

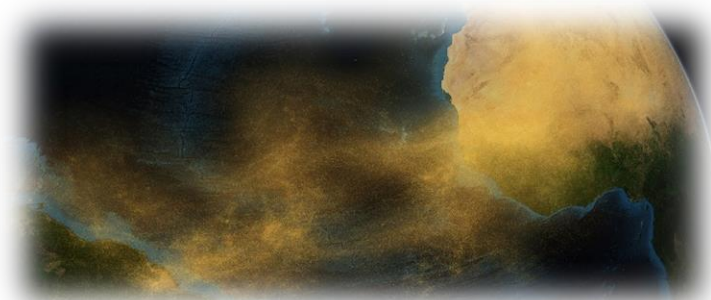
UNIVERSITE DES ANTILLES, POLE GUADELOUPE

Faculté des Sciences Exactes et Naturelles Ecole doctorale pluridisciplinaire

Thèse de doctorat en Science de l'Univers présentée par :

Lovely EUPHRASIE-CLOTILDE

CLIMATOLOGIE DU TRANSPORT DES AEROSOLS DESERTIQUES AU-DESSUS DE L'ATLANTIQUE VERS LA REGION CARAÏBE



Soutenue publiquement le 09 Mai 2018 devant le jury composé de :

Karine SELLEGRI, Directrice de recherche CNRS, Université de Clermont Auvergne, rapporteuse

Karine DESBOEUFS, Professeure, Université Paris Diderot et Paris Est, rapporteuse

Suzanne CRUMEYROLLE, Maître de conférences, Université de Lille, examinatrice

François BUSSIERE, Chargé de recherche, INRA Antilles Guyane, examinateur

Sandra JACOBY-KOALY, Maître de conférences, Université des Antilles, examinatrice

Rudy CALIF, Professeur, Université des Antilles, président du jury

Jack MOLINIE, Maître de conférences, Université des Antilles, co-encadrant

Narcisse ZAHIBO, Professeur, Université des Antilles, directeur de thèse

Thèse préparée au sein du Laboratoire LaRGE, EA4098, Université des Antilles, Campus de Fouillole, Guadeloupe et co-financée par la Région Guadeloupe.

REMERCIEMENTS

Je remercie mes parents (**Hélène Euphrasie-Clotilde** et **Samuel Brooks**) ainsi qu'**Héric Blirando** et **Marlène Blirando** pour m'avoir soutenu et pris soin de moi. Je remercie mon compagnon et partenaire dans la vie **Malik Blirando** pour son soutien, ainsi que mes deux merveilleux garçons...Je remercie mon meilleur ami **Jérémie Selzner** pour son soutien infaillible et sa grande compréhension.

Je remercie mon encadrant de thèse, **Jack Molinié**, pour son ouverture d'esprit et la liberté dont j'ai bénéficiée tout au long de ma thèse. Je remercie également mon directeur de thèse, **Narcisse Zahibo**, pour avoir cru en moi et en mes capacités.

J'ai une pensée pour tous mes professeurs de l'Université des Antilles qui m'ont formé et soutenu tout au long de mon parcours : **Rose-Hélène Petit (BOSS)**, **Sandra Jacoby-Koaly**, **Tony Feuillard**, **Marylise Bernard**, **Laurence Romana**, **Jean Louis Mansot**, **Rudy Blonbou**, **Rudy Calif**, **Ted Soubdan**, **François Bade**, **Stevie Roquelaure**, **Narcisse Zahibo**, **Didier Bernard** : je vous remercie du fond du cœur, vous m'avez tous, autant que vous êtes, inspiré. Je remercie également tous les membres du laboratoire LARGE de leur soutien.

Bon, à nous **France-Nor Brute** « data scientist » de haut niveau, merci pour ton soutien **INDISPENSABLE**, je n'oublie pas nos fous rires, nous formons une équipe de choc.

Céline Bassette*, **Tony Feuillard**, **Sandra Jacoby-Koaly**, **Mickael Vaitilingom**, **Thomas Plocoste**, **Rhozelle Louviers**, **André Roussas**, **Sébastien Solvar**, un grand **MERCI** à vous, pour votre soutien ; c'est clairement grâce à vous que j'ai pu arriver au bout de ma thèse.

**Ps : merci pour tes biscuits et gâteaux délicieux*

Je remercie **François Bussière** (INRA) d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Je remercie **Karine Sellegri**, **Karine Desboeufs** et **Suzanne Crumeyrolle**, je suis impressionnée, heureuse et reconnaissante de vous avoir rencontré. J'ai beaucoup appris de vous, un grand **MERCI** ...

J'ai une pensée particulière pour **Jean Louis Bernard**, je suis reconnaissante d'avoir croisé la route d'une personne aussi exceptionnelle, il m'a beaucoup soutenu, et je lui dois énormément...

En mémoire de ma grand-mère Siméonie BEREAU, le pilier de ma vie...

Toutes choses concourent au bien de ceux qui aiment Dieu (Romain 8 : 28)

TABLE DES MATIERES

Remerciements	2
Résumé	10
Abstract.....	11
LISTE DES FIGURES.....	12
LISTE DES TABLEAUX	19
LISTE DES ABREVIATIONS	20
Introduction générale.....	21
Partie I : Synthèse bibliographique	26
1. DEFINITION AEROSOLS.....	26
2. NORMES DE LA QUALITE DE L’AIR ET IMPACT SANITAIRE	26
2.1. Normes Européennes et législation française.....	26
2.2. Indicateurs de la qualité de l’air	27
2.3. Rôle des EIS (Evaluation de l’Impact Sanitaire)	27
2.4. Résultats des EIS en Europe.....	28
2.5. Seuils de protection sanitaire de PM10 et PM2.5	29
2.6. Indicateurs sanitaires associés aux évènements de « brumes désertiques ».....	29
2.7. Evaluation de l’Impact Sanitaire des poussières dans la Caraïbe	30
3. ZONES SOURCES DES POUSSIÈRES.....	30
3.1. Mobilisation des poussières	31
4. PARCOURS DES POUSSIÈRES AU-DESSUS DE L’ATLANTIQUE NORD.....	33
4.1. Expérience de Semmelhack (parcours saisonniers Nord Atlantique et Sud Atlantique).....	33
4.2. Modèle 3D de transport des aérosols	34
4.3. Campagne de mesure du Cap-Vert de 1951 à 1960	35
4.4. L’expérience PRIDE du 27 Juin au 25 Juillet 2000	35

4.5.	Résultats des campagnes de mesure réalisées dans la Caraïbe : SAMUM et SALTRACE	37
4.6.	Aerosols Optical Depth (AOD) au-dessus de l'Atlantique Nord	38
4.7.	Modèle de simulation de transport (ECHAM5/MESSy)	38
4.8.	Types de circulation atmosphériques dans la Caraïbe	39
5.	PROFIL GENERAL DE LA STRUCTURE THERMODYNAMIQUE DE L'ATMOSPHERE TROPICALE	41
5.1.	Etablissement des profils types atmosphériques prenant en compte les variations saisonnières	41
5.2.	Importance de la différenciation des profils atmosphériques en présence ou non des poussières sahariennes à partir de 1972	41
5.3.	Description de la SAL	42
5.4.	Caractérisation d'autres types de masses d'air dans la zone tropicale	44
Partie II : Données et méthodes		45
1.	PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	45
2.	MESURE DE LA CONCENTRATION MASSIQUE : DONNEES PM10, PM2.5, CONCENTRATION DE POUSSIERE	46
2.1.	Techniques de mesures et principe de fonctionnement du TEOM FDMS	47
2.2.	Mesure de base : calcul de la fraction non volatile (durée de l'étape : 6 minutes) 49	
2.3.	Mesure de référence : calcul de la fraction volatile (durée de l'étape : 6 minutes) 49	
2.4.	Données de performance de l'instrument TEOM	49
2.5.	Technique de mesure de concentration de poussière (Barbade)	50
2.6.	Stations de mesures	51
2.7.	Traitement des données journalières de PM10	56
2.8.	Traitement des données journalières de PM2.5	57
3.	EPAISSEUR OPTIQUE D'AEROSOLS : AEROSOL OPTICAL DEPTH (ANGLAIS) OU AOD PAR LA SUITE	58

3.1.	Epaisseur optique d'extinction	58
3.2.	<i>Epaisseur optique en aérosols</i>	59
3.3.	Coefficient d'Angstrom (AE pour « Angstrom Exponent »)	60
3.4.	Répartition en volume de la taille des particules (VPSD pour « Volume Particle Size Distribution »)	60
3.5.	Rayon médian du volume (logarithme moyen du rayon).....	61
3.6.	Concentration de volume ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)	61
3.7.	Propriétés radiatives	61
4.	RESEAU INTERNATIONAL DE TELEDETECTION DES AEROSOLS AERONET 63	
4.1.	Description et procédés de mesure	64
4.2.	Les données AERONET	65
5.	IMAGE SATELLITE AOD (MODIS)	69
6.	RETRO-TRAJECTOIRES	70
6.1.	Base de données météorologiques.....	70
6.2.	Génération des rétro-trajectoires	71
7.	ETUDE THERMODYNAMIQUE DES BRUMES DESERTIQUES	72
7.1.	Stratification thermodynamique en air sec.....	72
7.2.	Stratification thermodynamique d'une atmosphère humide	75
7.3.	Rapport de mélange.....	76
8.	RADIOSONDAGES	76
8.1.	Principe du radiosondage	76
8.2.	Données de sondages	77
Partie III : résultats et discussions		79
CHAPITRE 1 : DEFINITION D'UN EVENEMENT DE BRUME DESERTIQUE DANS LA CARAÏBE		79
1.1.	Origine de la pollution particulaire dans la Caraïbe.....	79

1.2.	Évolution journalière de la pollution particulaire dans la Caraïbe et sur les côtes de l'Afrique de l'Ouest	81
1.3.	Poussières mesurées à la surface : PM10	82
1.4.	Épaisseur optique en aérosols de la colonne atmosphérique : AOD.....	84
1.5.	Établissement de critères seuils pour la détection des épisodes de brumes sahariennes à partir des données PM10 et photométriques.....	87
1.6.	Répartition de la taille des particules en fonction de l'épaisseur optique aux côtes de l'Afrique de l'Ouest et dans la Caraïbe	88
1.7.	Corrélation entre PM10 et AOD dans la Caraïbe.....	92
1.8.	Détermination du seuil journalier de présence de poussière : PM10	95
2.	CHAPITRE 2 : CLIMATOLOGIE DES EVENEMENTS DE BRUMES DESERTIQUES DANS LA CARAIBE	103
2.1.	Aspect saisonnier des événements de poussière dans la Caraïbe.....	103
2.2.	Variations saisonnières du niveau de pollution de l'atmosphère de fond	105
2.3.	Variations mensuelles des concentrations en PM10	107
2.4.	Variations mensuelles des AOD sur les côtes atlantiques de l'Afrique de l'Ouest et dans la Caraïbe	110
2.5.	Variations mensuelles du coefficient d'Angstrom (AE) sur les côtes atlantiques de l'Afrique de l'Ouest et dans la Caraïbe	112
2.6.	Climatologie de l'intensité des épisodes poussiéreux	113
2.7.	Variations annuelles des concentrations en PM10 et normes Européennes.....	115
2.8.	Evolution annuelle de l'intensité des événements poussiéreux	118
3.	CHAPITRE 3 : ÉTUDE DU TRANSPORT DES AEROSOLS DESERTIQUES AU-DESSUS DE L'ATLANTIQUE TROPICAL A PARTIR DES MESURES D'ÉPAISSEUR OPTIQUE EN AEROSOLS PAR SATELLITE	121
3.1.	Basse saison des poussières : NDJF (Novembre, Décembre, Janvier, Février). 123	
3.2.	Première saison intermédiaire : MA (Mars, Avril)	125
3.3.	Haute saison des poussières : MJJA (Mai, Juin, Juillet, Août)	126
3.4.	Deuxième saison intermédiaire : SO (Septembre, Octobre)	127

3.5.	Origine des masses d'air traversant la Caraïbe : étude des rétro-trajectoires (HYSPLIT).....	128
3.6.	Trajectoire des masses d'air poussiéreuses arrivant sur l'arc antillais.....	138
3.7.	Classification saisonnière des trajectoires associées aux masses d'air poussiéreuses	145
4.	CHAPITRE 4 : CARACTERISATION DE LA TAILLE DES AEROSOLS DESERTIQUES AU DEPART DES COTES AFRICAINES ET DANS LA CARAÏBE	153
4.1.	Analyse mensuelle de la répartition volumique de la taille des particules (VPSD)	153
4.2.	Répartition volumique de la taille des particules (VPSD) en Afrique	153
4.3.	Répartition volumique de la taille des particules (VPSD) dans la Caraïbe.....	155
4.4.	Caractérisation des VPSD attribué aux particules des sels marins, poussières désertique, continentales, biomasses (BB pour « Biomass Burning) et mélange	159
4.5.	Etude de la relation entre PM10 et PM2.5	163
4.6.	PM2.5 versus PM10	163
4.7.	Ratio PM2.5/PM10.....	165
4.8.	PM2.5 versus PM10 et ratio PM2.5/PM10	166
5.	CHAPITRE 5 : STRATIFICATION VERTICALE DE L'ATMOSPHERE LORS D'EPISODES DE POUSSIÈRES	170
5.1.	Profils de température associés aux jours poussiéreux dans la Caraïbe.....	173
5.2.	Stratification verticale saisonnière en fonction de l'intensité des évènements poussiéreux.....	176
5.3.	Profils d'humidité associés aux jours poussiéreux dans la Caraïbe	177
5.4.	Profils saisonniers des jours poussiéreux	179
5.5.	Impact de la provenance des poussières et de leur temps de trajet sur la thermodynamique atmosphérique	183
6.	CHAPITRE 6 : RELATION ENTRE POUSSIÈRES DESERTIQUES ET ENERGIE DES SYSTEMES CYCLONIQUES.....	184
	Conclusion.....	187

Bibliographie.....	196
Annexes	208
Représentation graphique de la classification des retro-trajectoires associées aux Jours poussiéreux des îles de la Caraïbe : Porto Rico, Guadeloupe, Barbade	208
Liste des Publications.....	211
Articles publiés dans des revues à comité de lecture	211
Article scientifique en cours de soumission	211
Article scientifique en préparation	211
Présentations orales à des congrès internationaux	211
Posters (congrès internationaux)	212

RESUME

La région Caraïbe est régulièrement survolée par des masses d'air chargées en poussières désertiques, provenant des zones saharienne et sub-saharienne. Pour quatre îles de l'arc antillais : Porto Rico, Guadeloupe, Martinique et Barbade ; nous avons effectué une étude statistique visant à caractériser la pollution particulaire du bassin caribéen, pour une période de 11 ans (2006-2016). Nos investigations prennent en compte les mesures in situ des réseaux de qualité de l'air, du réseau international de mesures photométriques AERONET ; et les données de radiosondages réalisés localement. La première étape de notre travail, consistait à définir un « épisode de poussières désertiques » dans notre région, en établissant des critères déduits du jeu de données dont nous disposions. Il en résulte que les événements de « brumes désertiques » sont détectables dès $35 \mu\text{g m}^{-3}$ en PM10 journalier (concentration de particules inférieures à $10 \mu\text{m}$). Le seuil Européen relié aux épisodes de poussières est de $50 \mu\text{g m}^{-3}$, or 55 % d'entre eux se produisent entre 35 et $50 \mu\text{g m}^{-3}$. Ainsi, contrairement aux précédentes études, nous avons pris en considération l'ensemble des événements poussiéreux ayant affecté l'arc antillais au cours de la dernière décennie. Nous analysons donc par la suite, la climatologie du phénomène de pollution des brumes désertiques à travers l'étude de la circulation des masses d'air et la détection satellitaire des aérosols minéraux au-dessus de l'Atlantique ; mettant en évidence le cycle de transport des poussières. Nous nous sommes également axés sur la caractérisation de la taille des particules au départ des poussières en Afrique, et à l'arrivée dans les îles de la Caraïbe, afin de mettre en relief les effets du transport. Enfin, nous clôturons notre étude par la description du profil vertical de température et d'humidité de la couche atmosphérique, en situation de « brumes désertiques ».

ABSTRACT

The Lesser Antilles is an intermediate zone, located between the American continent, and the Atlantic Ocean. This region is regularly affected by the major long-range Saharan dust transportation from West African desert sources. The aerosols optical properties are provided by the AEronet Robotic NETwork (AERONET) measurement sites: in Puerto Rico, Guadeloupe, and Barbados. Thus, Aerosols Optical Depth (AOD), the Angstrom Exponent (AE), the Volume Particle Size Distribution (VPSD), the complex refractive indexes, and the Single Scattering Albedo (SSA) were used to define the predominant type of atmospheric particles, namely sea salt aerosols, mineral dust, and mixture of aerosols. The detailed analysis of the optical data (AERONET) associated with daily PM_{10} concentrations demonstrated that dust phenomenon can be observables below the PM_{10} threshold of $50 \mu\text{g m}^{-3}$, given by the European directives to detect dust episodes for the European context of pollution. Nevertheless, in a different geographical context such as the French Caribbean islands of Guadeloupe and Martinique, episodes of desert dust phenomenon are effective since $35 \mu\text{g m}^{-3}$. Our results show that the usual concentration of dust detection ($50 \mu\text{g m}^{-3}$) has not adapted and could be lowered at $35 \mu\text{g m}^{-3}$. Indeed, 55% of dust episodes are associated with daily concentrations between 35 and $50 \mu\text{g m}^{-3}$. This mean that previous studies have not considered slightly more than half of those dust events. Our proposal threshold is supported by the analysis of the atmospheric circulation and the vertical temperature profile, that we compared with results of the literature.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Iles de l'arc Antillais.....	22
Figure 2 : Figure extraite de Weinzierl et al. 2017 ; Time–altitude cross sections of VLDR detected with the TROPOS lidar BERTHA at three different locations between Africa and the Caribbean (Ouarzazate, Morocco; Praia, Cabo Verde; and Barbados) in summer 2006, 2008, 2013, and 2014 and in winter 2008 and 2014. The aerosol extends from the ground to 3–5-km altitude. The top of the aerosol layers is indicated by the white dashed lines. Note: VLDR values in Morocco and Cabo Verde were measured at a wavelength of 710 nm, whereas the VLDR values in Barbados refer to 1,064 nm.....	37
Figure 3 : Figure extraite des travaux de Chadee and Clarke (2015) ; Fig.5 (a) et (b); Atmospheric circulation type 1-7 wind speed;.....	40
Figure 4 : Image de détection de la SAL et MLDAI au moyen de la différence de Température de Brillance entre les canaux 10,8 µm et 12µm de Meteosat satellite ; CIMSS, Université du Wisconsin-Madison (http://tropic.ssec.wisc.edu/)	44
Figure 5 : Au Nord de l'arc se situe Porto Rico (18.22 °N, -66.59°E), au centre la Guadeloupe (16.24 °N, -61.53 °E), la Martinique (14.64 °N, -61.02 °E) (située à 189 Km de la Guadeloupe), puis au Sud-Est de l'arc antillais l'île de la Barbade (13.1939° N, -59.5432°E).....	45
Figure 6 : Ouragan Maria (classe 5) traversant l'arc Caribéen le 18 Septembre 2017	46
Figure 7 : Principe de fonctionnement du TEOM FDMS ; source : file:///C:/Users/lovel/Desktop/four%20tout%202/Dossier%20pollution/ae_fiche-technique_analyseur-pm-teom_2016_atmo_fc_e.pdf	48
Figure 8 : Emplacement des stations de mesures de Catano et de San Juan, à Porto-Rico	52
Figure 9 : Emplacement des stations de mesures de Pointe-à-Pitre, Baie-Mahault et Les Abymes, à la Guadeloupe (http://www.gwadair.fr/surveillance/reseau-de-mesure); Emplacement des stations de mesure de la Martinique (http://www.madininair.fr/Mesures-fixes)	53
Figure 10 : Emplacement de la station de mesure de concentration de poussière Ragged Point à la Barbade.....	54
Figure 11 : Réseau international (AERONET) de photomètres CIMEL (en haut) ; réseau implanté dans l'arc antillais (en bas, à gauche) et sur la côte Africaine (en bas, à droite)	63
Figure 12 : Photomètre CIMEL CE-318-1.....	65
Figure 13 : Stations de mesures de radiosondage aux Etats-Unis et dans la Caraïbe	77

Figure 14 : Profils moyens horaires des jours caractérisés par : une pollution locale minimale (Dimanches des mois de Janvier entre 2006 et 2016) ; activité locale (jours de semaines des mois de Janvier de 2006 à 2016) ; épisode de « brumes désertiques » ; niveau d’alerte maximale « brumes de poussières désertiques ». Données de concentration de PM10 horaire provenant de la station de mesure de Pointe-à-Pitre (Guadeloupe).	80
Figure 15 : Variations temporelles des valeurs journalières des concentrations de PM10 dans la Caraïbe de 2006 à 2016 ; Variations des concentrations de poussières prélevées à la station de Ragged Point (Barbade) pour la période de 2002-2011 ; les lignes en pointillés mettent en évidence l’augmentation saisonnière simultanée des valeurs journalières de PM10 et concentrations de poussières	83
Figure 16 : Variations temporelles des valeurs journalières d’AOD (440 nm, niveau de qualité 2.0) de 2006 à 2016 pour Porto Rico et Guadeloupe ; de 2007 à 2016 pour Barbade	85
Figure 17 : Variations temporelles des valeurs journalières d’AOD (440 nm, niveau de qualité 2.0) à Dakar et au Cap Vert (île) de 2006 à 2016.....	86
Figure 18 : Côte Africaine.....	86
Figure 19 : Dispersion des AE (440-870 nm) en fonction des AOD (440 nm) pour la période de 2006 à 2016 en Afrique de l’Ouest (Dakar et Cap Vert) ; les lignes en pointillés (rouge) indiquent les critères d’identifications des poussières minérales adoptés ($AOD \geq 0.2$ et $AE \leq 0.6$) (Dubovik et al., 2002)	89
Figure 20 : Dispersion des AE en fonction des AOD pour la période de 2006 à 2016 pour la zone de la Caraïbe (Porto Rico, Barbade et Guadeloupe) ; les lignes en pointillés indiquent les critères d’identification des poussières minérales adoptés ($AOD \geq 0.2$ et $AE \leq 0.6$)	90
Figure 21 : Représentation graphique des PM10 en fonction des AOD (440 nm) ; données PM10 provenant des stations de mesures de Pointe-à-Pitre et Baie-Mahault (Guadeloupe) et Catano (Porto Rico) pour la période de 2006 à 2016	93
Figure 22 : Corrélation entre les moyennes de concentrations mensuelles de PM10 et les valeurs mensuelles d’AOD (440 nm) AERONET calculées à partir des données journalières remplissant les critères de sélections énoncés précédemment pour la période de 2006 à 2016	94
Figure 23 : Répartition en Fréquence des données de PM10 de l’ensemble des îles de la Caraïbe (2006-2016).....	95
Figure 24 : Répartition en fréquence des PM10 pour les jours correspondants aux critères de poussières ($AOD \geq 0.2$ reliés aux $AE \leq 0.6$) ; Seuil des indices de qualité de l’air explicité dans le tableau 7 : « air moyen » (pointillés jaune), « air médiocre » (pointillés oranges), « air	

mauvais » (pointillés rouge) ; AOD journaliers (qualité 2.0) comprenant au moins 12 mesures.	97
Figure 25 : Répartition des AE (440-870 nm ; qualité 2.0) en fonction des AOD (440 nm ; qualité 2.0) pour les jours de concentration journalière PM10 supérieure à 28, 35 et 50 $\mu\text{g m}^{-3}$ à Porto Rico (2006-2016) ; critère de qualité appliqué (seules les données journalières fournissant au minimum 12 mesures d'AOD par jours ont été sélectionnées pour cette étude)	99
Figure 26 : Répartition des AE (440-870 nm ; qualité 2.0) en fonction des AOD (440 nm ; qualité 2.0) pour les jours de concentration journalière PM10 supérieure à 28, 35 et 50 $\mu\text{g m}^{-3}$ en Guadeloupe (2006-2016) ; critère de qualité appliqué (seules les données journalières fournissant au minimum 12 mesures d'AOD par jours ont été sélectionnées pour cette étude)	100
Figure 27 : Nombre moyen mensuel d'évènements poussiéreux (PM10 journalier $\geq 35 \mu\text{g m}^{-3}$) pour Porto Rico, la Guadeloupe et la Martinique (2006-2016) ; les lignes grise, orange et rouge montrent la limite haute du nombre d'évènements poussiéreux associé à la faible, intermédiaire et haute saison de poussières respectivement.	104
Figure 28 : Profils horaires moyens mensuels entre 2006 et 2016 pour les sites de Porto Rico (Catano), Guadeloupe (Point-à-Pitre et Baie-Mahault) et Martinique (Schoelcher).	105
Figure 29 : Evolution mensuelle des concentrations de PM10 (Porto Rico, Guadeloupe, Martinique) pour la période de 2006 à 2016	107
Figure 30 : Moyen de concentration de poussières mensuelles prélevées à la Barbade (2002-2010).	108
Figure 31 : Moyennes mensuelles représentées par années de 2002-2010. Les moyennes mensuels comprennent au minimum 14 valeurs journalières. Les valeurs manquantes sont les suivantes : Janvier à Avril 2002 ; Février 2006 et Octobre 2010.	109
Figure 32 : Variations mensuelles des AOD de la zone Africaine et caribéenne pour la période 2006-2016.	110
Figure 33 : Parcours saisonnier des masses d'air poussiéreuses au-dessus de l'Atlantique, atteignant les îles de l'arc Antillais	111
Figure 34 : Variation mensuelle des AE (440-870 nm) pour les sites de l'Afrique (Dakar et Cap Vert) et de la Caraïbe (Porto Rico, Guadeloupe et Barbade)	112
Figure 35 : Illustration par image satellite de l'épaisseur optique en aérosols : brulis représentés par les aérosols organiques (vert), aérosols désertiques (rouge-orange) et sel marin (bleu)	

[simulation de transport d'aérosol avec GEOS-5 par William Putman and Arlindo da Silva (Février 2013) ; https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/aerosol/modeling/nr1_movie/	113
Figure 36 : Classification du nombre d'évènements poussiéreux en fonction de leur intensité : Evènements faibles ($50 \mu\text{g m}^{-3} > \text{PM}_{10} \geq 35 \mu\text{g m}^{-3}$), évènements moyens ($80 \mu\text{g m}^{-3} > \text{PM}_{10} \geq 50 \mu\text{g m}^{-3}$), évènements forts ($\text{PM}_{10} \geq 80 \mu\text{g m}^{-3}$) [2006-2016]	114
Figure 37 : Concentrations annuelles en PM_{10} (Porto Rico, Guadeloupe, Martinique) et seuils établis pour la protection de la santé (OMS)	116
Figure 38 : Nombre moyen de jours dans l'année durant lesquels la concentration moyenne journalière est $\geq 50 \mu\text{g m}^{-3}$ (Porto Rico, Guadeloupe et Martinique) de 2006 à 2016	117
Figure 39 : Nombre annuel d'évènements poussiéreux dans la Caraïbe (Porto Rico, Guadeloupe et Martinique) ; Evènements faibles en gris ($50 \mu\text{g m}^{-3} > \text{PM}_{10} \geq 35 \mu\text{g m}^{-3}$), évènements moyens en rose ($80 \mu\text{g m}^{-3} > \text{PM}_{10} \geq 50 \mu\text{g m}^{-3}$), évènements forts en rouge ($\text{PM}_{10} \geq 80 \mu\text{g m}^{-3}$)	119
Figure 40 : Principaux couloirs de transport des poussières désertiques vers l'Ouest : transport Nord (entre les latitudes 10°N - 20°N) et transport Sud (0° - 10°N)	122
Figure 41 : AOD moyen mensuel (MODIS) pour la période de NDJF (2006-2016) dans la zone tropicale Nord Atlantique ; NASA GIOVANNI : https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/ ..	123
Figure 42 : Moyennes mensuelles d'AOD (MODIS) pour les mois de MA (2006-2016) dans la zone tropicale Nord Atlantique ; NASA GIOVANNI : https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/	125
Figure 43 : AOD moyen mensuel (MODIS) pour la période de MJJA (2006-2016) dans la zone tropicale Nord Atlantique ; NASAGIOVANNI : https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/ ..	126
Figure 44 : AOD moyen mensuel (MODIS) pour la période de SO (2006-2016) dans la zone tropicale Nord Atlantique ; NASAGIOVANNI : https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/ ..	127
Figure 45 : Rétro-trajectoires (N =1 323) générées au départ des îles caribéennes (Porto Rico, Guadeloupe, Barbade) ; hauteur = 1 500 m ; durée = 240 h ; période de NDJF (de 2006 à 2016).	131
Figure 46 : Rétro-trajectoires (N = 671) générées au départ des îles caribéennes (Porto Rico, Guadeloupe, Barbade) ; hauteur = 1 500 m ; durée = 240 h ; période de MA (2006 à 2016).	133
Figure 47 : Rétro-trajectoires (N = 1 353) générées au départ des îles caribéennes (Porto Rico, Guadeloupe, Barbade) ; hauteur = 1 500 m ; durée = 240 h ; période de MJJA (de 2006 à 2016).	135

Figure 48 : Rétro-trajectoires (N = 671) générées au départ des îles caribéennes (Porto Rico, Guadeloupe, Barbade) ; hauteur = 1 500 m ; durée = 240 h ; période de SO (de 2006 à 2016).	137
Figure 49 : Rétro-trajectoires associées aux évènements de brumes désertiques ($PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$) générées au départ de Porto Rico (traces bleu, N = 31), de Guadeloupe (traces rouge, N = 40) et de Barbade (traces jaunes, N = 28) : hauteur = 1 500 m ; durée = 240 h ; période de NDJF (de 2006 à 2016).	139
Figure 50 : Rétro-trajectoires associées aux évènements de brumes désertiques ($PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$) générées au départ de Porto Rico (traces bleu, N = 45), de Guadeloupe (traces rouge, N = 87) et de Barbade (traces jaunes, N = 70) : hauteur = 1 500 m ; durée = 240 h ; période de MA (de 2006 à 2016).	140
Figure 51 : Rétro-trajectoires associées aux évènements de brumes désertiques ($PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$) générées au départ de Porto Rico (traces bleu, N = 392), de Guadeloupe (traces rouge, N = 478) et de Barbade (traces jaunes, N = 241) ; hauteur = 1 500 m ; durée = 240 h ; période de MJJA (de 2006 à 2016).	143
Figure 52 : Rétro-trajectoires associées aux évènements de brumes désertiques ($PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$) générées au départ de Porto Rico (traces bleu, N = 75), de Guadeloupe (traces rouge, N = 90) et de Barbade (traces jaunes, N = 31) ; hauteur = 1 500 m ; durée = 240 h ; période de SO (de 2006 à 2016).	144
Figure 53 : Rétro-trajectoires types : NOAP, SOAP (NWAP et SWAP en anglais), NEAP, SA	146
Figure 54 : Parcours types associés aux jours poussiéreux (2006-2016) : NOAP, SOAP, NEAP ; exemples de rétro-trajectoires au départ de la Guadeloupe (16.24 ° N, -61.53 ° E), durée (240 ou 400 heures), altitudes (1 500 m, 2 000 m et 3 000 m) ; le cas en bas à droite est un exemple de rétro-trajectoire d'origine Nord-américaine, non relié au transport des poussières.	147
Figure 55 : Répartition saisonnière des types de circulation des masses d'air poussiéreuses impactant la Caraïbe définies à partir des valeurs du Tableau 9 ; <i>Représentation graphique de la classification des rétro-trajectoires en annexes.</i>	149
Figure 56 : Comparaison entre le radiosondage (Guadeloupe) reflétant un évènement poussiéreux associé aux types de masse d'air NEAP et NOAP.	150
Figure 57 : Détection des aérosols minéraux au-dessus de l'Atlantique (MODIS, GIOVANNI) et rétro-trajectoires de type NEAP (HYSPLIT)	151
Figure 58 : Humidité du sol et vent des basses couches de 1000-850 hPa ; [Fig. 4(f) (Jury, 2017)]	152

Figure 59 : Représentation des VPSD mensuelles de la zone Ouest-Africaine (Dakar et Cap Vert) pour la période de 2006 à 2016 : (gauche) distribution linéaire ; (droite) distribution logarithmique	154
Figure 60 : Représentation des VPSD mensuelles de la zone caribéenne (Porto Rico, La Guadeloupe et la Barbade) pour la période de 2006 à 2016 : (gauche) distribution linéaire ; (droite) distribution logarithmique.....	155
Figure 61 : Répartition des AE en fonction des AOD pour Porto Rico (PR), Guadeloupe (GPE) et Barbade (BAR) de 2006 à 2016. Le nombre de données se trouve réduit, puisque nous avons utilisé la base de données issue des travaux de Velasco-Merino et al. (2018) : amélioration des la qualité des données AERONET 1.5 : voir Burgos et al. (2016) et Mateos et al. (2014). .	159
Figure 62 : VPSD moyen des Modes grossiers désertique versus marin.....	160
Figure 63 : VPSD moyen des cas associés aux critères optiques : $AOD \geq 0.15$ et $AE \geq 0.6$.	161
Figure 64 : VPSD moyen associée aux jours poussiéreux ($PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$).....	162
Figure 65 : Concentrations journalières moyennes des $PM_{2.5}$ en fonction des concentrations journalières moyennes des PM_{10} pour les sites de Porto Rico (stations urbaines de San Juan) et de la Guadeloupe [stations urbaines de Pointe-à-Pitre (PM_{10}) et Baie-Mahault (PM_{10} et $PM_{2.5}$)].	164
Figure 66 : Cycle mensuel du ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ à Porto Rico (2006-2014) et en Guadeloupe (2006-2012).....	165
Figure 67 : Régressions linéaires des concentrations journalières moyennes de $PM_{2.5}$ et de PM_{10} pour Porto Rico (à gauche) et la Guadeloupe (à droite), selon deux types de pollution (groupe A avec un ratio < 0.6 et groupe B avec un ratio ≥ 0.6) ; https://presentations.copernicus.org/EMS2017-866_presentation.pdf)	167
Figure 68 : Illustration par image satellite de l'épaisseur optique en aérosols : brulis représentés par les aérosols organiques (vert), aérosols désertiques (rouge-orange) et sel marin (bleu) [simulation de transport d'aérosol avec GEOS-5 (résolution 10 Km) par William Putman and Arlindo da Silva (Février 2013) ; (https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/aerosol/modeling/nr1_movie/).....	168
Figure 69 : Régressions linéaires des concentrations journalières moyennes de $PM_{2.5}$ versus PM_{10} pour la Guadeloupe.....	169
Figure 70 : Radiosondage du 3 Juillet 2012 mesuré à la station du Raizet (code :78897, Guadeloupe)	171

Figure 71 : Représentation saisonnière des profils moyens de températures des JP (courbes continues) et JNP (courbes en pointillés) de Porto Rico (bleu) et de la Guadeloupe (rouge), profil SAL [Dunion and Marron (2008)]	174
Figure 72 : Profils de température des JP de faible, moyenne et forte intensité en fonction des saisons NDJF, MA, MJJA, SO (2006-2016) en Guadeloupe et à Porto Rico ; Profil SAL Dunion and Marron (2008)	176
Figure 73 : Profils de rapport de mélange (courbes de gauche), de température (courbes de droite) et de vents (barbules et hampes) des JP (courbes continues) et JNP (courbes en pointillés) de Guadeloupe (rouge) et Porto Rico (bleu) ; périodes NDJF, MA, MJJA et SO de 2006-2016]	179
Figure 74 : Répartition des AE (440-870 nm ; qualité 2.0) en fonction des AOD (440 nm ; qualité 2.0) pour les jours de concentration $PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$ en Guadeloupe et à Porto Rico (2006-2016) pour les quatre saisons préalablement définies NDJF, MA, MJJA et SO ; critère de qualité appliqué : seules les données journalières fournissant au minimum 12 mesures d'AOD par jours ont été sélectionnées pour cette étude	181
Figure 75 : Profils verticaux de température et d'humidité associé aux JP reliés aux types de parcours NOAP, SOAP, NEAP et SA (voir chapitre 3 des « résultats et discussions »).....	183
Figure 76 Variations de l'indice ACE de 2006 à 2016 dans l'Atlantique Nord comparées au nombre d'évènements de poussières faibles, moyens ou forts comptabilisés pour chacune de ces années.....	185
Figure 77 : Variations de l'indice ACE de 2006 à 2016 dans l'Atlantique Nord comparées à la concentration moyenne annuelle en PM_{10} pour chacune de ces années.	186
Figure 78 : Forçage radiatif (ΔF_{BOA}) mensuel entre 2006-2016 ; données fournit par AERONET	194
Figure 79 : Albedo de simple diffusion (SSA) mensuel entre 2006 et 2016 ; données fournit par AERONET	194

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Types de stations de mesure ; Coordonnées géographiques ; Période des données ; et Nombre total de données quotidiennes pour tous les sites utilisés.....	55
Tableau 2: La distribution de taille des particules selon les 3 modes	60
Tableau 3: Valeur des indices de réfractions pour différents types d'aérosols ; ces résultats concernent la gamme des longueurs d'onde du visible (références : Shettle and Fenn, 1979; Koepke et al.,1997; Dubovik et al., 2001; Takemura et al., 2002)	62
Tableau 4 : Nombre de mesures d'AOD et de données d'inversion (VPSD) de la zone Caraïbe et Africaine (2006-2016).....	68
Tableau 5 : Nombre de jours pour lesquels les données de sondages journaliers (12 UTC) sont disponibles simultanément avec les données de concentrations journalières de PM10 pour chaque station (2006-2016).....	78
Tableau 6 : Pourcentage de cas correspondant aux différents critères d'AOD et d'AE	91
Tableau 7 : Indices de Qualité de l'Air et classification des concentrations de PM10	95
Tableau 8 : Valeurs de références attribuées aux aérosols désertiques, marins (Dubovik and King, 2000 ; Dubovik et al., 2002 ; Toledano et al., 2007).....	101
Tableau 9 : Tableau récapitulatif du nombre de rétro-trajectoires classées	148

LISTE DES ABREVIATIONS

- AOD = Aerosols Optical Depth
- CT = Type de Circulation
- JP = Jours Poussiéreux
- JNP = Jours Non Poussiéreux
- MA = Mars-Avril
- MJJA = Mai Juin Juillet Août
- NEAP = Nord-Est Atlantique Parcours
- NDJF = Novembre Décembre Janvier Février
- SA = Sud Américain
- SO = September Octobre
- NOAP = Nord-Ouest Atlantique Parcours
- PM10 = Particle Matter less than 10 microns
- PM2.5 = Particle Matter less than 2.5 microns
- SOAP = Sud-Ouest Atlantique Parcours
- SSA = Single Scattering Albedo
- VPSD = Volume Particle Size Distribution

INTRODUCTION GENERALE

Les aérosols en suspension dans l'atmosphère, notamment les poussières minérales, influent sur les processus biogéochimiques marins, la fertilité du sol, la qualité de l'air, la santé humaine, ainsi que sur les conditions météorologiques et le climat à l'échelle mondiale et régionale [Organisation Météorologique Mondiale (OMM) ; Prospero et al., 2013]. La migration des amas de poussières au niveau planétaire est un processus contribuant à l'équilibre climatique planétaire. Les poussières désertiques proviennent essentiellement des zones arides et semi-arides, qui représentent plus de 30% de la surface de l'ensemble des continents (Schutz, 1980). Les déserts de l'Afrique de l'Ouest sont la principale source de particules minérales présentes dans l'atmosphère, comptabilisant la majorité de la production globale (Zender et al., 2003 ; Schepanski et al., 2009 ; Carlson and Prospero, 1972). Huneus et al. (2011) ont estimé que l'Afrique du Nord émettait entre 400 et 2 200 Tg par an, soit 70% de la part mondiale (Huneus, et al., 2011). Les panaches de poussières sont transportés sur de très longues distances depuis la zone saharienne, vers l'Ouest (États-Unis, Caraïbes et Amérique du Sud), mais aussi vers le Nord (Europe) et l'Est (bassin méditerranéen et Moyen-Orient) (Schutz, 1980 ; Koren et al., 2006 ; Kaufman et al., 2005 ; Schepanski et al., 2009). Au cours de la dernière décennie, l'étude des conséquences du phénomène de « brumes désertiques » à la fois sur le climat et la santé humaine constitue un axe principal d'étude en Science de l'atmosphère.

Le transport des poussières provenant d'Afrique est devenu un problème environnemental majeur dans la Caraïbe, dès lors qu'il s'est avéré être la principale cause de réduction de la qualité de l'air dans cette région. En effet, les îles de la Caraïbe sont caractérisées par un faible développement industriel, et sont de ce fait, soumises à une pollution anthropique moins importante que celle observée dans les zones urbaines des pays industrialisés tels que l'Europe et les Etats-Unis (Prospero, et al., 2014). Les aérosols marins (sel de mer) font partie intégrante de « l'atmosphère de fond » de ces îles entourées par l'Océan Atlantique (Prospero et al., 2013 ; Clergue et al., 2015 ; Rastelli et al., 2017).

Le bassin caribéen se trouve dans un contexte géographique et industriel propice à l'étude du phénomène de pollution des « brumes désertiques ».

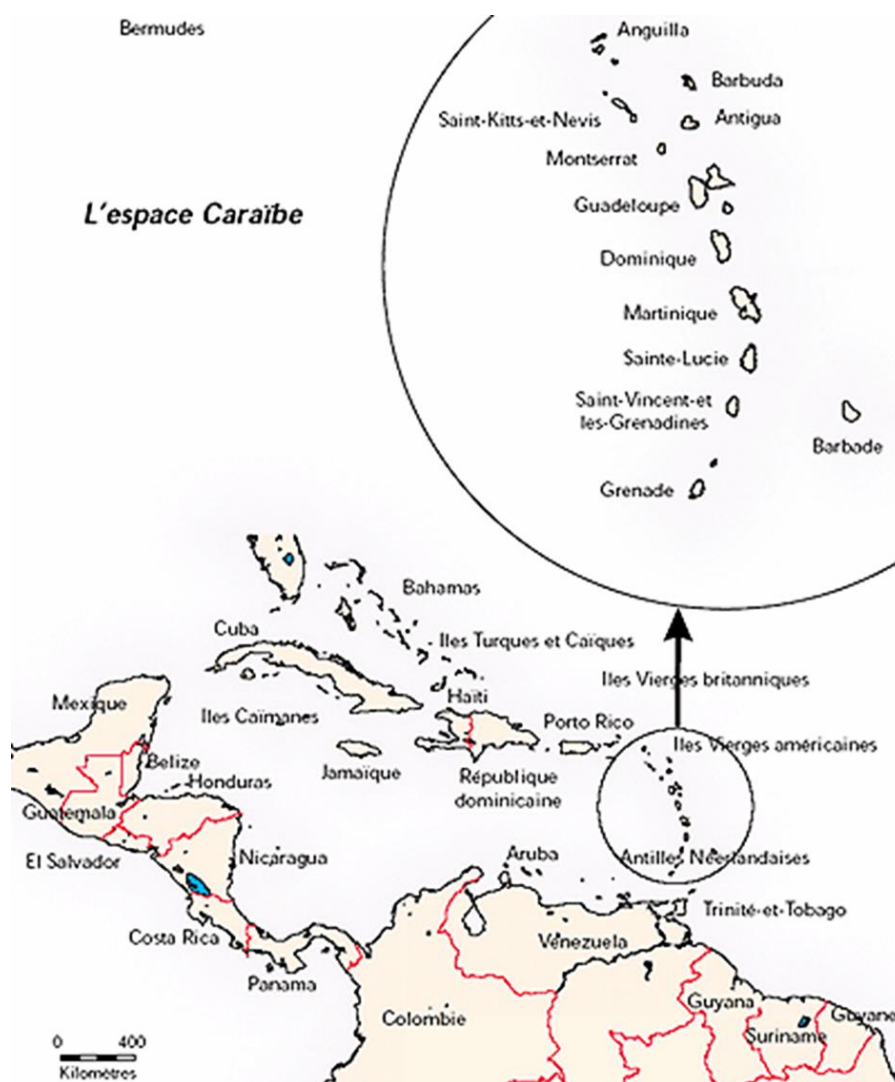


Figure 1 : Iles de l'arc Antillais

L'arc des Petites Antilles (Figure 1), qui se situe à environ 4 000 km des côtes Africaines, est directement impacté par le phénomène de transport épisodique des poussières Sahariennes. Il est constitué d'archipels membres de l'Organisation des États de la Caraïbe orientale depuis 1981 (Antigua-et-Barbuda, Dominique, Sainte Lucie, Saint-Vincent-et-les-Grenadines, Grenade) ; de départements et régions d'outre-mer sous dépendance française (Guadeloupe et Martinique), britannique (Anguilla, les Iles Vierges, Montserrat, anciennement la Barbade) et américaine (Puerto-Rico). Ces îles ne sont donc pas soumises aux mêmes normes et contrôles de la qualité de l'air.

Toutefois, les lois internationales pour la protection de la santé des personnes, imposent un contrôle de la qualité de l'air incluant des mesures quotidiennes des concentrations de

poussières à la surface (PM10, PM2.5) et des polluants tels que l’ozone (O₃), le dioxyde de soufre (SO₂), le monoxyde d’azote (NO), le dioxyde d’azote (NO₂) et l’oxyde d’azote (NO_x).

Après le transport au-dessus de l’Atlantique, la taille des particules de poussières désertiques est généralement inférieure à 10 µm de diamètre (Reid et al., 2003 ; Petit et al., 2005 ; Prospero et al., 2014). Par ailleurs, plusieurs îles de l’arc sont intégrées au réseau AERONET RObotic NETwork (AERONET) qui fournit une base de données sur les propriétés optiques, microphysiques et radiatives des aérosols pour l’étude et la caractérisation des particules désertiques. Ces données permettent de détecter l’arrivée de poussières sahariennes. Enfin, la Caraïbe dispose également de mesures de radiosondages atmosphériques dans plusieurs stations. Ces données sont indispensables à la description thermodynamique verticale de l’atmosphère en zone tropicale.

Trois sites de la Caraïbe réunissent l’ensemble de ces mesures au sol, utiles à l’étude de la climatologie du phénomène des « brumes désertiques » : Porto Rico (au Nord), la Guadeloupe (au centre) et la Barbade (au Sud). Parmi ces sites, seule la Barbade possède déjà un grand nombre d’analyses et d’études sur le sujet. De manière générale, les indices de pollutions affectés à la Caraïbe sont basés sur des études menées en Europe [exemple : Evaluation de l’Impact Sanitaire (EIS)]. Les échelles de transport pour l’Europe diffèrent de celles observées dans la Caraïbe. Ces dernières peuvent affecter les niveaux de pollutions détectés et les processus météorologiques de la zone. Aussi, il est important de s’interroger sur la légitimité des seuils de présence de poussières définis par l’Europe : Reflètent-ils réellement la réalité des épisodes poussiéreux de la zone Caribéenne ?

Nous proposons donc d’évaluer l’impact Environnemental des événements de poussières désertiques aux Petites Antilles, en effectuant une étude statistique se référant à la base de données de mesures existantes dans cette région (radiosondages, PM10, données AERONET). Par ailleurs, des Evaluations d’Impact Sanitaire pourront être réalisés selon les résultats obtenus. Cette approche qui tient compte du comportement des données de chaque île distinctement, non moyenné pour l’ensemble des sites de l’arc antillais (comme c’est le cas dans la plupart des études antérieures), permet de quantifier les épisodes poussiéreux au Nord, au centre et au Sud de l’Arc des Petites Antilles.

