (SES)	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (35 dépassements annuels autorisés)	28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Seuil d'évaluation inférieur (SEI)	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (35 dépassements annuels autorisés)	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Plomb :


	Valeur limite annuelle
Seuil d'évaluation supérieur (SES)	0,35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Seuil d'évaluation inférieur (SEI)	0,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Métaux lourds (arsenic, cadmium, nickel) :

	Valeur cible annuelle arsenic	Valeur cible annuelle cadmium	Valeur cible annuelle nickel
Seuil d'évaluation supérieur (SES)	3,6 ng/m ³	3 ng/m ³	14 ng/m ³
Seuil d'évaluation inférieur (SEI)	2,4 ng/m ³	2 ng/m ³	10 ng/m ³

Benzo(a)pyrène :

	Valeur limite annuelle
Seuil d'évaluation supérieur (SES)	0,6 ng/m ³
Seuil d'évaluation inférieur (SEI)	0,4 ng/m ³




XI.4 Annexe 4 : Lien entre particules et virus (cas de la COVID-19)

S'il a été démontré que les particules, en général, pouvait être un vecteur potentiellement responsables d'allergies, de pathologies pulmonaires ou encore cutanées, leurs **effets restent largement inconnus** (PROSPERO et al., 2014). La situation pandémique actuelle, conduit de manière légitime, à s'interroger sur le rôle des particules atmosphériques, toutes origines confondues, comme **vecteur du virus COVID-19** ainsi que sur l'influence de la pollution atmosphérique sur **l'augmentation de la vulnérabilité** de la population à la COVID-19.

Par le passé, une étude a déjà été réalisée sur la transmission aéroportée du virus H5N2 aux Etats-Unis (ZHAO et al., 2019). Bien que la chaleur et l'humidité participent à détruire le virus, il a été estimé que le virus pourrait rester viable pendant un jour et être transporté dans l'air. Cependant, de nombreuses inconnues persistaient à la fin de cette étude et il avait été conclu que le risque de transmission aérienne en extérieur restait assez faible. GORBUNOV et al. (2020) ont travaillé à évaluer **l'importance des voies de transmission** à la COVID-19 par les aérosols. Ils ont déterminé que les aérosols émis par une personne pouvaient parcourir jusqu'à 30 mètres voire 100 mètres selon les conditions atmosphériques. Les aérosols émis peuvent également **s'accumuler dans les lieux publics** tels que les hôpitaux, les maisons de retraite ou les supermarchés. La transmission aéroportée est donc importante, c'est pourquoi le **port du masque** est recommandé ou que **l'aération**, les **systèmes de ventilation** ou

les purificateurs d'air sont des systèmes efficaces (MORAWSKA et al., 2020) contre la transmission du virus. Cependant, il a été expliqué, lors de la matinale AIRLAB sur « le SARS-COV-2, un polluant de l'air », organisée par AIRPARIF et le Qi², que beaucoup plus d'éléments étaient rapportés sur la transmission aéroportée que la **transmission par contact** qui n'était finalement pas discutée. Selon CONTINI et al. (2020), des recherches supplémentaires sont nécessaires, à la fois dans les environnements intérieurs et extérieurs, pour étudier **l'aérosolisation du SARS-CoV-2 pendant la respiration et la parole**, les concentrations et la distribution de taille du virus dans l'air pour différentes conditions, ainsi que les propriétés physico-chimiques et biologiques, la durée de vie et l'infectivité des bioaérosols contenant le virus. Par ailleurs, l'interaction entre la pollution particulaire et le transport du virus ne résisterait pas à la **physique des aérosols**. En effet, le virus est déjà sur des particules lorsqu'il est émis et les probabilités pour qu'une particule contenant du virus et une particule de pollution coagulent sont très faibles. Par ailleurs, il est prouvé qu'il se déplace mieux et plus vite tout seul, tout en étant **extrêmement dilué dans l'air ambiant** et avec une faible durée de vie. L'IAS, Italian Aerosol Society a également exprimé sa position sur le sujet. Les 150 experts qui composent cette société s'accordent sur le **manque de connaissances et de données disponibles** pour affirmer que les particules atmosphériques puissent agir comme vecteur de la COVID-19 et augmenter ainsi le taux d'infection.