La première étape de ces travaux consiste à caractériser la pollution particulaire dans la zone caribéenne, afin de distinguer l’impact de l’activité anthropique, du phénomène des poussières désertiques sur la qualité de l’air, pour la période d’étude de 2006 à 2016 (11 années). Nous

nous sommes basés sur les quantités de poussières mesurées à la surface, définies par les concentrations massiques de particules inférieures à 10 μm (PM10) et 2.5 μm (PM2.5), ainsi que sur les données de mesure photométrique (AERONET) : Aérosols Optical Depth (AOD), le coefficient d'Angstrom (AE), Albédo de simple diffusion (SSA pour « Single Scattering Albedo ») et indices de réfraction. Ces paramètres optiques ont permis d'identifier les principaux types d'aérosols de la zone.

Ensuite, la caractérisation optique des aérosols minéraux a été mise en relation avec les concentrations de poussières mesurées in situ. C'est à partir de ces résultats que nous avons déterminé un seuil de PM10 journalier relatif à la présence des aérosols désertiques, adapté à la région caribéenne. Les propriétés d'absorption et radiatives des aérosols (SSA, indices de réfraction) sont venues renforcer nos hypothèses. En aparté, nous avons également analysé les données de concentrations de poussières prélevées à la Barbade (fournies pour la période entre 2002 et 2011).

Une fois notre seuil de poussières établi, nous avons réalisé une étude climatologique des épisodes poussiéreux (en Guadeloupe, Martinique et Porto Rico). Elle s'appuie sur l'étude de la circulation atmosphérique [rétro trajectoires des masses d'air ; Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT)] et la détection satellitaire [MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)] des particules minérales, au-dessus de l'Atlantique Nord. Ces travaux ont mis en évidence le cycle saisonnier du transport des poussières dans la Caraïbe.

Afin d'observer les effets du transport à grande échelle, nous nous sommes également penchés sur la caractérisation microphysique des particules au départ d'Afrique, et à l'arrivée des poussières dans le bassin caribéen. Nous avons donc analysé les données de répartition de la taille volumique (VPSD pour « Volume Particle Size Distribution ») des aérosols mesurés sur la côte Africaine (Dakar, Cap Vert) et dans les îles de l'arc des Petites Antilles (Porto Rico, Guadeloupe et Barbade). Toujours sur le même axe d'étude, nous utilisons également le rapport entre PM2.5 et PM10 mesurés à Porto Rico et en Guadeloupe, afin de cibler les divers régimes de pollution reflétés par le rapport de taille entre les particules fines et grossières.

La dernière partie de nos travaux concerne l'analyse des relations entre poussières désertiques et thermodynamique de l'atmosphère. Nous nous sommes intéressés aux profils de température et d'humidité (rapport de mélange) qui caractérisent la couche de transport des poussières : la Saharan Air Layer (SAL). Pour finir, nous comparons la fréquence et l'intensité des événements

poussiéreux, à l'énergie des systèmes cycloniques (ACE pour « Accumulated Cyclone Energy »).

PARTIE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. DEFINITION AEROSOLS

Les « aérosols » sont des particules en suspension dans l'atmosphère à l'état solides ou liquides, à l'exception des gouttelettes et des cristaux présents dans les nuages, qui sont définis comme des « hydrométéores ». On peut donc classer les aérosols en fonction de leur origine (sources naturelles, sources anthropiques) et de leur mode de formation (aérosols primaires, aérosols secondaires).

Les aérosols primaires sont les particules directement émises dans l'atmosphère sous forme solide ou liquide. Exemple : particules minérales provenant de l'érosion des sols, les sels marins, les cendres volcaniques.

Les aérosols secondaires résultent de la transformation de gaz atmosphériques en particules. La nucléation de particules solides ou liquides à partir de précurseurs gazeux ou ioniques est le mécanisme principal à l'origine de la formation de nouvelles particules dans l'atmosphère. Ce sont des particules très fines qui ont un impact climatique et sanitaire considérable.



2. NORMES DE LA QUALITE DE L'AIR ET IMPACT SANITAIRE

2.1. Normes Européennes et législation française

En France, le Programme de Surveillance de la Qualité de l'air (PSQA) de l'Institut de Veille Sanitaire (InVS) a cherché à relier le taux de mortalité, d'hospitalisation et des visites aux urgences (indicateurs sanitaires) avec le niveau de pollution atmosphérique (particules en suspension). Une fois ce lien établi, des études épidémiologiques ont permis de définir les

relations Exposition-Risques (E-R) pour l'Evaluation de l'Impact Sanitaire (EIS) de la pollution atmosphérique urbaine d'origine anthropique ou naturelle (Declercq et al., 2012).

2.2. Indicateurs de la qualité de l'air

Les particules en suspension responsables de la pollution atmosphérique sont mises en évidence par les données de quantité de matière en suspension (PM = Particle Matter) qui sont des indicateurs de la qualité de l'air. Ces données sont classées selon le diamètre des matières en suspension comme suit :

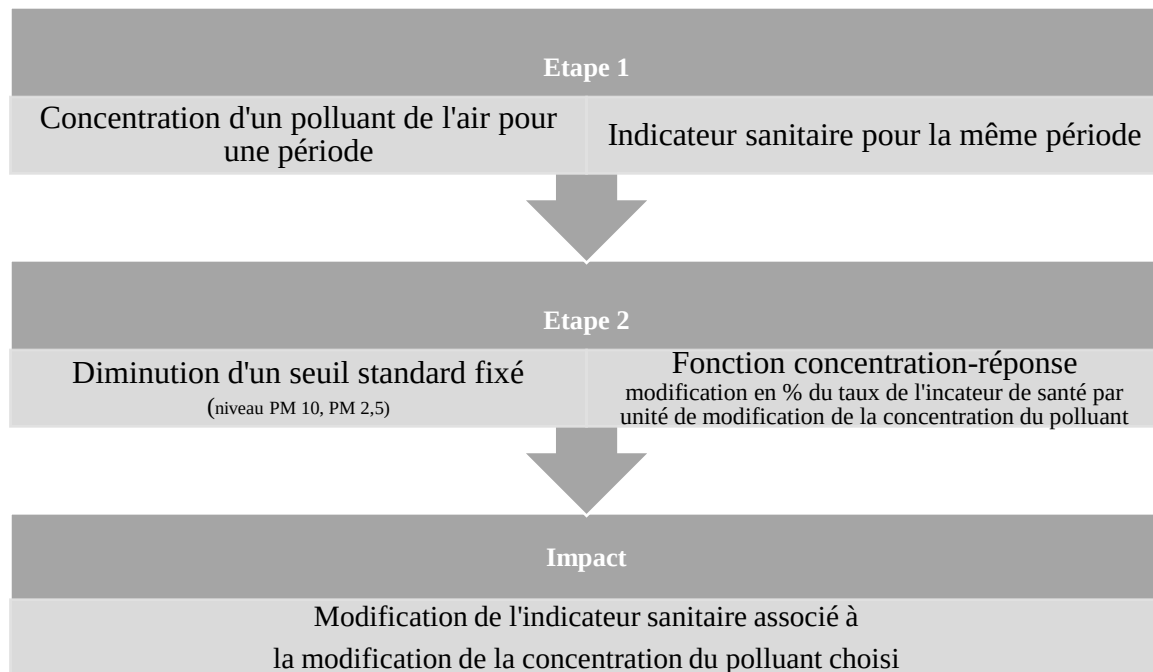
- Données PM10 : Concentration massique des particules présentant un diamètre aérodynamique inférieur à 10 μm
- Données PM2.5 : Concentration massique des particules présentant un diamètre aérodynamique inférieur à 2.5 μm

2.3. Rôle des EIS (Evaluation de l'Impact Sanitaire)

Afin de sensibiliser la population aux pollutions atmosphériques par les poussières, des EIS sont également utilisées. Elles permettent notamment la médiatisation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique locale qui peut être spécifique à chaque région. L'objectif de ces EIS est de réduire à court et long termes tous les indicateurs sanitaires (hospitalisation, mortalité) imposant de fait l'amélioration de la qualité de l'air et par là même, l'espérance de vie de la population (Declercq et al., 2012).

Exemple :

Principe de l'évaluation locale de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique



2.4. Résultats des EIS en Europe

Le projet Aphekom (Improving Knowledge and Communication for Decision Making on Air Pollution and Heath in Europe) a été réalisé dans 25 villes européennes, dont neuf villes françaises (Bordeaux, Le Havre, Lille, Lyon, Marseille, Paris, Rouen, Strasbourg et Toulouse). Cette évaluation de l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé de 39 millions d'habitants vivant dans des zones urbaines, pour la période de 2004 à 2006, a servi de guide méthodologique EIS (Ung et al., 2012 ; Declercq et al., 2012).

Les principaux résultats de cette étude concernant les PM10, pour les neuf villes françaises, à partir des indicateurs sanitaires tels que la mortalité, l'hospitalisation cardiaque et respiratoire, sont :

- Une diminution du seuil de l'OMS sur la moyenne annuelle des PM2.5 (à $10 \mu\text{g m}^{-3}$) aurait permis de réduire près de 3000 décès en France par an
- Une diminution du seuil de l'OMS sur la moyenne annuelle des PM10 (à $20 \mu\text{g m}^{-3}$) aurait permis d'éviter 360 hospitalisations cardiaques et 630 hospitalisations par année (Ung, et al., 2012) (Declercq, et al., 2012)

Les résultats pour l'ozone sont disponibles dans (Declercq, et al., 2012)].

2.5. Seuils de protection sanitaire de PM10 et PM2.5

De fait de leurs petites tailles, les particules fines sont plus facilement ingérées par l'organisme humain. Ainsi, plus elles sont fines, et plus elles sont dangereuses pour la santé. Les aérosols solides, surtout pour les atmosphères sous influences anthropiques, peuvent être composés d'un mélange complexe dont la toxicité dépend de la composition des particules. Ainsi, l'identification de leur composition qui est également un indicateur de leur origine, permet d'évaluer l'impact sur la santé grâce aux résultats épidémiologiques obtenus précédemment [(Declercq, et al., 2012) (Lippman, 2009)]. Les événements de « brumes de poussière désertique » génèrent de fortes concentrations de PM10 dans nos régions conduisant à des situations de mise en vigilance des populations tenant compte des recommandations de l'OMS et des directives européennes qui ont permis d'établir des seuils acceptables de concentrations massiques des particules de diamètres inférieurs à 10 μm (PM10) et 2.5 μm (PM2.5) :

- 50 $\mu\text{g m}^{-3}$ en moyenne journalière à ne pas dépasser plus de 35 fois par année civile (PM10)
- 40 $\mu\text{g m}^{-3}$ en moyenne annuelle (PM10). Depuis 2010, l'objectif est d'atteindre les 20 $\mu\text{g m}^{-3}$
- 25 $\mu\text{g m}^{-3}$ en moyenne annuelle civile (PM2.5)

En ce qui concerne les mesures appliquées ponctuellement (Institut de veille sanitaire, 2015), deux seuils de concentrations massiques des particules ont été retenus :

- 50 $\mu\text{g m}^{-3}$: à partir de cette valeur, des spots d'information sont diffusés à la population pour lui notifier la présence de « brumes de poussière désertique » et ainsi avertir les personnes les plus vulnérables (enfants, personnes asthmatiques ou atteintes de pathologie cardio vasculaire...).
- 80 $\mu\text{g m}^{-3}$: c'est le seuil d'alerte et à partir de cette valeur de pollution, l'ensemble de la population peut être impacté par le phénomène.

2.6. Indicateurs sanitaires associés aux événements de « brumes désertiques »

En 2013, l'OMS a établi que les admissions hospitalières pour problèmes cardiovasculaires étaient liées à la pollution atmosphérique par les aérosols minéraux d'origine désertique. En effet, un grand nombre d'études font état des difficultés respiratoires et cardiovasculaires que

peuvent provoquer les épisodes de poussières (Goudie, 2014 ; Morman and Plumlee, 2013). Ainsi, ces études ont permis de définir les principaux indicateurs sanitaires liés aux évènements poussiéreux. Ce sont :

- Les maladies respiratoires et l'asthme
- La « fièvre de la vallée » (coccidioidomycose)
- La méningite à méningocoques
- Les infections des yeux et de la peau

2.7. Evaluation de l'Impact Sanitaire des poussières dans la Caraïbe

Des études réalisées dans la Caraïbe, principalement à la Barbade, à Trinidad, à Antigua et à la Guadeloupe, ont cherché à montrer le lien entre les phénomènes de « brumes de poussière désertiques » et les augmentations d'admission pour **maladies respiratoires et asthme, irritations oculaires et accidents cardiovasculaires**. Les résultats ont montré que parmi l'ensemble de la population, les enfants étaient les plus touchés par les épisodes de poussières (Reyes et al., 2000 ; Monteil et al., 2005 ; Prospero et al., 2005 ; Cadelis et al., 2014 ; Virnot, 2017).

3. ZONES SOURCES DES POUSSIÈRES

Les potentielles zones sources des poussières Africaines de l'hémisphère Nord (zones Saharienne et Sahélienne) ont été déterminées à partir d'analyses géochimiques et biochimiques mais également par détections satellitaires (d'Almeida, 1986 ; Chiapello et al., 1997 ; Brooks and Legrand, 2000 ; Prospero et al., 2002 ; Goudie and Middleton, 2001 ; Koren et al., 2003 ; Schepanski et al., 2009 ; Huang et al., 2010 ; Formenti et al., 2011 ; et autres). Les résultats de ces études ont conduit à cibler six zones sources :

- La Zone de chotts en Tunisie et au Nord de l'Algérie
- Le Sahara occidental à l'Ouest de la Mauritanie
- La région frontalière entre le Mali-et l'Algérie
- La Libye centrale
- Le Sud de l'Égypte et le Nord du Soudan
- L'ancien bassin du lac Tchad dans la région du Bodélé

L'analyse de la composition chimique des particules de poussières prélevées dans la Caraïbe et l'étude des rétro-trajectoires ont permis de relier les poussières en suspension à certaines sources sahariennes (Petit et al., 2005 ; Clergue et al., 2015). Certaines études ont montré que la région des Petites Antilles est principalement concernée par deux zones sources : (1) le Sahara occidental à l'Ouest de la Mauritanie ; (2) le Bodélé (Shinn et al., 2000 ; Reid et al., 2003 ; Colarco et al., 2003).

3.1. Mobilisation des poussières

L'Afrique de l'Ouest est constituée d'un enchaînement de cuvettes et de massifs espacés de Talweg s'étendant du Nord au Sud. Ces reliefs influencent la circulation atmosphérique et contribuent à la mobilisation des aérosols minéraux. De plus, la rugosité et la composition des sols sont des facteurs à prendre en compte. Ainsi, la mobilisation des particules de poussières désertiques dans les zones sources primaires et secondaires dépend tout aussi bien de la variabilité saisonnière de la circulation atmosphérique, que des caractéristiques topographiques des régions désertiques (Goudie and Middleton, 2001).

3.1.1. *La région du Bodélé : une zone source primaire*

La dépression du Bodélé est localisée au Nord du lac Tchad, au centre Sud du Sahara, entre les massifs de Tibesti et de l'Ennedi. Toutefois, les fluctuations du climat sur le dernier millénaire ont conduit au dessèchement d'une grande partie du lac Tchad. La disparition de l'eau a cédé la place à une plaine riche en sédiments principalement composée d'argile. Cet ancien lit du lac Tchad est constitué de dépôts alluvionnaires riches en particules très fines et en diatomées qui sont soulevées et transportées sur de longues distances. Ces diatomées du Bodélé ont été identifiées dans les poussières désertiques retrouvées en Amazonie et dans la Caraïbe (Prospero et al., 1981 ; Reid et al., 2003 ; Ben-Ami et al., 2010 ; Adams et al., 2012 ; Prospero et al., 2014). La configuration spécifique de cette vallée, sise entre deux massifs montagneux, engendre une accélération de l'Harmattan, un vent continental de Nord-Est, qui érode la surface et soulève les particules de poussières minérales en altitude (Coudé-Gaussen, 1991 ; Koren et al., 2006). Ces jets de basses couches, souvent supérieurs à 10 m s^{-1} , sont majoritairement (à 65%) responsables de l'activation des zones sources de poussières désertiques (Blackadar, 1957) ; Schepanski et al., 2009). Lorsque les conditions sont favorables, les fines particules peuvent être entraînées jusqu'à 6000 m d'altitude (Cavalieri et al., 2010 ; Adams et al., 2012). Ainsi, cette région, soumise aux systèmes de vents saisonniers (Harmattan, flux de mousson),

connait des conditions favorables qui en font la principale source de poussières désertiques sur l'ensemble de la Terre (Koren et al., 2006 ; Washington et al., 2009).

3.1.2. *Activation saisonnière des sources désertiques*

Les cycles saisonniers qui régissent les conditions météorologiques de la zone, par les systèmes de vents associés, sont les moteurs d'activité des sources de poussières. Des études du cycle saisonnier des émissions sahariennes, basées sur des mesures photométriques, des prélèvements d'aérosols désertiques (d'Almeida, 1986) et des simulations (Laurent, 2005), ont montré que ces dernières étaient maximales au Printemps (maximum en Mars) et minimales en Automne (minimum en Novembre). La dépression du Bodélé fait exception à la règle puisque les émissions y sont maximales en Hiver.

3.1.2.1. *Période d'Hiver*

Pendant l'Hiver de l'hémisphère Nord (de Novembre à Mars), les régions Sahariennes et sub-Sahariennes sont principalement sous l'influence de l'Harmattan (Schwanghart and Schutt, 2008).

3.1.2.2. *Période d'Eté*

Durant la période d'Eté de l'hémisphère Nord, les configurations atmosphériques conditionnées par le déplacement de la Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT, air de basse pression) plus au Nord créent un flux de Mousson (vent maritime du Sud-Est) qui pénètre le continent Africain jusqu'à la limite de la zone Saharienne (Schutz, 1980 ; Formenti et al., 2011 ; Ben-Ami et al., 2012 ; Adams et al., 2012). Ces flux océaniques, chargés d'humidité, entrent en opposition avec les vents continentaux du Nord-Est (l'Harmattan) et sont à l'origine de développements convectifs importants : les lignes de grains (Bou Karam et al., 2008). Les violents orages super cellulaires qui se développent dans ces conditions engendrent alors des fronts de rafales responsables du soulèvement des poussières.

Par ailleurs, le Sahara central possède un des climats les plus extrêmes de la planète. A cette période de l'année, il se développe dans la zone Saharienne, une dépression thermique créée par le chauffage de la surface dû au rayonnement solaire au-dessus de vastes étendues désertiques qui couvrent le Nord du Mali, le Sud de l'Algérie et la Mauritanie orientale. Cette dépression thermique saharienne joue un rôle capital dans le soulèvement des poussières car elle impacte considérablement le système de mousson d'Afrique de l'Ouest (Bou Karam et al., 2008). Des études sur le phénomène de mobilisation des poussières en Eté, ont montré que les

épisodes de convections profondes engendraient des courants de densité soulevant les fines particules au-dessus de la couche de Mousson. Une partie de la poussière mobilisée se retrouve donc à l'interface Mousson-Harmattan caractérisée par des cisaillements de vent. Ainsi, ces particules de poussières sont disponibles pour le transport sur de longues distances (Bou Karam, 2008 ; Adams et al., 2012).

3.1.3. Sources secondaires de poussières (PDA, mélange avec les sels marins)

La caractérisation des particules suggère qu'il existe également un phénomène de recirculation des poussières. La présence de fer par exemple, conférant un aspect rougeâtre aux panaches de poussières, indique que ces poussières sont originaires des régions du sahel (régions exemptes de sols désertiques). Ce phénomène s'explique par l'acheminement de poussières provenant des zones sources majeures, telles que le Bodélé, vers ces régions. Par la suite, les particules sédimentées sont remises en suspension, puis transportées au-dessus de l'Atlantique. Ces régions peuvent être considérées comme des sources secondaires. Un tel comportement a été mis en exergue par Boloorani et al. (2014) pour les sources de poussières désertiques observées en Iran.

4. PARCOURS DES POUSSIÈRES AU-DESSUS DE L'ATLANTIQUE NORD

Depuis plusieurs siècles, les chercheurs s'intéressent aux parcours des « brumes de poussière désertique ». En effet, dès 1862, Ehrenberg publiait une carte historique de la distribution globale des records de retombés de poussières (Ehrenberg, 1862). Par la suite, le développement des techniques de détection satellitaire des amas poussiéreux a permis de suivre la progression des nuages de poussière dont l'extension horizontale pouvait aller jusqu'à 1000 km² (Shenk and Curran, 1974 ; Schutz, 1980). Ces études ont mis en lumière la durée moyenne de transport vers les Caraïbes qui est comprise entre 5 et 7 jours (Schutz, 1980). Enfin, plus récemment, l'amélioration des procédés de traitement d'image satellitaire a permis d'évaluer l'extension horizontale des masses d'air poussiéreuses nommées Saharan Air Layer (SAL). La SAL a été caractérisée par Prospero and Carlson (1972) et Carlson and Prospero (1972). Elle peut s'étendre de 4 000 à 5 000 km de diamètre (Dunion and Velden, 2004).

4.1. Expérience de Semmelhack (parcours saisonniers Nord Atlantique et Sud Atlantique)

Tout au long du parcours des poussières au-dessus de l'Océan Atlantique, le phénomène de déperdition de particules engendre la sédimentation marine (Schutz, 1980 ; Schutz et al., 1981

; Chamley, 1988). Au début du 20^e siècle, Semmelhack (1934) a réalisé une expérience qui consistait à analyser les données historiques de retombées de poussières dans une zone nommée « Dunkelmeer » (mer sombre), située au large des côtes Africaines [coordonnées : 10-15° Nord ; ~35° Ouest] (Schutz, 1980). Les résultats de ces travaux ont montré que le transport des poussières désertiques vers l'Ouest, était un phénomène relativement continu tout au long de l'année. Toutefois, dans l'hémisphère Nord et pendant l'Hiver, ils ont noté une diminution significative des quantités de poussières, contrairement à la période d'Eté de l'hémisphère Nord, caractérisée par une augmentation des quantités de poussières. Ainsi, le maximum de retombées de poussières désertiques dans la partie tropicale de l'hémisphère Nord se produit durant la période de Janvier à Août (Prospero et al., 1970 ; Prospero and Carlson, 1972 ; Schutz, 1980). Par ailleurs, l'expérience à « Dunkelmeer » a montré un déplacement de la zone de retombée vers le Sud pendant l'Hiver, et inversement, vers le Nord en Eté. Le « couloir » de transport des poussières désertiques s'inscrit entre les latitudes 5° N et 25° N. La migration saisonnière de la ZCIT borne le déplacement des panaches de poussières (Adams et al., 2012). Durant l'Eté, la ZCIT migre vers le Nord, favorisant le parcours entre les latitudes 15°N et 25°N. En Hiver, la ZCIT redescend vers l'équateur et permet le déplacement des nuages de poussières plus au Sud, entre les latitudes 5° N et 15° N. De ce fait, les départs « Nord » de nuages de poussières seraient liés aux sources désertiques du Nord de l'Afrique (Mali, Mauritanie, Sud de l'Algérie) ; et les départs « Sud », aux sources « Sud » (dépression du Bodélé) (Schutz, 1980).

4.2. Modèle 3D de transport des aérosols

Plus récemment, Adams et al. (2012) ont présenté un modèle de distributions 3D illustrant les voies de transport des aérosols minéraux à partir de leurs sources d'émission. Ce modèle est basé sur les données nocturnes, pour la période de Juin 2006 à Juin 2010, et englobe quatre cycles saisonniers : l'Eté boréal [Juin à Août (JJA)], l'Automne [Septembre à Novembre (SON)], l'Hiver [Décembre à Février (DJF)] et le Printemps [Mars à Mai (MAM)]. La variabilité zonale et méridienne du déplacement des poussières désertiques vers la zone de la Caraïbe et le Sud de l'Amérique a été présentée en mettant en avant le rôle déterminant de la ZCIT qui limite le déplacement des amas de poussières, en servant de « barrière ». Les résultats de modélisation obtenus par Adams et al. (2012) corroborent le caractère saisonnier du transport des poussières, précédemment montré par les observations de Semmelhack :

→ En Eté, le transport de type « Nord » prédomine et affecte principalement la Caraïbe.

- En Hiver, le transport de type « Sud » prévaut et impacte majoritairement le Sud de l'Amérique.

4.3. Campagne de mesure du Cap-Vert de 1951 à 1960

La campagne de mesure menée au Cap-Vert entre 1951 et 1960 sur les données de vent, est venue confirmer les observations de Semmelhack :

- Les vents d'Est dominant en haute altitude pour la période de Mai à Octobre, favorisant le transport vers l'Ouest, l'Atlantique Nord.
- En Hiver, les vents d'Ouest, appelés « counter winds », prévalent. Ces derniers inhibent donc le transport en dehors des côtes Nord-Africaines.
(Jaenicke and Schutz, 1978 ; Prospero et al., 1979 ; Schutz, 1980)

4.4. L'expérience PRIDE du 27 Juin au 25 Juillet 2000

Les premières mesures d'analyse de poussières désertiques dans la Caraïbe, ont été effectuées à la Barbade (île située au Sud de la Caraïbe) dès 1967 (Prospero et al., 1970 ; Savoie & Prospero, 1977 ; Prospero and Nees, 1977 ; Engelstaedter and Washington, 2007). Puis, en 2000, une importante campagne de mesures *Puerto Rico Dust Experiment* (PRIDE) a été réalisée sur le parcours des poussières entre l'Afrique et la Caraïbe (Porto Rico) en adoptant une approche analytique des différents paramètres tels que :

- La distribution spatiale à l'aide d'un Lidar
- Les profils verticaux de concentration
- La taille des particules
- Le forçage radiatif (aérosols)
- Les données spectrales

Cette campagne de mesures, basée sur des données issues des observations in-situ, la télédétection et la modélisation, a montré qu'en un mois, de fin juin à fin juillet 2000, on pouvait observer jusqu'à 6 événements de poussières.

Colarco et al. (2003) ont modélisé les émissions, le transport et le dépôt d'aérosols de poussières pendant la période de la campagne PRIDE. Les principaux résultats de simulation ont montré que 19% des masses d'air poussiéreuses mobilisées dans les régions sources d'Afrique, sont

transportés vers l'Ouest, au-delà des côtes Africaines vers la Caraïbe. Parmi les cas de poussières ayant quitté l'Afrique, 20% parvenaient à Porto Rico. Par ailleurs, la modélisation indiquait la présence potentielle d'un « réservoir » persistant de particules de poussières en suspension au-dessus de l'Afrique centrale et orientale. Les résultats de modélisation étaient améliorés lorsque les sources d'émission de poussières étaient paramétrées à l'aide du modèle de Ginoux et al. (2001).

La distribution granulométrique de ces poussières provenant d'Afrique a été étudiée durant la campagne PRIDE par Reid et al. (2003). Ces travaux ont mis en avant la complexité à déterminer une distribution granulométrique des poussières selon les méthodes aérodynamiques, optiques et géométriques. Cette complexité était particulièrement due à la présence de sels marins dans les nuages de poussières. Les propriétés radiatives et microphysiques de la poussière Saharienne sont décrites dans (Reid, 2000).

Enfin, il est à noter que lors de l'expérience PRIDE, le choix de l'année 2000 qui a été marquée par une faible saison de poussières (seulement 6 événements de fin Juin à fin Juillet), n'a pas permis l'étude des fluctuations mensuelles inhérentes au comportement saisonnier de poussières affectant l'ensemble de la Caraïbe.

4.5. Résultats des campagnes de mesure réalisées dans la Caraïbe : SAMUM et SALTRACE

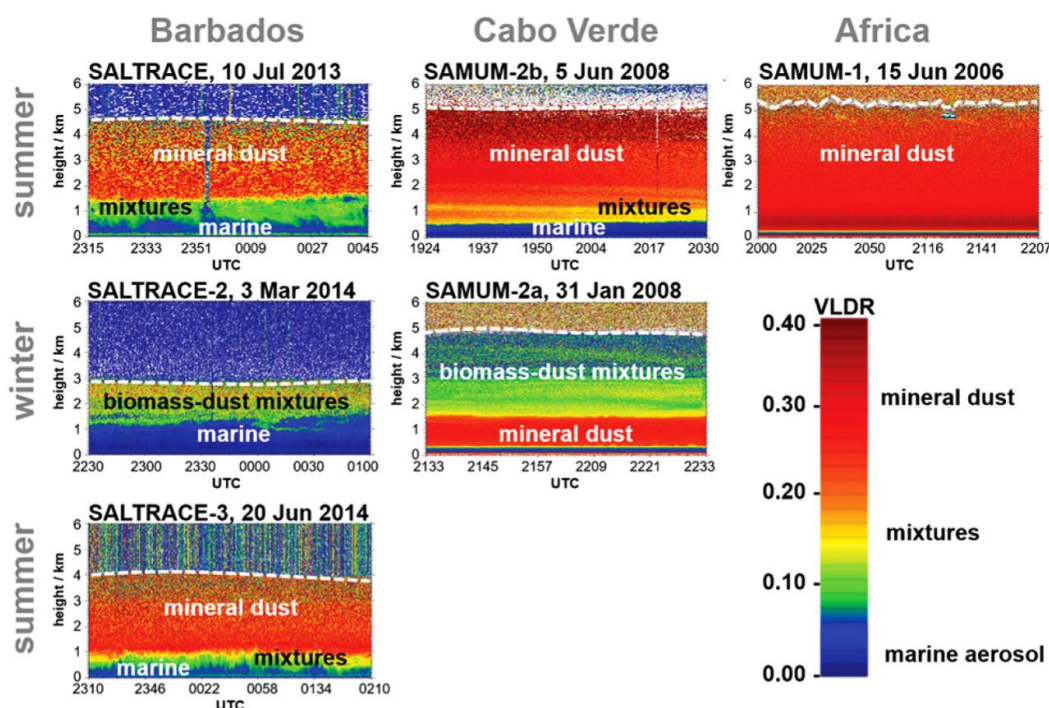


Figure 2 : Figure extraite de Weinzierl et al. 2017 ; Time–altitude cross sections of VLDR detected with the TROPOS lidar BERTHA at three different locations between Africa and the Caribbean (Ouarzazate, Morocco; Praia, Cabo Verde; and Barbados) in summer 2006, 2008, 2013, and 2014 and in winter 2008 and 2014. The aerosol extends from the ground to 3–5-km altitude. The top of the aerosol layers is indicated by the white dashed lines. Note: VLDR values in Morocco and Cabo Verde were measured at a wavelength of 710 nm, whereas the VLDR values in Barbados refer to 1,064 nm.

SAMUM (2006 et 2008) et SALTRACE (2013 et 2014) sont des campagnes de mesures traitant du transport des aérosols depuis la côte Africaine jusqu'à l'arc Antillais. Les principaux résultats ont permis de décrire le comportement saisonnier des aérosols (Figure 2). L'Afrique est principalement dominée par les aérosols désertiques. En Hivers, les aérosols marins et des mélanges entre les biomasses-poussières ont été mis en évidence au Cap Vert et dans la Caraïbe (Barbade). En Eté, cette dernière est dominée par les poussières désertiques. Néanmoins, les aérosols marins font partie de « l'atmosphère de fond » des îles.

D'autre part, il en ressort que l'épaisseur de la couche de transport des poussières dans la Caraïbe se situe entre 1000 et 4500 m d'altitude, tandis que les mélanges d'aérosols est observable autour de 1 000 m en Eté, et entre 1 500 et 3 000 m en Hivers. En Afrique, l'épaisseur de la couche des poussières peut s'étendre jusqu'à 6 000 m d'altitude. En ce qui concerne la couche de mélange biomasses-poussières au Cap Vert, elle est comprise entre 1 500 et 4 500 m en Hivers.

4.6. Aerosols Optical Depth (AOD) au-dessus de l'Atlantique Nord

Ben-Ami et al. (2012) ont identifié différents cycles de répartition d'aérosols minéraux au-dessus de l'Océan Nord Atlantique à partir d'une analyse basée sur les mesures AOD, déduites du système MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) :

- Le premier cycle se produit de Novembre à fin Mars. Il présente un parcours Sud des aérosols (situé entre 10° E et 50° W), impactant principalement le Nord de l'Amérique du Sud.
- La deuxième période s'étend de la fin Mars à la mi-Octobre. Elle est associée à un transport Nord des poussières (entre la côte Africaine et 60° W).
- Le dernier cycle se caractérise par une très faible présence des poussières entre la seconde partie d'Octobre et la première partie de Novembre.

Ces cycles sont influencés par les processus météorologiques (régimes saisonniers) et l'activité des sources d'émission sahariennes et sahéliennes tout au long de l'année.

4.7. Modèle de simulation de transport (ECHAM5/MESSy)

En 2015, Glaser et al. (2015) ont proposé un modèle de simulation de transport, combinant la méthode Eulérienne et Lagrangienne. Cette analyse décrit la saisonnalité des voies de transport et leurs caractéristiques (étude basée sur 5 années) :

- Leurs principales sources sont le Mali, la Mauritanie, le Sud de l'Algérie et le Bodélé.
- L'orientation du transport se fait au Nord en Eté (vers la Caraïbe) et au Sud en Hiver (vers le Nord de l'Amérique du Sud).
- L'épaisseur de la couche atmosphérique de transport diffère selon la saison. Du printemps à l'Hiver, le transport des poussières vers l'Amérique du Sud s'effectue au-dessus de l'Atlantique dans une épaisseur de couche atmosphérique depuis la surface jusqu'à 800 hPa. De l'Eté à l'Automne, les poussières se dirigent vers la Caraïbe depuis la surface jusqu'à 500 hPa.
- La durée de transport varie sensiblement également selon la saison. Les poussières prennent en moyenne 10 jours en Hiver pour parvenir au Sud de l'Amérique (Amazonie) et 12 jours en Eté pour atteindre la Caraïbe.

Toutefois, le modèle ECHAM5/MESSy ne permettait pas de simuler la complexité des processus de transport liée à la source du Bodélé, puisque les dépôts humides (liés à la ZCIT en

Hiver et à la Mousson Africaine en Été) inhibaient l'exportation des poussières du Bodélé hors des côtes Africaines.

4.8. Types de circulation atmosphériques dans la Caraïbe

Sept types de circulations atmosphériques journalières près de la surface ont été identifiés par Chadee and Clarke (2015) dans la région des Caraïbes (voir Figure 3). Ces investigations sont basées sur les données de circulation de réanalyse des composantes du vent à 850 hPa. Ces différents « types de circulation » nommés « CT » (pour « Circulation Type »), présentent des caractéristiques de durée de vie et de persistance distinctes. Ils sont pilotés par l'extension et la position des anticyclones quasi-stationnaires connus de l'Atlantique (Açores) et du Pacifique, ainsi que l'anticyclone sur le golfe du Mexique moins connu (élément transitoire ayant une durée de vie moyenne de deux à trois jours) qui influencent la circulation des vents dominants de la partie Ouest de la Caraïbe. La plupart des CT présentent les caractéristiques des Alizés dominants du Nord-Est / Est. Pour résumer, les 5 premiers types de circulations sont liés aux transitions de l'anticyclone du golfe du Mexique principalement, de l'Atlantique et du Pacifique au cours de la saison sèche (Novembre à Avril) ; avec une durée de vie moyenne de 2-3 jours. Puis, les CT 6 et CT 7 montrent une prédominance des vents du sud-Est dans les Caraïbes et des vents d'Ouest dans le Pacifique oriental. Leur durée de vie moyenne est de 6-7 jours. Ils présentent tous deux une large extension de l'anticyclone Atlantique et se produisent fréquemment durant la saison humide caribéenne correspondant aux mois de Mai à Octobre (Haute saison des poussières dans la Caraïbe. Ces sont ces CT qui favorisent le transport des aérosols désertiques.

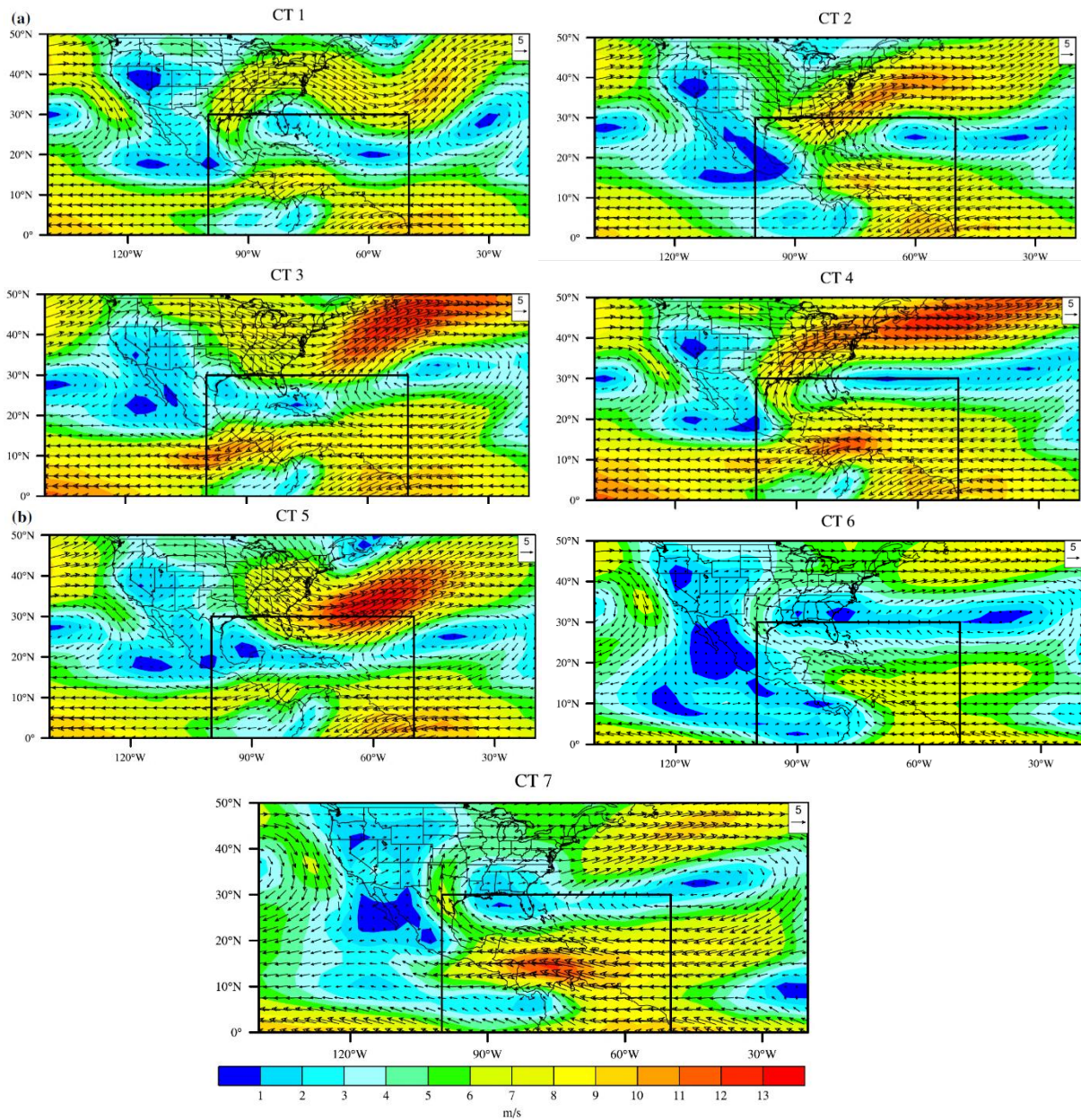


Figure 3 : Figure extraite des travaux de Chadee and Clarke (2015) ; Fig.5 (a) et (b); Atmospheric circulation type 1-7 wind speed;

5. PROFIL GENERAL DE LA STRUCTURE THERMODYNAMIQUE DE L'ATMOSPHERE TROPICALE

La connaissance de la structure verticale de l'atmosphère est importante dans les études météorologiques. Cette structure évolue selon la saison étudiée mais aussi selon la variabilité des transports de poussières provenant d'Afrique vers la Caraïbe, au cours de l'année.

5.1. Etablissement des profils types atmosphériques prenant en compte les variations saisonnières

Les premières représentations standards de la structure thermodynamique de l'atmosphère de la zone tropicale des Antilles ont été proposées en 1946 par Schacht, en utilisant des sondages réalisés au cours de deux saisons : l'Eté et l'Automne (Schacht, 1946). Ces profils qui n'étaient pas représentatifs des variations saisonnières observées dans la zone caribéenne ont cependant servi de référence pour toutes les études météorologiques de l'époque.

Par la suite, en 1958, grâce au développement des mesures de radiosondages effectués tout au long de l'année, Jordan (1958) a proposé des moyennes de sondage (profils de température et d'humidité), annuelles et saisonnières plus représentatives des fluctuations atmosphériques propres au bassin Caribéen. Son étude présente un profil annuel, ainsi que des profils mensuels, établis pour la période de 1946-1955 à partir des données de trois stations de la Caraïbe (Miami en Floride, San Juan à Porto Rico, les îles Swan au Honduras). En raison de l'inhomogénéités dans les données de jour découlant des différentes méthodes de correction des effets de rayonnement, seuls les profils de température et d'humidité mesurées pendant la nuit (considérés comme plus fiables) ont été pris en compte. Ainsi, Jordan (1958) a défini les valeurs types de hauteurs géo-potentielles, de la température et de l'humidité pour l'océan Atlantique Nord et la mer des Caraïbes occidentale. Ces profils types ont longtemps servi de référence aux modèles météorologiques pour la zone des tropiques.

5.2. Importance de la différenciation des profils atmosphériques en présence ou non des poussières sahariennes à partir de 1972

Les profils de Jordan ne prenaient pas en compte l'impact du phénomène des « brumes désertiques » sur la configuration atmosphérique de la région tropicale caribéenne durant la saison cyclonique. En effet, les stations utilisées (Miami à 84° W, San Juan à 66° W et Swan Island à 84° W) sont situées en moyenne sur une longitude de 77° W, soit à plus de 1800 km

de la longitude moyenne des petites Antilles situées à 60° W. De ce fait, les profils de Jordan étaient plus représentatifs des profils du Golfe du Mexique et des Grandes Antilles que de celui des Petites Antilles, plus proches des côtes de l'Afrique de l'Ouest.

Une dizaine d'années plus tard, Carlson and Prospero (1972) ont décrit la structuration thermodynamique (de température et d'humidité) associée aux événements saisonniers de poussières Sahariennes (toujours pour la période cyclonique). Ils l'ont nommée : la Saharan Air Layer (SAL) (Karyampudi and Carlson, 1988). Pour déterminer les caractéristiques thermodynamiques de la SAL, les travaux de Carlson and Prospero (1972) reposaient sur des mesures météorologiques effectuées à bord d'un avion, entre la Barbade et Miami, durant l'Eté de 1970, lors de la campagne BOMEX. Leurs travaux portaient sur la détection de Radon 222 à l'aide de procédures de mesures décrites dans Prospero et al. (1970). Il a été établi que les concentrations en Radon 222 dans l'air en présence de particules en suspension, étaient nettement plus élevées que dans une atmosphère exempte de poussières. Les données de poussières, combinées aux radiosondages de température et d'humidité, ont conduit à la description de la structure thermodynamique de la SAL, la couche de transport des poussières désertiques vers la Caraïbe.

5.3. Description de la SAL

Des flux d'air chauds et secs provenant de la zone du Sahara sont entraînés dans le courant des Alizés au-dessus de l'océan Atlantique. Cette injection d'air continental généralement chargé de poussières, au-dessus de masses d'air maritimes (« Boundary Layer ») plus froides et plus humide conduit à une stabilité thermodynamique qui va permettre le transport sur plusieurs jours. De plus, cette couche d'air est caractérisée par un système de rotation anticyclonique avec des vents forts qui sont générés par le contraste de température horizontal, autour de 650 hPa, entre la SAL et les masses d'air environnantes (Carlson and Prospero, 1972).

Le profil classique de la température de l'air montre que la base de la SAL est marquée par une inversion de température se produisant entre 900 et 800 hPa, soit entre environ 900 et 1800 m d'altitude. Cette inversion de température correspond à une diminution brutale du rapport de mélange, caractéristique d'un assèchement de la couche à la base de la SAL. Le sommet de la SAL est marqué par une seconde inversion de température pouvant se situer jusqu'à 500 hPa, soit à 5500 m d'altitude (Carlson and Prospero, 1972 ; Diaz. et al., 1976 ; Dunion and Velden, 2004).

L'inversion de température à la base de la SAL liée à la différence entre la couche limite marine (froide et humide) et l'air provenant de la zone saharienne (air chaud et sec) conserve cette configuration sur plus de 7000 km au delà des côtes Africaines. En effet, la chaleur de l'air contenue par la SAL est maintenue par l'absorption du rayonnement solaire par les particules de poussières désertiques en suspension. Ce réchauffement favorise et maintient l'inversion de température. Il inhibe les mouvements verticaux entre la SAL et la « Boundary Layer », ce qui produit une réduction des énergies potentielles convectives disponibles (Convectible Available Potential Energy, CAPE) (Dunion & Velden, 2004).

Carlson and Prospero (1972) ont dissocié les configurations atmosphériques types de la zone tropicale caribéenne (pour la saison cyclonique) en proposant deux profils types distincts de sondages, SAL et Non-SAL, communément utilisés de nos jours.

5.3.1. *Méthode de détection de la SAL*

Des techniques de détection d'imagerie satellite multi spectrale ont été développées pour suivre l'évolution de cette masse d'air à travers l'Atlantique Nord vers la Caraïbe. Les aérosols minéraux transportés dans la SAL absorbent le rayonnement solaire incident directement reçu, puis le réémettent sous forme de rayonnement infrarouge (IR). L'étude par radiomètre IR de ces radiations réémises par les poussières montre une différence de température de brillance pour les longueurs d'onde de 12 μm et 10,7 μm , car les particules de poussière ont la propriété d'émettre plus efficacement à 12 μm qu'à 10 μm . La présence des poussières réduit donc significativement la différence de température de brillance entre ces deux canaux. La technique de détection de la SAL consistait initialement à calculer la différence de température de brillance $T_B(\lambda)$ entre ces canaux, via GOES-8 :

$$\rightarrow +5^{\circ}\text{C} \leq (\text{TB}(12) - \text{TB}(10,7)) \leq +10^{\circ}\text{C} : \text{Absence de la SAL.}$$

$$\rightarrow -4^{\circ}\text{C} \leq (\text{TB}(12) - \text{TB}(10,7)) \leq +4^{\circ}\text{C} : \text{Présence de la SAL}$$

(Dunion and Velden, 2004)

De nos jours, toujours basé sur le même algorithme, le calcul de différence de température de brillance s'effectue entre les canaux 10,8 μm et 12 μm de Meteosat Satellite. Selon ces résultats, l'extension vertical de la SAL se situe entre 4 000 à 5 000 km (Dunion and Velden, 2004). Les données de détection de la SAL sont maintenant accessibles et consultables en ligne, sur le site du CIMSS Tropical cyclones Group de l'Université du Wisconsin-Madison (Figure 4 ; <http://tropic.ssec.wisc.edu/>).

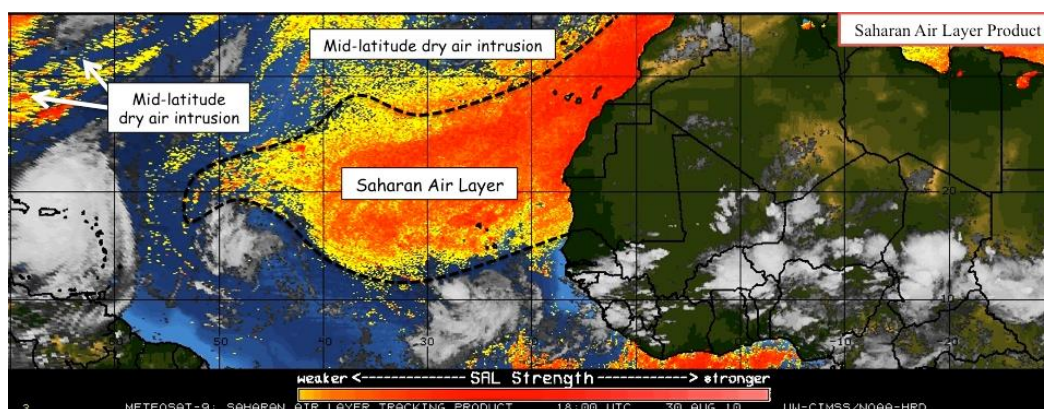


Figure 4 : Image de détection de la SAL et MLDAI au moyen de la différence de Température de Brillance entre les canaux 10,8 μm et 12 μm de Meteosat satellite ; CIMSS, Université du Wisconsin-Madison (<http://tropic.ssec.wisc.edu/>)

5.4. Caractérisation d'autres types de masses d'air dans la zone tropicale

Plus récemment, d'autres types de masses d'air ont été détectés à l'aide de profils types d'humidité et de température proposés par Dunion (2010). L'approche qui a été développée combinait à la fois la détection IR par GOES précédemment proposée par Dunion and Velden (2004) (Dunion and Marron, 2008), les rétro-trajectoires du model lagrangien Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) et les radiosondages mesurés dans 4 stations de la Caraïbe (Guadeloupe, San Juan, Grand Cayman et Miami) pour les mois de Juillet à Octobre, pour la période allant de 1995 à 2002. Les résultats de cette étude suggèrent l'existence de 3 types de masses d'air dans la région de la Caraïbe :

- Moist Tropical (MT) : masse d'air humide de provenance multiple
- Saharan Air Layer (SAL) : masse d'air sec en provenance d'Afrique
- Mid-Latitude Dry Air Intrusions (MLDAIs) : masse d'air sec en provenance des Etats-Unis

Dunion (2010) a présenté le profil moyen de la température, du rapport de mélange, de l'humidité relative, de la vitesse et de la direction du vent pour chacune des catégories de ces masses d'air.

PARTIE II : DONNEES ET METHODES

1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE



Figure 5 : Au Nord de l'arc se situe Porto Rico (18.22 °N, -66.59°E), au centre la Guadeloupe (16.24 °N, -61.53 °E), la Martinique (14.64 °N, -61.02 °E) (située à 189 Km de la Guadeloupe), puis au Sud-Est de l'arc antillais l'île de la Barbade (13.1939° N, -59.5432°E)

Nos travaux portent sur la zone tropicale des Petites Antilles, située dans la bande de latitudes 10° N-20° N (Figure 5). L'arc des îles antillaises qui bénéficie d'un climat tropical humide est principalement sous l'influence des Alizés, vent d'Est soufflant généralement du Nord-est vers le Sud-Ouest et généré par la circulation horaire des flux autour des hautes pressions de l'anticyclone des Açores dont la position et la force présentent des fluctuations saisonnières. Le climat tropical est caractérisé par l'alternance d'une période sèche allant de Février à mi-Avril nommée « Carême » (Anticyclone des Açores plus au Sud, Alizé soutenue de Nord-Est, températures fraîches) et d'une saison humide de Juillet à Novembre nommée « hivernage » (Anticyclone des Açores plus au Nord, Alizé plus faible, températures plus élevées) qui englobe l'essentiel de la saison cyclonique (Juin-Novembre) [Figure 6]. Les deux saisons sont séparées par deux périodes de transition plus ou moins bien définies (Avril-Juin et Décembre-Janvier) (Anthony Chen and Taylor, 2002).

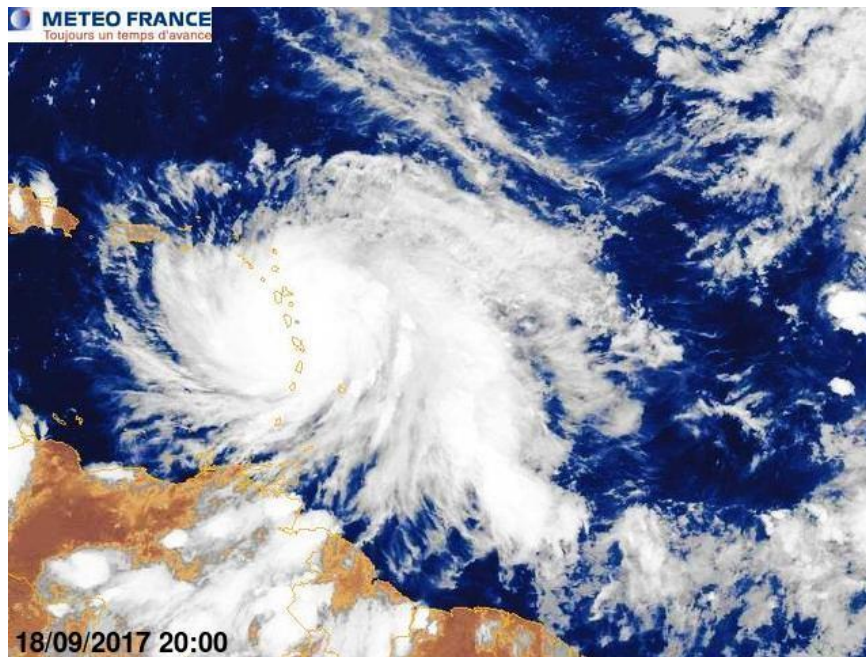


Figure 6 : Ouragan Maria (classe 5) traversant l'arc Caribéen le 18 Septembre 2017

L'oscillation de la ZCIT entre l'Amazonie (durant la saison sèche) et l'Amérique centrale (durant la saison humide) provoque la remontée de bandes de convection. Les variations de température sont relativement faibles dans notre zone d'étude, de l'ordre de quelques degrés (environ 3° C) au cours de l'année (~27° C en moyenne) (Malardel, 2005).

2. MESURE DE LA CONCENTRATION MASSIQUE : DONNEES PM10, PM2.5, CONCENTRATION DE POUSSIERE

La loi du 30 Décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE) prend en compte l'impact sanitaire associé à la pollution atmosphérique et implique le droit à chacun de « respirer un air qui ne nuit pas à sa santé ». Selon les directives européennes, la surveillance de la qualité de l'air est obligatoire. En application de ces lois, la mesure des polluants atmosphériques est réalisée quotidiennement sur l'ensemble du territoire français. La population doit également être informée en cas de dépassement des seuils d'alerte fixés pour la protection de la santé. Par ailleurs, des Plans Régionaux pour la Qualité de l'Air (PRQA) visant à prévenir, réduire ou atténuer les effets de la pollution atmosphérique sont également mis en place (Declercq et al., 2012).

Les PM (Particle Matter) sont des particules de matière en suspension dans l'air constituant un polluant atmosphérique sans distinction chimique. Leur impact sur la santé et sur le climat dépend de leur taille et de leurs caractéristiques physico-chimiques. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes focalisés sur la pollution atmosphérique liée aux particules en suspension d'origine désertique (aérosols minéraux). Leur présence dans l'atmosphère est mise en évidence par la mesure des concentrations massiques des particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 μm (« PM10 ») et 2.5 μm (« PM2.5 ») (Patashnick and Rupprecht, 1991) .

2.1. Techniques de mesures et principe de fonctionnement du TEOM FDMS

En Guadeloupe et en Martinique (comme en Europe), les mesures des PM10 et PM2.5 sont effectuées par l'analyseur de poussières TEOM [Thermo Scientific Tapered Element Oscillating Microbalance, moniteurs : 1400 ab]. Le FDMS (Filter Dynamics Measurement System) raccordé au modèle standard TEOM 1400 ab, est l'unique analyseur de poussières mesurant en continu la volatilisation des poussières sur le filtre de collection. Son rôle est d'estimer, en temps réel, et de façon la plus fiable possible, les épisodes de pollution. En effet, la volatilisation due à l'adsorption de composés organiques volatils sur les poussières déjà déposées sur le filtre, et les réactions chimiques entre les poussières déjà déposées sur le filtre et des gaz réactifs présents dans l'air ambiant (nitration, sulfatation, hydratation, etc...) peuvent causer des variations de poids du filtre de collection indépendamment de la concentration massique en particules.

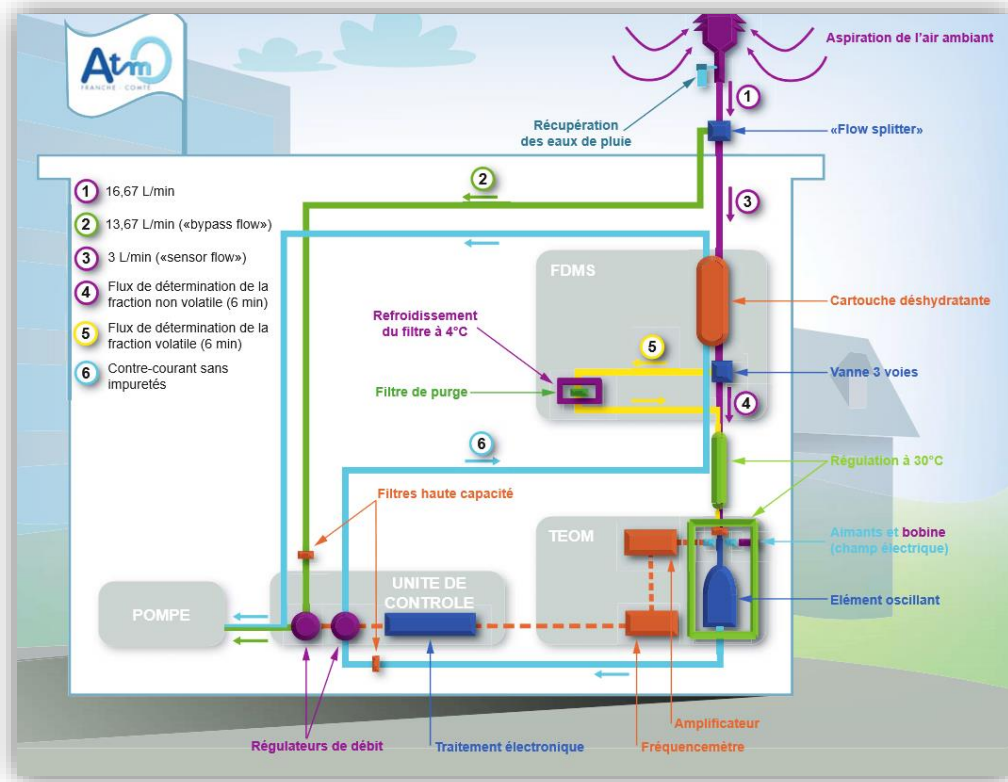


Figure 7 : Principe de fonctionnement du TEOM FDMS ; source : file:///C:/Users/love/Desktop/four%20tout%20Dossier%20pollution/ae_fiche-technique_analyseur-pm-teom_2016_atmofc_e.pdf

Le TEOM est équipé d'une tête de prélèvement installée en début de ligne (Figure 7). L'aspiration par phénomène de cyclone permet de sélectionner les poussières de diamètre inférieur à 10 μm (ou à 2,5 μm avec un insert cyclonique pour les PM_{2.5}). La tête est également équipée d'un dispositif de récupération servant à récupérer l'eau de pluie que l'air ambiant peut contenir. Puis, le flux d'air passe par le séparateur de débit (« flow splitter ») et se sépare en deux voies :

- Une partie qui fait l'objet de la mesure : soit un débit de 3 L min⁻¹ dirigée vers le module FDMS
- L'autre partie est envoyée vers la pompe (13,67 L min⁻¹) pour être évacué

En pénétrant dans le FDMS, l'air et les poussières sont séchés par leur passage dans une colonne déshydratante du type Nafion (système de contre-courant). Ensuite cet air est envoyé dans une « vanne 3 voies » qui commute toutes les 6 minutes. Cette vanne séquentielle (en amont de

l'analyseur TEOM) dirige alternativement l'air échantillonné soit vers le « filtre de collection » de la microbalance TEOM, soit vers un « filtre de purge » refroidi à 4 °C.

2.2. Mesure de base : calcul de la fraction non volatile (durée de l'étape : 6 minutes)

L'air est chauffé à 30°C, puis passe par le « filtre de collection » et arrive dans un élément conique creux oscillant dont la fréquence d'oscillation dépend de la masse du filtre. Plus les dépôts sur ce dernier sont importants et plus la fréquence d'oscillation est diminuée. Ce processus permet de déterminer la « concentration en poussières non volatiles ».

2.3. Mesure de référence : calcul de la fraction volatile (durée de l'étape : 6 minutes)

L'air est envoyé dans le « filtre à purge » où il est refroidi à 4°C (Effet de pelletier). Dans ce cas, l'air filtré qui en ressort est exempt de particules en suspension et est réinjecté dans la microbalance TEOM. La valeur de cette mesure est négative puisqu'elle correspond à la perte de matière volatilisable : c'est la « concentration en poussières volatiles ».

Ainsi, le TEOM FDMS additionne la « concentration en poussières non volatiles » à la « concentration en poussières volatiles » (qui est négative). La somme de ces dernières représente la « concentration massique TEOM FDMS » attribuée à la valeur réelle et instantanée de la concentration en poussières dans l'atmosphère :

$$\begin{aligned} \text{Concentration massique FDMS} \\ &= \{ \text{concentration en poussières non volatiles} \} \\ &- \{ \text{concentration en poussières volatiles} \} \end{aligned}$$

Cette opération est effectuée toutes les 12 minutes dans l'unité de contrôle de l'analyseur TEOM FDMS. Grâce à cette opération, l'utilisation d'un facteur de correction pour tenir compte de la fraction volatile n'est plus nécessaire. Pour finir, l'air analysé est évacué par la pompe.

2.4. Données de performance de l'instrument TEOM

- Gamme de mesure correspondant respectivement à la mesure la plus faible et la plus grande fournies par l'appareil : 0 à 5 000 000 $\mu\text{g m}^{-3}$ (5 g m^{-3})
- Résolution de la mesure : 0.1 $\mu\text{g m}^{-3}$

- Précision de la mesure : $\pm 1.5 \mu\text{g m}^{-3}$ (pour 1 heure), $\pm 0.5 \mu\text{g m}^{-3}$ (sur 24 heures)
- Minimum détectable pour la mesure horaire de masse : $0.06 \mu\text{g m}^{-3}$
- Précision pour la mesure de masse : $\pm 0,75\%$

Les valeurs de concentration massique de PM10 et PM2.5 sont obtenues en quasi temps réel, et sont moyennées et enregistrées toutes les 15 minutes. C'est à partir des valeurs quart-horaires que sont calculées les moyennes horaires et journalières. Ces mesures sont réalisées par des associations agréées de surveillance de la qualité de l'air sur le territoire français.

A Porto Rico, la qualité de l'air est régie par l'EPA (Environmental Protection Agency, Etats-Unis). Les techniques de mesures utilisées à Porto Rico sont les mêmes qu'en Europe (TEOM FDMS). Les données de PM10 et PM2.5 (ainsi que les mesures des autres polluants) sont disponibles en ligne (https://aq5.epa.gov/aq5web/airdata/download_files.html#AQI).

2.5. Technique de mesure de concentration de poussière (Barbade)

Actuellement, il n'y a pas de mesure de PM10 sur l'île de la Barbade. Néanmoins, des échantillons d'aérosols y sont quotidiennement prélevés par filtration totale de l'air depuis plus de 40 ans. L'air est aspiré à travers un filtre Whatman 41 (W-41) de 20 x 25 cm (Kitto et al., 1988) qui est placé au sommet d'une tour de 17 mètres, située sur une falaise sur la côte Est de la Barbade. L'efficacité de collecte des filtres W-41 est de 95% pour les poussières. Le pompage est réalisé avec un débit d'échantillonnage de $1 \text{ m}^3 \text{ mn}^{-1}$. Dans des conditions normales d'échantillonnage, nous arrivons donc à des volumes échantillonnés moyens d'à peu près 1000 m^3 en une journée. L'échantillonneur est contrôlé par un capteur de vent, de façon que l'échantillonnage ne soit activé que lorsque les conditions de vent requises sont remplies à savoir une vitesse du vent supérieure à 1 m.s^{-1} . Cela élimine donc toutes les conditions de vent faible et variable de façon à minimiser l'impact des sources de pollution locale.

L'extraction des filtres s'effectue à Miami avec de l'eau déionisée puis les filtres sont incinérés à une température de 500°C dans un four à moufle. Les filtres Whatman sont adaptés aux procédés nécessitant une incinération car ils ont la particularité de brûler sans produire de cendres. Le poids des cendres résiduelles est donc considéré comme étant dû essentiellement aux poussières minérales. Mais en réalité, la pesée du poids des cendres résiduelles aboutit sans doute à une sous-estimation de la concentration réelle des poussières, en raison des pertes de matière occasionnées par les procédés d'extraction et d'incinération. Par conséquent, un facteur

de correction, déterminé en comparant les concentrations en aluminium mesurées sur les filtres à celle mesurée en moyenne dans les sols, est appliqué sur toutes les données de poussières.

Des études antérieures menées à la Barbade sur la répartition des tailles des particules, ont montré que le diamètre aérodynamique médian des poussières était de $\sim 2.3 \mu\text{m}$ (Arimoto, et al., 1997) et que plus de 90% des aérosols constituant la masse totale de poussière ont un diamètre inférieur à $10 \mu\text{m}$ (Li-Jones and Prospero, 1998 ; Prospero et al., 2001). Ceci explique que les données de concentration de poussières mesurée à la Barbade aient été assimilées aux données de PM₁₀ dans une étude antérieure (Prospero et al., 2014).

2.6. Stations de mesures

Les stations de mesure de PM₁₀ et PM_{2.5} sont classifiées en fonction de leur distance par rapport aux sources d'émission des particules :

- Stations de type « rurales » : distance comprise entre 10 et 50 km de toute source
- Station « péri-urbaine » : distance comprise entre 3 et 10 km des sources
- Station « urbaine » : proche d'axes routiers (dans un rayon de 50 m)
- Station « trafic » : proximité immédiate des axes de circulation automobile

Afin de différencier l'impact des poussières de la pollution anthropique, nous avons sélectionné des stations de mesure de type urbaines (axes routiers situés dans un rayon de 50 m autour de la source d'émission), et péri-urbaines (source d'émission située à une distance comprise entre 3 et 10 km). Nos choix se sont portés sur les stations fournissant des données de mesures stables et continues de PM₁₀ et PM_{2.5} pour la période de 2006 à 2016, sur les sites de Porto Rico, Guadeloupe et Martinique. Porto Rico possède une base de données PM₁₀ importante qui regroupe près de 40 ans de données. Les mesures de PM en Guadeloupe et Martinique sont beaucoup plus récentes puisqu'elles ont commencé respectivement en 2005 et 2003.

2.6.1. Stations de mesure de la qualité de l'air de Porto Rico

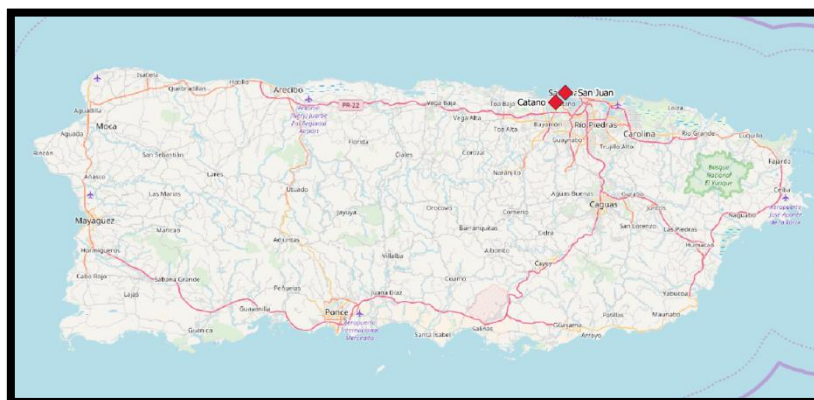


Figure 8 : Emplacement des stations de mesures de Catano et de San Juan, à Porto-Rico

Porto Rico est une île située au Nord de l'arc Antillais, d'une superficie de 9104 km² (Figure 8). Elle comptabilise 12 stations de mesures fixes localisées sur l'ensemble de l'île. Pour notre étude, nous utilisons les données de mesure fournies par les stations urbaines de Catano (PM10) et San Juan (PM10 et PM2.5) pour la période de 2006 à 2016. Les villes de Catano et San Juan comptent respectivement 28140 et 395326 habitants (<https://suburbanstats.org/population/puerto-rico/list-of-counties-and-cities-in-puerto-rico/>).

2.6.2. Stations de mesure de la qualité de l'air de Guadeloupe

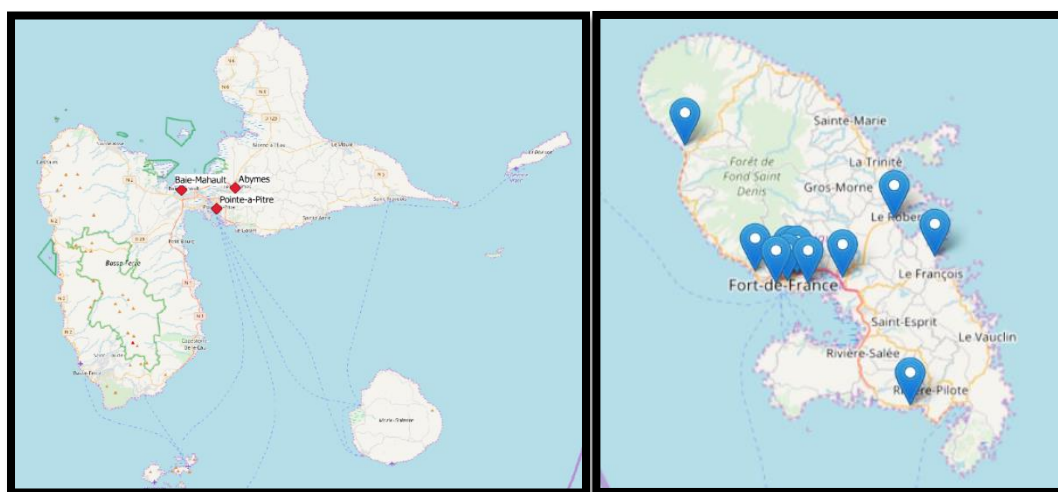


Figure 9 : Emplacement des stations de mesures de Pointe-à-Pitre, Baie-Mahault et Les Abymes, à la Guadeloupe (<http://www.gwadair.fr/surveillance/reseau-de-mesure>); Emplacement des stations de mesure de la Martinique (<http://www.madininair.fr/Mesures-fixes>)

L'archipel de la Guadeloupe est situé au centre de l'arc Antillais et présente une superficie de 1628 km² (Figure 9). Les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) évaluent la qualité de l'air pour les agglomérations supérieures à 100 000 habitants. Les mesures de PM sont effectuées dans les stations fixes implantées dans la Zone Urbaine Régionale (ZUR) qui inclut 6 communes (Les Abymes, Baie-Mahault, Le Gosier, Lamentin, Petit-Bourg et Pointe-à-Pitre) avec au total 173132 habitants. Les 3 stations de mesures fixes de la Guadeloupe sont localisées à Pointe-à-Pitre, Les Abymes et Baie-Mahault. Les données de cette étude proviennent des stations urbaines et péri-urbaines de Pointe-à-Pitre (16550 habitants) et Baie-Mahault (30775 habitants)

La Martinique se trouve à 189 km au sud de la Guadeloupe, avec une superficie de 1128 km² (Figure 8). Une grande partie des stations de mesures fixes se concentrent à Fort-de-France (83651 habitants). Pour notre étude, nous avons sélectionné la station urbaine de Schœlcher (20839 habitants) située au Nord-Ouest de la Martinique à proximité du campus universitaire de Schœlcher.

2.6.3. *Mesure de concentrations de poussières à la Barbade*

La Barbade est une petite île située au sud de l'arc antillais, à la limite de l'Océan Atlantique, d'une superficie de 431 km² (Figure 10). Les mesures de concentration de poussières sont effectuées à Ragged Point, un site élevé sur la côte Est de la Barbade depuis 1965. (Prospero & Lamb, 2003).

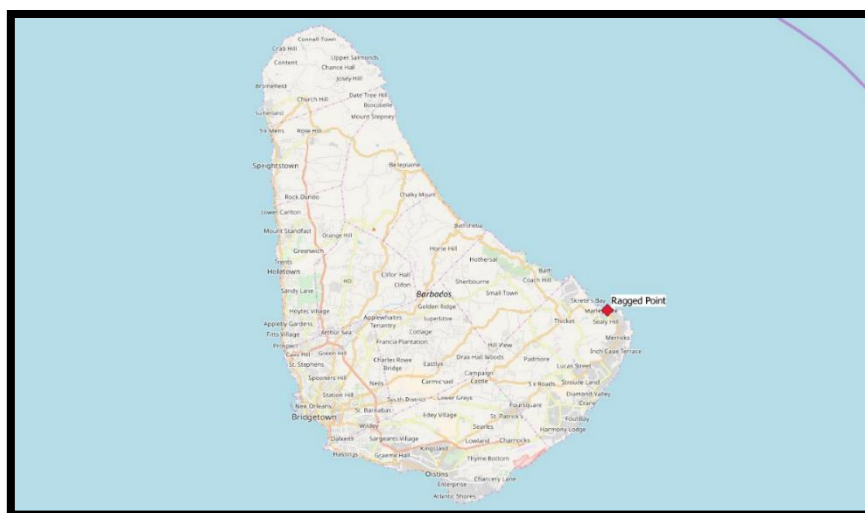


Figure 10 : Emplacement de la station de mesure de concentration de poussière Ragged Point à la Barbade

Localisation	Site	Type de station	Coordonnées Géographiques (°N, °E)	Données mesurées	Période d'étude	Nombre de données (journalières)
Porto Rico	Catano	Urbaine	18.431°N ; -66.142°E	PM10	2006-2016	3720
	San Juan	Urbaine	18.384°N ; -65.620°E	PM10 ; PM2.5	2006-2016	629 *disponibles simultanément pour les PM 10 et PM 2.5
Guadeloupe	Pointe-à-Pitre	Urbaine	16.242°N ; -61.541°E	PM 10	2006-2014	2807
	Baie-Mahault	Péri-urbaine	16.256°N ; -61.590°E	PM10 ; PM 2.5	2015-2016	688
Martinique	Schœlcher	Urbaine	14.648°N ; -61.099°E	PM10	2006-2016	3898
Barbade	Ragged Point	Site exempt de pollution anthropique	13.164°N ; -59.433°E	Concentrations de Poussières	2002-2011	2869

Tableau 1 : Types de stations de mesure ; Coordonnées géographiques ; Période des données ; et Nombre total de données quotidiennes pour tous les sites utilisés

2.7. Traitement des données journalières de PM10

La fiabilité des données de mesures du TEOM FDMS est évaluée par des tests réalisés sous le contrôle du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l’Air (LCSQA) pour l’ensemble des analyseurs du territoire français. Les données que nous utilisons pour notre étude ont été contrôlées et validées par :

- Le LCSQA pour les mesures de la Martinique et la Guadeloupe
- L’EPA (Environmental Protection Agency, Etats-Unis) pour les mesures de Porto Rico.

2.7.1. *Données horaires*

Les données horaires ont servi à établir les profils horaires moyens journaliers et mensuels des concentrations PM10 pour les sites de Porto Rico, Guadeloupe et Martinique.

2.7.2. *Données journalières*

Le phénomène des « brumes désertiques » a une dimension temporelle et spatiale de 2 à 3 jours. Sa dimension spatiale peut atteindre plusieurs centaines de kilomètres. Pour l’étude de ce phénomène, nous avons basé l’essentiel de notre analyse sur les moyennes journalières des PM10 afin de minimiser l’influence de l’activité locale sur les données de mesures.

Porto Rico : Les données de concentrations journalières de PM10 de Catano (Porto Rico) sont extraites de la base de données « Air Now ». Pour la période de 2006 à 2016, 92.6% des données sont disponibles.

Guadeloupe : Les données de concentrations journalières PM10 nous ont été fournies par « Gwad'air ». Sur les 11 années d’étude (2006-2016), 87% des données journalières de PM10 sont disponibles. Les données allant de 2006 à 2014, proviennent essentiellement de la station de Pointe-à-Pitre. Cependant, celles de Janvier 2013 et de la quasi-totalité de l’année 2014 ont été invalidés par LCSQA en raison de problèmes techniques. A partir de 2013, des travaux urbains ont été effectués à proximité de la station de Pointe-à-Pitre, pouvant ainsi biaiser les données de PM10. Nous avons donc utilisé les données mesurées à la station de Baie-Mahault pour le reste de notre période d’étude (2015-2016). Ces trous de données nous ont amenés par la suite à considérer avec prudence les éléments de comparaison statistique avec les sites de Porto-Rico et de la Martinique, particulièrement en ce qui concerne la fréquence des événements de poussières désertiques, déduite de l’analyse des données PM10.

D'autre part, nous avons choisi de ne pas utiliser des données qui étaient clairement issues d'un autre évènement de pollution naturelle exceptionnel : l'éruption du volcan de Montserrat. En effet, le 11 Février 2010, le volcan de Montserrat (situé au Nord-Ouest de l'archipel de la Guadeloupe) a rejeté d'importantes quantités de cendres volcaniques en haute troposphère. Les vents de contre Alizés d'une part, et les Alizés par la suite ont transporté les particules de poussières volcaniques dans la Caraïbe et plus particulièrement sur la Guadeloupe. Pendant quelques jours, les recirculations dans les basses couches de ces poussières ont impacté les données PM10. Par conséquent, les données du 11 au 15 Février 2010 n'ont pas été prises en compte dans notre étude.

Martinique : Les données de PM10 sont disponibles en ligne et fournies par « Madinair ». Elles proviennent exclusivement de la station de Schœlcher. Pour ce site, on dispose de 97% des données journalières pour les 11 années d'étude (2006-2016). Comme pour la Guadeloupe, la période entre le 11 et le 15 Février 2010 n'a pas été prise en compte en raison de la présence des cendres volcanique liées à l'éruption du volcan de Montserrat, le 11 Février 2010.

Concentrations de poussières prélevées à Barbade : Les mesures de concentration de poussières mesurées à la Barbade pour une période de 10 ans, allant de 2002 à 2011, nous ont été fournies par Joseph Prospero. Cette base de données contient 78.6% de la totalité des jours.

2.8. Traitement des données journalières de PM2.5

Les PM2.5 sont davantage impactées par la pollution anthropique car elles sont essentiellement issues du trafic routier et de la production d'énergie (Xu et al., 2017). Dans le cas d'études des poussières désertiques, il a été montré que la part des PM2.5 liée aux poussières désertiques est généralement plus faible que celle des PM10 (Petit et al., 2005 ; Institut de veille sanitaire, 2015 ; García et al., 2017). Afin d'identifier la part de particules de poussières liées à la pollution anthropique dans les particules de poussières désertiques, nous avons analysé en première étape les corrélations entre les données de PM2.5 et de PM10. Puis, nous avons établi le ratio PM2.5/PM10 sur les sites sélectionnés de la Caraïbe. Toutefois, pour la période de notre étude (2006 à 2016), seuls 43.23% des données sont disponibles sur les sites de Guadeloupe, Porto Rico et Martinique.

Pour la Guadeloupe : Les données de PM2.5 sont fournies par la station de Baie-Mahault. Elles ont été comparées aux données de PM10 mesurées par la station de Pointe à Pitre, située à moins de 9 km de Baie-Mahault.

Pour Porto Rico : Nous avons privilégié le site urbain de San Juan qui propose les deux types de mesures (PM10 et PM2.5) pour la période de 2006-2016.

Pour la Martinique : Les base de données de PM2.5 de la Martinique n'est établie que pour la période allant de 2013 à 2015. Nous l'avons jugée insuffisantes pour pouvoir la comparer aux données des autres sites de notre étude.

3. EPAISSEUR OPTIQUE D'AEROSOLS : AEROSOL OPTICAL DEPTH (ANGLAIS) OU AOD PAR LA SUITE

3.1. Epaisseur optique d'extinction

Les photomètres solaires permettent de déterminer localement l'épaisseur optique en mesurant l'éclairement direct provenant du soleil, c'est-à-dire l'énergie par unité de temps et de surface qu'ils reçoivent à une longueur d'onde donnée (unité : $W.m^{-2} nm^{-1}$).

En condition de ciel clair, le rayonnement solaire incident peut être atténué par les aérosols et les molécules de gaz présents dans l'atmosphère. Selon la loi de Beer-Lambert, l'atténuation de l'intensité du rayonnement solaire est définie comme étant l'épaisseur optique d'extinction des particules τ . Pour une longueur d'onde λ donnée, elle se détermine de la façon suivante en fonction de l'éclairement solaire direct mesuré au sol par le photomètre $E(\lambda)$:

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) \times e^{-m \cdot \tau(\lambda)}$$

- E : Eclairement solaire direct mesuré au sol par le photomètre
- E_0 : Eclairement solaire hors atmosphère (monochromatique, perpendiculaire aux rayons du soleil)
- m : $m=1/\cos \theta$; θ est l'angle zénithale solaire
- τ : Epaisseur optique d'extinction des particules (molécules, aérosols, nuages)
- λ : Longueur d'onde
- $e^{-m \cdot \tau(\lambda)}$: facteur d'atténuation de l'Eclairement solaire

L'expression de l'épaisseur optique d'extinction pour une longueur d'onde λ est donc :

$$\tau(\lambda) = -\frac{1}{m} \times \ln \frac{E(\lambda)}{E_0(\lambda)} \quad \text{Loi de Beer Lambert}$$

3.2. Epaisseur optique en aérosols

L'épaisseur optique d'extinction est la somme de l'épaisseur optique de diffusion des molécules, de l'épaisseur optique d'extinction des aérosols et de l'épaisseur optique d'extinction par les nuages :

$$\tau_{\text{tot}} = \tau_{\text{gaz}}(\lambda) + \tau_{\text{aérosols}}(\lambda) + \tau_{\text{nuages}}(\lambda)$$

- $\tau_{\text{tot}}(\lambda)$: Epaisseur optique totale de l'atmosphère
- $\tau_{\text{gaz}}(\lambda)$: Epaisseur optique de diffusion par les molécules de gaz [ozone (O₃), dioxyde d'azote (NO₂), gaz (CO₂ et O₂) ; diffusion de Rayleigh].
- $\tau_{\text{Aérosols}}(\lambda)$: Epaisseur optique d'extinction par les aérosols
- $\tau_{\text{nuages}}(\lambda)$: Epaisseur optique d'extinction par les nuages

L'épaisseur optique de diffusion par les molécules de gaz est proportionnelle à la pression :

$$\tau_{\text{gaz}}(P) = \tau_{\text{gaz}}(P_0) \times \frac{P}{P_0}$$

- P : Pression
- P_0 : Pression au sol

En définitive on a :

$$\text{AOD}(\lambda) = \tau_{\text{aérosols}}(\lambda) = \frac{1}{m} \times \ln \frac{E(\lambda)}{E_0(\lambda)} - \tau_{\text{gaz}}(\lambda) - \tau_{\text{nuages}}(\lambda)$$

Contrairement aux mesures de PM₁₀ qui représentent la quantité d'aérosols mesuré en surface, les mesures d'AOD évaluent la présence d'aérosols dans l'intégralité de la colonne atmosphérique et permettent de détecter l'arrivée des « brumes de poussières » qui voyagent en altitude. La valeur d'AOD (sans unité) est généralement comprise entre 0 et 1 dans la Caraïbe, et jusqu'à 4 en Afrique. La présence de poussières désertiques est généralement associée aux AOD ≥ 0.2 (Smirnov et al., 2000 ; Dubovik et al., 2002 ; Toledano et al., 2007 ; Velasco-Merino et al., 2018). A proximité immédiate des sources d'émission de poussières en Afrique, les valeurs d'AOD peuvent atteindre la valeur de 4.

3.3. Coefficient d'Angstrom (AE pour « Angstrom Exponent »)

Le coefficient d'Angström (AE) α , est un indicateur de la taille moyenne de la distribution en taille des aérosols. On calcule l'AE de la façon suivante :

$$\alpha = \frac{-\ln(\frac{\tau_1}{\tau_2})}{\ln(\frac{\lambda_1}{\lambda_2})}$$

τ_1 et τ_2 sont respectivement les mesures de l'épaisseur optique réalisées aux longueurs d'ondes λ_1 et λ_2 . Plus α est élevé et plus la taille des particules est petite et inversement. En ce qui concerne les aérosols, les valeurs d'AE comprises entre 0-1 sont associées aux particules grossières (poussières désertiques, aérosols marins) ; les valeurs supérieures à 1 reflètent les fines particules généralement assimilées à la pollution industrielle et urbaine. Les grosses particules peuvent avoir un AE négatif.

3.4. Répartition en volume de la taille des particules (VPSD pour « Volume Particle Size Distribution »)

Dans nos travaux de thèse, nous analysons les caractéristiques de taille des particules en suspension dans la Caraïbe et sur la côte Africaine. Pour ce faire, nous présentons la répartition volumique de la taille des particules (VPSD) fournie par les données d'inversions d'AERONET. La distribution en taille des aérosols est décrite par :

- La Moyenne : base du calcul de la distribution (nombre, surface, volume)
- Le Mode : correspond au plus haut pic de la distribution, c'est-à-dire l'ordre des tailles les plus couramment retrouvées dans la distribution (Tableau 2)

Tableau 2: La distribution de taille des particules selon les 3 modes

	Rayon min	Rayon max
	(μm)	(μm)
<i>Total (t)</i>	0.05	15
<i>Fin (f)</i>	0.05	0.6
<i>Grossier (c)</i>	0.6	15

3.5. Rayon médian du volume (logarithme moyen du rayon)

Le rayon médian du volume se réfère à la taille des particules au point médian, où la moitié du volume de la distribution concerne les tailles plus petites, et l'autre moitié les tailles plus grandes que la moyenne. Exemple : r_v de 50 μm , indique que la moitié du volume est dans des tailles de particules inférieures à 50 μm et que l'autre moitié du volume est dans des tailles supérieures à 50 μm .

3.6. Concentration de volume ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)

La concentration de volume représente le volume par rapport au volume total de la distribution. Notons que la distribution de la taille des particules est calculée sur la totalité de la colonne atmosphérique.

$$C_v = \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{dV(r)}{d \ln r} d \ln r$$

La VPSD illustre la concentration de volume ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$) en fonction du rayon médian (μm) des particules. Le détail des équations des produits d'inversions sont accessibles à l'adresse suivante : https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/Documents/Inversion_products_V2.pdf

3.7. Propriétés radiatives

Lors de la propagation d'un rayonnement, il peut être émis, absorbé (énergie incidente amortie dans une direction) ou diffusé (énergie incidente redistribuée dans toutes les directions). Pour décrire la composition particulaire atmosphérique, nous avons analysé les caractéristiques d'absorption et de diffusions des particules en suspension dans l'air.

3.7.1. Indice de réfraction (diffusion et absorption)

On peut définir le type d'aérosols grâce à l'indice complexe de réfraction :

$$m_\lambda = n_\lambda + ik_\lambda$$

→ La partie réelle n_λ décrit principalement la diffusion

→ k_λ , la partie imaginaire, correspond principalement à l'absorption

Le tableau 3 présente les indices de réfraction des types d'aérosols pertinents pour notre étude.

Tableau 3: Valeur des indices de réfractions pour différents types d'aérosols ; ces résultats concernent la gamme des longueurs d'onde du visible (références : Shettle and Fenn, 1979; Koepke et al., 1997; Dubovik et al., 2001; Takemura et al., 2002)

<i>Type d'aérosols</i>	n_λ	k_λ
<i>Aérosol marin</i>	1.36	0.0015
<i>Aérosol minéral</i>	1.53	0.003

3.7.2. *Albédo de simple diffusion (SSA pour « Single Scattering Albedo »)*

L'albédo de simple diffusion se calcule en faisant le rapport du **coefficient de diffusion** / (**coefficient diffusion** + **coefficient d'absorption**). Il mesure donc la quantité de lumière d'extinction des aérosols due à la diffusion. Le SSA (nombre sans unité) est caractérisé par :

- $\omega_0 \approx 1$: l'extinction par les particules est due à la diffusion
- $\omega_0 \approx 0$: inversement l'extinction est due à l'absorption

Pour les particules sphériques, on peut calculer la valeur du SSA à partir de la théorie de Mie et de la connaissance des propriétés globales du matériau, telle que l'indice de réfraction, la morphologie et la taille [(Triplet & Roche, 1996) ; (Dubovik, et al., 2002) ; (Sportisse, 2008) ; (Pietryk, 2015)].

4. RESEAU INTERNATIONAL DE TELEDETECTION DES AEROSOLS AERONET

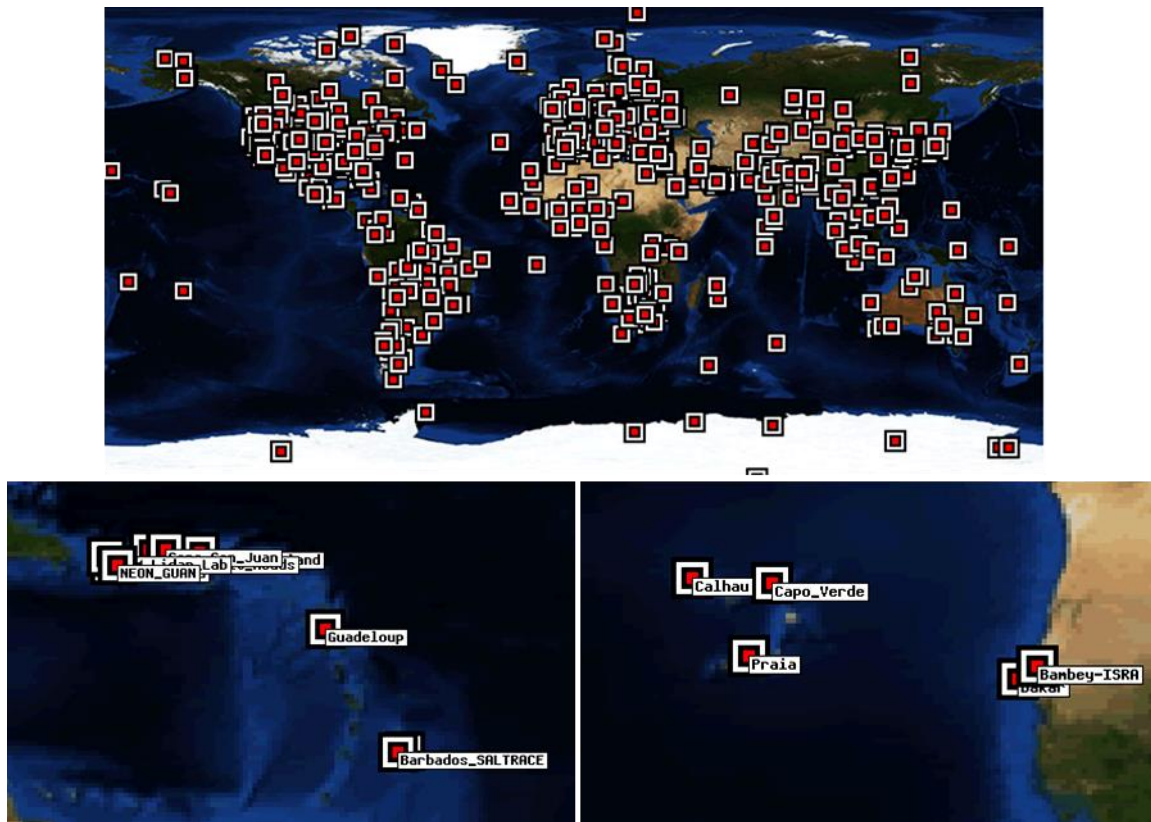


Figure 11 : Réseau international (AERONET) de photomètres CIMEL (en haut) ; réseau implanté dans l'arc antillais (en bas, à gauche) et sur la côte Africaine (en bas, à droite)

Le programme AERONET est un réseau de télédétection d'aérosols au sol établi par la NASA et PHOTONS (PHOtométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire ; Université de Lille 1, CNES, and CNRS-INSU). Le réseau de photomètres (Figure 11) mesure le rayonnement solaire direct et permet d'étudier les propriétés des aérosols en déterminant :

- Les propriétés optiques de l'atmosphère
- L'épaisseur optique des aérosols (AOD)
- La caractérisation et quantification des aérosols
- La distribution de la taille du volume
- La calibration satellitaire des mesures aérosols
- La détection des panaches de cendres volcaniques en temps réel
- Les AOD en mode fin et en mode grossier
- La couleur de l'océan
- La quantité de vapeur d'eau (précipitations)

Notre laboratoire est responsable du site de mesures AERONET pour la Guadeloupe. Le photomètre est situé sur le toit du bâtiment de recherche de l'Université des Antilles, à Pointe-à-Pitre.

4.1. Description et procédés de mesure

Ces photomètres (modèle : CIMEL CE-318-1, Figure 12) sont équipés de filtres (modèle standard CE-318-1) correspondant aux longueurs d'onde (canaux) comprises entre 1640 et 340 nm ; le canal de 935 nm est utilisé pour la détermination de l'abondance de l'eau dans la colonne atmosphérique. Les données sont collectées toutes les 15 minutes pour les différentes longueurs d'onde grâce à un dispositif pivotant se trouvant dans la tête de mesure qui évalue le rayonnement solaire à l'aide d'un capteur photosensible. Il existe 5 types de têtes (capteurs) :

- **Standard** : il utilise des filtres de 340, 380, 440, 500, 675, 870, 937, 1020 et 1640 nm.
- **Polarisé** : un filtre à roue contenant 3 jeux de 3 polariseurs fonctionnant en infrarouge (POL1), ultraviolet (POL2) et dans le visible (POL3), qui sont orientés avec un angle de 120 ° supplémentaire au-dessus de la roue contenant les filtres standard. Des informations supplémentaires sur la nature et les formes des aérosols peuvent ensuite être récupérées.
- **Seaprism** : il est conçu pour l'application pour la couleur de l'Océan (« Ocean Colour »). Il utilise uniquement des détecteurs de silicium. Filtres : 412, 440, 500, 531, 550, 675, 870, 937, 1020 nm.
- **BRDF** : il utilise des filtres de 380, 440, 550, 675, 740, 870, 937, 1020 et 1640 nm.
- **BRDF (12 Filtres)** : il est conçu pour l'étalonnage par satellite. Il utilise des filtres 412, 440, 500, 555, 675, 702, 740, 782, 870, 937, 1020, 1640 nm.

Le photomètre est également équipé d'un collimateur, un composant qui permet à la lumière d'être guidée correctement vers la tête du capteur à l'extérieur des lentilles, réduisant ainsi la lumière parasite.

Le robot est l'élément sur lequel la tête du capteur est fixée. Sa conception mécanique lui permet de viser n'importe quel point du ciel sur les angles azimutaux et zénithaux avec une très grande précision.

Description détaillée du photomètre CIMEL CE-318-1 :

file:///C:/Users/lovel/Desktop/articles%20récents/man_ce318_us.pdf

Les mesures sont effectuées au cours de la journée (situation d'éclairement variant au cours de l'année, généralement entre 6 heures et 18 heures). Par ailleurs, le photomètre est équipé d'un capteur d'humidité qui détecte la pluie afin d'arrêter les mesures et de protéger la tête du capteur de l'eau lorsqu'il pleut. La région tropicale de la Caraïbe est caractérisée par un climat humide, ce qui explique le manque de données durant certaines périodes. Les mesures collectées par l'appareil sont transmises au centre de la NASA, où elles sont stockées, traitées, puis publiées sur le site AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>).