Concernant, l'augmentation de la vulnérabilité de la population à la COVID-19 par la pollution atmosphérique. CONTINI et al. (2020) indique qu'une étude de 2003 en

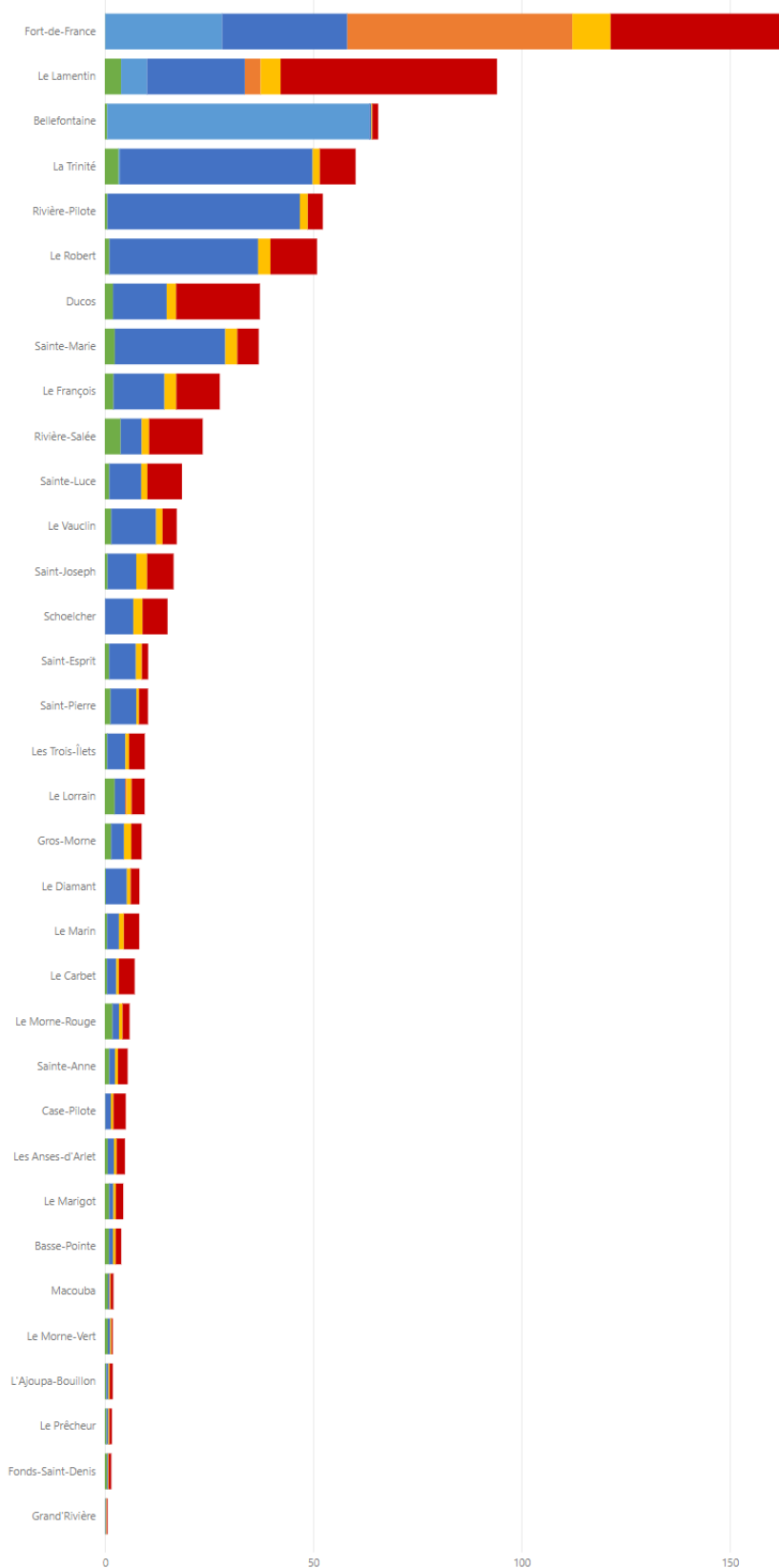


Chine sur un précédent SARS avait recensé un **plus grand nombre de décès** dans les régions présentant un **indice de pollution plus élevé** que dans d'autres régions. Cependant, une autre étude, en 2017, sur le virus H1N1 révélait que les **PM10** n'étaient associés qu'à **4% de la mortalité**. Il est donc énoncé par CONTINI et al. qu'il soit possible que la pollution atmosphérique augmente la vulnérabilité de la population à la COVID-19, néanmoins, **plusieurs facteurs** tel que la distribution de l'âge de la population, la densité de population, les mesures appliquées, les habitudes sociales ou encore les conditions météorologiques sont à prendre en compte. L'exposition à la pollution atmosphérique pourrait donc augmenter la vulnérabilité et avoir des effets néfastes sur le pronostic des patients touchés par la COVID-19. Cependant, le **poids relatif de la pollution atmosphérique**, par rapport aux autres facteurs, reste à être déterminé. ZORAN et al. (2020) ont également étudié cette problématique à Milan où la pollution atmosphérique est importante. Ils expriment qu'une exposition à court ou long terme à des concentrations élevées en PM10 et en PM2,5 telles que celles mesurées à Milan peut avoir contribué à l'importante létalité qu'il y a eu dans cette région. Néanmoins, ils nuancent leur propos en ajoutant que des **conditions météorologiques** telles que la hauteur de la couche limite relativement basse durant cette période a participé à concentrer les polluants à basse altitude. Il est largement établi qu'une exposition, plus ou moins prolongée, à d'importantes concentrations en particules **augmente la sensibilité aux maladies respiratoires et cardiovasculaires chroniques** pouvant ainsi aggraver la situation sanitaire des personnes déjà infectées. En revanche, **aucun argument ne**