Figure 12 : Photomètre CIMEL CE-318-1

4.2. Les données AERONET

Le photomètre mesure les propriétés optiques de l'atmosphère, d'une part l'irradiance solaire et d'autre part l'éclat du sol et du ciel conduisant à la caractérisation physico-optique des aérosols.

4.2.1. *Niveau de qualité des données*

Trois niveaux de qualité des données sont proposés par AERONET :

- Niveau 1.0 (brut) : non filtré et l'étalonnage final peut ne pas être appliqué
- Niveau 1.5 (nuages filtrés) : nuage automatiquement effacé, mais l'étalonnage final peut ne pas être appliqué. Ces données ne sont pas de qualité garantie.

→ Niveau 2.0 (nuages filtrés et qualité assurée) : calibrage avant et après le champ appliqué, nuage automatiquement nettoyé et inspecté manuellement.

4.2.2. **Paramètre Angstrom (AE)**

L'AE est calculé pour toutes les longueurs d'ondes disponibles dans la plage de paramètres Angstrom. Par exemple, l'Angstrom 870-440 nm inclut les données AOD 870, 670, 500 et 440 nm.

4.2.3. **Variabilité du triplet en pourcentage**

Chaque mesure d'AOD est composée d'un triplet de mesures : ces mesures sont prises toutes les 30 secondes pendant une minute. La variabilité de cette mesure donne un aperçu de la qualité des données.

4.2.4. **Traitement des données issues des produits d'inversion AERONET**

Les données de radiance, combinées aux mesures de l'épaisseur optique des aérosols, aux estimations de la réflectance de la surface terrestre et de l'eau, sont inversées pour estimer les propriétés optiques et microphysiques des aérosols [méthode de Dubovik et al. (2002)]. Les mesures du rayonnement solaire par le photomètre peuvent en effet être inversées pour déterminer les propriétés optiques des aérosols dans la colonne atmosphérique totale. Ces dernières sont récupérées par le nouveau code développé par le projet AERONET (Dubovik and King, 2000 ; Dubovik et al., 2002) :

- Le code inverse : radiances célestes simultanées à quatre longueurs d'onde (440 ; 670 ; 870 ; 1020 nm) dans l'Almucantar solaire total ($2.8^\circ < \Theta$) avec $\tau(\lambda)$ aux mêmes longueurs d'onde
- Hypothèses d'inversions : les particules d'aérosols sont des sphéroïdes
- Résultats microphysiques d'inversion :
 - $dV(r)/d\ln r - (\mu m^3 / \mu m^2)$: distribution granulométrique volumique dans la gamme 22 points compris entre les tailles $0.05 \mu m \leq r \leq 15 \mu m$
- Propriétés radiatives :
 - $\omega_0(\lambda)$ - Albédo de simple diffusion [Single Scattering Albedo (SSA)]
 - Indice de réfraction : grandeur sans dimension caractérisant l'interaction entre lumière et la matière (en fonction de la longueur d'onde) : partie réelle $n(\lambda)$, partie imaginaire $k(\lambda)$

Pour plus de précision, il est recommandé de sélectionner les données de qualité 1.5 et 2.0 lorsqu'elles sont disponibles. Dans le cas contraire (qualité 1.0), un protocole de traitement est recommandé (Dubovik, et al., 2002).

4.2.5. *Cas des fines particules*

En ce qui concerne les aérosols non dominés par des particules grossières (origine industrielle, combustion de biomasse ou autres) il convient d'utiliser des données prétraitées par AERONET lorsqu'elles sont disponibles :

- Qualité 1.5 : filtrage nuages
- Qualité 2.0 : filtrage nuage et vérification des données (qualité des données assurée)

Précision attendue :

- $dV(r)/\ln r$: 15 - 25% pour $0.1 \mu m \leq r \leq 7 \mu m$;
- 25 - 100% (ou $< 10\%$ de $dV(r)/\ln r$ au maximum) pour les cas :
 $r < 0.1 \mu m$ et $r > 7 \mu m$

4.2.6. *Cas des particules grossières*

Correspondant aux poussières désertiques ou autres types d'aérosols dominés par des particules de type grossier (exemple : sel marin). Il est recommandé d'utiliser les données de nuages filtrés (qualité 1.5) et qualité assurées (qualité 2.0).

Précision attendue :

- $dV(r)/\ln r$: 15 - 25% pour $r \geq 0.5 \mu m$;
- 25 - 100% (ou $< 10\%$ de $dV(r)/\ln r$ au maximum) pour $r < 0.5 \mu m$

Remarque :

- Il est possible d'obtenir un mode fin « non réaliste » avec un maximum à $r < 0.1 \mu m$. Cela se produit en raison de la non-sphéricité. Cet effet est maximal à l'angle zénithal solaire élevé et minimal à l'angle zénithal solaire bas (20 - 30°). Dans ces situations, l'erreur d'adaptation au rayonnement solaire est plutôt élevée (jusqu'à 15 - 20%).
- Il est possible d'obtenir un indice de réfraction $n(\lambda)$ fortement dépendant de la longueur d'onde [croissant avec la longueur d'onde ; pour $\lambda = 440 \text{ nm}$, $n(440)$]

est proche de 1.33]. Ceci est un autre indicateur de non-sphéricité des particules. Dans ce cas, seules les valeurs à 870 et 1020 nm sont proches des valeurs réelles.

Pour l'analyse des données AOD et AE, nous privilégions les données de mesure de qualité niveau 2.0. Cependant, en ce qui concerne les données de VPSD (produit d'inversion AERONET), l'exigence de qualité pour les produits d'inversion de niveau 2.0 rejette les valeurs d'AOD inférieures à 0.4, ce qui réduit considérablement la quantité de données. Nous avons donc réduit le niveau d'exigence de qualité à 1.5 afin d'augmenter la base de données pour notre étude de la taille des particules. De façon analogue aux précédentes études sur la caractérisation des aérosols dans la zone caribéenne [exemple Velasco-Merino et al. (2018)], nous avons sélectionné les AOD associés à la longueur d'onde de 440 nm et les AE correspondent à la gamme 440-870 nm. Nous avons opté pour ces gammes de longueurs d'onde en raison du nombre conséquent de données disponibles dans la base de données pour cette gamme de longueur d'onde, pour notre période d'étude.

Le Tableau 4 présente le nombre de mesures AOD et données d'inversion journalières VPSD disponibles pour chaque site.

Tableau 4 : Nombre de mesures d'AOD et de données d'inversion (VPSD) de la zone Caraïbe et Africaine (2006-2016)

Sites	Coordonnées (°N, °E)	AOD (N) Qualité (2.0)	VPSD (N) Qualité (1.5)	Période
Porto Rico (Cape San Juan)	(18.38, -65.62)	1730	1171	2006-2016
Guadeloupe (Pointe-à-Pitre)	(16.33, -61.50)	1689	1168	2006-2016
Barbade (Ragged Point)	(13.15, -59.42)	2264	1528	2007-2016
Dakar	(14.394, -16.959)	3033	2769	2006-2016
Cap Vert	(16.733, -22.94)	2708	2041	2006-2016

5. IMAGE SATELLITE AOD (MODIS)

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) est un instrument clé à bord des satellites Terra (« EOS AM-1 ») et Aqua (« EOS PM-1 »). L'orbite de Terra autour de la Terre est réglée de sorte qu'il passe du Nord au Sud sur l'équateur le matin, tandis qu'Aqua passe du Sud au Nord sur l'équateur dans l'après-midi. Terra MODIS et Aqua MODIS possèdent une bande d'observation de 2 330 km et couvrent ainsi l'ensemble de la surface de la Terre tous les 1 à 2 jours. Ses détecteurs mesurent 36 bandes spectrales entre 0.405 et 14.385 μm , et acquièrent des données à trois résolutions spatiales : 250m, 500m et 1000m. Les données MODIS sont transférées aux stations au sol (White Sands, Nouveau-Mexique) via le système de suivi et de relais de données (TDRSS). Elles sont ensuite envoyées au système d'exploitation EOS (EDOS) du Goddard Space Flight Center. Les produits de niveau 1A, niveau 1B, géolocalisation et masque de nuage et les produits terrestres et atmosphériques MODIS de niveau supérieur sont produits par le système de traitement adaptatif MODIS (MODAPS) et sont distribués à la communauté des utilisateurs scientifiques et opérationnels.

Il existe de nombreuses données de produits dérivés des observations MODIS servant à décrire les caractéristiques du sol, des océans et de l'atmosphère à l'échelle locale et mondiale. Afin d'observer le comportement saisonnier du transport des aérosols désertiques au-dessus de l'océan Atlantique Nord, et de cibler la position de départ des panaches de poussières depuis les côtes Africaines, nous avons sélectionné le traitement d'image satellitaire d'AOD « Dark Target Algorithm » améliorant la détection AOD (MODIS) sur la Terre [basée sur les récents résultats de Wu et al. (2016)] :

- Bande spectrale : 550 nm (MOD08_M3_v6)
- Satellite : Terra
- Résolution spatiale : 1°

La représentation de la distribution des aérosols minéraux dans l'océan Atlantique est illustrée par les moyennes d'AOD mensuelles calculés à partir des moyennes journalières. Pour cette étude, nous avons généré les images AOD [Dark Target, MODIS] pour les périodes mensuelles allant de 2006 à 2016 (données disponibles sur le site Web de GIOVANNI (NASA) : <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>).

6. RETRO-TRAJECTOIRES

Les rétro-trajectoires sont couramment utilisées pour examiner l'origine des masses d'air liées aux épisodes de poussières survenant en Europe et dans les Caraïbes (Stohl, 1998 ; Toledano, et al., 2007 ; Dunion, 2010 ; Prospero et al., 2014 ; Gläser et al., 2015 ; García et al., 2017 ; et autres). Cette étude met en avant les rétro trajectoires pour analyser la circulation saisonnière atmosphérique, conduisant au transport de poussière dans le bassin Caribéen. Nous employons la version téléchargée du model HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) version 4 (PC Windows-based HYSPLIT ; https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_hytrial.php) qui offre plus de fonctionnalités : la représentation du nombre d'altitudes et des point de départ des rétro trajectoires n'est pas limité par exemple (Stein et al., 2015 ; Rolph et al., 2017).

6.1. Base de données météorologiques

A l'inverse de la version en ligne où les champs de données météorologiques utilisés par HYSPLIT sont déjà intégrés au modèle, la version téléchargée nécessite l'importation des données météorologiques. On peut accéder à divers fichiers de données récupérables depuis le serveur ARL, pour une saisie immédiate dans HYSPLIT. Ces fichiers comprennent diverses archives d'analyse régionales et mondiales. Pour le traitement de nos rétro-trajectoires, nous utilisons comme entrée pour les applications HYSPLIT, la base de données météorologiques (retraitées et convertis dans une base de données compatible avec HYSPLIT) globale réanalysée NCEP / NCAR (Kalnay et al., 1996). C'est un projet conjoint entre les Centres Nationaux de Prévision Environnementale (NCEP, anciennement « NMC ») et le Centre National de Recherche Atmosphérique (NCAR).

Pour accéder au serveur de données, une simple adresse mail est requise. L'archive ARL est constituée de divers formats issues du système GDAS (Global Data Analysis System) et NAM (North America Mesoscal). Le format de données que nous utilisons est le GDAS qui, jusqu'à la fin de 2006, sauvegardait les données toutes les 6 heures sur une projection hémisphérique, d'une résolution spatiale de 191 km. Les nouvelles archives GDAS à 1 et 0.5 degrés sont disponibles toutes les trois heures. Le déplacement des masses d'air au-dessus de l'Atlantique, présente un temps de transport de l'ordre d'une dizaine de jours. Notre modélisation est adaptée au système GDAS caractérisé par :

→ Résolution 1-degré

- Données météorologiques, disponibles à partir de l'année 2005, contient les champs basiques des composantes méridienne et zonale du vent (u , v), la température, l'humidité et la pression
- Les données sont regroupées dans un fichier hebdomadaire fichier hebdomadaire ($W1=1-7$; $W2=8-14$; $W3=15-21$; $W4=22-28$; $W5=29$ -au dernier jours du mois). Ici W désigne la semaine considérée associée à 7 jours dans le mois (Week en anglais).
- Les sorties sont générées toutes les 3 heures sur les surfaces isobares

Les archives de données NCEP / NCAR sont mises à jour chaque année.

6.2. Génération des rétro-trajectoires

Les trajectoires Lagrangiennes sont calculées à partir de la base des données météorologiques (u , v , w) interpolées sur la grille interne du modèle. A chaque coordonnée (latitude, longitude, hauteur) et pour chaque intervalle de temps (6 h, 12h, 24h), la position de la masse d'air est calculée selon le vecteur de vitesse horizontal et sa position initiale. Les mouvements verticaux sont recalculés par le modèle en utilisant la variation verticale, par rapport à la surface, de la pression par unité de temps. La méthode de calculs des rétro-trajectoires est similaire. Elle comprend une double approche : Eulérienne et Lagrangienne.

Pour nos travaux, les rétro-trajectoires sont générées chaque jour pour l'ensemble de notre période d'étude (2006-2016) et paramétrées comme suit :

- Altitude : 1 500 m, 2 000 m et 3 000 m (a.g.l.) ; altitudes compatibles avec les propriétés de la Saharan Air Layer (SAL), couche de transport des poussières qui se situe généralement entre $\sim 1\,500$ m et $\sim 3\,500$ m dans la Caraïbe (Prospero and Carlson, 1972 ; Carlson and Prospero, 1972)
- Localisations de départ : 16.24° N 61.53° W (Guadeloupe) ; 14.64° N 61.02° W (Porto Rico) et 13.17° N 59.43° W (Barbade)
- Heure de départ : 12 UTC (8 heure locale)
- Durée remontée dans le temps pour le calcul de la rétro-trajectoire : 240 heures (10 jours) correspondant au temps de transport des masses d'air poussiéreuses des côtes Africaines vers la Caraïbe.
- Intervalle de temps : 24 heures

Les rétro-trajectoires générées (fichiers position latitude/longitude) sont importées dans le programme ArcInfo/ArcView GIS (version QGIS2.18.14 : <http://www.qgis.org/fr/site/>).

La méthode d'utilisation est détaillée dans le Guide d'utilisation HYSPLIT : file:///C:/Users/lovel/Desktop/test%20dans%20la%20journée/hysplit_user_guide.pdf

7. ETUDE THERMODYNAMIQUE DES BRUMES DESERTIQUES

Le niveau de pollution dans les basses couches est conditionné par les configurations météorologiques. La dispersion des polluants dans la troposphère s'effectue par advection horizontale sous l'effet du champ de vent synoptique. Ces processus pilotent le déplacement des particules sur de longues distance, nécessitant un état de stabilité atmosphérique. Le second phénomène permettant la dispersion des aérosols est le brassage vertical produit par la turbulence au sein de la Couche Limite Atmosphérique (CLA). Dans le contexte caribéen, la couche limite joue également un rôle important dans les événements de pollution particulaire détectés à la surface.

Les épisodes de « brumes désertiques » sont des phénomènes à l'échelle synoptique et planétaire. En considérant les îles de la Guadeloupe et de Porto Rico distinctement, nous avons analysé à l'échelle régionale (mésos-échelle), les effets des événements poussiéreux sur la stratification verticale de température et d'humidité dans les basses couches atmosphériques.

7.1. Stratification thermodynamique en air sec

Pour étudier la CLA, on représente communément une parcelle d'air sans enveloppe matériel vérifiant les propriétés suivantes :

- Echange adiabatique avec l'air environnant
- Température propre, différente de celle de l'air environnant
- Equilibre de la pression de la parcelle d'air et de l'air environnant à l'interface

7.1.1. *Température potentielle*

Dans l'atmosphère, on considère l'air sec comme un gaz parfait de masse molaire : $M_{\text{air}} = 29 \text{ g mol}^{-1}$.

La pression (P), la température (T) et la masse volumique (ρ) sont reliés par l'expression :

$$P = \rho \times R_a \times T$$

→ R_a est la constante d'état de l'air sec : $287 \text{ J K}^{-1} \text{ Kg}^{-1}$

Expression du premier principe de la thermodynamique selon l'enthalpie :

$$dH = V dP + \delta Q \quad \text{et} \quad dQ = m c_p dT$$

→ V : volume

→ δQ : échange de chaleur avec le milieu

→ m : masse du gaz

→ C_p : chaleur spécifique à pression constante, qui représente l'énergie nécessaire pour augmenter de 1°C

une masse d'air de 1 Kg du gaz ; s'exprime en $\text{J K}^{-1} \text{ Kg}^{-1}$

Dans le cas d'une transformation adiabatique (sans échange de chaleur), la première loi de la thermodynamique s'écrit :

$$m c_p dT = V dP$$

Tenant compte de la loi des gaz parfaits on obtient :

$$d \left(\ln \left(T \times P^{\frac{r_{air}}{c_p}} \right) \right) = 0$$

→ $P = \rho \times r_{air} \times T$

→ $r_{air} = R_a / M_{air}$

→ $\rho = m/V$

La température potentiel (Θ) est défini comme la température qu'aurait au sol un gaz ramené adiabatiquement au sol à partir d'un état thermodynamique (T, P) :

$$\Theta (P, T) = T \left(\frac{P_s}{P} \right)^{\frac{r_{air}}{c_p}}$$

→ P_s : Pression au sol

→ $c_p = 1004.5 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$

$$\rightarrow r_{\text{air}}/c_p = 0.286 \text{ K}$$

7.1.2. *Variation verticale de la température potentielle dans l'atmosphère*

Dans une atmosphère adiabatique, la température T diminue en fonction de l'altitude z , de façon constante selon la relation :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) = -\frac{\rho r_{\text{air}} T}{P} \times \frac{g}{c_p} = -\frac{g}{c_p} \quad \text{donc} \quad \Gamma_d = -\frac{g}{c_p}$$

Cette expression définit le gradient adiabatique de température de l'air sec, noté $-\Gamma_d$ (d pour « dry »). Ce dernier correspond à la perte verticale de température de 9.8°C par kilomètre dans la troposphère. Le gradient adiabatique sec Γ_d est supérieur au gradient de température moyen de l'atmosphère équivalent à $\sim 6.5^\circ\text{C}$ par kilomètre. C'est l'écart entre le gradient adiabatique sec idéalisé et celui de la température atmosphérique qui permet d'évaluer la stabilité atmosphérique de la parcelle d'air.

7.1.3. *Equilibre hydrostatique*

Stabilité

Lorsque cette parcelle d'air se déplace adiabatiquement et verticalement, elle subit l'action de son poids (lié à l'accélération gravitationnelle g) et de la poussée d'Archimède due à sa flottabilité. Pour synthétiser, la stabilité atmosphérique dépend de la force de flottabilité associée au type de déplacement. C'est le signe du gradient de température potentielle qui permet de déterminer l'état de stabilité de l'atmosphère :

$$\begin{aligned} \rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial z} > 0 &\rightarrow \text{atmosphère stable} \\ \rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial z} < 0 &\rightarrow \text{atmosphère instable} \\ \rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 &\rightarrow \text{atmosphère neutre} \end{aligned}$$

Inversion de température

Comme vu précédemment, le gradient de température adiabatique est négatif dans la troposphère. Donc lorsque celui-ci est nul ou positif, cela implique des conditions atmosphériques de stabilité particulières. Les deux types d'inversion de température les plus fréquents sont :

- L'inversion de surface : due au refroidissement du sol au cours de la nuit ou encore, au réchauffement des couches supérieures. La couche d'inversion est généralement très stable.
- Inversion de subsidence : observée en situation anticyclonique, c'est une inversion qui se produit en altitude. La compression qu'exercent les masses d'air descendantes sur les basses couches réchauffe ces dernières, créant une zone d'inversion de température. Les inversions de subsidence sont également associées aux forts épisodes de pollution.

La couche Saharienne (Saharan Air Layer ou SAL) illustre un exemple d'inversion de température créée en altitude par advection d'une masse d'air sec et plus chaud au-dessus d'un air maritime plus frais. Cette couche qui transporte les poussières désertiques présente une inversion de température caractéristique à sa base.

7.2. Stratification thermodynamique d'une atmosphère humide

Analogiquement au cas de l'air sec, le gradient de température de l'air humide s'exprime par :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) = - \frac{g}{c_{p,w}} = -\Gamma_w$$

- $c_{p,w}$: chaleur spécifique à pression constante pour l'air humide

$$c_{p,w} = (1 - q_s) c_{p,d} + q_s c_{p,v}$$

- q_s : humidité spécifique, c'est la fraction massique de la vapeur d'eau par rapport à l'air humide

- $c_{p,d}$ et $c_{p,v}$: chaleur spécifique de l'air sec ($1004.5 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ à 273 K) et de la vapeur d'eau ($1952 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ à 273 K) respectivement

La chaleur spécifique à pression constante est plus importante dans l'air humide :

$$c_{p,d} < c_{p,w} \text{ d'où } \Gamma_w < \Gamma_d$$

Une atmosphère sèche est donc intrinsèquement plus stable qu'une atmosphère humide (Triplet and Roche, 1996 ; Dubovik et al., 2002 ; Sportisse, 2008 ; Pietryk, 2015).

L'humidité correspond à la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère. Pour décrire l'impact du phénomène des brumes désertiques sur les conditions d'humidité de la couche

atmosphérique dans la caraïbe, nous avons analysé les paramètres de rapport de mélange et l'humidité relative.

7.3. Rapport de mélange

Le rapport de mélange r d'une parcelle d'air désigne la masse de vapeur d'eau qu'elle contient par rapport à une masse d'air sec. Il est d'usage de l'exprimer en grammes de vapeur d'eau par kilogramme d'air sec (g kg⁻¹) :

$$r = \frac{M_{vap}}{M_{air}} \frac{P_{vap}}{P - P_{vap}}$$

- M_{air} : masse molaire de l'air
- M_{vap} : masse molaire de la vapeur
- P : pression
- P_{vap} : pression partielle de vapeur d'eau

La base de la SAL est caractérisée par un dessèchement brutal de la couche atmosphérique.

8. **RADIOSONDAGES**

Le radiosondage permet de décrire la structure verticale de la couche atmosphérique (troposphère et stratosphère). Ces données servent à modéliser le comportement météorologique et à prévoir (dans une certaine mesure) le temps. Au cours des cinquante dernières années, l'Organisation Mondiale Météorologique a favorisé le développement de réseaux de mesures qui couvrent l'ensemble de la Caraïbe. Des radiosondages sont effectués quotidiennement à 00Z UTC (heure locale : 8h00) et 12Z UTC (heure locale : 20h00) en Guadeloupe et dans plusieurs autres stations des Antilles.

8.1. Principe du radiosondage

Des « ballons-sondes » sont lâchés quotidiennement dans l'atmosphère. Ils sont constitués de gros ballons de baudruche, gonflés avec un gaz plus léger que l'air, l'hélium, auquel est attelée une radiosonde. Le ballon s'élève à une vitesse constante en altitude. La radiosonde est équipée d'instruments de mesures* de pression, température et humidité et envoie vers la station d'observation les mesures pour une altitude donnée. La vitesse et la direction du vent se

déduisent par calcul grâce au positionnement par GPS du ballon au cours de son ascension. Ainsi deux fois par jour [00 UTC et 12 UTC] les ballons sont lancés depuis les stations météorologiques (généralement proches des aéroports). Après environ 2h à 2h30 d'ascension, entre 20 et 30 kilomètres d'altitude, ils « éclatent » et retombent (équipées de petits parachutes) à quelques dizaines de kilomètres de leur point départ. Les sondes ne sont pas réutilisables, mais elles sont intégrées dans un circuit de recyclage.

**Les mesures fournies par les capteurs de température du réseau terrestre ont une plage d'erreur assez faible.*

8.2. Données de sondages

Les données de radiosondages sont mesurées quotidiennement à 00 UTC (20h00 en heure locale) et 12 Z UTC (8h00 en heure locale) aux stations météorologiques des sites Caraïbéens [Figure 12 ; code : 78526 TJSJ (San Juan, Porto Rico) ; code : 78897 TFFR (Le Raizet, Guadeloupe) ; code : 78954 TBPB (Grantley Adams, Barbade)].



Figure 13 : Stations de mesures de radiosondage aux Etats-Unis et dans la Caraïbe

Ces données sont récupérées et traitées par l'université du Wyoming (Etats-Unis) et mises en ligne sur le site : <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> . Elles nous ont servi à analyser l'impact des poussières sur la structure thermodynamique de la Caraïbe.

L'air atmosphérique est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. Dans la continuité des études déjà réalisées par Jordan (1958), Carlson and Prospero (1972) et Dunion and Marron (2008), nos travaux s'orientent sur les propriétés thermodynamiques de l'état atmosphérique. Ainsi, nous représentons les profils verticaux de température et d'humidité (Rapport de mélange et humidité relative) des jours poussiéreux dans la Caraïbe. Ces derniers sont définis par le seuil de PM10 journalier lié à la présence des poussières que nous fixerons au cours de notre étude.

Pour illustrer nos profils, nous utilisons deux types de diagramme thermodynamique. Pour la température nous nous sommes servis du Téphigramme. C'est l'un des quatre diagrammes thermodynamiques utilisés pour analyser la structure thermique de l'atmosphère. Le nom vient des axes utilisés, soit T pour la température et phi pour l'entropie. Pour la description de l'humidité au regard de la température et de la vitesse et direction des vents, nous utilisons un diagramme de type Skew-T.

Les courbes de profils de cette étude correspondent aux pressions standards [également utilisées par Dunion and Marron (2008) et Jordan (1958) : 1000, 925, 850, 700, 500, 400 et 300 hPa. Les mesures de radiosondages sont assez stables pour ces hauteurs de pression. Compte tenu du manque récurrent de données à 600 hPa, cette hauteur a été exclue de la représentation graphique. Le nombre de données de sondages disponibles pour chaque station de mesure étudiée est fourni dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Nombre de jours pour lesquels les données de sondages journaliers (12 UTC) sont disponibles simultanément avec les données de concentrations journalières de PM10 pour chaque station (2006-2016)

<i>Station</i>	<i>Nombre de Données</i>	<i>Période</i>	<i>Heure de mesure</i>
<i>Raizet</i> <i>(Guadeloupe)</i>	1026	2006-2016	12 UTC
<i>San Juan</i> <i>(Porto Rico)</i>	954	2006-2016	12 UTC

PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE 1 : DEFINITION D'UN EVENEMENT DE BRUME DESERTIQUE DANS LA CARAÏBE

Les principaux facteurs conduisant à l'élévation de la pollution particulaire dans l'atmosphère sont l'activité locale, et les épisodes saisonniers de brumes désertiques. Dans notre étude, les évènements de pollution liés aux poussières désertiques sont essentiellement appréhendés à travers les concentrations de PM10 mesurés à la surface. Nous débutons notre analyse en représentant les moyennes de concentrations horaires en PM10 en Guadeloupe.

1.1. Origine de la pollution particulaire dans la Caraïbe

Des études menées en Europe ont permis de modéliser l'impact de la pollution anthropique sur l'évolution horaire des concentrations de plusieurs polluants [Ozone (O_3), Dioxyde d'Azote (NO_2), PM2.5, sulfate, nitrate, Sodium...], dont les PM10. Il a été démontré que l'activité industrielles et le trafic routier s'exprimaient par des pics de pollution horaires (Tombette et al., 2009 ; Menut et al., 2012). A priori, les concentrations horaires de PM10 mesurées hors évènement de poussières reflètent les effets de la pollution locale, dans la Caraïbe, qui rappelons-le, est une zone caractérisée par un faible développement industriel en comparaison des Etats-Unis et de l'Europe. Ainsi, au travers des données horaires de concentrations de PM10, nous avons représenté :

- Le profil horaire moyen lié à l'activité anthropique locale, quasiment exempté d'évènement de poussières désertiques : moyenne horaire des jours de la semaine du mois de Janvier, entre 2006 et 2016.
- Le second profil moyen correspond à une période où le trafic et l'activité industrielle se trouvent réduits au minimum toujours quasiment sans évènements poussiéreux, c'est-à-dire les dimanches des mois de Janvier (2006 à 2016)

Parallèlement, nous caractérisons l'impact de la présence des aérosols désertiques dans la couche atmosphérique, en définissant les profils types associés aux épisodes de « brumes désertiques » (Figure 14) :

- Profils moyens horaires reliés aux épisodes de brumes désertiques, c'est-à-dire, des jours présentant un indice de qualité de l'air mauvais (concentration journalière de PM10 comprise entre $50 \mu\text{g m}^{-3}$ et $80 \mu\text{g m}^{-3}$ non inclus) ;
- Puis, le profil moyen des événements poussiéreux intenses (concentration journalière de $\text{PM}_{10} \geq 80 \mu\text{g m}^{-3}$), conduisant à l'alerte maximale liée aux conditions de poussière extrêmes.

Soulignons tout de même, que ces profils horaires de PM10 décrivent la pollution particulaire d'une zone périphérique. Elles ne sont donc pas représentatives des zones rurales pour lesquelles l'activité industrielle est minimale, voire inexistante, qui présentent donc des concentrations de poussières plus faibles.

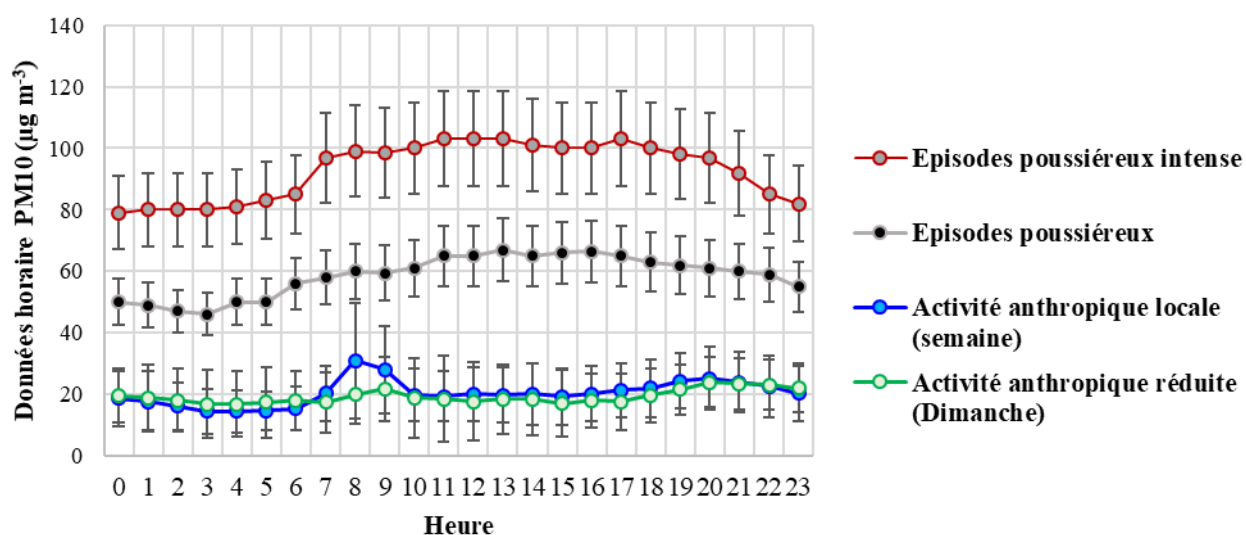


Figure 14 : Profils moyens horaires des jours caractérisés par : une pollution locale minimale (Dimanches des mois de Janvier entre 2006 et 2016) ; activité locale (jours de semaines des mois de Janvier de 2006 à 2016) ; épisode de « brumes désertiques » ; niveau d'alerte maximale « brumes de poussières désertiques ». Données de concentration de PM10 horaire provenant de la station de mesure de Pointe-à-Pitre (Guadeloupe).

L'impact de la présence des aérosols désertiques sur les concentrations horaires est nettement plus important que celui de la pollution locale (agissant ponctuellement, visible par les pics horaires de concentration). Au cours du Week end (lorsque le trafic est moins dense), les valeurs horaires sont minimales (inférieures à $23 \mu\text{g m}^{-3}$ la plupart du temps) ; en moyenne journalière on se situe généralement autour de $17.5 \pm 3 \mu\text{g m}^{-3}$. En semaine, lorsque l'on a une bonne qualité de l'air, les concentrations sont corrélées avec l'activité anthropique. On constate généralement une augmentation du niveau de concentration de PM10 en début de matinée avec le renforcement du vent en journée et le début des activités humaines. Celles-ci se matérialisent d'ailleurs par un léger pic horaire en Guadeloupe (8-9 h du matin). L'empoussièrément reste

ensuite à peu près stable en cours de journée avant d'augmenter en fin d'après-midi, avec l'apparition de pics sans doute associés au retour des citadins en début de soirée. Ainsi les valeurs vont osciller pendant la journée entre 14 et 23 $\mu\text{g m}^{-3}$ avec une valeur moyenne journalière de $20.4 \pm 9 \mu\text{g m}^{-3}$.

En présence de « brumes désertiques », les concentrations horaires sont largement dominées par la présence des poussières désertiques avec des valeurs le plus souvent supérieures à 50 $\mu\text{g m}^{-3}$ même pendant la nuit. Il apparaît que lors des événements poussiéreux, les aérosols minéraux en suspensions dans l'atmosphère s'additionnent à la pollution locale. Les valeurs horaires de jour sont en effet nettement supérieures à celles de nuit, à cause sans doute de la remise en circulation des poussières par les activités anthropiques. Les pics horaires sont toujours visibles mais moins marqués, surtout dans le cas des événements de poussières intenses.

A travers ces profils standards caractérisant différentes conditions de qualité de l'air en Guadeloupe, on s'aperçoit que la pollution d'origine anthropique se manifeste ponctuellement par des pics horaires, à l'inverse des événements de poussières désertiques qui génèrent de fortes concentrations horaires persistantes 2 à 3 fois plus élevées que celles liées aux effets de l'activité humaine, et ce tout au long de la journée, pouvant même perdurer au-delà de 24 heures. En effet, les masses d'air poussiéreuses dans la zone caribéenne présentent une importante dimension spatiale [soit 4 000 à 5 000 km de diamètre (Dunion and Velden, 2004)] et temporelle (de l'ordre de plusieurs jours).

1.2. Évolution journalière de la pollution particulaire dans la Caraïbe et sur les côtes de l'Afrique de l'Ouest

Nous avons vu au paragraphe précédent, que la charge en PM10 mesurée à la surface présente des variations plus ou moins importante liées au passage de brumes désertiques d'échelle synoptique ou à la pollution particulaire d'échelle locale générée par les activités humaines. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes focalisés sur la pollution associée aux brumes désertiques exportées hors des côtes Africaines, et transportées sur 4 000 km au-dessus de l'Océan Atlantique, vers la zone Caribéenne. Pour ces événements de grande échelle, nous nous intéresserons surtout à la variation temporelle des valeurs journalières, voire mensuelles ou annuelles plus tard lors de l'établissement de la saisonnalité et de la dérive climatique de ces épisodes, l'analyse des fluctuations horaires étant moins cruciale. Dans ce contexte d'étude, nous nous sommes principalement basés sur la détermination de l'empoussièrement au sol

défini par les mesures de concentrations moyennes journalières en poussières (PM10), et l'épaisseur optique moyenne journalière en aérosols calculée sur l'ensemble de la colonne atmosphérique [données d'AOD (AERONET)] pour définir les événements poussiéreux aux Antilles.

1.3. Poussières mesurées à la surface : PM10

La Figure 15 décrit l'impact des poussières sahariennes sur la variation temporelle des valeurs journalières de PM10 (Porto Rico, Guadeloupe, Martinique) et de concentration de poussières (Barbade). En premier lieu, on remarque que les données journalières des 3 sites (Porto Rico, Guadeloupe et Martinique) montre le même comportement au fil des années, ce qui implique des conditions de pollution similaires sur l'ensemble de l'arc (Figure 15). D'une part, on distingue « l'atmosphère de fond » représentée par le regroupement de la majorité des concentrations journalières sous la forme d'une ligne apparente qui se situe autour de $\sim 20 \mu\text{g m}^{-3}$; puis on observe des périodes de niveaux élevés en particules se répétant successivement au fil des années. Les événements de « brumes désertiques » constituent le principal facteur provoquant l'élévation significative et saisonnière des valeurs de concentrations journalières observables sur les trois îles de l'arc.

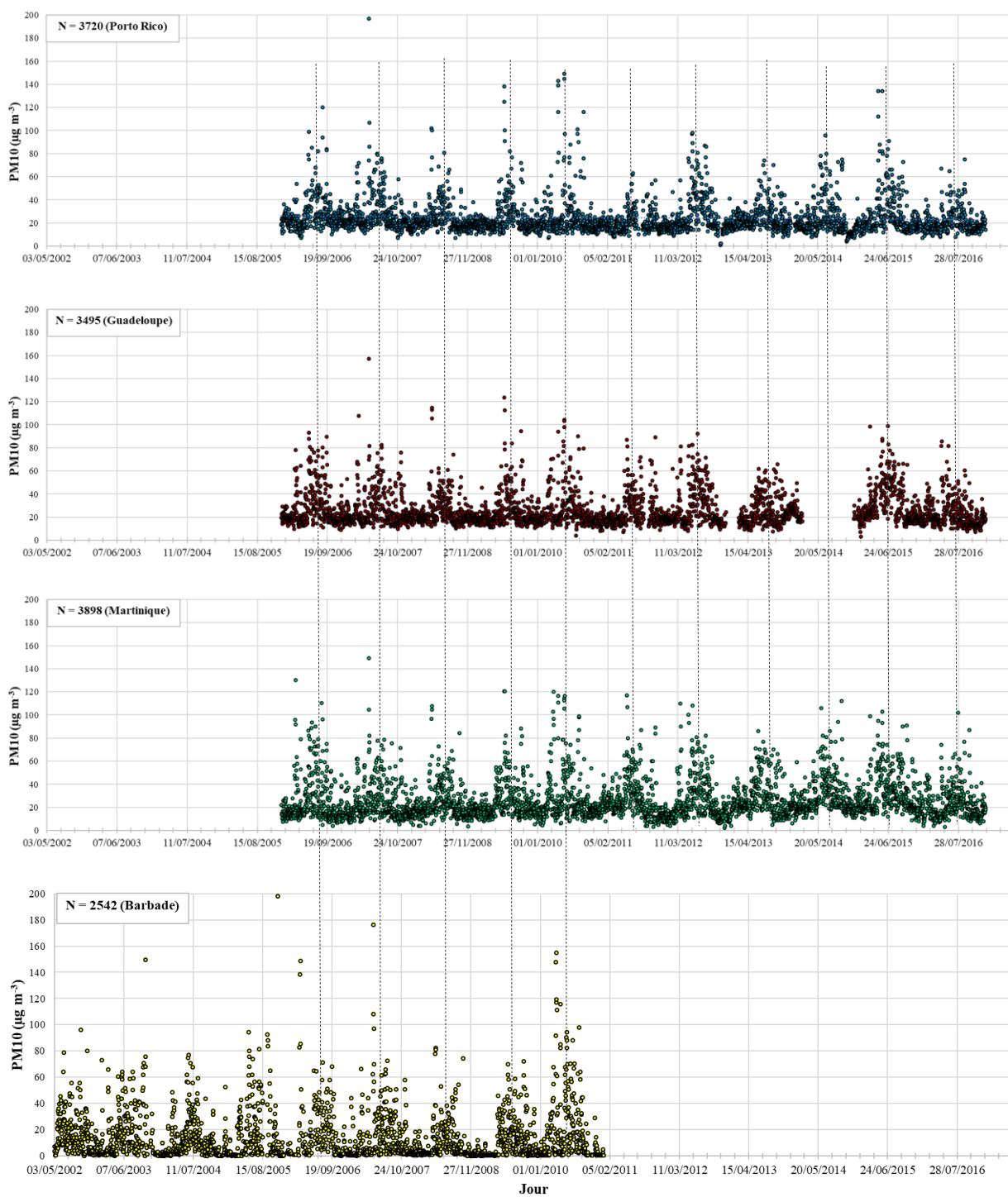


Figure 15 : Variations temporelles des valeurs journalières des concentrations de PM10 dans la Caraïbe de 2006 à 2016 ; Variations des concentrations de poussières prélevées à la station de Ragged Point (Barbade) pour la période de 2002-2011 ; les lignes en pointillés mettent en évidence l'augmentation saisonnière simultanée des valeurs journalières de PM10 et concentrations de poussières

A titre de comparaison, Perez et al. (2008) ont décrit l'impact des aérosols désertiques sur les données de concentrations de PM10 à Barcelone. Ils ont montré que l'augmentation périodique des données journalières pouvait être associée à la présence de poussières sahariennes, mais également à des pics de pollution anthropique ; ce qui n'est pas le cas de la région des Petites Antilles caractérisée par un faible développement industriel. L'augmentation des valeurs de PM10 correspond au cycle saisonnier des « brumes de poussière désertique ». Dans ce contexte, nous pouvons envisager de déterminer un seuil PM10 pour la détection des aérosols désertiques, ceux-ci étant le principal facteur de réduction de la qualité de l'air dans cette zone.

Les variations de concentration de poussières journalières de la Barbade décrivent les mêmes variations rythmées par le passage des épisodes périodiques de poussières. Cette station de mesure est localisée en dehors des zones d'activités industrielles, les données sont donc exemptes des effets de la pollution anthropique. Cependant, la technique de mesure diffère, ce qui peut expliquer le biais avec les valeurs de PM10 (Prospero et al., 2014). La valeur maximale de $200 \mu\text{g m}^{-3}$ est atteinte en 2006.

L'analyse journalière des données de PM10 dans la Caraïbe a permis de mettre en évidence grossièrement le niveau de « l'atmosphère de fond » ($\sim 20 \mu\text{g m}^{-3}$ pour l'ensemble de l'arc) décrit par la majorité des données. Ce qui montre que la qualité de l'air y est généralement « bonne ». Ceci s'explique par le faible développement industriel de cette région.

1.4. Epaisseur optique en aérosols de la colonne atmosphérique : AOD

Contrairement aux concentrations de PM10 mesurées dans les basses couches de la troposphère, les données AOD sont des mesures intégrées sur l'ensemble de la colonne atmosphérique. Nous avons comparé les valeurs d'AOD mesurées à Dakar et au Cap Vert (Figure 17), à celles mesurées dans les îles de la Caraïbe (Figure 16).

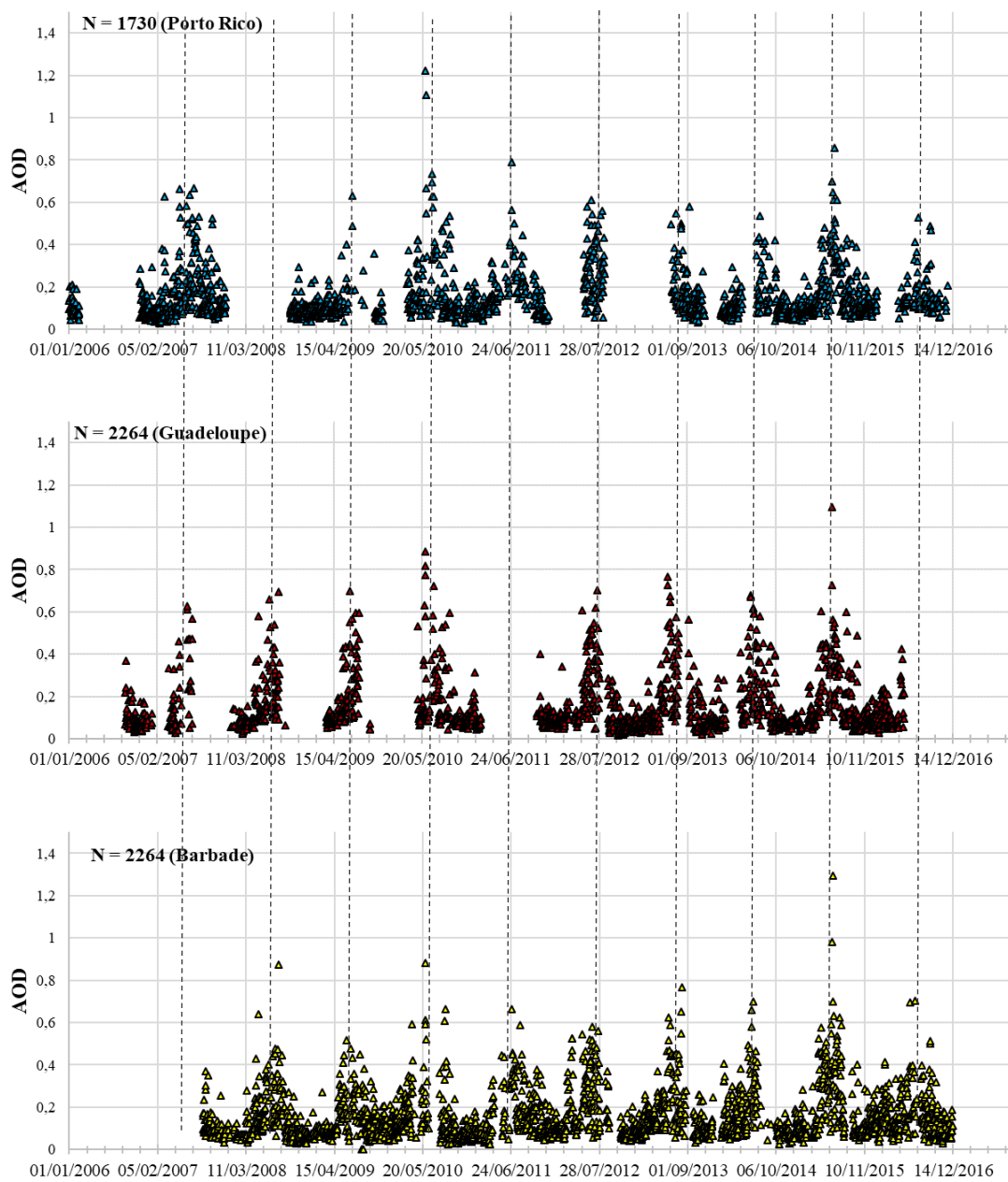


Figure 16 : Variations temporelles des valeurs journalières d'AOD (440 nm, niveau de qualité 2.0) de 2006 à 2016 pour Porto Rico et Guadeloupe ; de 2007 à 2016 pour Barbade

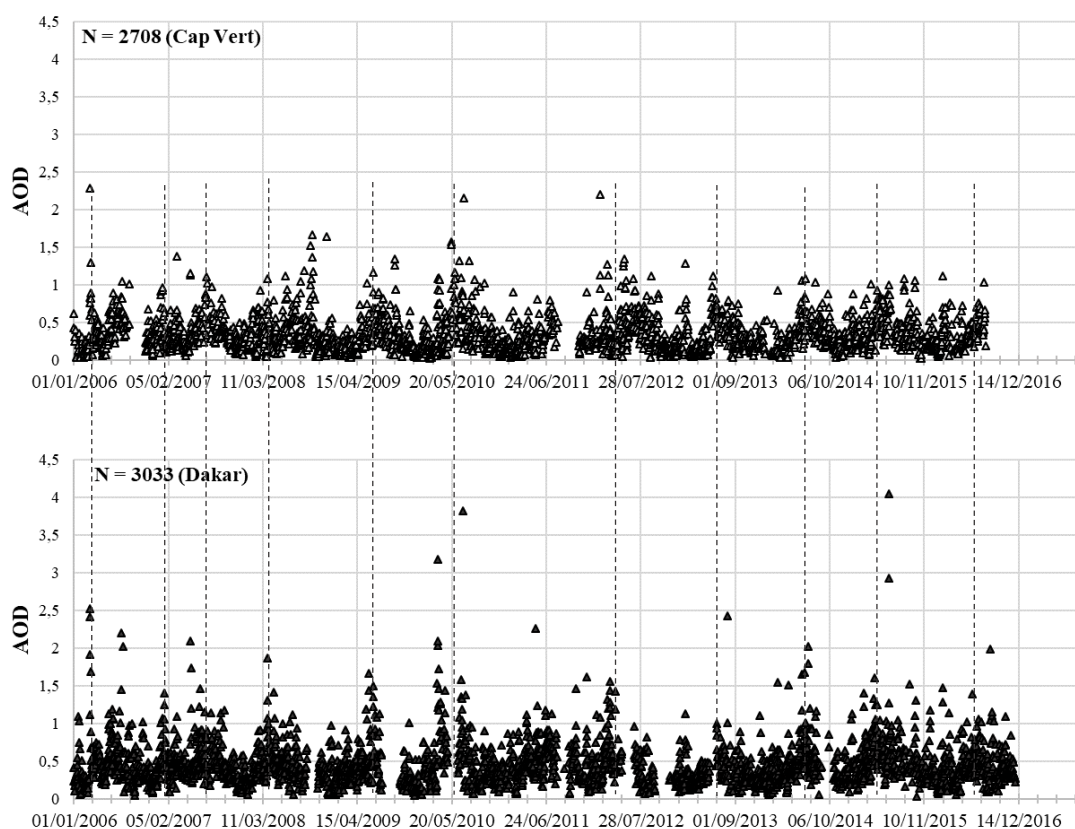


Figure 17 : Variations temporelles des valeurs journalières d'AOD (440 nm, niveau de qualité 2.0) à Dakar et au Cap Vert (île) de 2006 à 2016

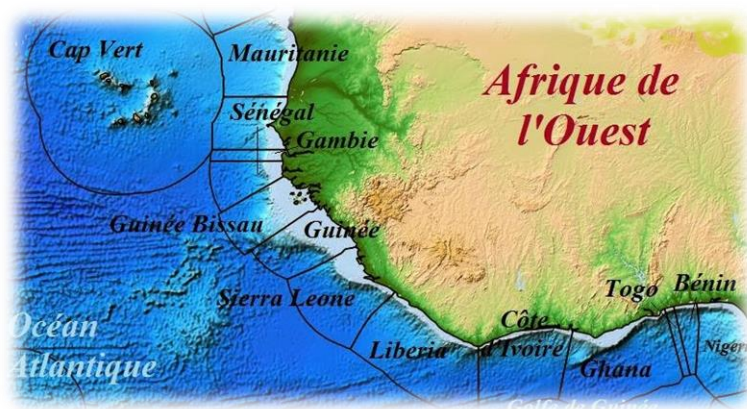


Figure 18 : Côte Africaine

De 2006-2016, l'évolution des AOD journaliers de la Caraïbe (Figure 16) présentent le même comportement saisonnier décrit pour les concentrations journalières de PM₁₀ (Figure 15). L'augmentation périodique des valeurs est vraisemblablement liée à la présence des particules de poussières désertiques dans l'atmosphère pour les 3 îles caribéennes situées au Nord, au centre et au Sud de l'arc. La majorité des valeurs d'AOD se concentrent en dessous de 0.2.

La Figure 16 montre la variation temporelle des valeurs journalières d'AOD, au départ des côtes de l'Afrique de l'Ouest (Dakar et Cap-Vert, localisés sur la Figure 18). A Dakar, les valeurs d'AOD sont visiblement plus élevées que ceux mesurés au Cap Vert. Les îles du Cap Vert se situent à environ 700 Km à l'Ouest de Dakar, ce qui pourrait expliquer la perte en charge de poussières due à la distance parcourue par les aérosols minéraux ; de plus l'activité anthropique n'est pas la même. A Dakar et au Cap Vert, les valeurs d'AOD sont généralement inférieures à 1 et 0.7, respectivement. Le maximum observé à Dakar (Cap Vert) s'élève à ~ 4 (~ 2.3). Pour la station du Cap Vert, la variation temporelle des valeurs journalières d'AOD semble périodique, traduisant un comportement saisonnier. Cependant, cette tendance est moins marquée sur le graphique de Dakar.

Dans l'ensemble, ces valeurs sont plus de 3 fois inférieures à celles observées à Dakar et aux îles du Cap Vert. Contrairement au bassin caribéen, Dakar (situé sur la côte Africaine) est plus régulièrement soumis à la présence de particules désertiques provenant des déserts de l'Ouest (actifs quasiment toute l'année). Toutefois, c'est le régime saisonnier des vents qui va favoriser ou inhiber le transport des particules vers les îles du Cap Vert (Jaenicke and Schutz, 1978), puis vers la zone de la Caraïbe [condition thermodynamique de transport : Saharan Air Layer (Carlson and Prospero, 1972); exportation des aérosols désertiques sur l'Océan Atlantique (Ben-Ami et al., 2010).

1.5. Établissement de critères seuils pour la détection des épisodes de brumes sahariennes à partir des données PM10 et photométriques

Afin de poursuivre notre étude, il nous faut définir un critère fiable permettant d'attester la présence de poussières désertiques dans l'atmosphère à tout moment. Comme nous le verrons ci-dessous, des travaux précédents ont permis d'établir que la présence des aérosols sahariens pouvait être attestée en utilisant des valeurs seuils de grandeurs photométriques telles que le l'épaisseur optique (AOD) et le coefficient d'Angström (AE) (Smirnov et al., 2000 ; Velasco-Merino et al., 2018). Il résulte de ces études que des valeurs d'AOD ≥ 0.2 associées aux AE ≤ 0.6 (particules de type grossières) permettraient de mettre en évidence la présence de poussières désertiques dans la zone caribéenne. Il n'est pas exclu que les épisodes de poussières se produisent avec des valeurs d'AOD < 0.2 et AE > 0.6 , néanmoins, ces critères maximisent la probabilité de présence des poussières dans les îles.

1.6. Répartition de la taille des particules en fonction de l'épaisseur optique aux côtes de l'Afrique de l'Ouest et dans la Caraïbe

Velasco-Merino et al. (2018) ont présenté l'évolution des AE (440-870 nm) en fonction des AOD (440 nm) pour la zone Africaine (moyenne des valeurs de Dakar et du Cap vert) et celle de la Caraïbe (toutes les stations disponibles de l'arc : Porto Rico, Guadeloupe et Barbade), pour la période de 1994 à 2014.

Nous proposons la même représentation sous forme de nuage de points, des valeurs AE (440-870 nm) en fonction des AOD (440 nm), pour chaque station Africaine et caribéenne individuellement. Notre objectif est de montrer l'impact de la distance de transport, et ce même entre les deux sites Africains, Dakar et Cap Vert. De plus, le parcours des panaches poussiéreux joue également un rôle sur la densité (valeur d'AOD) et la taille (AE) des particules. On le constate sur nos résultats ci-dessous, même à l'échelle de la zone Caribéenne. En effet la répartition de la taille en fonction des valeurs d'AOD évolue en fonction de la position plus ou moins est des îles sur l'arc, c'est à dire en fonction de l'éloignement des côtes Africaines (selon la longitude). La Figure 19 illustre déjà les effets du transport des particules entre Dakar et Cap Vert (séparés par une distance de ~ 700 Km) en observant la répartition des AE en fonction des AOD. Les critères liés aux aérosols minéraux dans la caraïbe sont indiqués par les lignes en pointillés en rouge ($AOD \geq 0.2$ et $AE \leq 0.6$).

Il ressort que le nombre de valeurs d' $AOD \geq 0.2$ est nettement supérieur à Dakar.

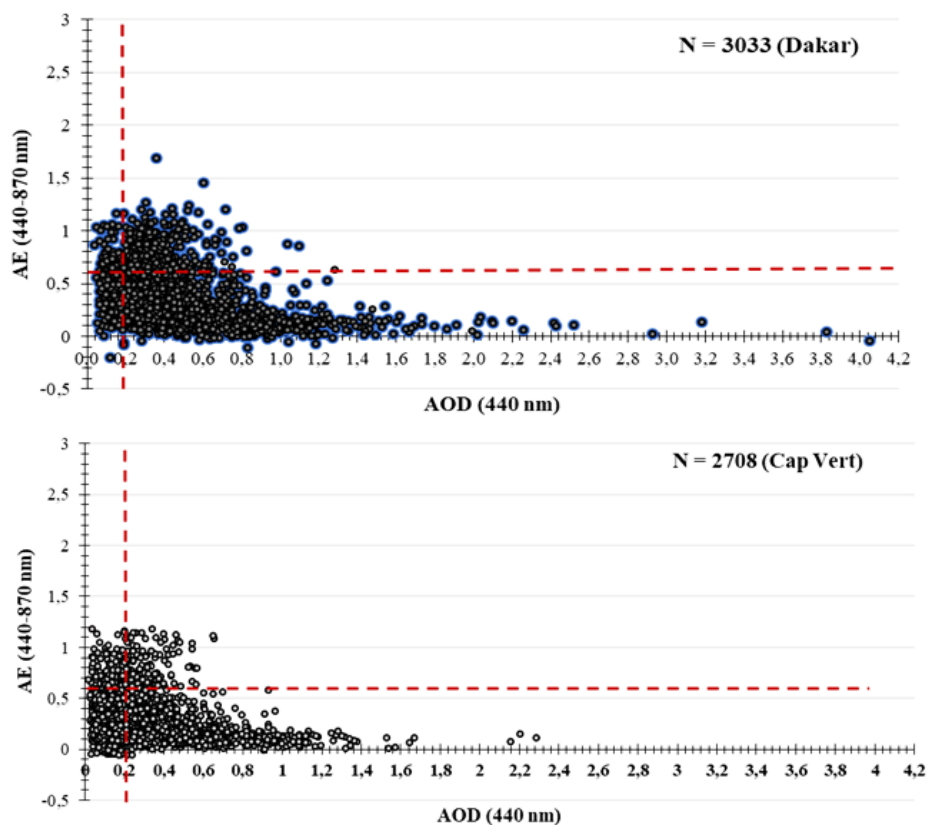


Figure 19 : Dispersion des AE (440-870 nm) en fonction des AOD (440 nm) pour la période de 2006 à 2016 en Afrique de l'Ouest (Dakar et Cap Vert) ; les lignes en pointillés (rouge) indiquent les critères d'identifications des poussières minérales adoptés ($AOD \geq 0.2$ et $AE \leq 0.6$) (Dubovik et al., 2002)

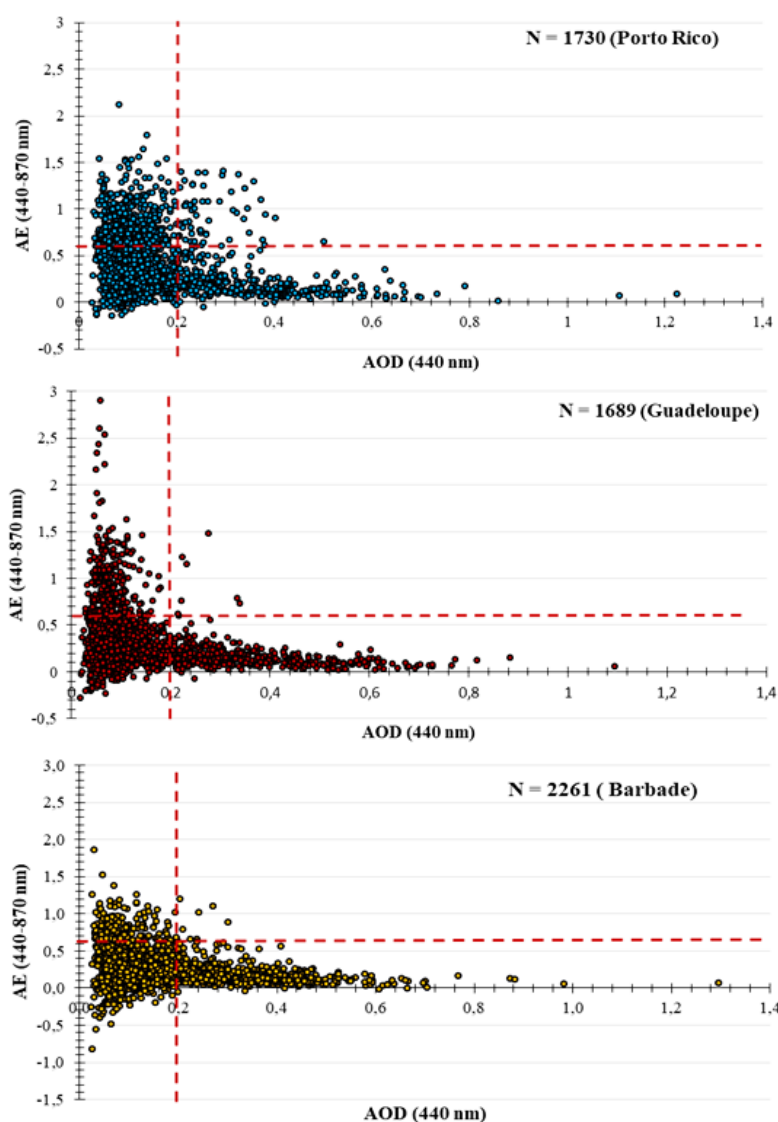


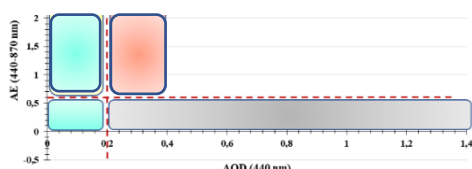
Figure 20 : Dispersion des AE en fonction des AOD pour la période de 2006 à 2016 pour la zone de la Caraïbe (Porto Rico, Barbade et Guadeloupe) ; les lignes en pointillés indiquent les critères d'identification des poussières minérales adoptés ($AOD \geq 0.2$ et $AE \leq 0.6$)

La répartition des AE en fonction des valeurs d'AOD dans la Caraïbe se distingue de celle de l'Afrique premièrement par un nombre plus faible de données dans la gamme $AOD \geq 0.2$; ensuite, par la répartition des valeurs AE dans la gamme $AE \leq 0.6$, particulièrement pour le cas de Guadeloupe (Figure 20). On remarque également que la distribution de l'ensemble des valeurs diffère selon la position dans l'arc indiquant des propriétés microphysiques des particules différentes pour les 3 îles. Nous développerons cet aspect dans le 5^{ème} chapitre des « résultats et discussion » de la thèse, axé sur la caractérisation de la taille des poussières d'origine désertique dans la Caraïbe.

Dubovik et al. (2002) ont présenté les propriétés optiques des différents types d'aérosols : désertiques, marins, industriels, biomasses. Il est intéressant de noter que ces travaux postulent que la charge en aérosols marins ne dépasse généralement pas $\tau(440) = 0.15$. Compte-tenu du contexte géographique, il est donc fortement probable que les aérosols appartenant à la gamme d' $AOD \leq 0.2$ et $AE < 2$ soient des aérosols marins.

Ainsi, le pourcentage des cas répondants aux critères de poussières ($AOD \geq 0.2$ et $AE \leq 0.6$) pour les sites Africains et Caraïbens de notre étude est présenté dans le Tableau 7. Par ailleurs, le pourcentage des gammes généralement attribuées aux particules d'origine continental/biomasse ($AOD \geq 0.2$ et $AE > 0.6$), ainsi qu'aux aérosols marins ($AOD \leq 0.15$ et $AE < 2$) sont également mentionnés.

Tableau 6 : Pourcentage de cas correspondant aux différents critères d'AOD et d'AE



ZONE	Site (Longitude° E)	$AOD \geq 0.2 ; AE \leq 0.6$  Critères <i>Poussières désertiques</i>	$AOD \leq 0.15 ; AE < 2$  Critères <i>Sel marin</i>	$AOD \geq 0.2 ; AE > 0.6$  Critères <i>Continental/ biomasse</i>
AFRIQUE	Dakar (-16.95°E)	75.5%	12.2%	12.3%
	Cap Vert (-22.94°E)	63.4%	93.4%	5.3%
CARAÏBE	Barbade (-59.42°E)	25.1%	74.5%	0.4%
	Guadeloupe (-61.50°E)	22.9%	76.6%	0.5%
	Porto Rico (-65.62°E)	18.7%	77.7%	3.6%

D'après le Tableau 6, on s'aperçoit que :

- Le pourcentage de cas répondant aux critères de poussières désertiques ($AOD \geq 0.2$ et $AE \leq 0.6$) décroît en fonction de la distance (longitude) en partant des

côtes Africaines jusqu'aux côtes caribéennes, attribuable à la perte en charge d'aérosols pendant le transport entre les deux régions

- A l'inverse, en ce qui concerne les cas appartenant à la gamme des aérosols marins (**AOD ≤ 0.15 et AE < 2**), le pourcentage est nettement supérieur dans la zone caribéenne. Ces valeurs sont caractéristiques des particules majoritairement de grosse taille associée à une épaisseur optique relativement faible (en comparaison de la zone Africaine)
- La dernière gamme (**AOD > 0.2 et AE > 0.6**) comptabilise très peu de cas (un nombre négligeable) dans la Caraïbe, en particulier pour la Guadeloupe et la Barbade. Porto-Rico, qui est plus proche du continent Nord-américain et qui comptabilise plus d'habitants et une activité industrielle plus importante, enregistre une plus forte densité en particules fines provoquée sans doute par les activités anthropiques. Ces derniers sont nettement plus importants pour les deux sites Africains (Cap-Vert et surtout Dakar).

1.7. Corrélation entre PM10 et AOD dans la Caraïbe

Si les critères caractérisant la charge atmosphérique en aérosols et la taille des particules à partir des données photométriques permettent effectivement de distinguer la pollution particulaire locale de la pollution générée par les brumes sahariennes, ils ne sont malheureusement pas toujours applicables. En effet, la disponibilité des données photométriques est fortement conditionnée aux conditions d'ensoleillement et aux conditions atmosphériques. Les données PM10 sont quant à elles disponibles à tout moment (sauf incident technique) et elles sont collectées en différents points des îles de la Caraïbe. La finalité de cette analyse est d'observer la répartition des concentrations de PM10 mesurées les jours vérifiant les critères de poussières désertiques (AOD ≥ 0.2 et AE ≤ 0.6), afin d'évaluer un seuil PM10 de poussières.

Pour cela, il nous faut vérifier le degré de corrélation entre les données AOD et PM10 pour la zone caribéenne. La relation entre AOD (AERONET) et concentrations journalière de PM10 a déjà été étudiée en Europe (Pere, et al., 2009), aux Etats-Unis (Wang et al., 2003 ; Engel-Cox et al., 2004) et en Chine (Wang et al., 2011). Ces analyses ont utilisé des méthodes d'améliorations (basées sur des modèles linéaires) et ont présenté un coefficient de corrélation allant jusqu'à 0.8 [estimation des PM10 à l'aide des AOD (Pelletier et al., 2007 ; Wang et al., 2010)]. Pour toutes ces études, les difficultés proviennent des différences d'échantillonnage spatial et temporel entre AOD et PM10. De plus, l'AOD est une quantité intégrée sur la colonne

atmosphérique totale, tandis que les PM10 sont mesurés au sol. Par conséquent, la corrélation entre AOD et PM10 est influencée par la distribution verticale des aérosols et dépend fortement de la pollution locale et des conditions atmosphériques.

Nous avons appliqué le critère de qualité suivant : seules les données journalières fournissant au minimum 12 mesures d'AOD par jours ont été sélectionnées pour cette étude. Précisons que ce contrôle de qualité est appliqué uniquement pour cette partie de l'étude mettant en relation les données de PM10 et d'AOD.

Nous présentons les résultats de corrélation entre PM10 et AOD pour les sites caribéens de Porto Rico et Guadeloupe (Figure 21). La corrélation entre concentrations de poussières et AOD a déjà été réalisée pour la Barbade pour la période de Janvier 1997 à Juin 1998 (Smirnov et al., 2000).

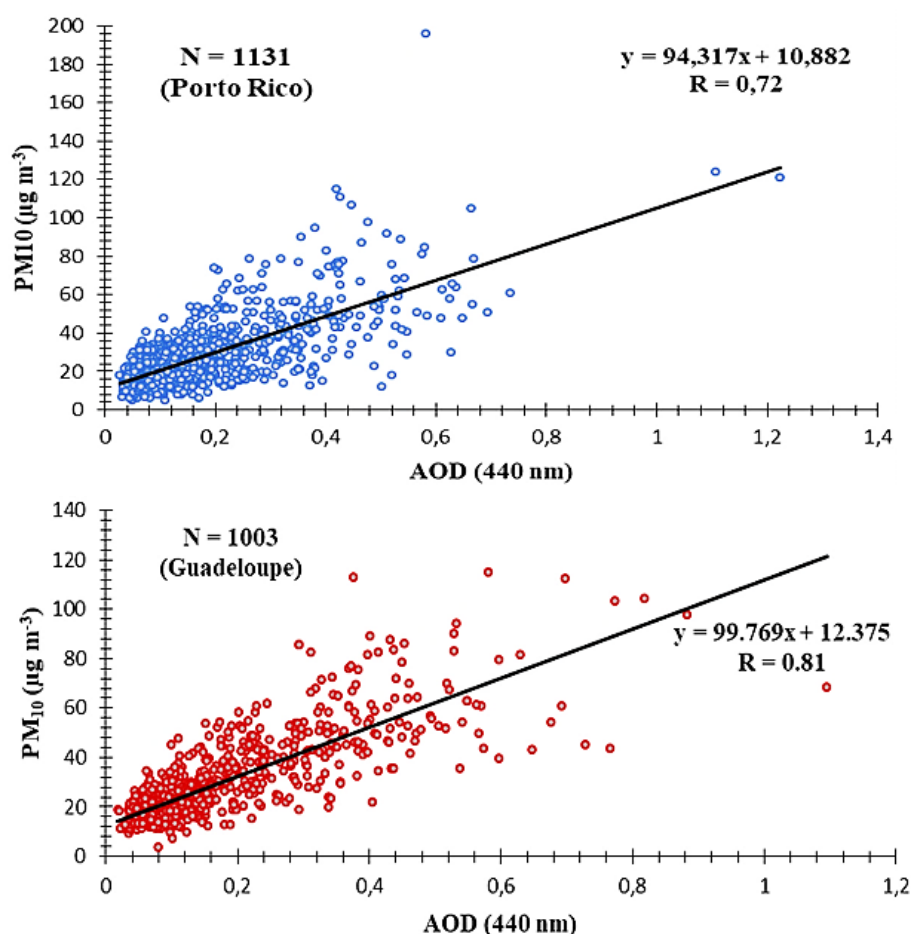


Figure 21 : Représentation graphique des PM10 en fonction des AOD (440 nm) ; données PM10 provenant des stations de mesures de Pointe-à-Pitre et Baie-Mahault (Guadeloupe) et Catano (Porto Rico) pour la période de 2006 à 2016

Les coefficients de corrélation entre AOD et PM10 sont respectivement de $R = 0.72$ et $R = 0.81$ pour Porto Rico et Guadeloupe (Figure 21). Smirnov et al. (2000) ont étudié la corrélation entre les concentrations de poussières mesurées à la Barbade (Ragged Point) et les AOD (AERONET), qui ont montré un coefficient $R \sim 0.7$ [illustration : Fig. 4 (a) dans Smirnov et al. (2000)].

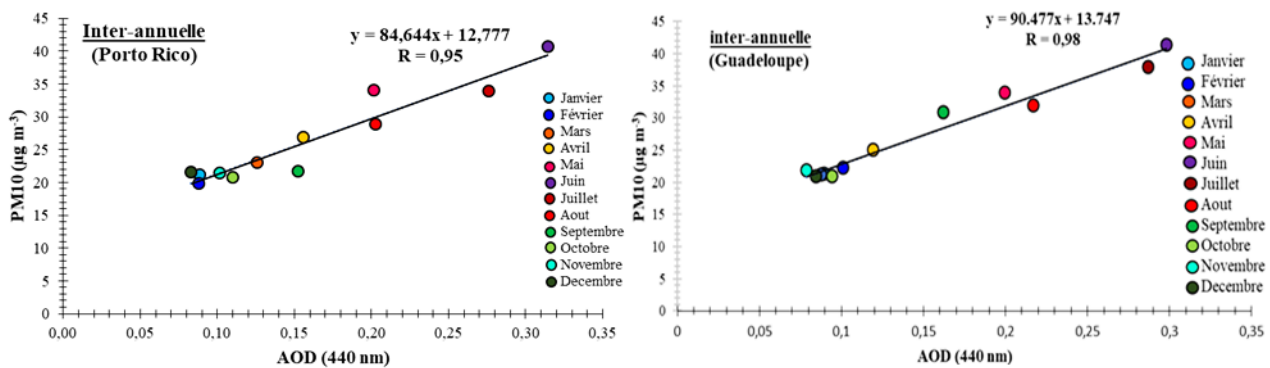


Figure 22 : Corrélation entre les moyennes de concentrations mensuelles de PM10 et les valeurs mensuelles d'AOD (440 nm) AERONET calculées à partir des données journalières remplissant les critères de sélections énoncés précédemment pour la période de 2006 à 2016

Selon la Figure 22, les coefficients de corrélation mensuelles et inter annuels (2006-2016) sont de $R = 0.95$ pour Porto Rico, et $R = 0.98$ pour la Guadeloupe [$R = 0.81$ pour la Barbade ; Fig. 4 (c) dans Smirnov et al. (2000)].

Les données journalières de PM10 étant fortement corrélées aux valeurs journalières d'AOD, nous pouvons donc déterminer un seuil de PM10 à partir des critères de poussières d'AOD et d'AE préalablement définis.

Les indices de la qualité de l'air (présentés dans le Tableau 7) stipulent que pour des concentrations PM10 inférieures à $28 \mu\text{g m}^{-3}$, la qualité de l'air est bonne à très bonne. Pour les valeurs supérieures à $35 \mu\text{g m}^{-3}$ la qualité de l'air est qualifiée de médiocre, pour aboutir à un niveau mauvais à très mauvais entre 50 à $80 \mu\text{g m}^{-3}$. L'influence de la pollution anthropique étant très réduite au niveau des îles de l'arc antillais, il est vraisemblable que le passage d'un niveau de qualité bon à un niveau médiocre soit déjà imputable au passage des brumes désertiques dans la majorité des cas. Les aérosols sahariens seraient donc présents dans l'atmosphère caribéenne pour des concentrations inférieures au seuil d'information fixé en Europe, c'est-à-dire $50 \mu\text{g m}^{-3}$ [hypothèse énoncée antérieurement par Prospero en 2015 : <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015AGUFM.A52F..01P>].

Tableau 7 : Indices de Qualité de l’Air et classification des concentrations de PM10

Indices de la qualité de l’air		Concentration moyenne Journalière de PM10 ($\mu\text{g m}^{-3}$)
Très bon	1	0 – 6
Très bon	2	7 - 13
Bon	3	14 - 20
Bon	4	20 -27
Moyen	5	28 - 34
Médiocre	6	35 - 41
Médiocre	7	42 -49
Mauvais	8	50 - 64
Mauvais	9	65 - 79
Très mauvais	10	≥ 80

1.8. Détermination du seuil journalier de présence de poussière : PM10

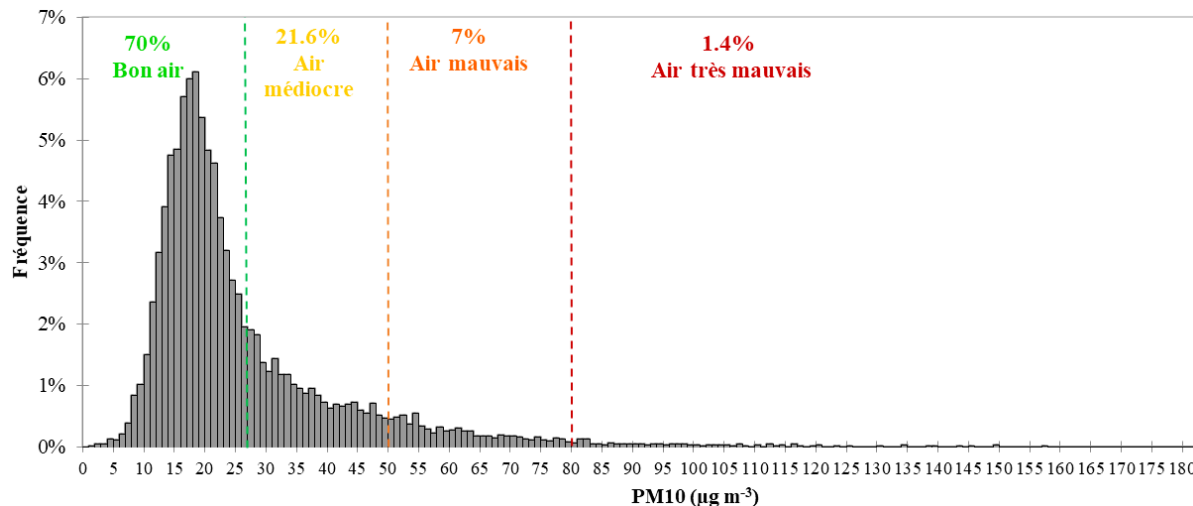


Figure 23 : Répartition en Fréquence des données de PM10 de l’ensemble des îles de la Caraïbe (2006-2016)

La Figure 23 montre la répartition en fréquence de l’ensemble des données journalières de PM10 mesurées à Porto Rico, en Guadeloupe et Martinique entre 2006 et 2016 : soit 11 119 valeurs journalières en tout. Pour la période considérée, 70% des valeurs décrivent une « bonne » à « très bonne » qualité de l’air ($0-27 \mu\text{g m}^{-3}$) ; 21.6% correspondent à une qualité de l’air « moyenne » à « médiocre » ($28-49 \mu\text{g m}^{-3}$) ; seul 7% et 1.4% des jours sont respectivement

associés à une « mauvaise » ($50-79 \mu\text{g m}^{-3}$) et à une « très mauvaise » ($\geq 80 \mu\text{g m}^{-3}$) qualité de l'air.

Sur la Figure 23, nous avons regroupé les cas « moyens » et « médiocres » dans une même catégorie « médiocre ».

La plage de concentrations attribuée à la qualité de l'air « moyenne-médiocre » ($28-49 \mu\text{g m}^{-3}$) se situe d'une part au-dessus du niveau de « l'atmosphère de fond » déduit grossièrement de l'examen des valeurs journalières de PM₁₀ (voir Figure 16), et d'autre part, en-dessous du seuil d'information à la population. En s'appuyant sur les seuils des indices de la qualité de l'air, il est très probable que les aérosols désertiques soient détectés dans la Caraïbe pour des concentrations de PM₁₀ supérieures ou égales à $28 \mu\text{g m}^{-3}$ (indice de qualité moyen).

Notre analyse ci-dessous consiste à établir un seuil de concentration PM₁₀ pour attester de la présence d'aérosols désertiques dans le contexte caribéen, en le confrontant aux seuils de poussières d'AOD et d'AE déjà validés. La contextualisation des seuils pour cette région permettra une meilleure prévention des risques sanitaires liés au passage des « brumes désertiques ». D'abord, nous proposons d'étudier la répartition en fréquence des concentrations journalières de PM₁₀ à Porto Rico et en Guadeloupe, pour les jours correspondant aux $\text{AOD} \geq 0.2$ et $\text{AE} \leq 0.6$. Nous allons tester non seulement le seuil potentiel évoqué ci-dessus de $28 \mu\text{g m}^{-3}$ qui marque la transition entre un air de bonne qualité et un air de qualité moyenne, mais aussi le seuil de $35 \mu\text{g m}^{-3}$ qui marque le passage à la qualité d'air médiocre ; puis le seuil de $50 \mu\text{g m}^{-3}$ qui annonce, une fois franchi, une qualité d'air mauvaise (alerte poussière désertique).

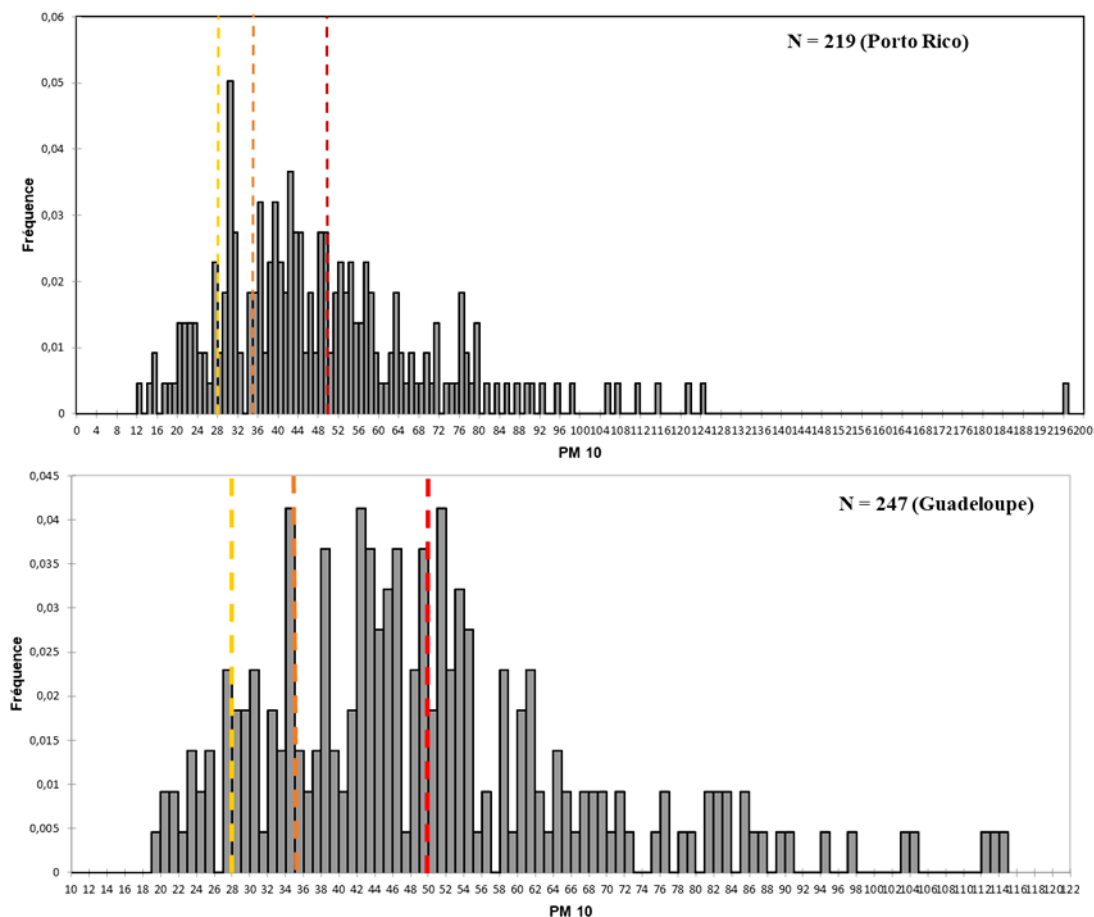


Figure 24 : Répartition en fréquence des PM10 pour les jours correspondant aux critères de poussières ($AOD \geq 0.2$ reliés aux $AE \leq 0.6$) ; Seuil des indices de qualité de l'air explicité dans le tableau 7 : « air moyen » (pointillés jaune), « air médiocre » (pointillés oranges), « air mauvais » (pointillés rouge) ; AOD journaliers (qualité 2.0) comprenant au moins 12 mesures.

La Figure 24 illustre la répartition des concentrations journalières de PM10 pour les jours respectant les critères de poussière ($AOD \geq 0.2$ et $AE \leq 0.6$) pour Porto Rico et la Guadeloupe. Ainsi, on obtient que :

- 91.3 % (86.8%) des valeurs journalières en Guadeloupe (à Porto Rico) présentent une concentration journalière **PM10 $\geq 28 \mu\text{g m}^{-3}$**
- 77.5% (73.5%) des valeurs journalières en Guadeloupe (à Porto Rico) présentent une concentration journalière **PM10 $\geq 35 \mu\text{g m}^{-3}$**
- 42.2% (39%) des valeurs journalières en Guadeloupe (à Porto Rico) présentent une concentration journalière **PM10 $\geq 50 \mu\text{g m}^{-3}$**

Cependant, une petite proportion des données (8.7% en Guadeloupe, 13.2% à Porto-Rico) demeure associée à de fortes charges atmosphériques en aérosols ($AOD \geq 0.2$), et semble indiquer la présence de grosses particules ($AE \leq 0.6$), tout en exhibant des concentrations PM10 à la surface faible ($PM10 < 28 \mu\text{g m}^{-3}$). Ces cas semblent refléter les situations où les poussières

sont restées confinées en altitude à l'intérieur de la couche d'air saharien sans avoir franchi la couche d'inversion de température très stable que l'on trouve à la base de la masse d'air sèche chargée en poussières. Cela pourrait également être lié à un décalage possible entre les mesures de PM10 et d'AOD.

Dans un deuxième temps, nous évaluons cette fois ci, les répartitions des données AE en fonction des AOD pour les jours de concentration journalière supérieure ou égale à 28, 35 et 50 $\mu\text{g m}^{-3}$ pour Porto Rico et Guadeloupe.

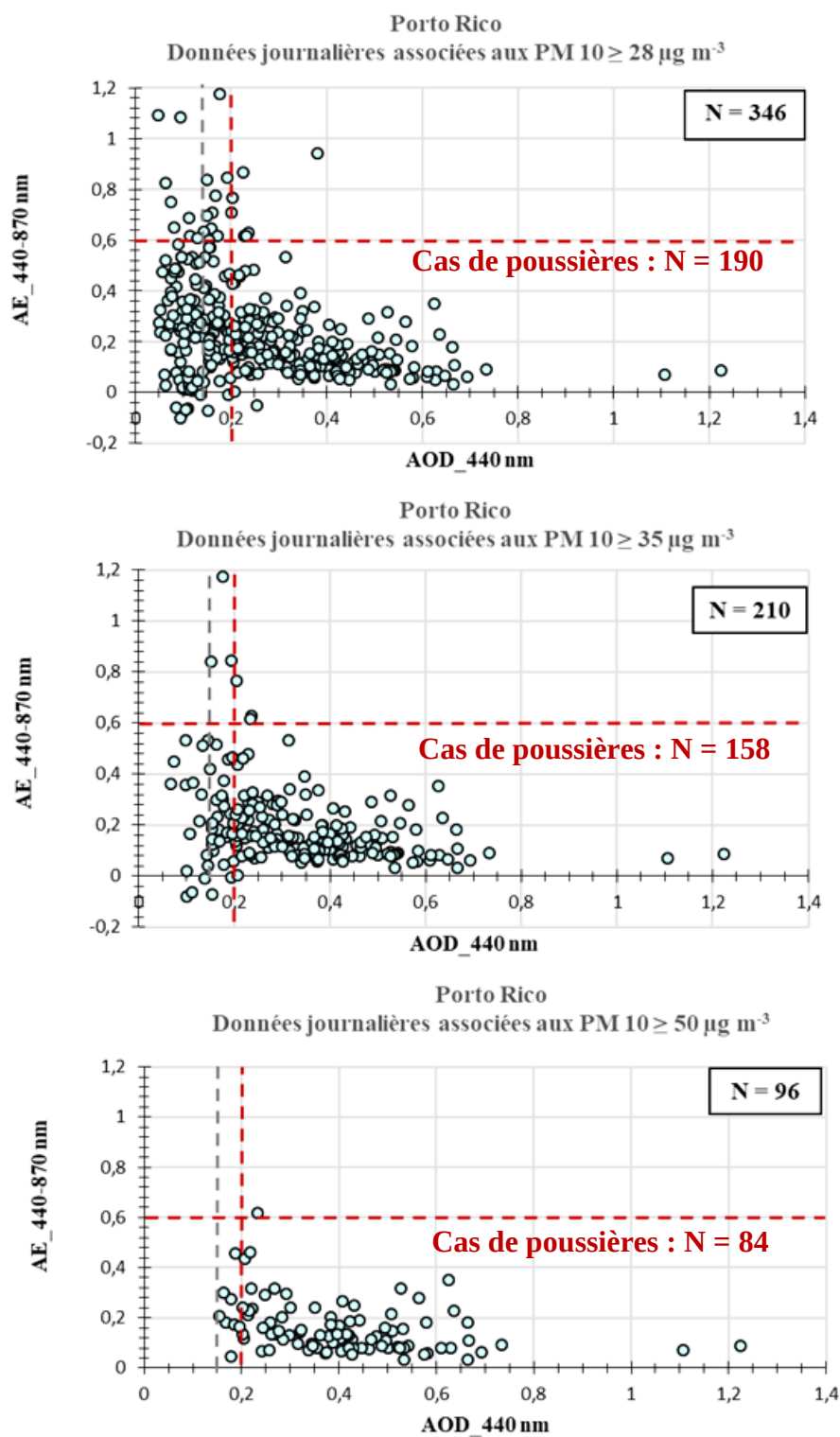


Figure 25 : Répartition des AE (440-870 nm ; qualité 2.0) en fonction des AOD (440 nm ; qualité 2.0) pour les jours de concentration journalière PM_{10} supérieure à 28, 35 et $50 \mu g m^{-3}$ à Porto Rico (2006-2016) ; critère de qualité appliqué (seules les données journalières fournissant au minimum 12 mesures d'AOD par jours ont été sélectionnées pour cette étude)

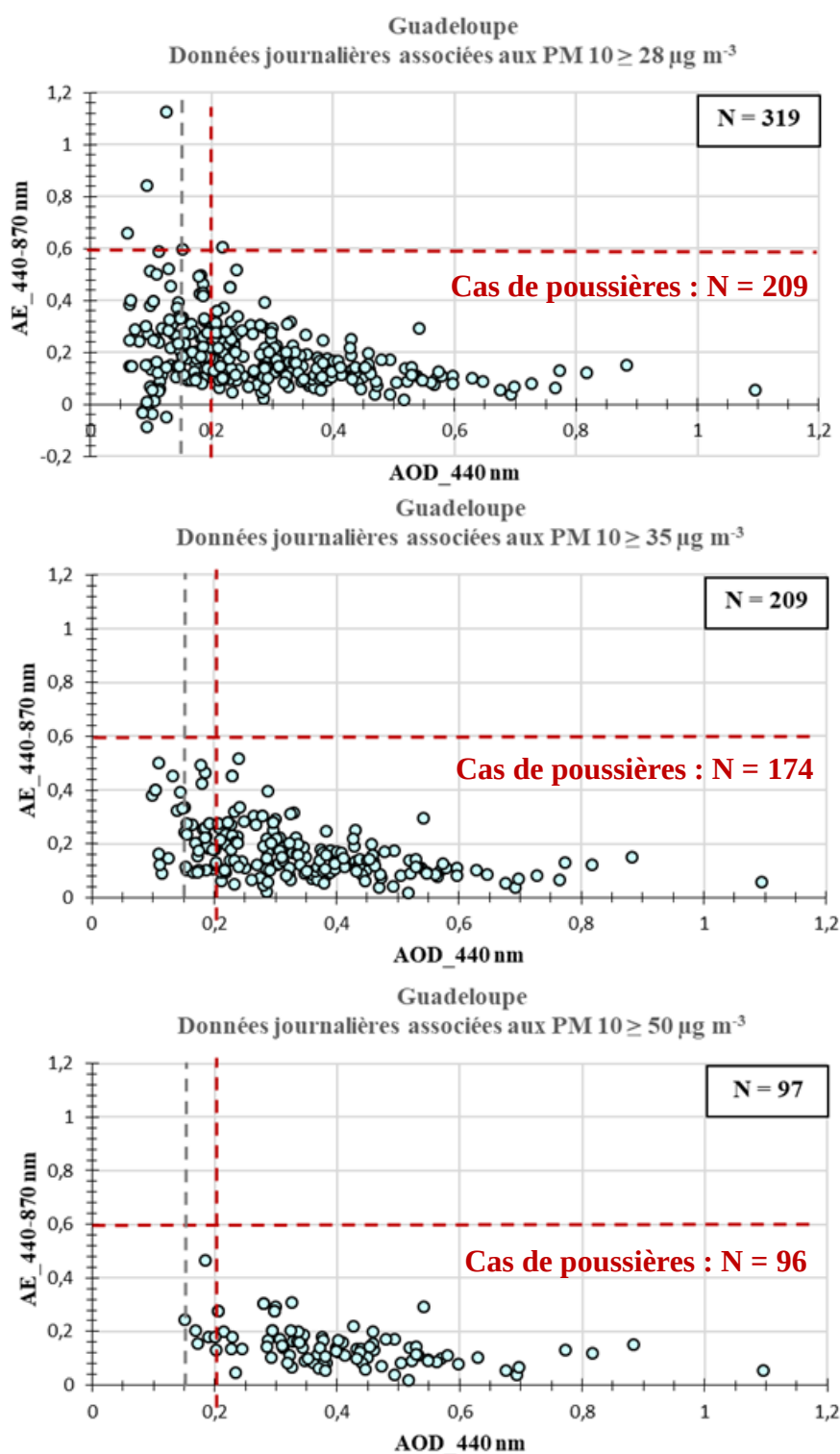


Figure 26 : Répartition des AE (440-870 nm ; qualité 2.0) en fonction des AOD (440 nm ; qualité 2.0) pour les jours de concentration journalière PM_{10} supérieure à 28, 35 et $50 \mu g m^{-3}$ en Guadeloupe (2006-2016) ; critère de qualité appliqué (seules les données journalières fournissant au minimum 12 mesures d'AOD par jours ont été sélectionnées pour cette étude)

Ainsi, pour les jours de concentration en PM10 supérieure à 28, 35 et 50 $\mu\text{g m}^{-3}$, la répartition des données d'AE en fonction des AOD indique la consistance des éventuels seuils PM10 pour la détection des poussières désertiques. On peut sortir plusieurs informations des résultats illustrés dans les Figures 25 et 26.

Tout d'abord, notre seuil semble cohérent vis-à-vis du critère lié à la taille des aérosols désertiques ($\text{AE} \leq 0.6$). En revanche, plus on diminue la valeur du seuil PM10, plus il y a de valeurs d'AOD qui se répartissent en-dessous de 0.2, c'est-à-dire dans la gamme des aérosols marins. Pour renforcer notre hypothèse, nous avons évalué les propriétés radiatives associées aux gammes d'aérosols marins ($\text{AOD} \leq 0.15$ et $\text{AE} < 2$) et de poussières désertiques ($\text{AOD} \geq 0.2$; $\text{AE} \leq 0.6$). Les résultats sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Valeurs de références attribuées aux aérosols désertiques, marins (Dubovik and King, 2000 ; Dubovik et al., 2002 ; Toledano et al., 2007)

Type d'aérosols	SSA $\lambda \sim 440 \text{ nm}$	Indice de Réfraction Partie réelle $n(\lambda)$ $\lambda \sim 440 \text{ nm}$	Indice de réfraction Partie imaginaire $k(\lambda)$ $\lambda \sim 440 \text{ nm}$
Aérosols marins	$\geq 0.97 \pm 0.05-0.07$	≈ 1.36	≈ 0.0015 (forte incertitude)
Littérature			
Guadeloupe $\text{AOD} \leq 0.15$	0.97 ± 0.03	1.41 ± 0.03	0.001 ± 0.002
Porto Rico $\text{AOD} \leq 0.15$	0.95 ± 0.03	1.44 ± 0.04	0.002 ± 0.002
Poussières désertiques	$0.92-0.93 \pm 0.05-0.07$	$\approx 1.53 \pm 0.05$	≈ 0.003 (forte incertitude)
Littérature			
Guadeloupe $\text{AOD} \geq 0.2$; $\text{AE} \leq 0.6$	0.95 ± 0.02	1.46 ± 0.04	0.003 ± 0.001
Porto Rico $\text{AOD} \geq 0.2$; $\text{AE} \leq 0.6$	0.94 ± 0.04	1.46 ± 0.06	0.003 ± 0.002

Soulignons que l'incertitude sur les valeurs d'albédo de simple diffusion (SSA) fournit par AERONET est de l'ordre de 0.05-0.07 (pour de faibles valeurs d'AOD). En tenant compte des écarts types, les résultats sur l'albédo et les indices de réfraction complexes évalués pour la Guadeloupe et Porto Rico concordent avec les valeurs rapportées dans la littérature, concernant les aérosols marins et désertiques (Dubovik et al., 2001 ; Takemura et al., 2002).