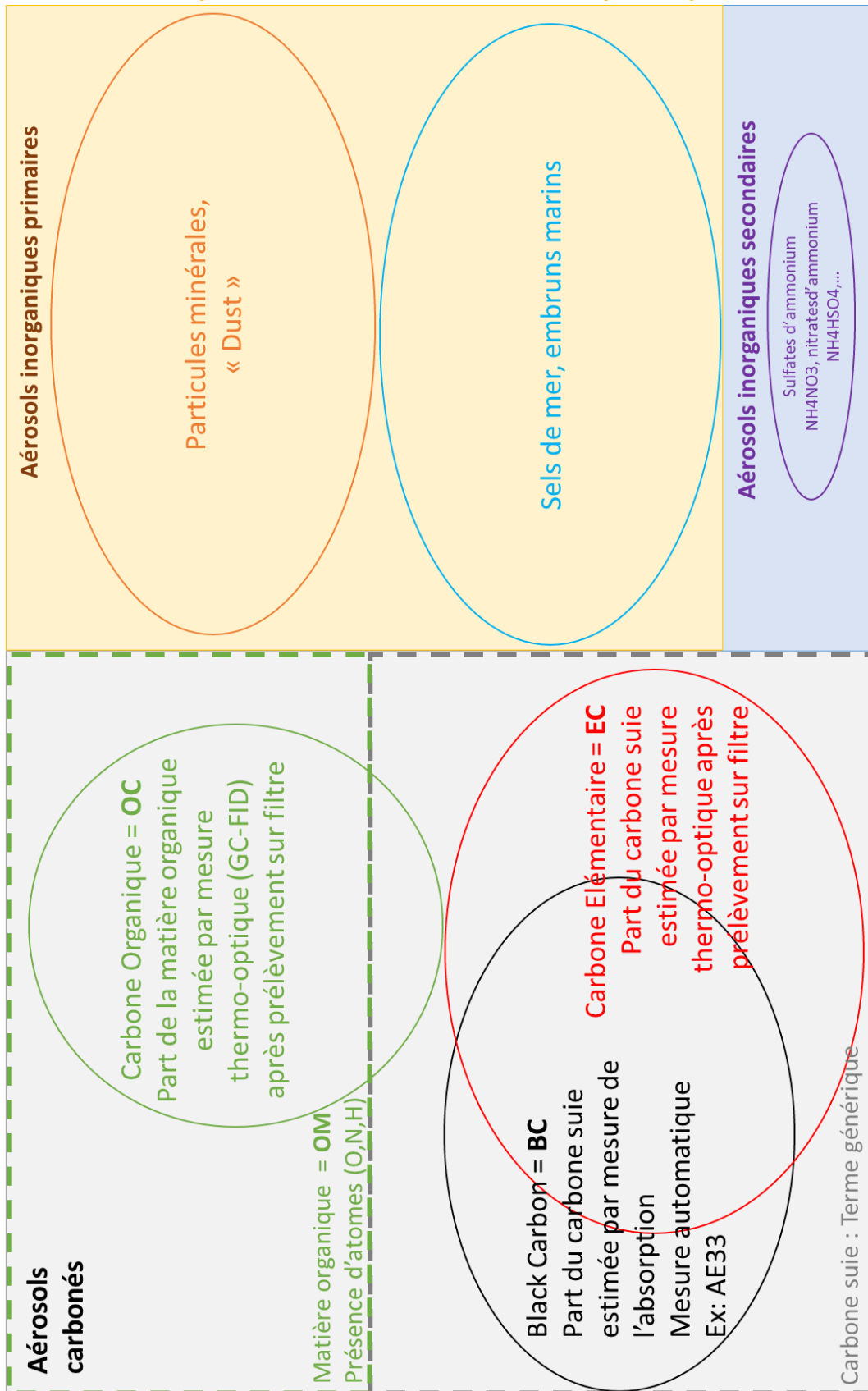
permet aujourd'hui d'affirmer un **lien de cause à effet entre une plus grande sensibilité à la contagion à la COVID-19 et une exposition aux particules atmosphériques** (IAS, 2020).

XI.5 Annexe 5 : Inventaire des émissions de particules PM10 en Martinique en 2016

secten1 ● Agriculture/Sylviculture ● Energie ● Industrie Manufacturière ● Modes de transports autres ● Résidentiel; tertiaire; commercial et institution... ● Transports Routiers



XI.6 Annexe 6 : Synthèse de la caractérisation chimique des particules fines





31, rue du Professeur Raymond Garcin
Allée du Prunier - 97200 Fort-de-France
Tél. : 0596 60 08 48
info@madininair.fr
www.madininair.fr