Ainsi, nous pouvons commenter plus aisément la répartition des valeurs AE en fonction des valeurs AOD pour les 3 seuils de PM10 reliés aux indices de qualité de l'air moyen, médiocre et mauvais (Figures 25 et 26). Les graphiques de la Guadeloupe et de Porto Rico montrent qu'au fur et à mesure que le seuil PM10 augmente, le nombre de cas potentiellement attribués aux sels marins est réduit ($AOD \leq 0.15$). Néanmoins, les valeurs de la gamme liée aux poussières désertiques diminuent également considérablement. De ce fait, il convient d'établir un compromis et de déterminer un seuil de poussières prenant en compte le maximum d'évènements de brumes désertiques, tout en limitant le nombre de cas assimilés aux aérosols marins. Il apparaît que ces derniers impactent les mesures de poussières à la surface, sans qu'il soit possible de distinguer leur contribution de celle des aérosols terrigènes. A première vue, le seuil de $35 \mu\text{g m}^{-3}$ semble concilier ces deux aspects.

Nous proposons donc à l'issue de cette analyse, d'adopter un seuil de concentration journalier PM10, permettant de détecter la présence des aérosols désertiques pour la Caraïbe : il correspond à **$35 \mu\text{g m}^{-3}$** . Ce qui n'exclut pas la possibilité que de faibles évènements poussiéreux puissent se produire en-dessous de ce seuil, mais on ne pourrait les distinguer valablement des montées en charge de poussières dû à l'apport des embruns marins très présents dans ce contexte insulaire caribéen. De même, en prenant le seuil de **$35 \mu\text{g m}^{-3}$** , on peut envisager que certaines des données présentant des valeurs PM10 égales ou supérieures à ce seuil soient liées à un pic de pollution d'origine anthropique ou encore à la contribution d'aérosols marins, mais la probabilité de tels scénarios est réduite par rapport au seuil $28 \mu\text{g m}^{-3}$, tout en conservant un échantillon statistique suffisamment étoffé.

CHAPITRE 2 : CLIMATOLOGIE DES EVENEMENTS DE BRUMES DESERTIQUES DANS LA CARAIBE

Le deuxième chapitre des « résultats et discussions » la thèse est consacré aux aspects climatologiques des évènements de poussières référencés au-dessus du seuil de $PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$ caractérisant la présence de poussières dans les îles de l'arc antillais. Un évènement de « brumes désertiques » durent généralement plusieurs jours. Dans le contexte de cette étude, nous nous sommes intéressés à la climatologie de la répartition des jours de poussières et non pas à celle des évènements de poussières, plus difficiles à délimiter dans le temps, surtout lorsque deux évènements s'enchaînent dans un délai réduit. Dans ce qui suit, les expressions « évènement ou épisode de poussière » correspondent donc à un jour où la présence de poussière est établie. Nous allons d'abord présenter la saisonnalité des évènements poussiéreux en abordant leur intensité lors de leur passage au-dessus de l'arc antillais. Ensuite, nous étudierons la climatologie du parcours des amas de poussières désertiques au-dessus de l'Océan Atlantique vers la zone caribéenne. Nous terminerons enfin par l'examen de la variabilité interannuelle des évènements de brumes désertiques à partir d'une décennie de données, afin de dégager une tendance climatique sur un plus long terme.

2.1. Aspect saisonnier des évènements de poussière dans la Caraïbe

Nous avons calculé le nombre moyen mensuel d'évènements observés sur la période allant de 2006 à 2016. Cette analyse concerne toutes les îles pourvues de mesures quotidiennes de PM_{10} (Porto Rico, Guadeloupe et Martinique).

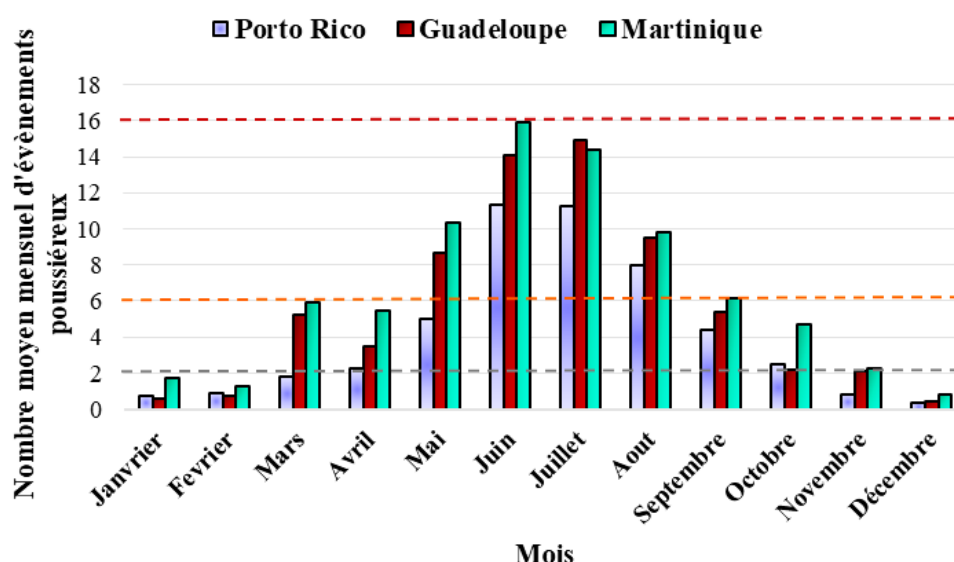


Figure 27 : Nombre moyen mensuel d'évènements poussiéreux (PM_{10} journalier $\geq 35 \mu\text{g m}^{-3}$) pour Porto Rico, la Guadeloupe et la Martinique (2006-2016) ; les lignes grise, orange et rouge montrent la limite haute du nombre d'évènements poussiéreux associé à la faible, intermédiaire et haute saison de poussières respectivement.

La Figure 27 présente le nombre moyen d'épisodes poussiéreux se produisant chaque mois dans les îles étudiées. On s'aperçoit que les événements de brumes désertiques ont un comportement saisonnier. Néanmoins, il apparaît clairement que le transport des poussières est un phénomène relativement continu tout au long de l'année. Ce constat avait déjà été fait par Schutz en 1980 (Schutz, 1980). Les îles caribéennes de notre étude montrent, dans l'ensemble des variations moyennes mensuelles similaires. En se basant sur les fluctuations du nombre mensuel de jours poussiéreux, nous avons défini 3 saisons-types de poussières pour la Caraïbe :

- Une basse saison (Novembre, Décembre, Janvier et Février) : période où les épisodes de poussières restent exceptionnels, soit entre 0-2 événements poussiéreux mensuels.
- Deux saisons intermédiaires (Mars-Avril, Septembre-Octobre) : ces deux périodes transitoires présentent généralement entre 2 et 6 jours poussiéreux par mois.
- Une haute saison (Mai à Août) : durant cette période, les événements de poussière sont fréquents. Au cours des mois de Juin et Juillet, il se produit environs 14-16 épisodes journaliers poussiéreux en Guadeloupe et Martinique et 11 épisodes à Porto Rico.

On remarque qu'à Porto Rico le nombre de jour poussiéreux est inférieur aux nombres obtenus pour les deux autres îles (Guadeloupe et Martinique) pour tous les mois. Même si les valeurs mensuelles de la Guadeloupe et de la Martinique restent proches, c'est cette dernière qui présente le maximum de cas de poussières pendant toute l'année.

2.2. Variations saisonnières du niveau de pollution de l'atmosphère de fond

Après avoir déterminé la fréquence moyenne mensuelle des événements poussiéreux, et établi les différentes saisons de poussière dans la zone Caraïbe, nous mettons en évidence l'impact des épisodes poussiéreux sur les profils horaires moyens mensuels.

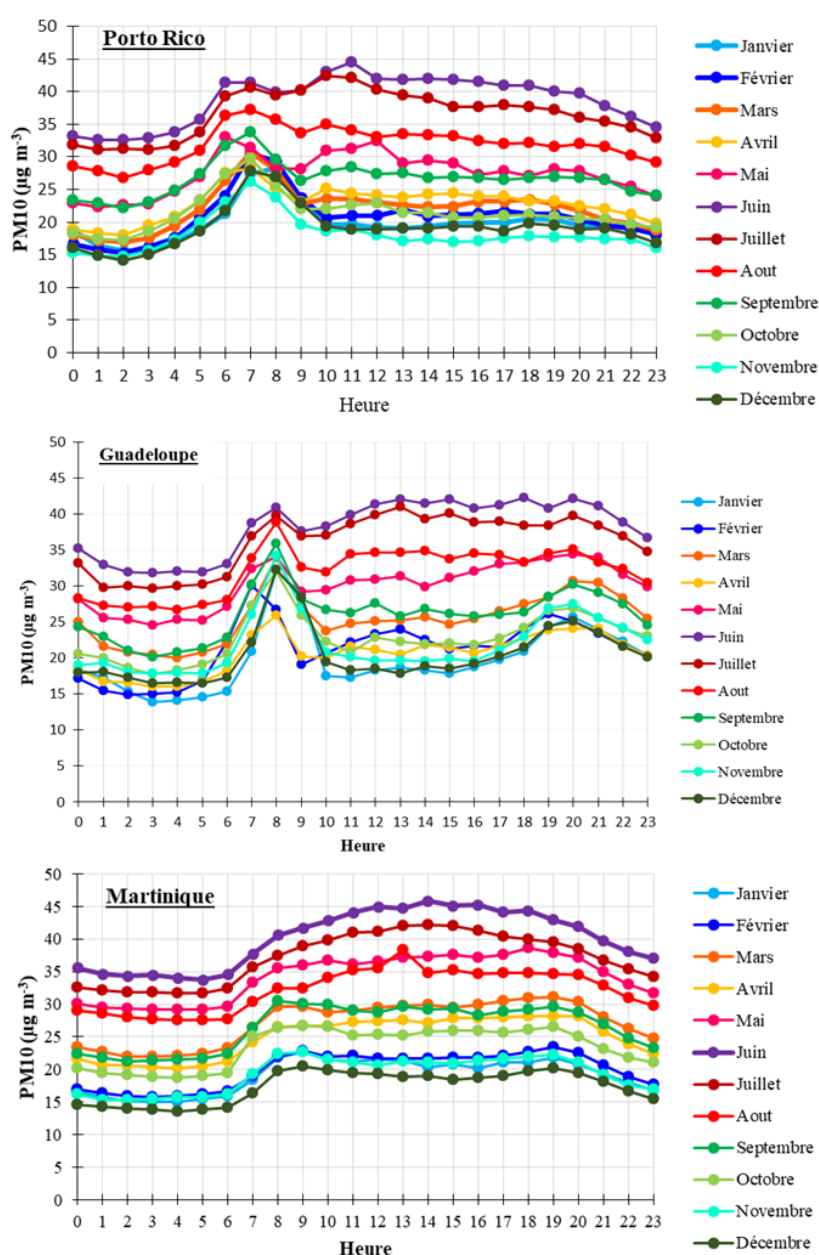


Figure 28 : Profils horaires moyens mensuels entre 2006 et 2016 pour les sites de Porto Rico (Catano), Guadeloupe (Point-à-Pitre et Baie-Mahault) et Martinique (Schoelcher)

La Figure 28 présente l'évolution mensuelle des profils de concentrations horaires de PM10 pour Porto Rico, Guadeloupe et Martinique. Globalement, on constate que pour la période de Novembre, Décembre, Janvier et Février (basse saison des poussières), les concentrations horaires sont minimales (entre ~ 15 et $25 \mu\text{g m}^{-3}$). Les mois de Mars, Avril, Septembre et Octobre présentent des niveaux intermédiaires de concentrations horaires (entre ~ 20 et $35 \mu\text{g m}^{-3}$). Pour finir, Mai, Juin (valeurs maximales pour les 3 sites), Juillet et Août apparaissent clairement au-dessus des autres mois (entre ~ 30 et $45 \mu\text{g m}^{-3}$). Cette période coïncide avec la haute saison des poussières désertiques pour la Caraïbe.

Ces profils mensuels horaires décrivent les effets de la pollution anthropique locale et ceux de la pollution naturelle de grande échelle. L'influence de la haute saison des poussières désertiques se traduit par l'augmentation de l'ensemble des concentrations horaires. Les pics horaires dus à l'augmentation du trafic aux heures de pointe sont visibles à toutes les saisons ; mais en haute saison, ils sont atténués et moins visibles sur des courbes plus aplaties. Ainsi, le passage répété des masses d'air poussiéreuses entre Mai et Août a pour effet d'élever le niveau de « l'atmosphère de fond » dans l'ensemble de la zone caribéenne.

Des observations similaires présentées par Karaca et al. (2009), illustrent l'augmentation saisonnière en Turquie des profils horaires mensuels due aux poussières minérales transportées par des masses d'air provenant des pays du Nord de la Méditerranée et des pays arabes au Printemps [profils horaires mensuels de 10 stations de mesures situées à Istanbul présentés par Karaca et al. (2009)].

2.3. Variations mensuelles des concentrations en PM10

Les concentrations mensuelles en PM10 exposent également la saisonnalité des épisodes de « brumes désertiques » affectant les Petites Antilles.

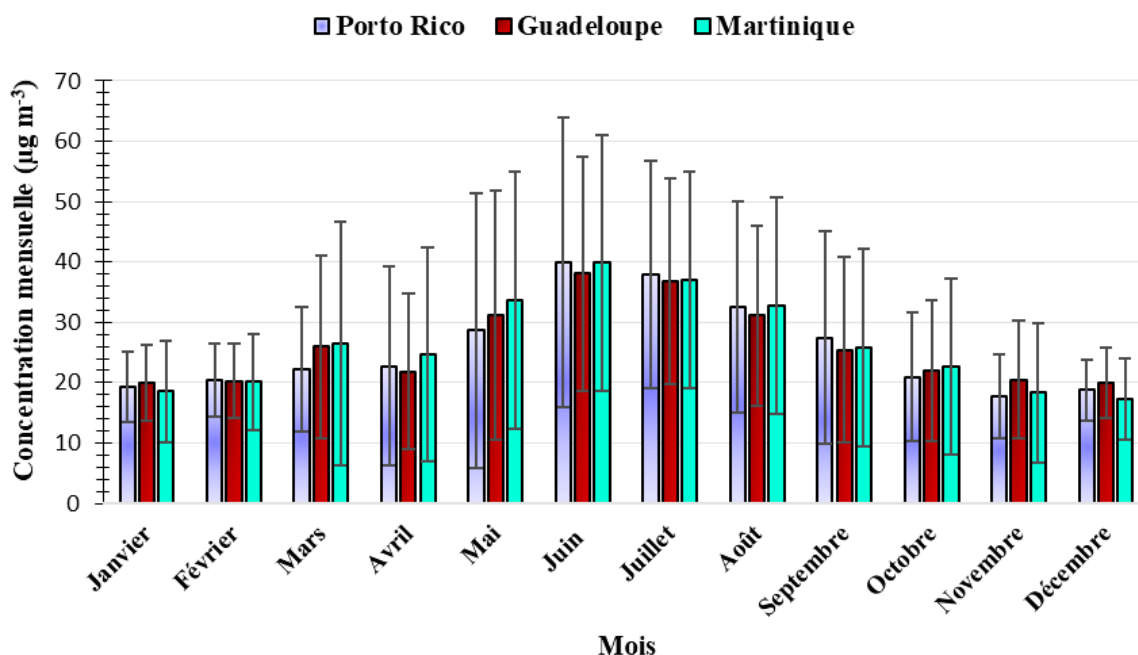


Figure 29 : Evolution mensuelle des concentrations de PM10 (Porto Rico, Guadeloupe, Martinique) pour la période de 2006 à 2016

La Figure 29 illustre l'impact des épisodes de « brumes désertiques » sur l'ensemble de l'arc au cours des mois. Comme l'ont montré précédemment les profils horaires mensuels (Figure 28), les mois de Janvier, Février, Novembre et Décembre (basse saison des poussières) présentent les plus faibles concentrations moyennes mensuelles en PM10, inférieures ou égales à $\sim 20 \pm 7.2 \mu\text{g m}^{-3}$ [niveau de « l'atmosphère de fond »]. Pour la haute saison des poussières (Mai à Août), on remarque une augmentation significative des concentrations mensuelles, comprises entre ~ 30 et $40 \pm 19.4 \mu\text{g m}^{-3}$. Les mois de Juin et Juillet présentent des concentrations moyennes mensuelles maximales pour les trois sites. Puis les saisons intermédiaires, Mars et Avril (concentrations mensuelles comprises entre ~ 20 et $30 \pm 17.9 \mu\text{g m}^{-3}$), ainsi que Septembre et Octobre (concentrations mensuelles inférieures à $\sim 23 \pm 15.4 \mu\text{g m}^{-3}$), apparaissent comme étant des périodes de transition séparant la haute saison de la basse saison.

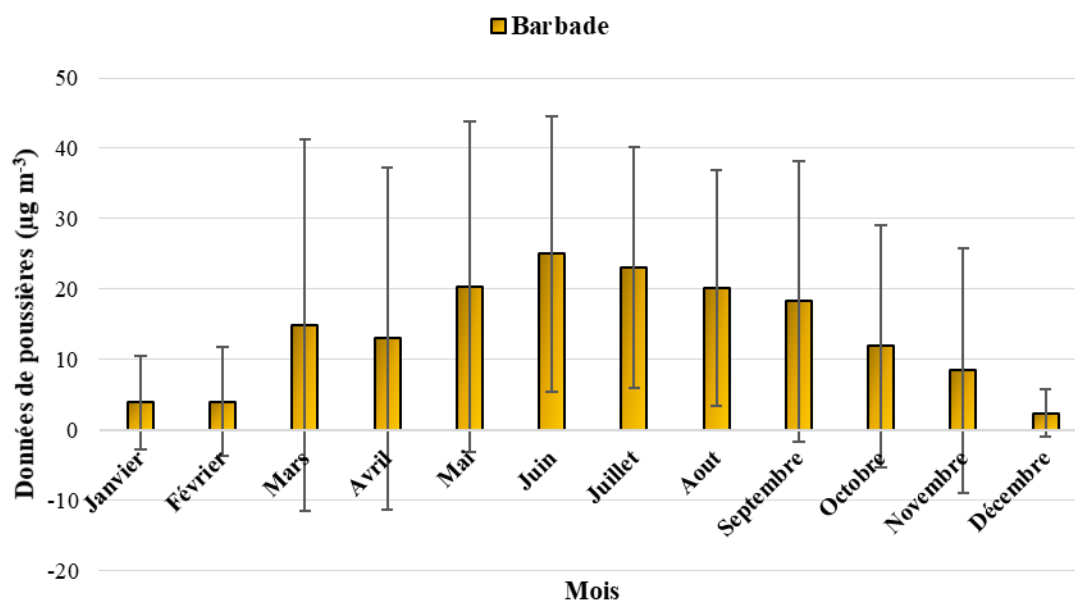


Figure 30 : Moyen de concentration de poussières mensuelles prélevées à la Barbade (2002-2010)

Les concentrations mensuelles de poussières de la Barbade présentent des fluctuations mensuelles analogues aux comportements des mesures de PM₁₀ issues des autres stations de la Caraïbe (Figure 30). La période de Novembre à Février présente des concentrations inférieures à $10 \pm 8.8 \mu\text{g m}^{-3}$; les valeurs de Mars et Avril sont respectivement de $\sim 13 \pm 26.4 \mu\text{g m}^{-3}$ et $\sim 15 \pm 24.3 \mu\text{g m}^{-3}$. Pour Septembre et Octobre, les valeurs mensuelles sont de $\sim 18 \pm 20 \mu\text{g m}^{-3}$ et $\sim 12 \pm 17 \mu\text{g m}^{-3}$; de Mai à Août, elles sont supérieures à $20 \pm 19.2 \mu\text{g m}^{-3}$.

Cette analyse met en évidence le comportement saisonnier préétabli plus haut, par les concentrations mensuelles des PM₁₀ dans la Caraïbe (Figure 29). Toutefois, il ressort que les saisons intermédiaires soient caractérisées par une importante variabilité annuelle entre 2002 et 2010 (se référer à la Figure 31).

Variabilité annuelle des concentrations de poussières mensuelles de Barbade (2002-2010)

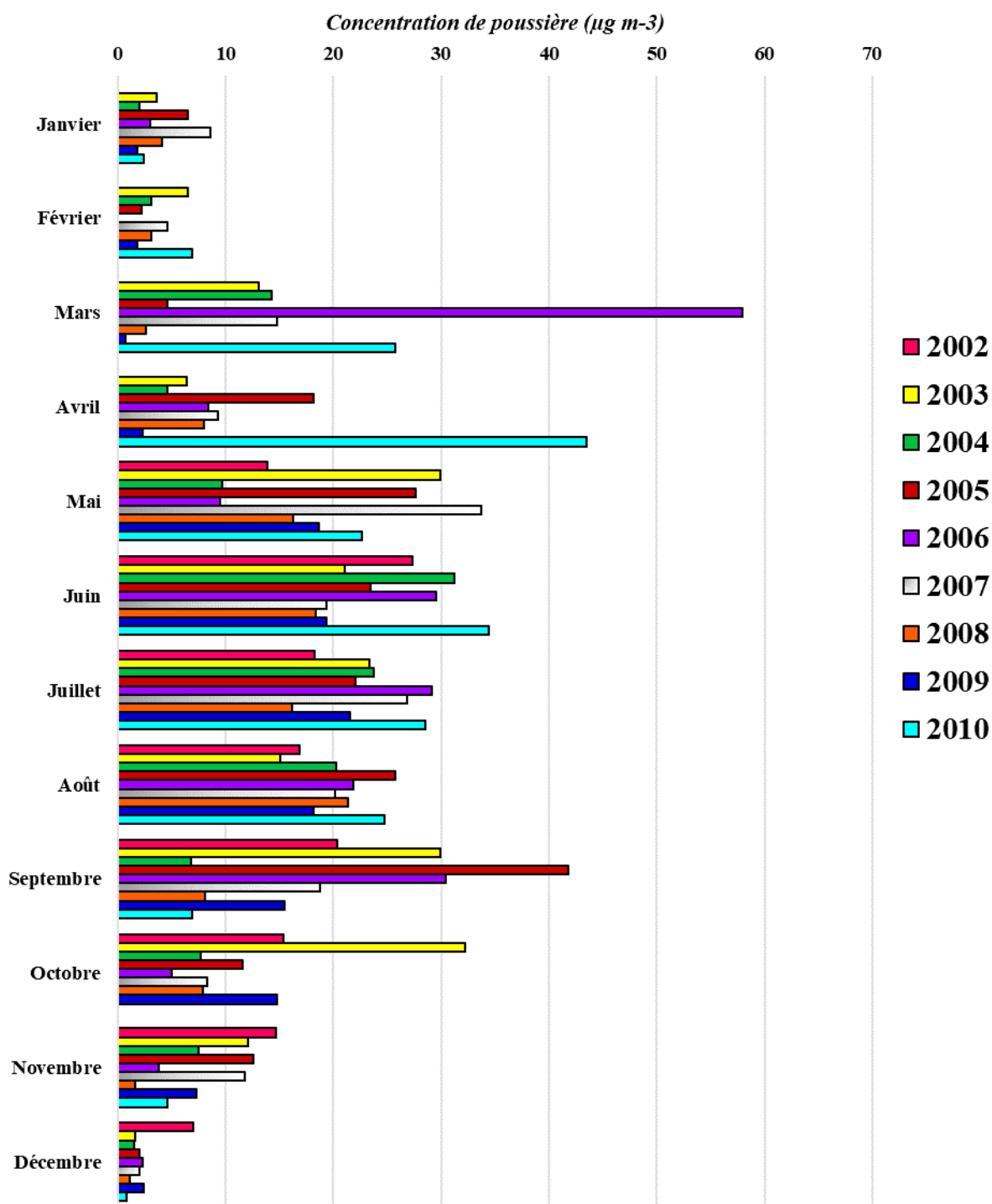


Figure 31 : Moyennes mensuelles représentées par années de 2002-2010. Les moyennes mensuels comprennent au minimum 14 valeurs journalières. Les valeurs manquantes sont les suivantes : Janvier à Avril 2002 ; Février 2006 et Octobre 2010.

2.4. Variations mensuelles des AOD sur les côtes atlantiques de l'Afrique de l'Ouest et dans la Caraïbe

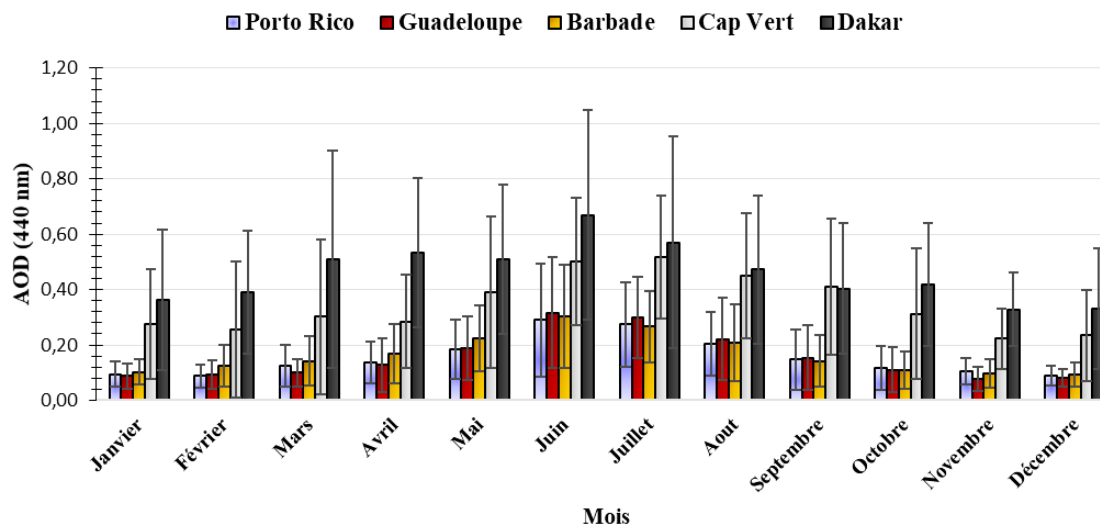


Figure 32 : Variations mensuelles des AOD de la zone Africaine et caribéenne pour la période 2006-2016

La Figure 32 compare le comportement mensuel des AOD entre la zone caribéenne et les côtes Africaines. L'allure générale des courbes est la même pour les deux zones et analogue au comportement des concentrations mensuelles des PM₁₀ vues précédemment (Figure 29). Comme attendu, les valeurs de Dakar (du Cap Vert) sont ~3 fois (~2 fois) plus élevées que celles de la Caraïbe.

Les moyennes mensuelles de Dakar sont généralement supérieures aux mesures du Cap Vert, excepté en Septembre. Les valeurs maximales en moyennes mensuelles de 0.67 et 0.52 sont respectivement atteintes en Juin à Dakar, et en Juillet au Cap Vert. Les mois de Novembre, Décembre, Janvier et Février présentent les moyennes les plus faibles, soit 0.35 en moyenne à Dakar ; et 0.25 en moyenne au Cap Vert. Le caractère saisonnier des valeurs d'AOD mensuelles est plus marqué au Cap Vert, qu'à Dakar où les moyennes mensuelles sont relativement élevées toutes l'année.

Pour la Caraïbe, le graphique montre une augmentation progressive des valeurs mensuelles d'AOD à partir du mois de Mars jusqu'en Juillet. A partir du mois d'Août, elles diminuent significativement. Une fois de plus, on distingue 3 périodes : (1) basse saison des poussières (Novembre, Décembre, Janvier et Février), (2) périodes de transition (Mars-Avril, Septembre-Octobre) ; (3) haute saison des poussières (Mai à Août). Soulignons que les valeurs d'AOD des

mois de Février, Mars, Avril et Mai diffèrent selon la position de l'île sur l'arc. Des études récentes sur la circulation atmosphérique, ainsi que sur les événements de « brumes désertiques » se produisant au Printemps, met en relief des processus de transport particuliers que nous développerons à la fin de ce chapitre (Jury, 2017). Il apparaît que la Barbade, située plus au Sud de l'arc, soit plus régulièrement impactée par ces types de transport durant les mois de Février à Avril, saison des poussières affectant le Sud de L'Amérique du Sud, Amazonie (Prospero et al., 2014). Ainsi, les valeurs moyennes mensuelles de Décembre à Mai sont légèrement supérieures à celles des autres îles. Lorsque les conditions atmosphériques de circulation au-dessus de l'Atlantique le permettent, ces événements affectent aussi ponctuellement la Guadeloupe et Porto Rico au mois de Mars (Figure 33).



Figure 33 : Parcours saisonnier des masses d'air poussiéreuses au-dessus de l'Atlantique, atteignant les îles de l'arc Antillais

De Juin à Août, c'est la Guadeloupe qui détient les valeurs maximales. Ceci s'explique par sa position au centre de l'arc en face de Dakar, qui est la principale zone de départ des panaches de poussières à cette époque de l'année (Gläser et al., 2015). Ainsi, les panaches de poussières sont directement transportés vers le centre de l'arc des Petites Antilles.

2.5. Variations mensuelles du coefficient d'Angstrom (AE) sur les côtes atlantiques de l'Afrique de l'Ouest et dans la Caraïbe

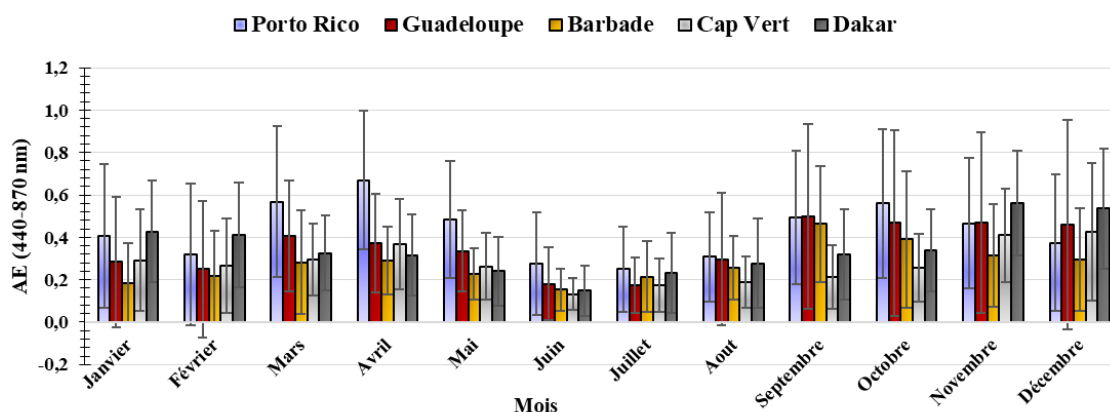


Figure 34 : Variation mensuelle des AE (440-870 nm) pour les sites de l'Afrique (Dakar et Cap Vert) et de la Caraïbe (Porto Rico, Guadeloupe et Barbade)

La Figure 34 montre par les valeurs d'AE, que la taille moyenne des particules varie au cours de l'année et quelle que soit la zone. Les moyennes mensuelles du coefficient d'Angstrom (AE) décrivent la variation saisonnière de la taille des aérosols, et permettent de confirmer la présence des particules désertiques. On observe un comportement similaire pour toutes les stations d'Afrique et de la Caraïbe.

A Dakar, les moyennes mensuelles d'AE diminuent de Décembre (0.54 ± 0.28) à Juin (minimum : 0.15 ± 0.12). Puis elles augmentent de Juillet (0.23 ± 0.19) à Novembre (maximum : 0.56 ± 0.25).

Les trois sites de la Caraïbe présentent généralement le même comportement. Durant la période des poussières (Mai à Août) les valeurs d'AE mensuels sont minimales (inférieures à 0.2 ± 0.1 en Juin).

En dehors de la saison des poussières, on constate une augmentation générale des valeurs mensuelles. Les valeurs d'AE sont supérieures pour les mois de Septembre à Novembre, c'est probablement lié à la présence de brulis (fine particules) en provenance d'Amérique du Sud et de l'Afrique du Sud (Figure 35). Ces aérosols peuvent ainsi remonter l'équateur grâce au flux de moussons générés à la période d'Eté. De Mars à Mai, Porto Rico semble être affecté par des poussières fines.

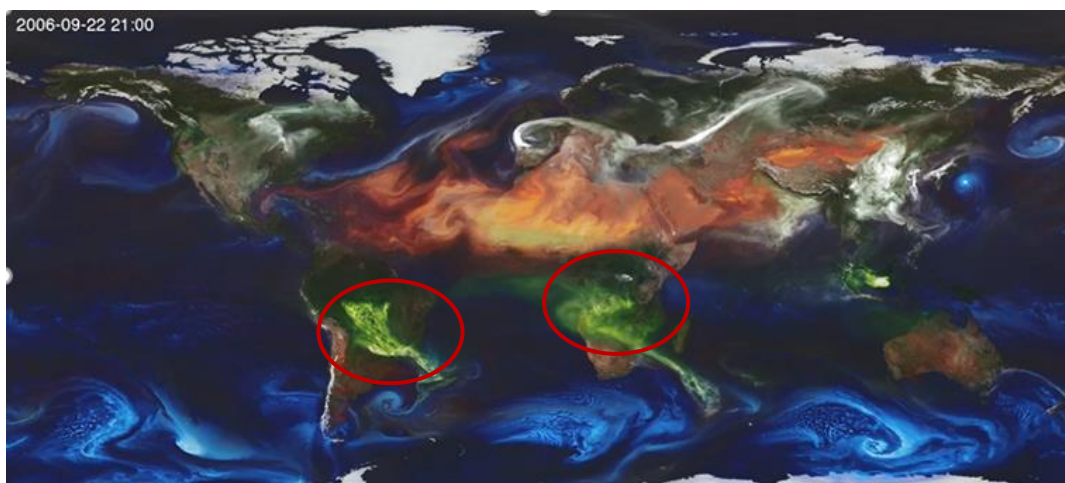


Figure 35 : Illustration par image satellite de l'épaisseur optique en aérosols : brulis représentés par les aérosols organiques (vert), aérosols désertiques (rouge-orange) et sel marin (bleu) [simulation de transport d'aérosol avec GEOS-5 par William Putman and Arlindo da Silva (Février 2013) ; https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/aerosol/modeling/nr1_movie/]

Maintenant que le comportement saisonnier du phénomène de brumes désertiques a été mis en évidence par l'ensemble des données dont nous disposons (PM10, AOD, AE), nous proposons d'analyser la climatologie de l'intensité des événements mensuels définie par les niveaux de concentrations de PM10, pour les trois îles de notre étude.

2.6. Climatologie de l'intensité des épisodes poussiéreux

Compte tenu du seuil défini précédemment pour caractériser les journées de poussières désertiques, nous proposons d'analyser l'intensité de ces événements au cours des mois (2006-2016). En effet, l'intensité du phénomène joue un rôle important sur la qualité de l'air, et donc sur la santé. Une récente Evaluation d'Impact Sanitaire (EIS) à laquelle nous avons participé en proposant aux auteurs le seuil journalier de concentration en $PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$, a évalué les effets des « brumes désertiques » sur la rhinite allergique de l'adulte et de l'enfant de plus de 12 ans au service de L'Oto-Rhino Laryngologie (ORL) du Centre Hospitalier Universitaire de Pointe-à-Pitre (Guadeloupe). Cette étude a montré que l'impact des poussières était mesurable sur la population dès $35 \mu g m^{-3}$, notamment avec une augmentation des admissions hospitalière pour causes de conjonctivites allergiques [résultats consultables dans la thèse de Céline Virnot parue en Novembre 2017].

Les effets des épisodes de poussières sur la population sont proportionnels aux intensités des événements. Nous avons donc classifié les jours poussiéreux selon trois intensités définies par les concentrations journalières de PM10 en accord avec les normes de qualité de l'air :

- Évènements faibles ($50 \mu\text{g m}^{-3} > \text{PM}_{10} \geq 35 \mu\text{g m}^{-3}$)
- Évènements moyens ($80 \mu\text{g m}^{-3} > \text{PM}_{10} \geq 50 \mu\text{g m}^{-3}$) : spot d'alerte « brumes de poussière désertique »
- Évènements forts ($\text{PM}_{10} \geq 80 \mu\text{g m}^{-3}$) : seuil d'alerte (impacte la santé des populations)

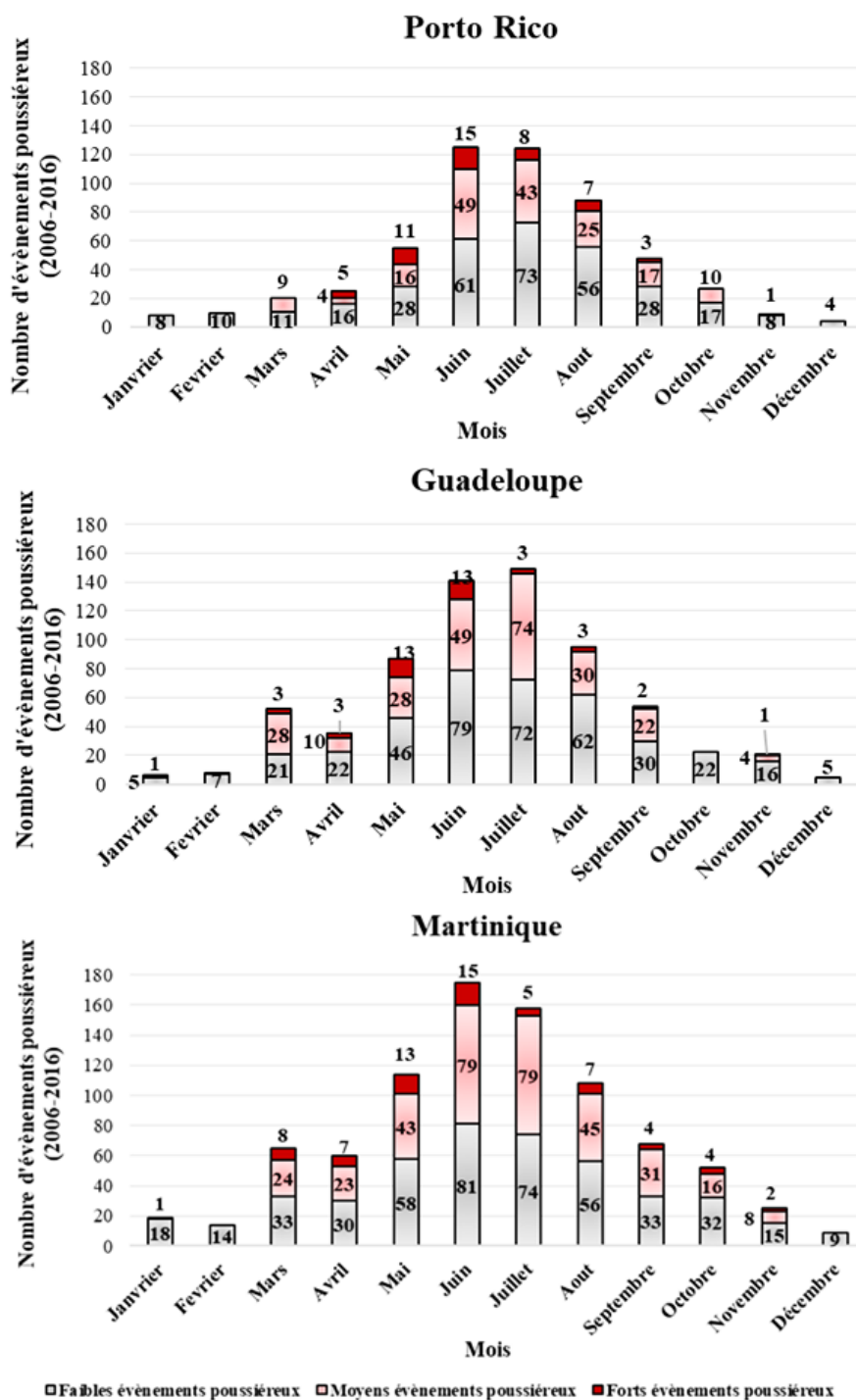


Figure 36 : Classification du nombre d'évènements poussiéreux en fonction de leur intensité : Évènements faibles ($50 \mu\text{g m}^{-3} > \text{PM}_{10} \geq 35 \mu\text{g m}^{-3}$), évènements moyens ($80 \mu\text{g m}^{-3} > \text{PM}_{10} \geq 50 \mu\text{g m}^{-3}$), évènements forts ($\text{PM}_{10} \geq 80 \mu\text{g m}^{-3}$) [2006-2016]

On constate que plus les îles sont éloignées des côtes Africaines, et plus le nombre de moyens et forts évènements poussiéreux décroît (Figure 36). Cette décroissance est également observée pour les faibles évènements poussiéreux. Soulignons que ces derniers sont comptabilisés entre 2006 et 2016. La disponibilité moindre des données en Guadeloupe rend difficile la comparaison entre les îles. Néanmoins, compte tenu de la faible distance qui sépare la Guadeloupe et la Martinique (~189 km), on peut considérer que ces deux îles voisines sont soumises à un régime d'intensité d'évènements poussiéreux similaire. Mis à part le cas de la Guadeloupe, on remarque que la différence entre Porto Rico et la Martinique n'est pas très marquée sur les évènements faibles ou forts ; elle l'est surtout sur les évènements moyens qui sont presque deux fois plus fréquents en Martinique qu'à Porto Rico. Par ailleurs, on peut voir que la quasi-totalité des évènements survenant en basse saison, dans les trois îles, sont des évènements faibles.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous orientons notre étude vers les fluctuations annuelles des valeurs moyennes de PM10 afin d'analyser l'évolution des évènements de « brumes désertiques » au cours de la dernière décennie. Nous commençons par situer les épisodes poussiéreux annuels de la Caraïbe par rapport aux normes Européennes établies pour la protection de la santé.

2.7. Variations annuelles des concentrations en PM10 et normes Européennes

Nous avons examiné les concentrations annuelles en PM10 vis-à-vis des normes et recommandations de l'OMS pour la protection de la santé. Cette analyse ne concerne pas la Barbade, puisque ces normes s'appliquent uniquement aux valeurs de concentrations en PM10.

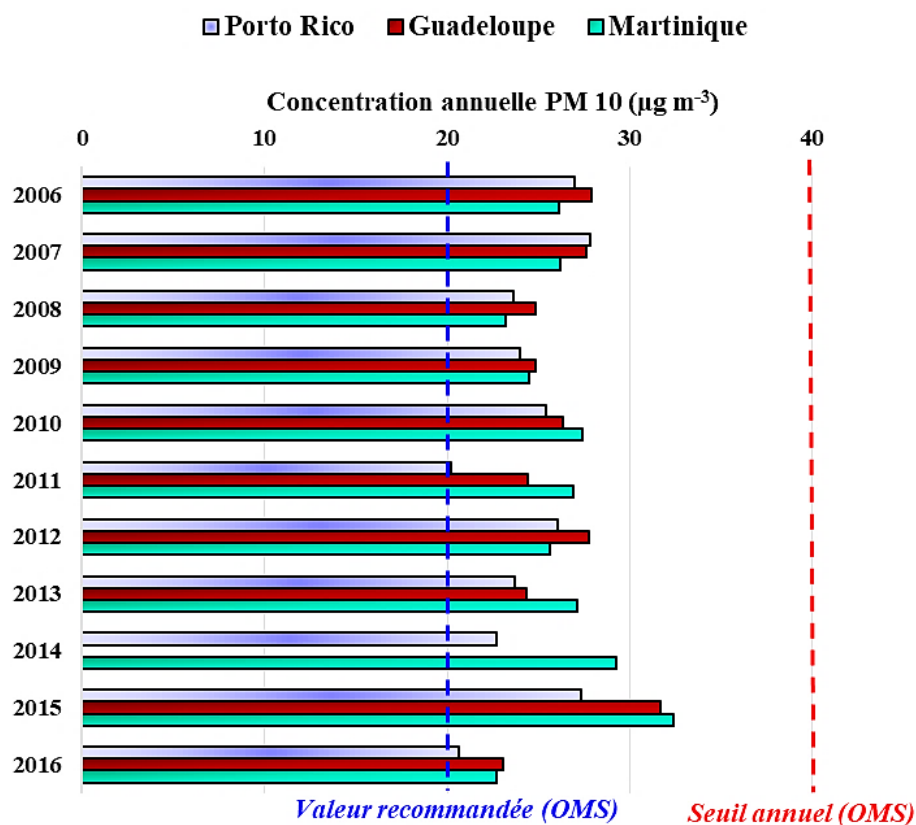


Figure 37 : Concentrations annuelles en PM10 (Porto Rico, Guadeloupe, Martinique) et seuils établis pour la protection de la santé (OMS)

A cause de l'impact de la pollution naturelle, c'est-à-dire du passage des poussières désertiques affectant la Caraïbe chaque année, la valeur recommandée par l'OMS ($20 \mu\text{g m}^{-3}$) en vue de favoriser une transition vers la réduction des concentrations annuelles est systématiquement dépassée (Figure 37). Par ailleurs, il existe une variabilité avérée des concentrations annuelles en PM10 reflétée par l'examen des trois sites. Néanmoins, le phénomène des « brumes désertiques » dans la Caraïbe, ne semble pas s'être intensifié au cours de la dernière décennie. L'année 2015 présente cependant une concentration moyenne annuelle indiscutablement plus élevée que celle des autres années avec une valeur supérieure à $30 \mu\text{g m}^{-3}$ en Guadeloupe et en Martinique. En effet, cette année a été ponctuée d'épisodes poussiéreux particulièrement longs : plus d'une dizaine de jours au mois de Juin, avec un maximum de 21 jours consécutifs de poussières du 14 Juillet au 3 Août 2018. L'ensemble de la population de la Guadeloupe et de la Martinique a été impactée (irritations oculaires, rhinites, toux, asthme...) par la fréquence et l'intensité inhabituelle de ces événements poussiéreux. Inversement, 2016 présente la concentration annuelle en PM10 minimale.

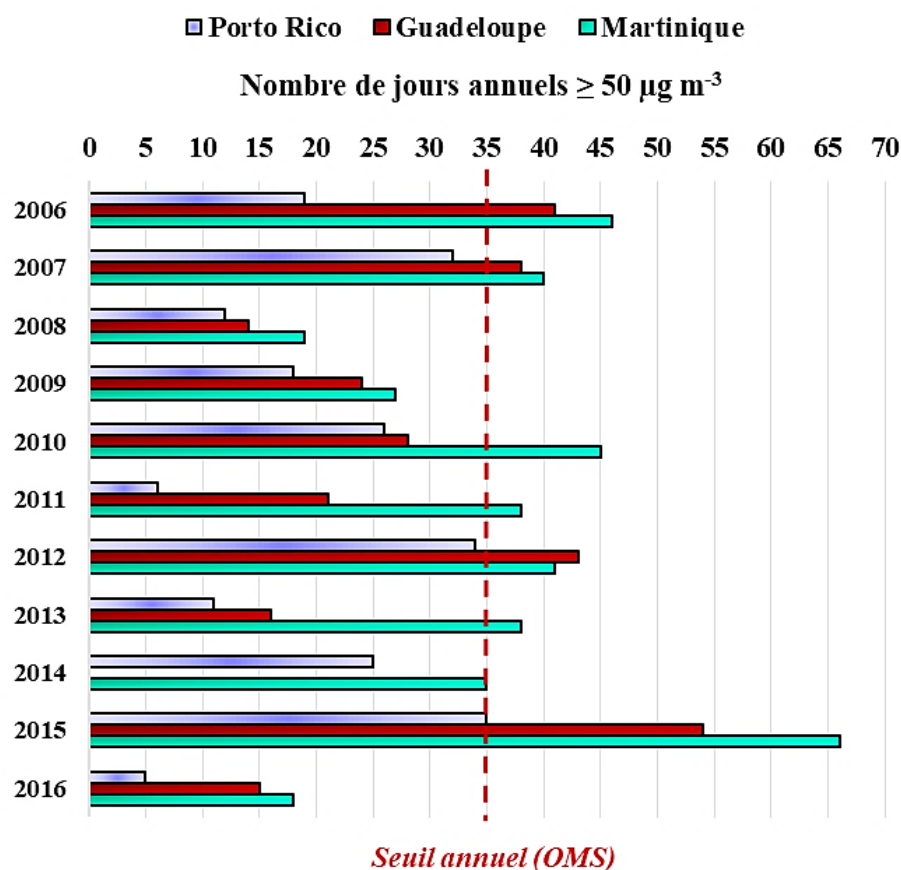


Figure 38 : Nombre moyen de jours dans l'année durant lesquels la concentration moyenne journalière est $\geq 50 \mu\text{g m}^{-3}$ (Porto Rico, Guadeloupe et Martinique) de 2006 à 2016

Concernant le nombre de jours dans l'année durant lesquels la concentration moyenne journalière est supérieure ou égale à $50 \mu\text{g m}^{-3}$, on observe un comportement différent en fonction de la position sur l'arc (Figure 38). En effet, il apparaît que Porto Rico est généralement moins fréquemment impacté par des événements journaliers de poussières avec des concentrations PM10 supérieures ou égales à $50 \mu\text{g m}^{-3}$. Le seuil lié au nombre de jours de concentration PM10 supérieures ou égales à $50 \mu\text{g m}^{-3}$ (*à ne pas dépasser plus de 35 fois par année civile*) pour la protection de la santé est atteint pour les années suivantes :

- Porto Rico : 2015
- Martinique : 2006, 2007, 2010, 2012, 2013 et 2015
- Guadeloupe : 2006, 2007, 2012 et 2015 (*à nuancer cependant compte-tenu de la disponibilité incomplète des données en Guadeloupe durant la période d'étude pour les années 2013 et 2014*)

L'année 2015 atteint les records de 35, 54 et 66 jours de concentration PM10 supérieures ou égales à $50 \mu\text{g m}^{-3}$ pour Porto Rico, la Guadeloupe et la Martinique respectivement. Dans l'ensemble, 2008 et 2016 présentent le nombre de dépassements le plus faible.

2.8. Evolution annuelle de l'intensité des évènements poussiéreux

De 2006 à 2016, les trois îles (Porto Rico, Guadeloupe et Martinique) comptent en tout $N = 11\ 119$ données journalières de PM10 disponibles. Sur l'ensemble de ces cas, $\sim 19\%$ des jours (soit $N = 2107$) sont associés à des évènements de brumes désertiques (valeurs journalières moyennes supérieures ou égales à $35 \mu\text{g m}^{-3}$). Le graphique qui suit présente la répartition du nombre annuel de jours poussiéreux classés en fonction de l'intensité des épisodes (faibles, moyens ou forts) pour les trois sites de la Caraïbe.

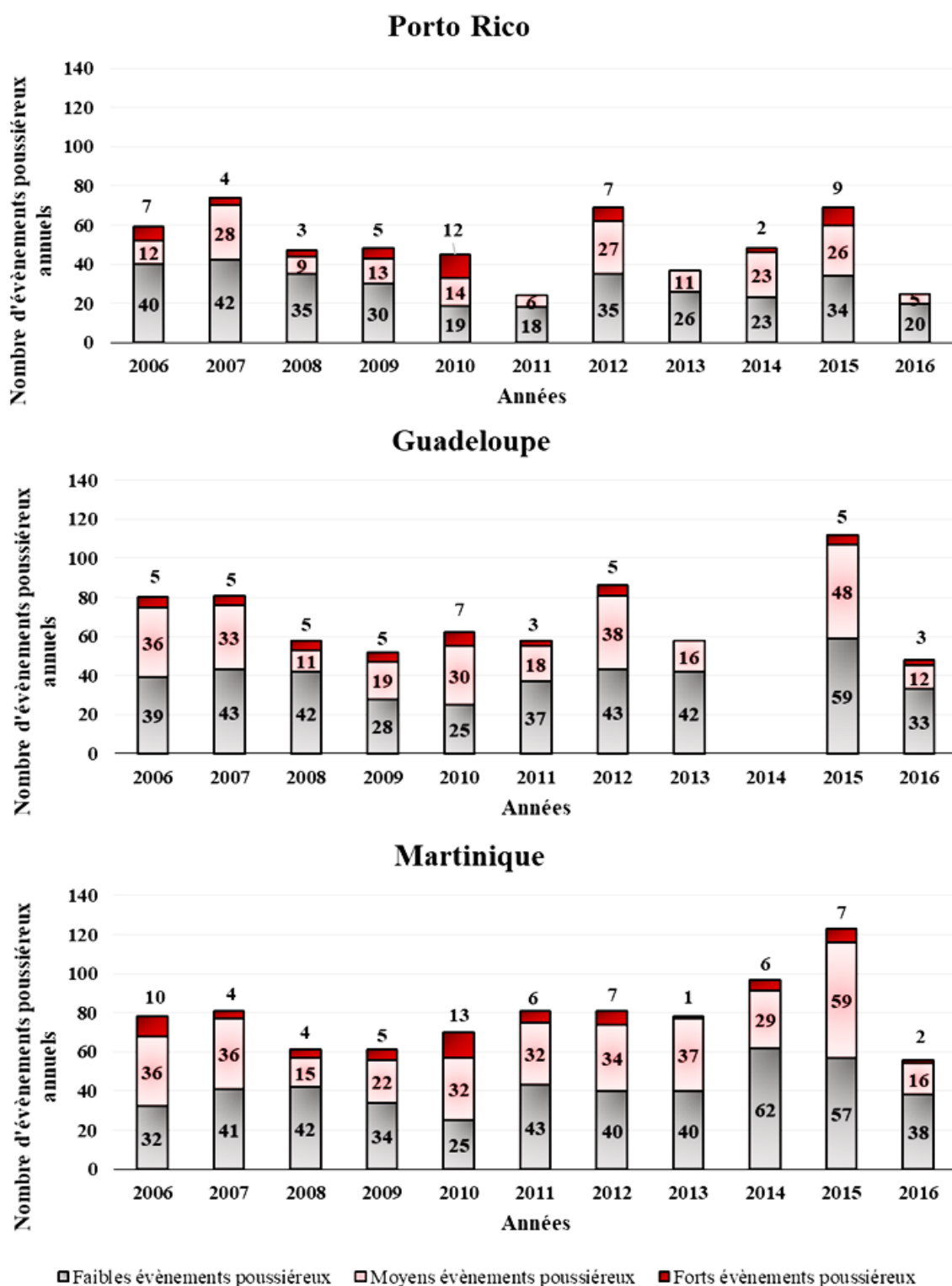


Figure 39 : Nombre annuel d'événements poussiéreux dans la Caraïbe (Porto Rico, Guadeloupe et Martinique) ; Evènements faibles en gris ($50 \mu\text{g m}^{-3} > \text{PM}_{10} \geq 35 \mu\text{g m}^{-3}$), évènements moyens en rose ($80 \mu\text{g m}^{-3} > \text{PM}_{10} \geq 50 \mu\text{g m}^{-3}$), évènements forts en rouge ($\text{PM}_{10} \geq 80 \mu\text{g m}^{-3}$)

La Figure 39 présente le nombre total de cas de poussières en faisant apparaître trois niveaux d'intensité d'évènements poussiéreux. Globalement, parmi les jours poussiéreux, environ

55.4% correspondent à des événements de faible intensité, ~ 37.2% aux événements moyens, et seulement ~ 7.4% sont liés à de forts événements. L'intensité des événements poussiéreux est assez variable au cours des années.

Entre 2006 et 2016, l'évolution du nombre de jours poussiéreux au cours des années est caractérisée par :

- Porto Rico : diminution du nombre des événements poussiéreux de 2007 à 2011 ; augmentation significative en 2012. En 2013, ils diminuent puis augmentent progressivement jusqu'en 2015
- Martinique : augmentation constante du nombre d'événements poussiéreux de 2008 à 2015 ;
- Guadeloupe : importante variabilité interannuelle du nombre d'événements ; on ne distingue pas pour notre période d'étude une tendance à diminuer ou à augmenter comme c'est le cas pour Porto Rico et la Martinique. Les trous de données empêchent de visualiser une tendance plus nette.

L'année 2015 atteint le record de 112 et 123 épisodes de poussières en Guadeloupe et en Martinique respectivement. Pour Porto Rico, c'est l'année 2007 qui détient le maximum de cas, 74 en tout. A l'inverse, 2016 présente le nombre minimum de cas pour les trois îles caribéennes.

D'une année à l'autre, il n'y a pas vraiment de différence au niveau des événements forts. On en compte quelques unités chaque année (une dizaine au maximum) et il n'y a pas d'évolution notable. Les ajustements à la hausse ou à la baisse se font sur le nombre d'événements faibles et moyens surtout.

Ainsi, notre seuil lié à la présence d'aérosols désertiques (concentration journalière de $PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$) pour la zone caribéenne a conduit à établir la climatologie des événements de poussières à Porto Rico, en Guadeloupe et en Martinique (2006-2016). Une étude précédente sur l'impact des poussières dans la Caraïbe incluant les données de concentrations de poussières de la Barbade, et les concentrations de PM_{10} de la Guadeloupe et de la Guyane, a pris en compte la norme européenne de présence de poussières : $50 \mu g m^{-3}$ (Prospero et al., 2014). Cette étude n'a donc pas considéré plus de 55% des épisodes de poussières du bassin caribéen.

CHAPITRE 3 : ÉTUDE DU TRANSPORT DES AEROSOLS DESERTIQUES AU-DESSUS DE L'ATLANTIQUE TROPICAL A PARTIR DES MESURES D'ÉPAISSEUR OPTIQUE EN AEROSOLS PAR SATELLITE

Dans ce chapitre, nous analysons les images de détection satellitaire d'AOD (MODIS) pour déterminer la distribution saisonnière des aérosols minéraux entre les côtes Africaines et la zone caribéenne. L'objectif de cette étude est de cibler la zone de départ des amas poussiéreux et de caractériser l'évolution de leur parcours au-dessus de l'Atlantique au fil des mois. Nous avons sélectionné les images mensuelles de « Dark Target » [Algorithm Dark Target, 550 nm (MOD08_M3_v6), satellite Terra, résolution spatiale de 1° ; méthode détaillée dans Wu et al. (2016)]. Les produits « Dark Target » apportent une amélioration de la détection des aérosols, spécifiquement sur la Terre. L'avantage pour notre étude réside dans la possibilité d'analyser les départs de poussières localisés sur les côtes de l'Afrique de l'Ouest.

Les images satellites de détection d'AOD (MODIS) qui suivent, illustrent les moyennes des données journalières calculées pour les cartes saisonnières ou mensuelles entre 2006 et 2016. Nous présentons les images mensuelles réparties selon les quatre saisons de poussières que nous avons prédéterminées : basse saison (NDJF), première saison intermédiaire (MA), haute saison (MJJA) et deuxième saison intermédiaire (SO).

Le parcours des masses d'air poussiéreuses présente généralement deux couloirs de transport (Schutz, 1980) :

- Couloir « Nord » : impactant l'arc antillais
- Couloir « Sud » : impactant la partie Nord de l'Amérique du Sud (Amazonie)

Illustration Figure 40

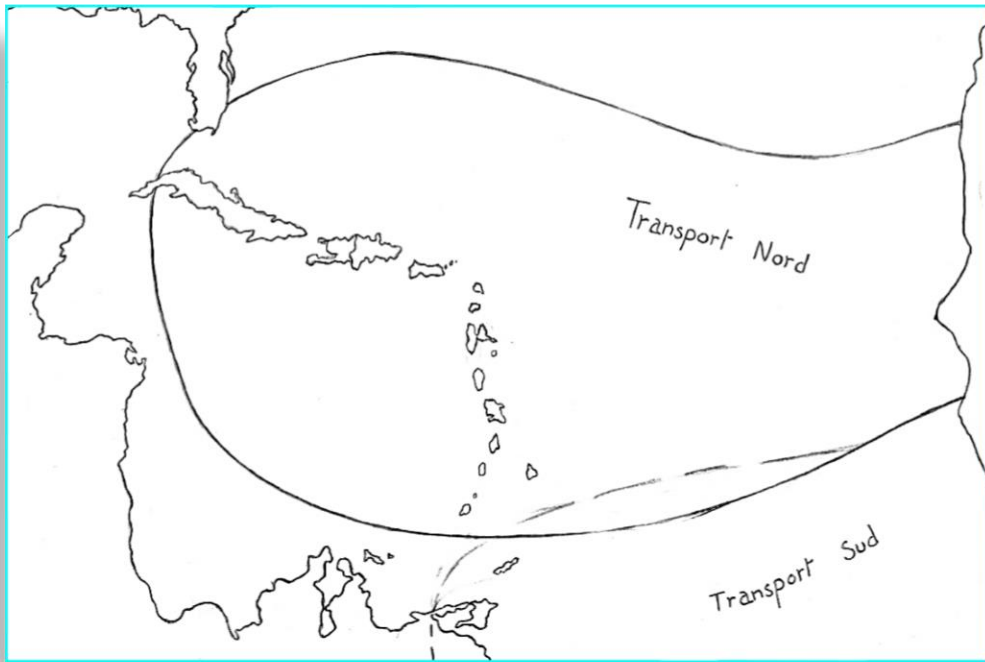


Figure 40 : Principaux couloirs de transport des poussières désertiques vers l'Ouest : transport Nord (entre les latitudes 10°N-20°N) et transport Sud (0°-10°N)

3.1. Basse saison des poussières : NDJF (Novembre, Décembre, Janvier, Février)

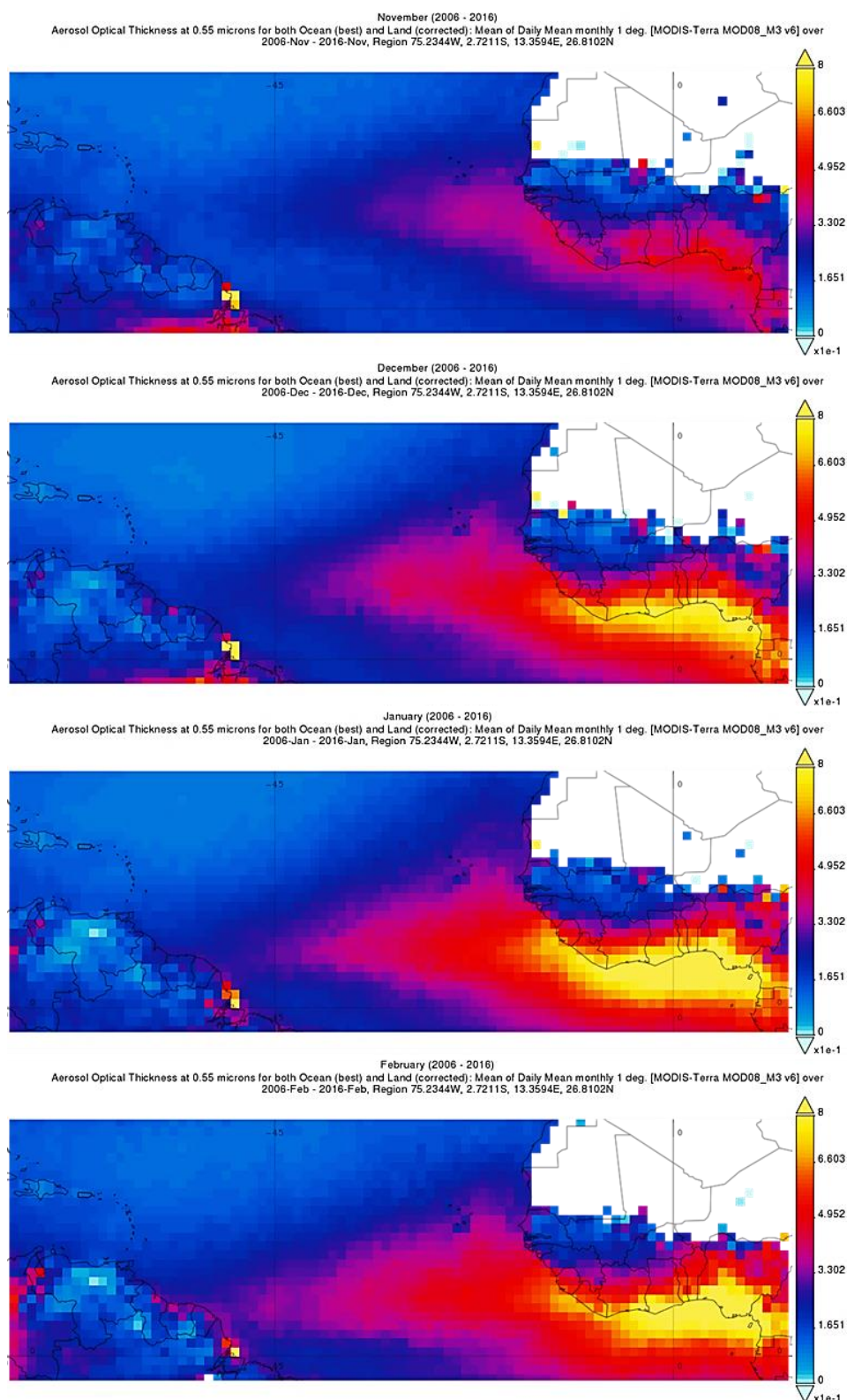


Figure 41 : AOD moyen mensuel (MODIS) pour la période de NDJF (2006-2016) dans la zone tropicale Nord Atlantique ; NASA GIOVANNI : <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

Dans la Caraïbe, la période la moins impactée par les événements de poussières sahariennes va de Novembre à Février. Durant cette période, l'influence de l'Harmattan, vent continental du Nord-Est prédomine sur l'Afrique et l'activité des sources sub-sahariennes (Bodélé, Sahel) est maximale (Schwanghart and Schutt, 2008). Par ailleurs, la position méridionale de la ZCIT favorise un parcours Sud des masses d'air poussiéreuses au-dessus de l'Océan Atlantique (Schutz, 1980 ; Formenti et al., 2011 ; Ben-Ami et al., 2012 ; Adams et al., 2012).

Globalement, la Figure 41 montre que durant la basse saison, le départ des panaches de poussières est principalement localisé au Sud des côtes de l'Afrique de l'Ouest, centré sur les latitudes inférieures à 10° N, autour de 0° E. On remarque que l'intensité des amas poussiéreux quittant l'Afrique, augmente progressivement au fil des mois. Novembre présente l'intensité d'aérosols la plus faible au départ ($AOD \approx 0.5$), celle-ci augmentant significativement en Décembre ($AOD \geq 0.7$). Ce comportement est lié au cycle de mise en activité des sources désertiques à cette période de l'année (Ben-Ami et al., 2012). Des poussières sont alors détectées dans la partie Sud de l'Océan Atlantique Nord, néanmoins, elles ne semblent pas atteindre, ou très faiblement le continent Sud-américain ($AOD \leq 0.2$).

Puis, à partir de Janvier-Février, les départs de poussières s'intensifient davantage. L'exportation des poussières affecte la partie Nord de l'Amérique du Sud (Cayenne, Amazonie) avec des valeurs d'AOD avoisinant 0.3.

Ces observations sont en accord avec les résultats de Ben-Ami et al. (2010), qui ont notamment montré que la présence d'aérosols minéraux était très faible au-dessus de l'Atlantique pour la période de mi-October à mi-Novembre. A partir de Janvier, les amas poussiéreux, plus intenses au départ des côtes, présentent principalement un parcours Sud vers l'Amazonie (Guyane, Amérique du Sud), où débute la saison des poussières pour cette région (Prospero et al., 2014). C'est la raison pour laquelle cette période présente de faibles concentrations mensuelles de PM₁₀ dans les îles de l'arc antillais (Porto Rico, Guadeloupe et Martinique). Nous expliquerons au prochain chapitre des « résultats et discussions », les processus de transport associés aux cas exceptionnels de poussières de la basse saison dans la Caraïbe.

3.2. Première saison intermédiaire : MA (Mars, Avril)

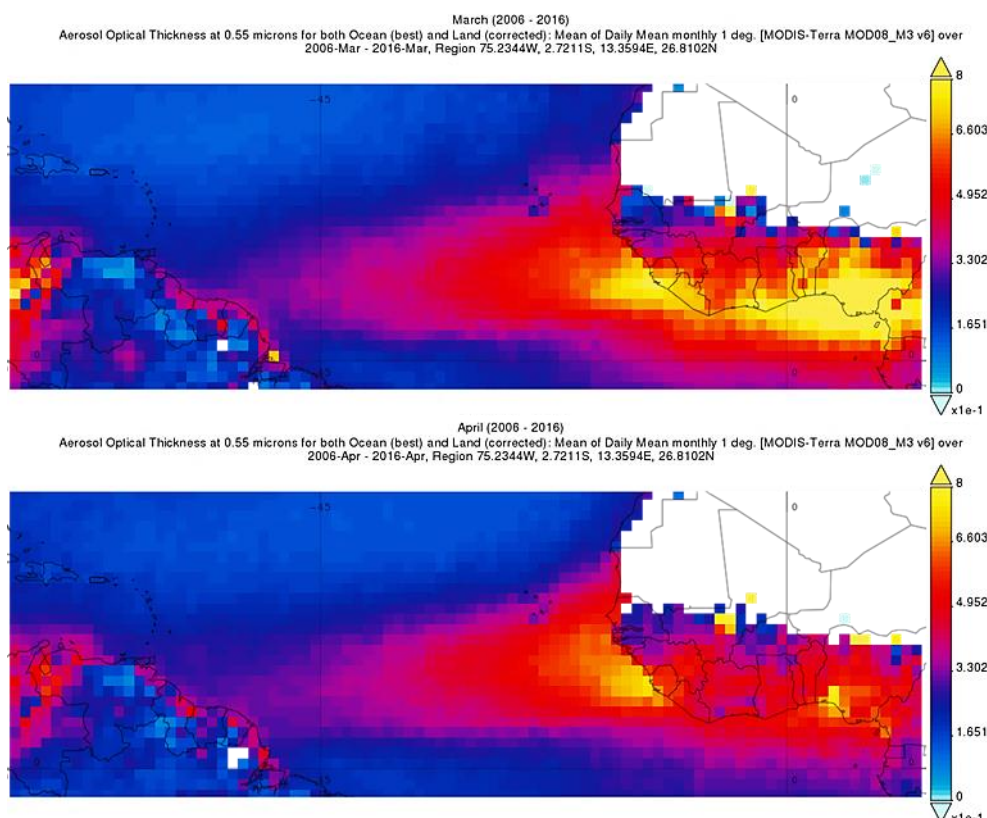


Figure 42 : Moyennes mensuelles d'AOD (MODIS) pour les mois de MA (2006-2016) dans la zone tropicale Nord Atlantique ; NASA GIOVANNI : <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

Au cours de MA, l'activité des sources du sahel (Bodélé) reste prédominante et les sources sahariennes (Mali, Mauritanie) commencent progressivement à s'activer. La tendance générale de départ et de parcours des poussières observée en basse saison se poursuit aux mois de Mars et Avril (Figure 42). Toutefois, le départ des panaches de poussières intenses migre légèrement plus au Nord-Ouest des côtes Africaines, autour de 10° N et entre -15° et 0° E. Mars et Avril correspondent à la période maximale d'événements poussiéreux en Guyane, au Suriname et en Amazonie (partie Nord de l'Amérique du Sud). On constate également que la partie Sud de l'arc des Petites Antilles, en l'occurrence l'île de la Barbade, semble être impactée par ce qu'on pourrait qualifier « d'épisodes de poussières du Printemps ». Soulignons que le caractère ponctuel du transport des amas poussiéreux plus au Nord de l'arc (Martinique, Guadeloupe et Porto Rico) n'apparaît pas sur la représentation climatologique d'AOD (MODIS) pour cette période. Néanmoins, ces événements ne sont pas isolés, et sont au cœur des études actuelles (exemple : Jury, 2017) . Nous aborderons également ces cas particuliers dans la suite de ce chapitre.

3.3. Haute saison des poussières : MJJA (Mai, Juin, Juillet, Août)

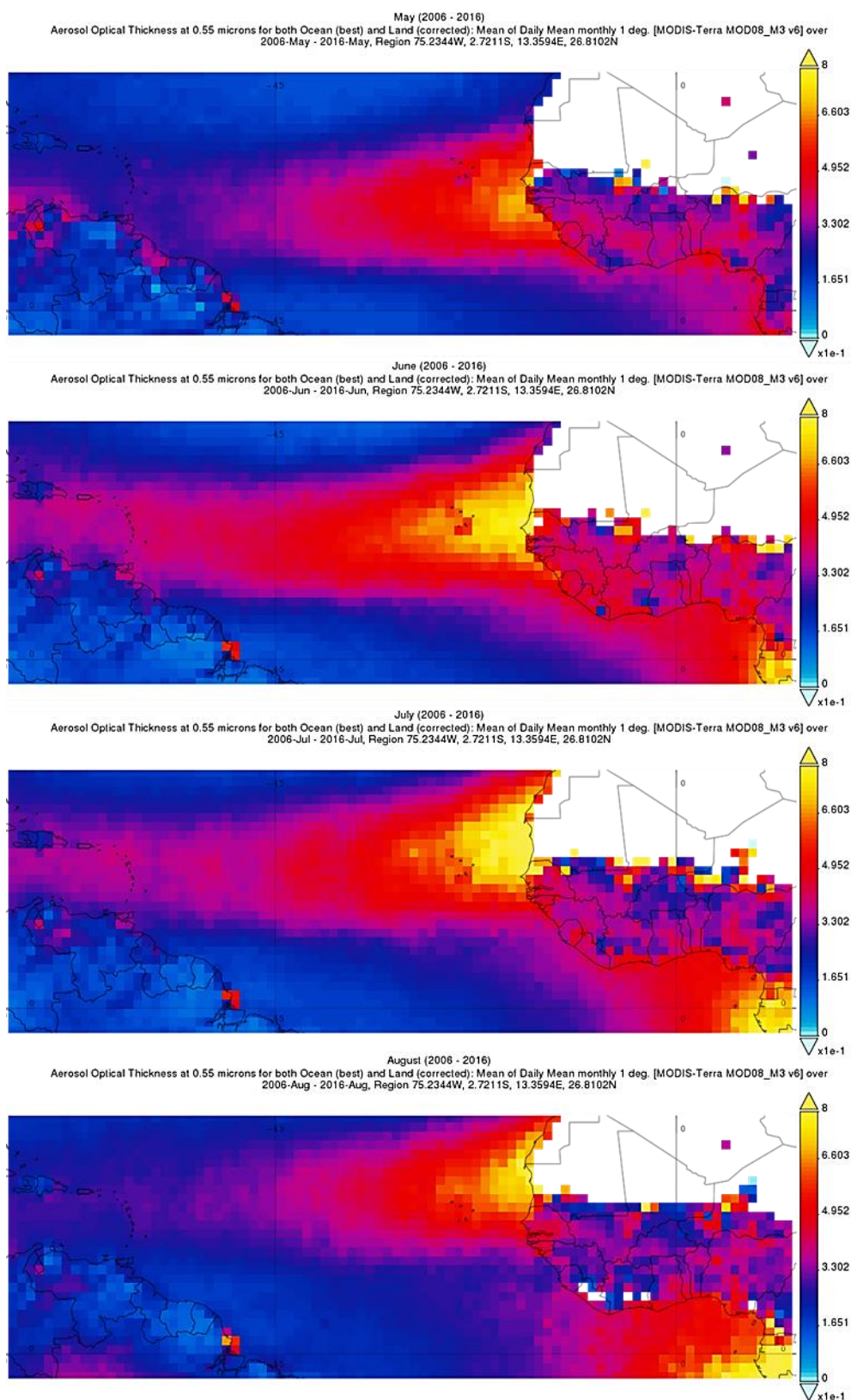


Figure 43 : AOD moyen mensuel (MODIS) pour la période de MJJA (2006-2016) dans la zone tropicale Nord Atlantique ; NASAGIOVANNI : <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

De Mai à Août, les lignes de grains générées par le flux de mousson (vent maritime du Sud-Est) favorisent l'activation des sources sahariennes (Mali, Mauritanie) (Brooks and Legrand, 2000 ; Flamant et al., 2007 ; Bou Karam, 2008). De plus, la migration de la ZCIT au Nord orientent la route des masses d'air poussiéreuses vers la zone caribéenne (Schutz, 1980 ; Formenti et al., 2011 ; Ben-Ami et al., 2012 ; Adams et al., 2012). La Figure 43 montre une masse importante d'aérosols désertiques ($AOD \geq 0.5$) quittant les côtes Nord-Africaines, autour de Dakar ($\sim 15^\circ$ N). A l'inverse des deux saisons précédentes, les poussières présentent un parcours « Nord » situé entre les latitudes 10° N et 20° N, impactant l'ensemble de l'arc antillais. Les mois de Mai et Août illustrent respectivement le début et la fin de la haute saison des poussières. Juin et Juillet correspondent au maximum de transport d'aérosols vers la Caraïbe.

3.4. Deuxième saison intermédiaire : SO (Septembre, Octobre)

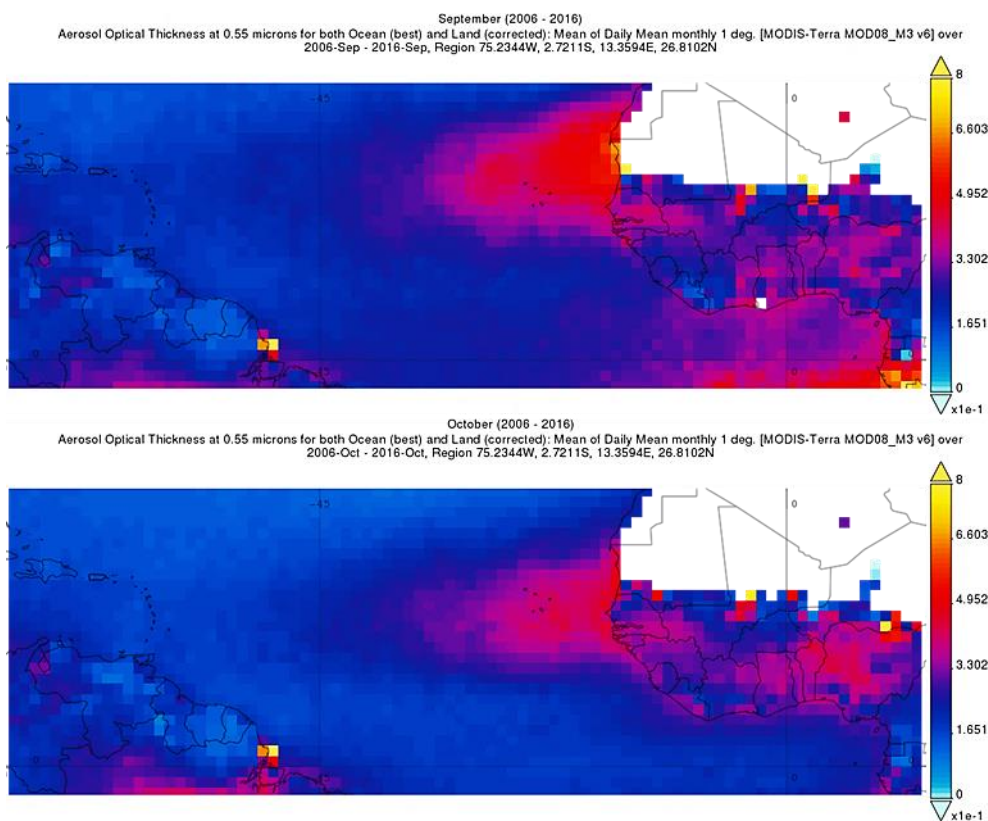


Figure 44 : AOD moyen mensuel (MODIS) pour la période de SO (2006-2016) dans la zone tropicale Nord Atlantique ; NASAGIOVANNI : <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

En ce qui concerne les mois de Septembre et d'Octobre, le départ des poussières est centré sur Dakar (côtes Nord-Africaines). Cependant, les poussières ne semblent pas atteindre l'arc antillais (Figure 44). Cette période marque la fin de la saison des poussières pour la Caraïbe avec un changement de circulation atmosphérique. En parallèle, la saison des brûlis de l'Afrique

du Sud et de l'Amérique du Sud débute au même moment (autre source visible d'aérosols localisée sur l'image de traitement satellite de Septembre). Cela peut potentiellement occasionner le transport de PDA (pour « Polluted Dust Aerosols ») dans la région des Petites Antilles comme nous avons pu l'évoquer en amont. De toute évidence, les périodes intermédiaires de poussières présentent des caractéristiques particulières attenantes à une atmosphère également en transition.

En conclusion, le départ et le transport des brumes désertiques répondent à un cycle saisonnier piloté par l'activation saisonnières des sources désertiques combinée à la fluctuation périodique de la ZCIT. Le comportement décrit par la climatologie des départs et des transports de poussières entre les côtes Africaines et la zone caribéenne, montre que la production de particules de poussières est un phénomène relativement continu tout au long de l'année. Toutefois, l'exportation des aérosols minéraux hors d'Afrique est favorisée ou inhibée en fonction des régimes de vents saisonniers et de la configuration atmosphérique au-dessus de l'Océan Atlantique. C'est précisément cet aspect que nous tenterons d'approfondir dans la partie qui suit. Nous poursuivons notre analyse avec l'étude de la circulation saisonnière des masses d'air au-dessus de l'Océan Atlantique au moyen des rétro-trajectoires (fournies par HYSPLIT).

3.5. Origine des masses d'air traversant la Caraïbe : étude des rétro-trajectoires (HYSPLIT)

A ce stade de notre étude, nous avons une meilleure compréhension du cycle périodique d'exportation des poussières hors du continent Africain. Dans cette partie, nous mettons en évidence le caractère saisonnier de la circulation générale des masses d'air en représentant les rétro-trajectoires au départ des îles de la Caraïbe (Porto Rico, Guadeloupe, Barbade) pour la période de 2006 à 2016. Antérieurement, Dunion (2010) a défini trois types de masse d'air généralement observées dans la zone caribéenne :

- Moist Tropical (MT) : masse d'air humide (provenances multiples)
- Saharan Air Layer (SAL) : masse d'air sec provenant d'Afrique (*déjà référencée dans la littérature*)
- MidLatitude Dry Air Intrusions (MLDAIs) : masse d'air sec provenant du Nord des Etats-Unis

Chadee and Clarke (2015) ont étudié la variabilité journalière de la circulation atmosphérique de la région caribéenne. Ils ont déterminé le cycle de différents types de circulation (CT pour « Circulation Type ») influencé par la fluctuation de la position des anticyclones, dépressions et de la ZCIT. Cette étude est basée sur les composantes du vent à 850 hPa (~1 500 m) pour la période de 1979 à 2010 [technique détaillée dans Chadee and Clarke (2015)]. En tout, on compte sept différents CT. La fréquence mensuelle de ces derniers a montré que les mois de Janvier à Mai et d'Octobre à Décembre étaient associés aux cinq premiers CT référencés, chacun présentant une durée de vie inférieure à 3 jours. Paradoxalement, la période de Mai à Septembre (correspondant principalement à la haute saison des poussières) est caractérisée par le sixième et septième CT présentant une durée de vie d'environ 6 et 7 jours respectivement [ces résultats sont illustrés par la Fig. 6 (fréquence mensuelle des CT) et le Tab. 3 (durée de vie des CT) dans (Chadee and Clarke (2015))]. Nous interprétons ces résultats de la façon suivante :

- En dehors de la haute saison des poussières, les conditions atmosphériques décrivent une atmosphère instable (durée de vie des CT inférieurs à 3 jours) non propice au transport des poussières.
- Inversement, la haute saison des poussières présente des conditions atmosphériques plus stables, puisque les sixième et septième CT présentent tous deux une durée de vie de ~ 6 et ~ 7 jours favorable au transport de la poussière minérale entre les côtes Africaines et la Caraïbe [durée de transport des poussières mentionné dans la littérature : ~ 7 jours (Schutz, 1980 ; Reid et al., 2003)].

Nous proposons ci-dessous d'étudier les rétro-trajectoires journalières, à 850 hPa (1 500 m), pour la période de 2006 à 2016. Ainsi, nous avons représenté l'ensemble des rétro-trajectoires générées par le modèle d'HYSPLIT au départ de la Caraïbe selon les saisons de poussières (NDJF, MA, MJJA et SO). L'intérêt était d'analyser par une autre méthode, les types de circulation (CT) atmosphérique de la zone caribéenne, tout en caractérisant le transport des poussières désertiques vers chaque île de notre étude.

Dans un premier temps, la modélisation de l'ensemble des rétro-trajectoires générées journalièrement pour chaque période de poussière (NDJF, MA, MJJA et SO), permettra de cerner l'origine saisonnière des masses d'air. Ensuite, nous nous focaliserons sur la circulation atmosphérique associée aux jours poussiéreux ($PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$). L'autre aspect de cette analyse consiste à déterminer si l'acheminement des poussières varie en fonction de la position

des îles sur l'arc. En effet, même si l'ensemble de l'arc est généralement impacté par les événements de poussières à la même période (haute saison des poussières : MJJA), nos investigations nous laissent penser que certains événements poussiéreux affectent plus ou moins certaines îles que d'autres.

Remarque :

Après avoir étudié la circulation aux différentes altitudes 1 500 m, 2 000 m et 3 000 m, nous en avons conclu que le comportement général des rétro-trajectoires était similaire pour tous ces niveaux d'altitude. C'est la raison pour laquelle nous présentons cette étude uniquement pour l'altitude 1 500 m. De plus, nous considérons la Guadeloupe comme étant représentative du centre de la caraïbe, puisque les rétro-trajectoires calculées en Guadeloupe sont très semblables à celles générées pour la Martinique.

3.5.1. *Basse saison des poussières (NDJF)*

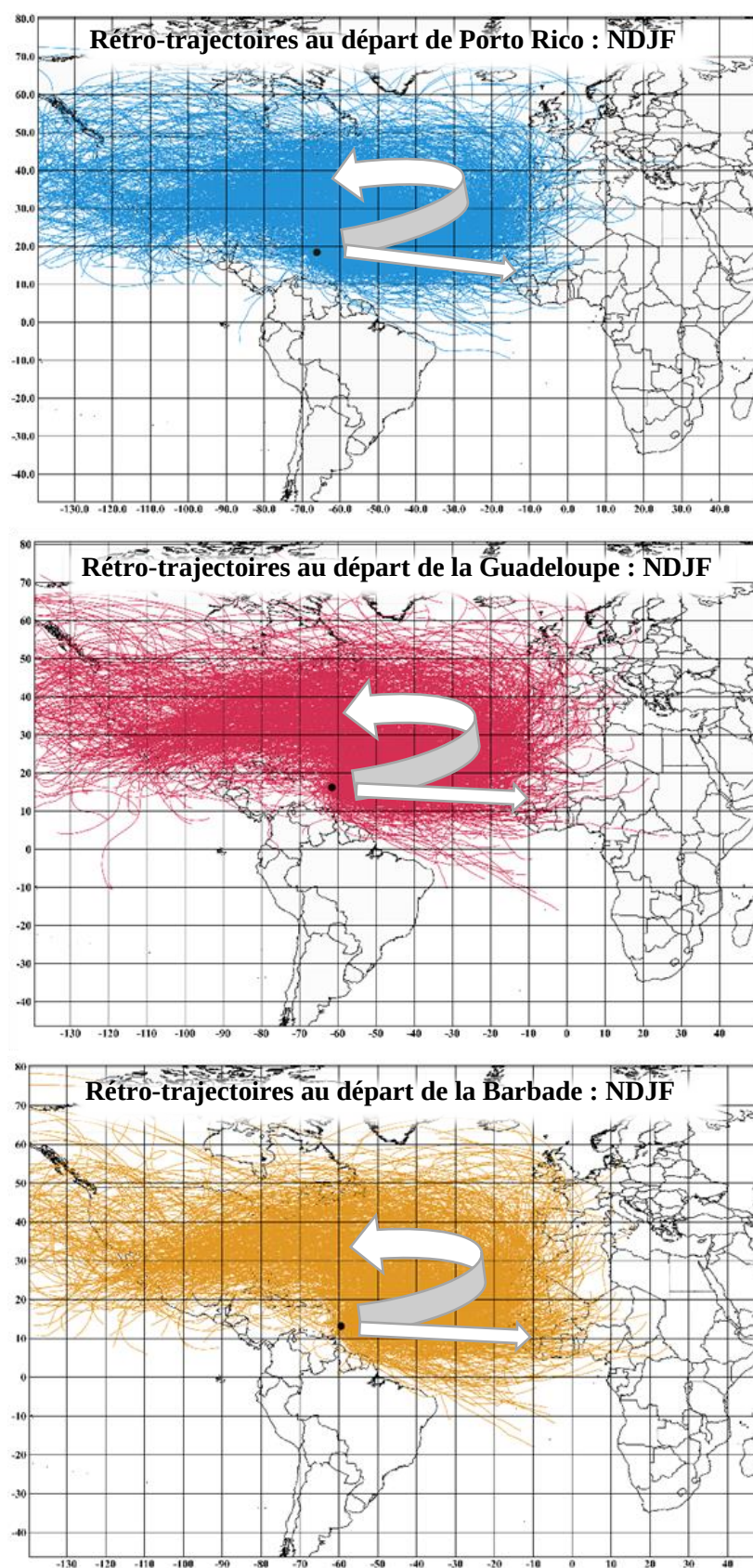


Figure 45 : Rétro-trajectoires (N =1 323) générées au départ des îles caribéennes (Porto Rico, Guadeloupe, Barbade) ; hauteur = 1 500 m ; durée = 240 h ; période de NDJF (de 2006 à 2016).

A priori, au cours de la période NDJF, la circulation atmosphérique générale présente les mêmes caractéristiques pour les trois îles (Figure 45). L'ensemble des rétro-trajectoires semblent principalement provenir du Nord des Etats-Unis. Elles forment une boucle vers l'Ouest, au-dessus de l'Atlantique Nord, puis passent au large de la côtes Ouest Africaine en se dirigeant vers l'arc des Petites Antilles. En bouclant vers la Caraïbe, elles peuvent frôler le continent Africain. Soulignons que ce type de circulation est très rapide, puisqu'en 10 jours (240 heures), les masses d'airs semblent parcourir plus de $\sim 10\,000$ Km. Par ailleurs, on distingue un certain nombre de rétro-trajectoires qui proviennent directement d'Afrique, entre les latitudes $\sim 10^\circ$ N et $\sim 20^\circ$ N, particulièrement pour le cas de la Barbade située au Sud-Est de l'arc Antillais.

3.5.2. *Première saison intermédiaire (MA)*

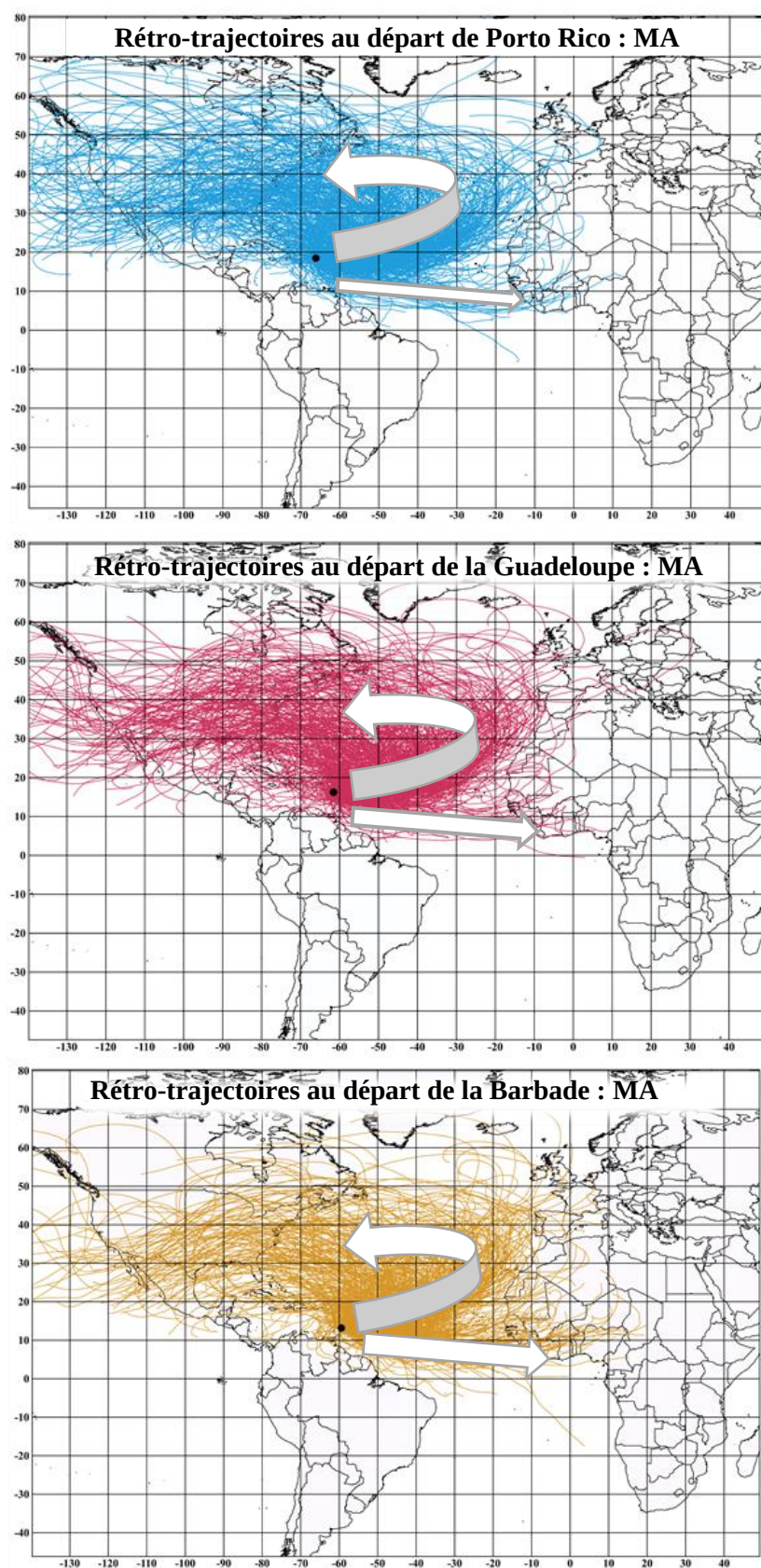


Figure 46 : Rétro-trajectoires (N = 671) générées au départ des îles caribéennes (Porto Rico, Guadeloupe, Barbade) ; hauteur = 1 500 m ; durée = 240 h ; période de MA (2006 à 2016).

Pour la période de MA, il apparait deux tendances de parcours (Figure 46). De façon analogue à la saison précédente, la circulation principale (rapide) provient essentiellement du Nord des Etats-Unis. Le second comportement, est défini par un parcours « Sud » des masses d'air originaires d'Afrique qui se produit à des latitudes inférieures à 15° N. Ce type de circulation est plus fréquent pour le cas de la Barbade.

3.5.3. Haute saison des poussières (MJJA)

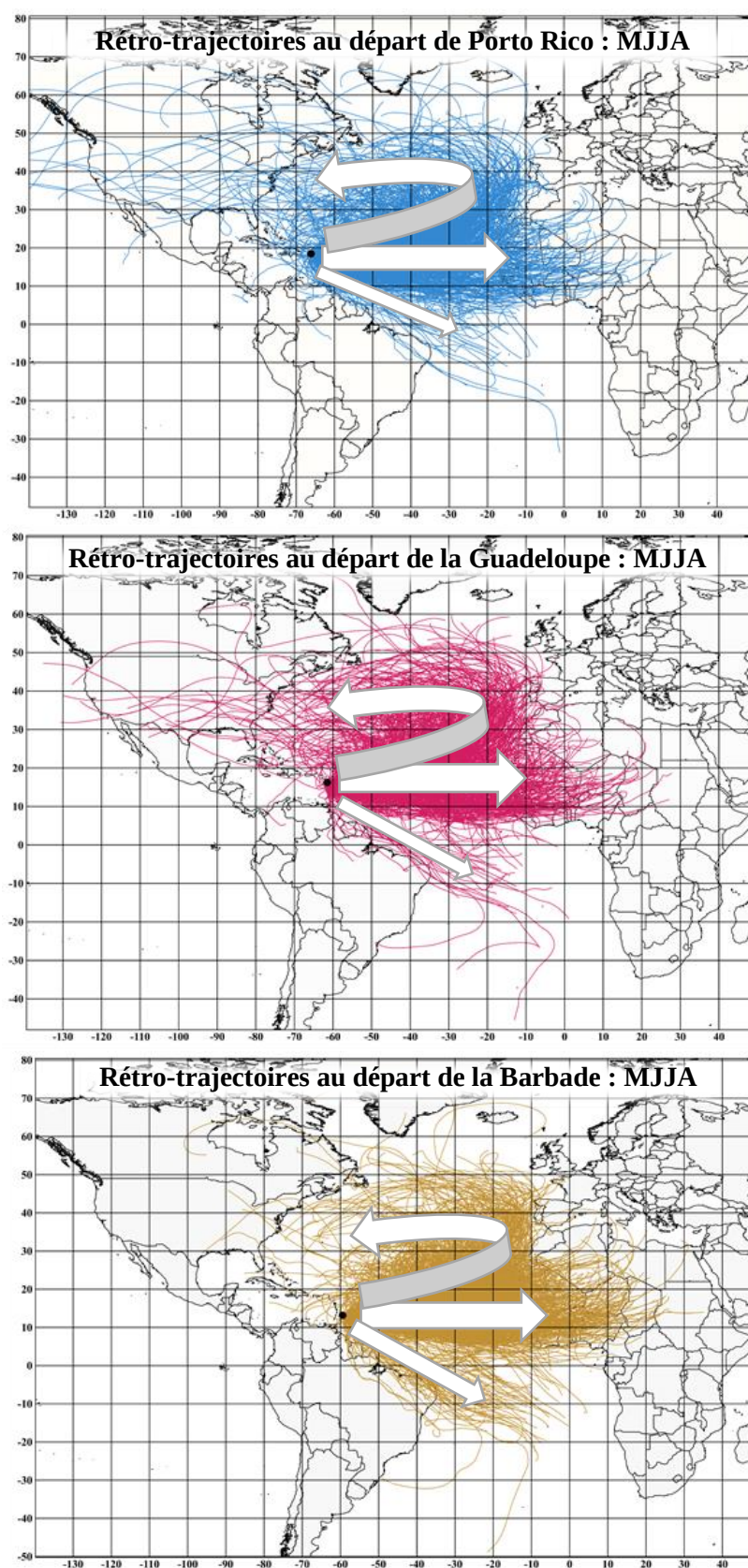


Figure 47 : Rétro-trajectoires (N = 1 353) générées au départ des îles caribéennes (Porto Rico, Guadeloupe, Barbade) ; hauteur = 1 500 m ; durée = 240 h ; période de MJJA (de 2006 à 2016).

La haute saison des poussières dans la Caraïbe montre un couloir principal entre l'Afrique et l'arc des Petites Antilles, localisé entre les latitudes 10° N et 30° N (Figure 47). On voit également apparaître les rétro-trajectoires du Nord bouclant à proximité des côtes Africaines, et empruntant le couloir de transport des masses d'air provenant de l'Afrique de l'Ouest. Ce qui est cohérent avec les sixième et septième CT stables (durée de vie 6-7 jours) présentés par Chadee and Clarke (2015). En effet, ces conditions semblent favoriser le transport des poussières vers les îles de la Caraïbe. La seconde tendance observée concerne un parcours longeant la partie Nord de l'Amérique du Sud, plus prononcé pour la Barbade. Ces cas sont probablement associés à la remontée saisonnière de la ZCIT à cette période de l'année (responsable des flux de mousson en Afrique).

3.5.4. *Seconde saison intermédiaire (SO)*

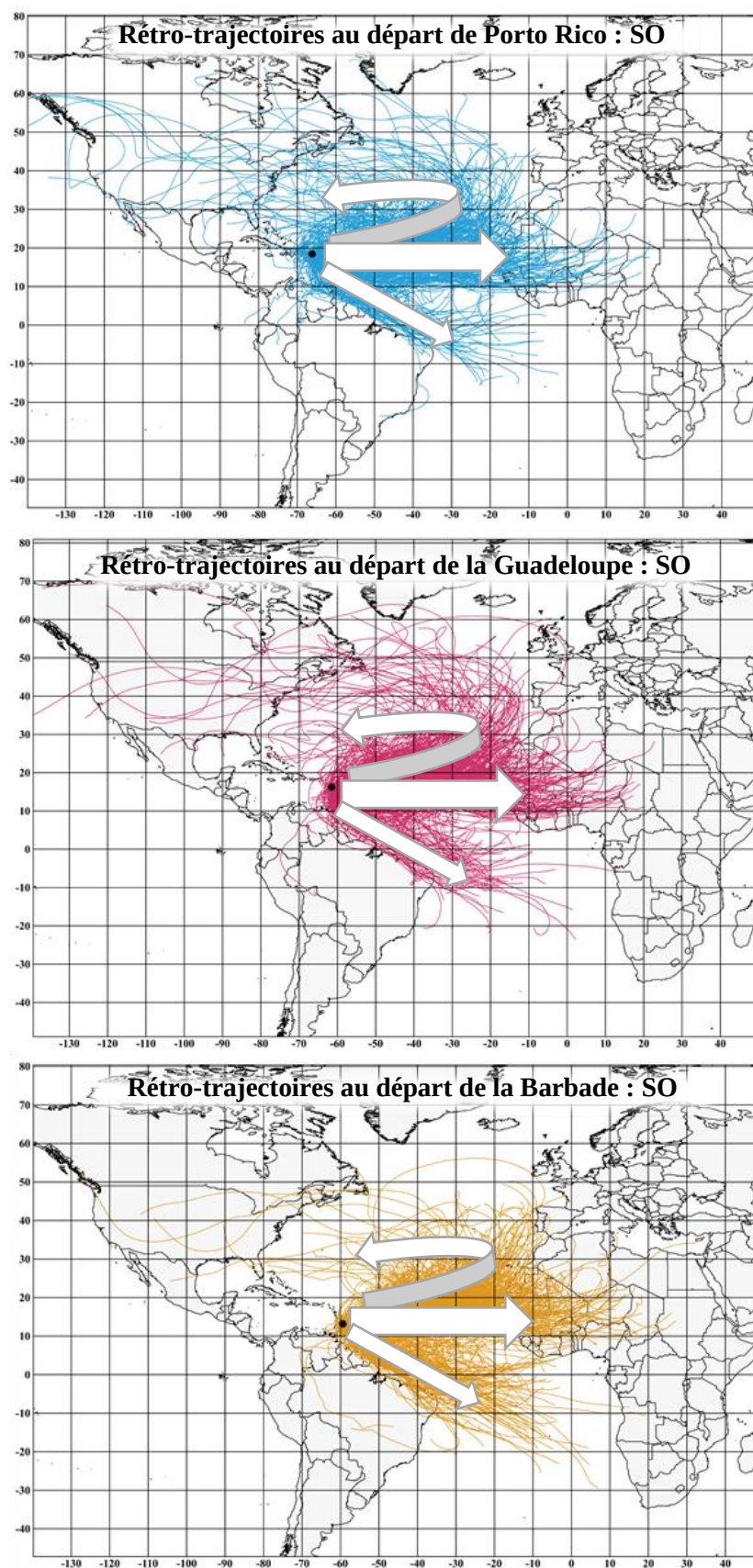


Figure 48 : Rétro-trajectoires (N = 671) générées au départ des îles caribéennes (Porto Rico, Guadeloupe, Barbade) ; hauteur = 1 500 m ; durée = 240 h ; période de SO (de 2006 à 2016).

Durant la seconde période intermédiaire (SO), le couloir Afrique-Caraïbe est toujours en place (Figure 48). La circulation de type « Sud » (en-dessous des latitudes 10° N) semble s'intensifier, en comparaison des autres saisons. Soulignons que SO correspond au pic le plus important de la saison des pluies (dans la Caraïbe) qui semble être relié à ces remontées de masses d'air humide caractéristiques de la ZCIT (Anthony Chen and Taylor, 2002). D'autre part, on distingue tout de même quelques rétro-trajectoires provenant du Nord en bouclant vers la Caraïbe, au-dessus de l'Atlantique Nord.

En définitive, les quatre saisons poussiéreuses présentent des circulations de masses d'air distinctes. La basse saison est principalement caractérisée par une origine Nord-Américaine. Les deux saisons intermédiaires apparaissent comme des périodes de transition, en montrant plusieurs tendances de parcours (« Nord » et « Sud » Atlantique) et d'origines (Sud-Américaine, Afrique et Nord-Américaine). Cet aspect corrobore les observations de Chadee and Clarke (2015) qui indiquent que ces périodes présentent 5 différents types de CT (2 à 3 jours de durées de vie).

Enfin, la circulation caractérisant la haute saison des poussières se démarque des autres périodes en illustrant un couloir stable de transport entre l'Afrique et la Caraïbe. Pour ce qui est des variations de circulation des masses d'air reliées à la position des îles sur l'arc, la Barbade s'est révélée être plus impactée par les parcours de type « Sud » que les deux autres. Toutefois, dans l'ensemble, la circulation atmosphérique est relativement similaire pour les 3 îles.

3.6. Trajectoire des masses d'air poussiéreuses arrivant sur l'arc antillais

Nous poursuivons avec les rétro-trajectoires reliées aux jours poussiéreux (**PM10 journaliers $\geq 35 \mu\text{g m}^{-3}$**). Précisons que pour le cas de la Barbade qui ne possède pas de mesure de PM10, la classification des événements poussiéreux est basée sur les critères **d'AOD ≥ 0.2 et d'AE ≤ 0.6** (explicités au premier chapitre des « résultats et discussion »). Cette méthode pourrait impliquer une légère diminution du nombre de cas de poussières par rapport au nombre de cas sélectionnés sur critère PM10.

Nous avons également déterminé, avec les rétro-trajectoires, le temps de parcours moyen des masses d'air poussiéreuses entre les côtes Africaines et l'arrivée dans la Caraïbe, pour chaque saison de poussières.

3.6.1. Basse saison des poussières : NDJF

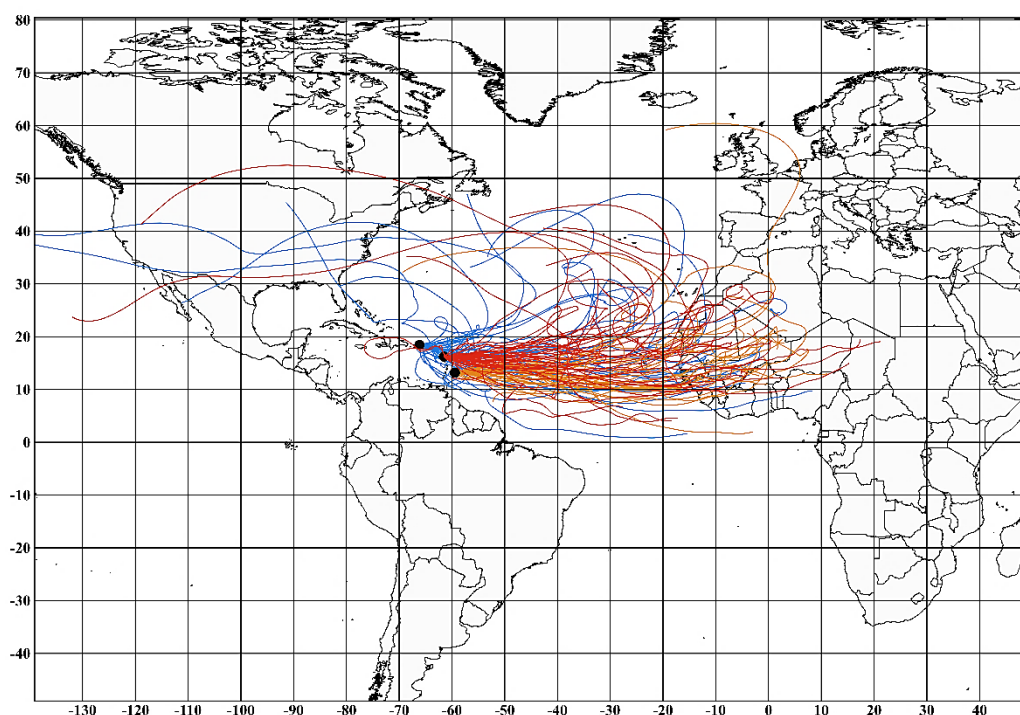


Figure 49 : Rétro-trajectoires associées aux évènements de brumes désertiques ($PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$) générées au départ de Porto Rico (traces bleu, N = 31), de Guadeloupe (traces rouge, N = 40) et de Barbade (traces jaunes, N = 28) : hauteur = 1 500 m ; durée = 240 h ; période de NDJF (de 2006 à 2016)

Le nombre d'évènements étant faible à cette période de l'année, nous avons représenté les rétro-trajectoires au départ des trois îles de la Caraïbe (Porto Rico, Guadeloupe, Barbade) sur la Figure 49. Dans la grande majorité, les rétro-trajectoires reliées aux 3 îles proviennent principalement d'Afrique et présentent un parcours « Nord », entre les latitudes 10° N-20° N. Il apparaît également qu'un certain nombre d'évènements poussiéreux soit attribuables aux masses d'air provenant du Nord des Etats-Unis et bouclant à proximité des côtes Ouest-Africaines.

En définitive, la circulation des amas poussiéreux diffère du comportement général dominant décrit dans la section précédente concernant cette période. Ceci explique le faible nombre d'épisodes de poussières se produisant de Novembre à Février ; ces derniers sont en effet reliés à un type de circulation inhabituel pour cette période. Le temps de transport est de 6-7 jours en moyenne.

3.6.2. Première saison intermédiaire : MA

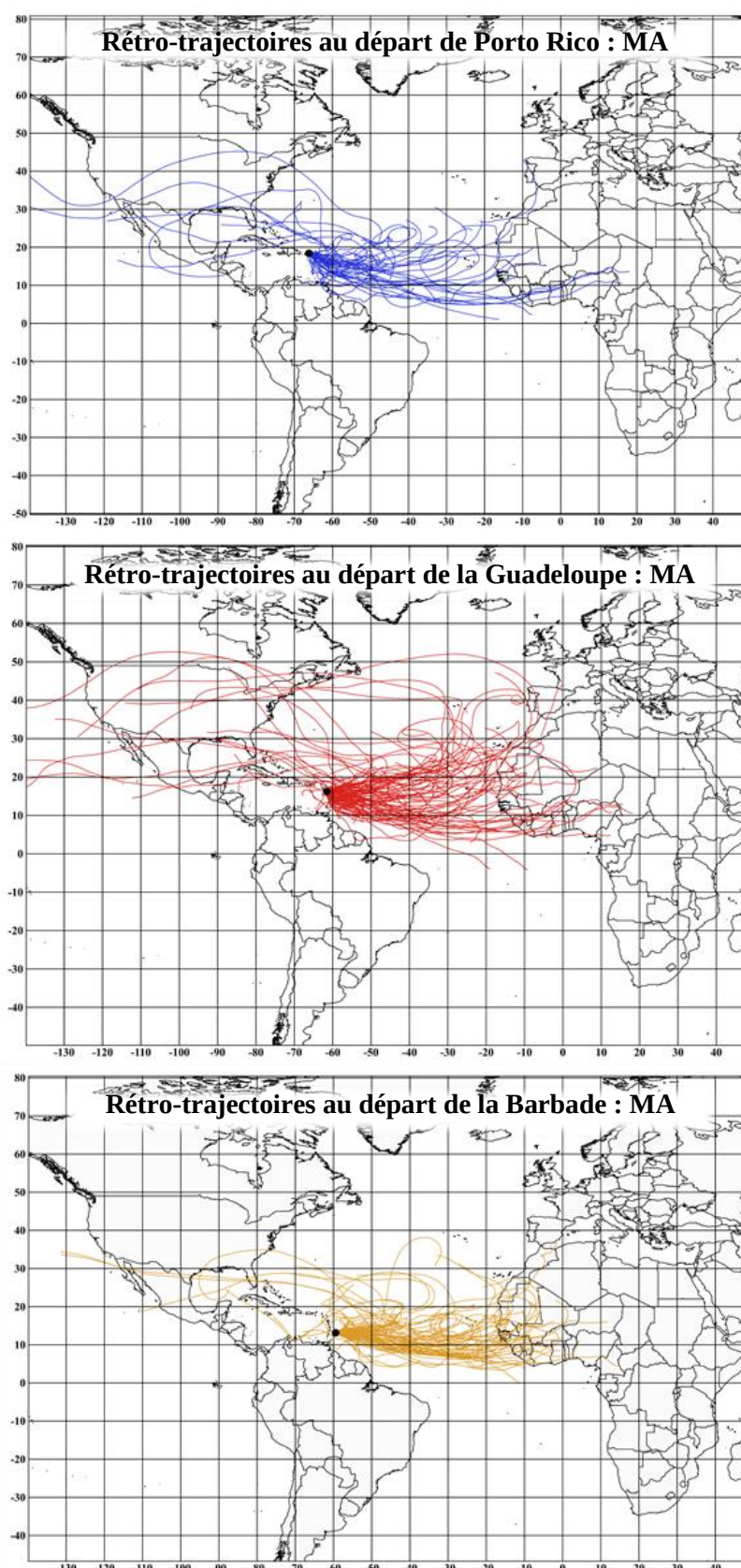


Figure 50 : Rétro-trajectoires associées aux événements de brumes désertiques ($PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$) générées au départ de Porto Rico (traces bleu, $N = 45$), de Guadeloupe (traces rouge, $N = 87$) et de Barbade (traces jaunes, $N = 70$) : hauteur = 1 500 m ; durée = 240 h ; période de MA (de 2006 à 2016).

D'après la Figure 50, on distingue deux types de transport :

- Un parcours « Sud » : entre les latitudes 0° et 15° N pour les trois îles
- Un parcours « Nord » : entre les latitudes 15° N et 30° N, plus prononcé pour la Guadeloupe, que pour Porto Rico et Barbade

En effet, cette période coïncide avec la haute saison des poussières de la partie Nord de l'Amérique du Sud : Suriname, Amazonie, Guyane (Prospero et al., 2014). Comme nous l'avons montré dans l'analyse climatologique de la répartition des aérosols au-dessus de l'Atlantique, le parcours des amas poussiéreux est principalement situé au Sud (entre 0° N- 10° N) en Mars et Avril. En réalité, se sont ces types d'évènements qui remontent exceptionnellement, néanmoins de façon récurrente au cours des années, pour impacter le Sud, puis le centre et le Nord de l'arc Antillais. La Barbade, située au Sud est plus fréquemment concernée par ces épisodes. Mark Jury (2017) a récemment fait mention de cette circulation particulière des masses d'air au cours du Printemps ; où la configuration atmosphérique est propice à ces remontées de flux de poussières vers Porto Rico (Jury, 2017). Le temps de transport lié à ces cas particuliers est de 10-12 jours. Comme nous avons pu le constater au premier Chapitre des « résultats et discussions », le transport impacte les propriétés microphysiques et optiques des aérosols minéraux. Ainsi, nous étudierons au chapitre suivant la caractérisation mensuelle des particules en suspension dans l'atmosphère en Afrique et dans la Caraïbe.

3.6.3. Haute saison des poussières : MJJA

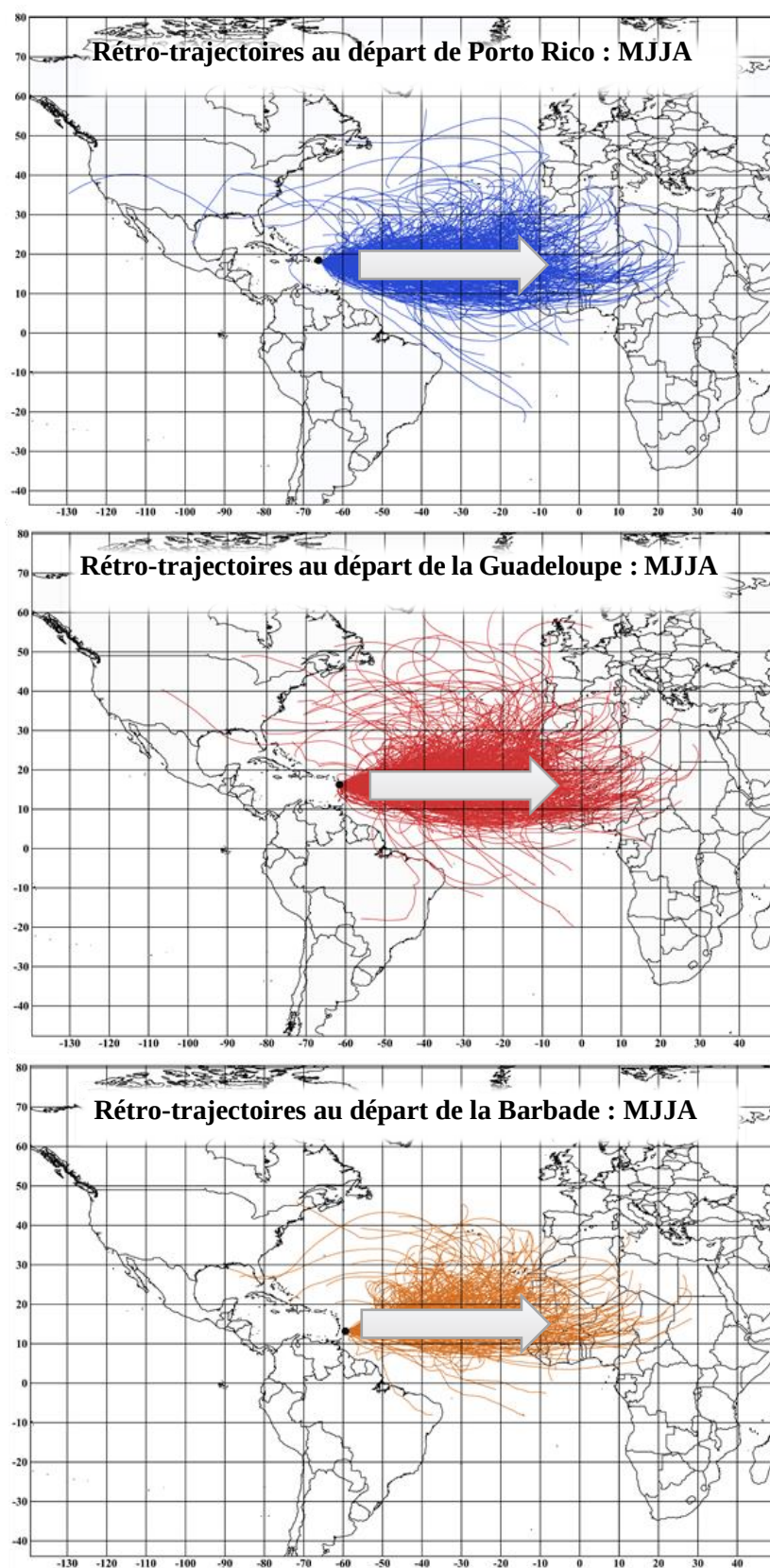


Figure 51 : Rétro-trajectoires associées aux événements de brumes désertiques ($PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$) générées au départ de Porto Rico (traces bleu, N = 392), de Guadeloupe (traces rouge, N = 478) et de Barbade (traces jaunes, N = 241) ; hauteur = 1 500 m ; durée = 240 h ; période de MJJA (de 2006 à 2016).

Comme attendu, la Figure 51 illustre le couloir généralisé de transport des particules de poussière désertiques, mis en place au cours de la haute saison des poussières, centré entre les latitudes 10° N et 20° N. Ce parcours des amas poussiéreux (type « Nord ») est plus direct entre les îles de l'arc et l'Afrique de l'Ouest avec un temps de transport de 6-7 jours en moyenne.

3.6.4. *Seconde saison intermédiaire : SO*

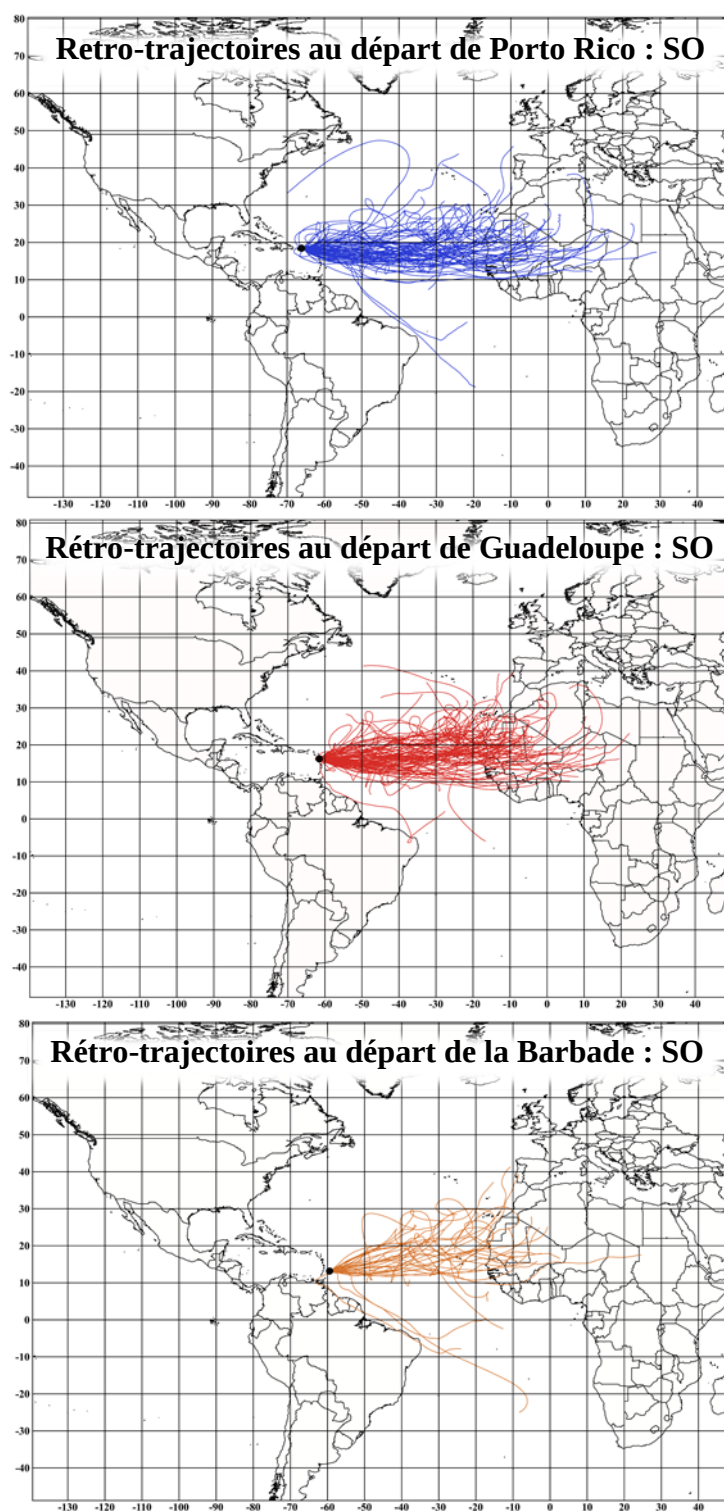


Figure 52 : Rétro-trajectoires associées aux événements de brumes désertiques ($PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$) générées au départ de Porto Rico (traces bleu, $N = 75$), de Guadeloupe (traces rouge, $N = 90$) et de Barbade (traces jaunes, $N = 31$) ; hauteur = 1 500 m ; durée = 240 h ; période de SO (de 2006 à 2016).

On constate le même type de circulation « Nord », toujours en place au mois de Septembre et Octobre(Figure 48). Le temps de transport est de 6-7 jours. Cette période de transition, marque la fin de la saison des poussières et précède le renouvellement du cycle de la circulation des masses d'air de la région caribéenne.

3.7. Classification saisonnière des trajectoires associées aux masses d'air poussiéreuses

A la suite de cette analyse, nous avons répertorié quatre types de parcours (illustration : Figures 53 et 54) au-dessus de l'Océan Atlantique Nord, associés au transport des poussières désertiques dans la Caraïbe :

→ Nord-Ouest Atlantique Parcours (NOAP) : dans ce cas, les rétro-trajectoires touchent le continent Africain dans le domaine défini par les coordonnées suivantes :

-  ○ Latitudes : entre 10° N et 35° N
- Longitudes : entre -20° E et -16° E

→ Sud-Ouest Atlantique Parcours (SOAP) : les rétro-trajectoires touchent le continent Africain à l'intérieur du domaine de coordonnée suivant :

-  ○ Latitudes : entre 0° et 10° N
- Longitudes : entre -20° E et -16° E

→ Nord-Est Atlantique Parcours (NEAP) : les rétro-trajectoires en provenance du Nord des Etats-Unis bouclent au-dessus de l'Atlantique à l'intérieur du domaine de coordonnée suivant :

-  ○ Latitudes : entre 20° N et 35 °N
- Longitudes : entre -50° E et -20° E

→ Sud-Américaines (SA) : les rétro-trajectoires passent à proximité de la côte Est de la partie Nord de l'Amérique du Sud, dans l'aire géographique définie par :

-  ○ Latitudes : entre 0° N et 5° N
- Longitudes : entre -50° E et -30° E

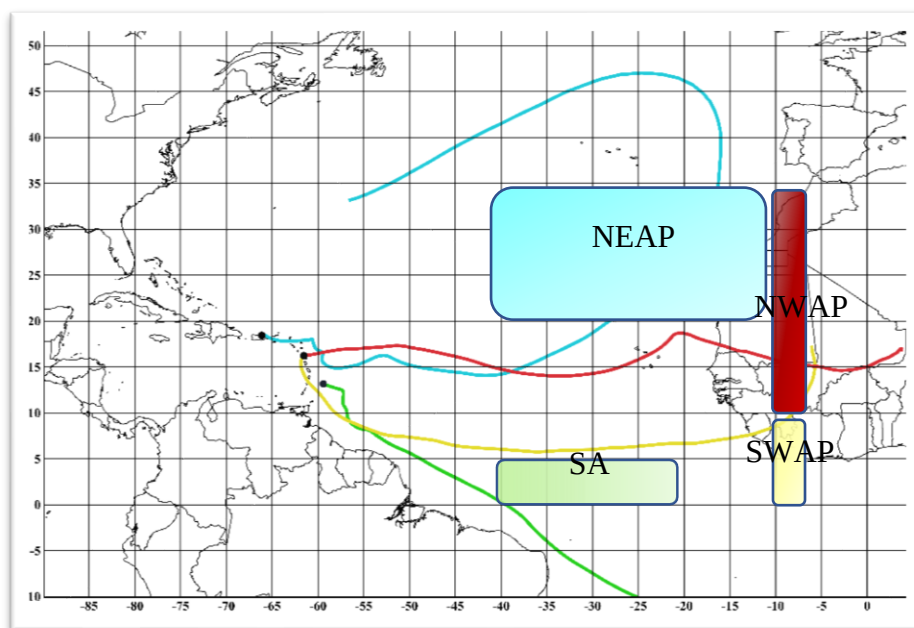


Figure 53 : Rétro-trajectoires types : NOAP, SOAP (NWAP et SWAP en anglais), NEAP, SA

Pour trier les rétro-trajectoires et dénombrer le nombre de cas correspondant à chaque parcours-type, nous avons appliqué la méthodologie suivante. Pour éviter que les rétro-trajectoires ne se chevauchent, nous avons procédé par élimination. D'abord, nous commençons par identifier les rétro-trajectoires associées aux principaux parcours NOAP et SOAP. Puis, nous classons le reste des rétro-trajectoires selon qu'elles appartiennent aux cas SA ou NEAP. Nous estimons que ces types de transport peuvent potentiellement acheminer des poussières désertiques dans la zone caribéenne. A partir de l'ensemble des données de rétro-trajectoires associées aux jours poussiéreux dans les trois îles pour la période de 2006 et 2016, nous établissons le bilan suivant :

- Total des cas : $N = 1609$
- Rétro-trajectoires inexploitables : ces traces inconsistantes (exemple : trajectoires tournant sur elle-même) peuvent être provoquées par des défauts de données météorologiques, ou la présence d'ondes au-dessus de l'Atlantique Nord. Ces cas ne permettent pas de déterminer une origine et un parcours fiable ($N = 117$)
- Rétro-trajectoires exploitables : $N = 1492$
- Cas de rétro-trajectoires provenant purement du Nord des Etats-Unis (exemple Figure 54 en bas à droite) : $N = 28$, soit moins de 2% des cas. Ces derniers ne peuvent vraisemblablement pas être reliés au transport de poussières désertiques. Ainsi, les dates correspondantes sont sûrement liées à des

augmentations des concentrations journalières PM10, provoquées par des évènements de pollution non clairement définis.

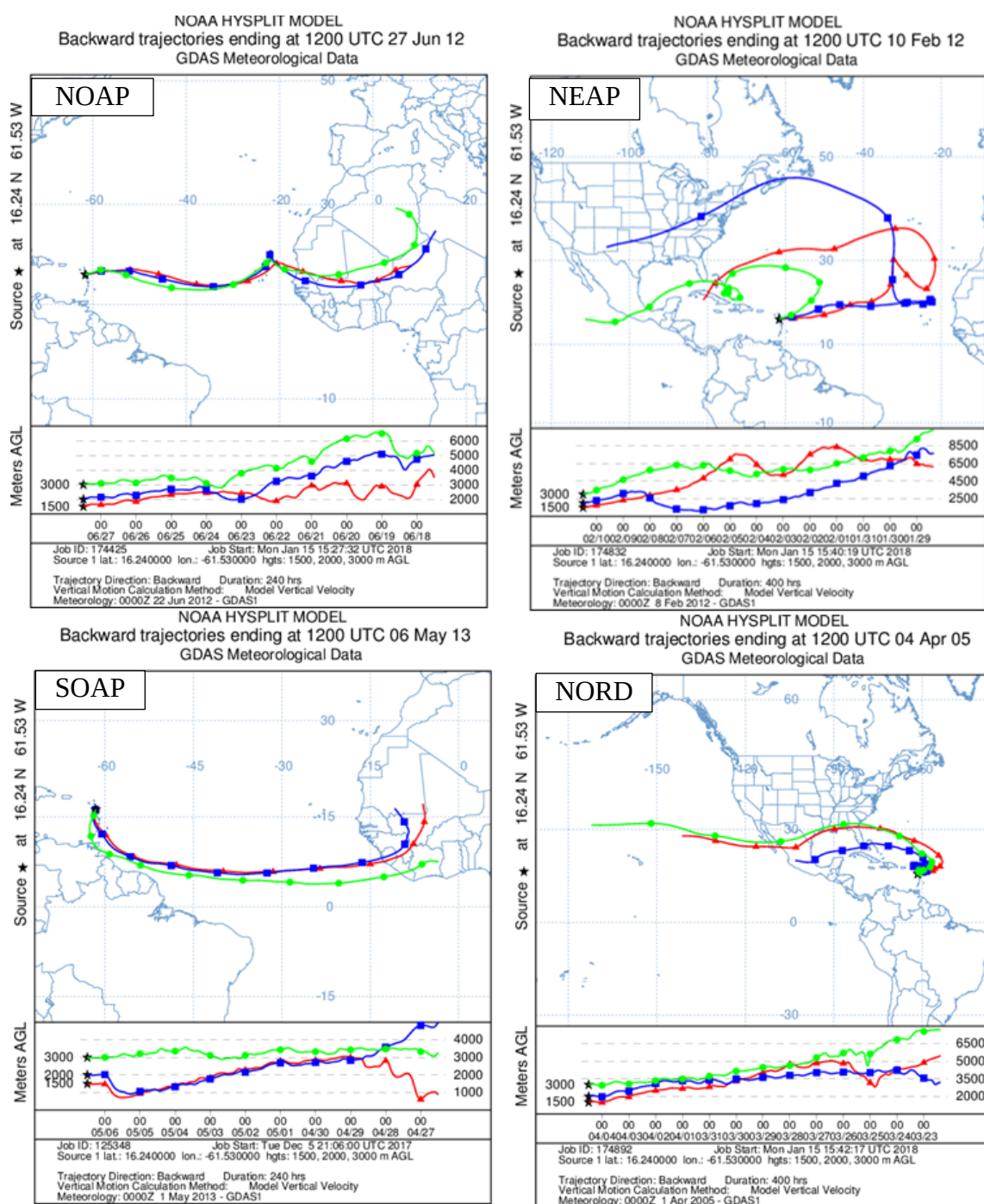


Figure 54 : Parcours types associés aux jours poussiéreux (2006-2016) : NOAP, SOAP, NEAP ; exemples de rétro-trajectoires au départ de la Guadeloupe (16.24 ° N, -61.53 ° E), durée (240 ou 400 heures), altitudes (1 500 m, 2 000 m et 3 000 m) ; le cas en bas à droite est un exemple de rétro-trajectoire d'origine Nord-américaine, non relié au transport des poussières.

Tableau 9 : Tableau récapitulatif du nombre de rétro-trajectoires classées

Sites	Jours poussiéreux	Rétro-trajectoires exploitables	Rétro-trajectoires Inexploitables
Porto Rico	543	501	42 (7.7%)
Guadeloupe	696	643	53 (7.7%)
Barbade	370	348	22 (6%)

NDJF	NOAP	SOAP	NEAP	SA	NORD
Porto Rico	12	1	6	5	4
Guadeloupe	20	5	11	1	0
Barbade	18	6	2	2	0

MA	NOAP	SOAP	NEAP	SA	NORD
Porto Rico	5	6	11	7	2
Guadeloupe	19	8	26	11	6
Barbade	18	13	10	15	5

MJJA	NOAP	SOAP	NEAP	SA	NORD
Porto Rico	230	31	87	20	6
Guadeloupe	264	45	110	29	3
Barbade	137	17	62	14	0

SO	NOAP	SOAP	NEAP	SA	NORD
Porto Rico	45	0	18	3	2
Guadeloupe	57	3	18	7	0
Barbade	16	3	8	2	0

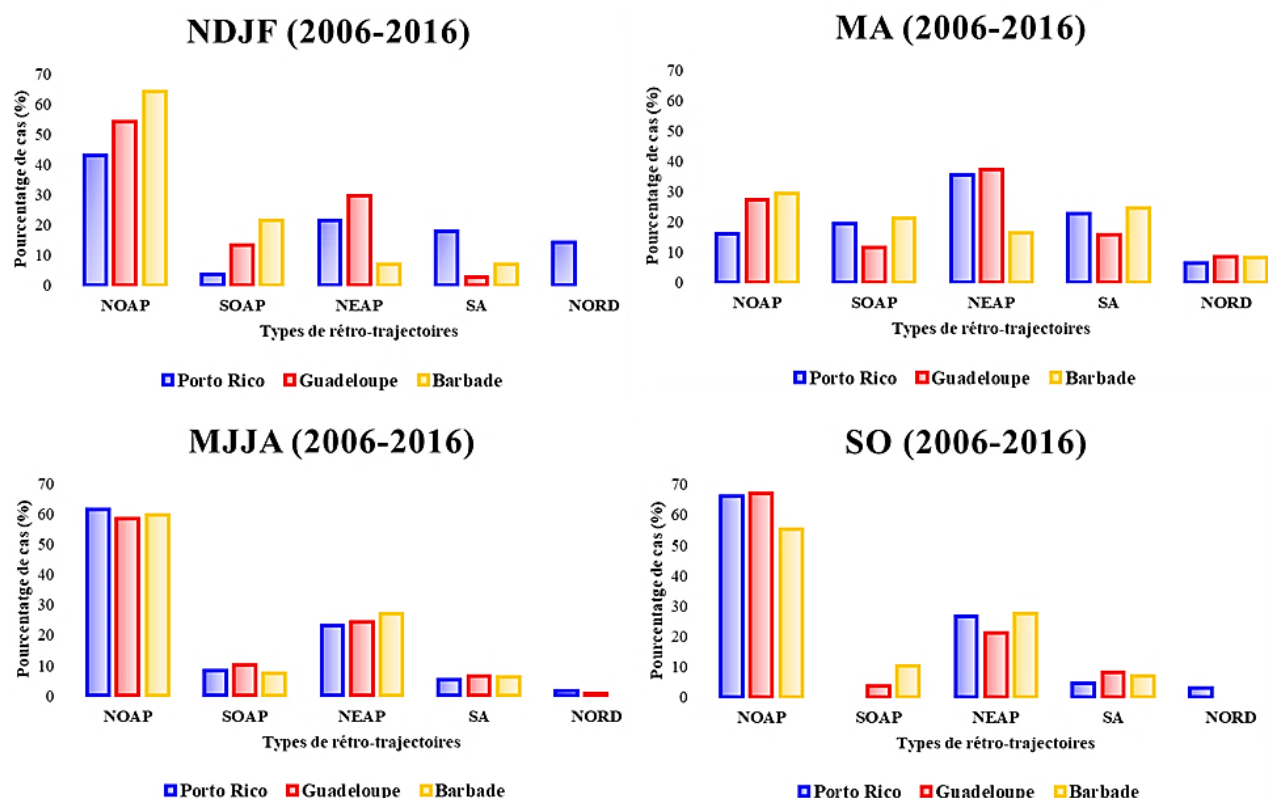


Figure 55 : Répartition saisonnière des types de circulation des masses d'air poussiéreuses impactant la Caraïbe défini à partir des valeurs du Tableau 9 ; *Représentation graphique de la classification des rétro-trajectoires en annexes.*

D'après les résultats de la répartition des types de parcours associés aux jours poussiéreux de la Caraïbe, on constate que selon la position des îles sur l'arc, le type de routes empruntées par les masses d'air poussiéreuses varie faiblement (Figure 55).

Les parcours les plus souvent adoptés par les panaches de poussières sont de type « Nord », quelle que soit la saison (NOAP et NEAP), y compris pour la Barbade pourtant située au Sud de l'arc. Dans l'ensemble, le parcours privilégié (plus de 50% des cas) des poussières dans la Caraïbe, correspond aux rétro-trajectoires NOAP. A l'exception de la période MA durant laquelle les parcours NEAP sont majoritaires pour les masses d'air poussiéreuses arrivant en Guadeloupe et à Porto-Rico. Les autres types de parcours sont significativement minoritaires au cours des saisons. Le second parcours le plus fréquent est associé à la circulation NEAP.

Circulation particulière NEAP :

La circulation atmosphérique NEAP est assez proche du type NOAP, en ce qui concerne la fin de la trajectoire dans le sens est-Ouest sur l'Atlantique, mais c'est principalement l'origine

Nord-Américaine qui la différencie du parcours NOAP d'origine Africaine. De plus, contrairement au cas NOAP, les NEAP n'atteignent pas le continent Africain. Ce qui confère à ces masses d'air des propriétés thermodynamiques différentes. En analysant leur structure thermodynamique, nous avons constaté qu'elles ne présentaient pas exactement les mêmes caractéristiques thermiques et humides standards de la SAL (exemple Figure 56). Pour ces cas (cas NEAP à gauche de la Figure 52) on remarque que l'inversion de température et le dessèchement de la couche sont beaucoup moins marqués sur le radiosondage que pour les cas de couche SAL (cas NOAP à droite de la Figure 52) : Cet axe d'étude mérite d'être approfondi.

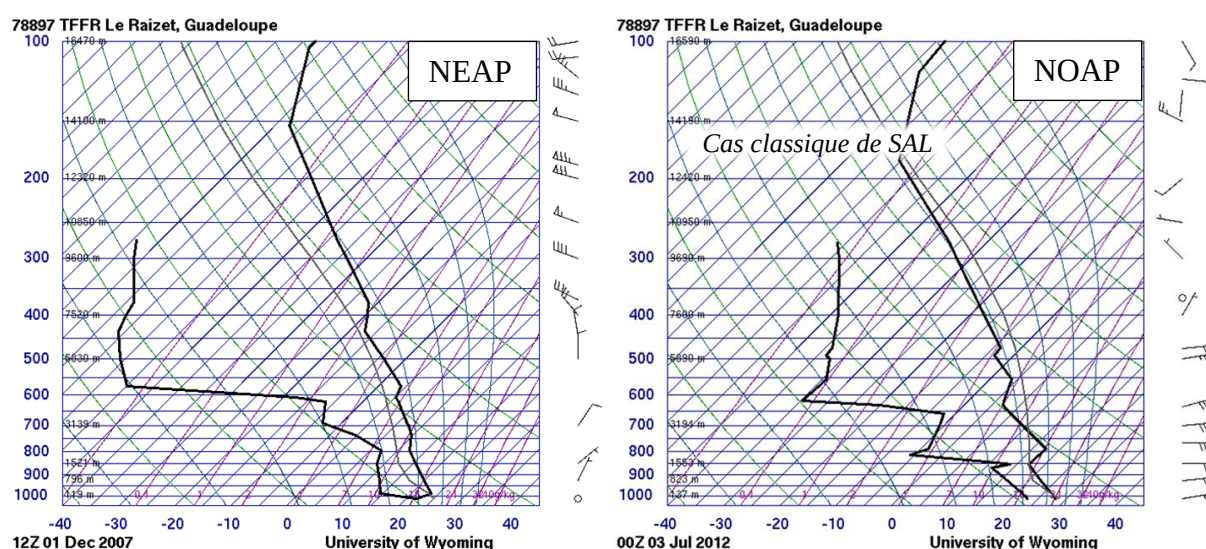


Figure 56 : Comparaison entre le radiosondage (Guadeloupe) reflétant un évènement poussiéreux associé aux types de masse d'air NEAP et NOAP.

Nous avons ainsi analysé les cas NEAP pour comprendre comment ces masses d'air, a priori originaires du Nord des Etats-Unis, pouvaient transporter des particules de poussières désertiques, sans qu'elles ne passent au-dessus du continent Africain. Les images de détection satellites au-dessus de l'Océan Atlantique ont permis d'établir la présence d'amas poussiéreux à proximité des côtes Africaines, pouvant potentiellement être entraînés par les circulations rapides de type NEAP (voir Figure 57).

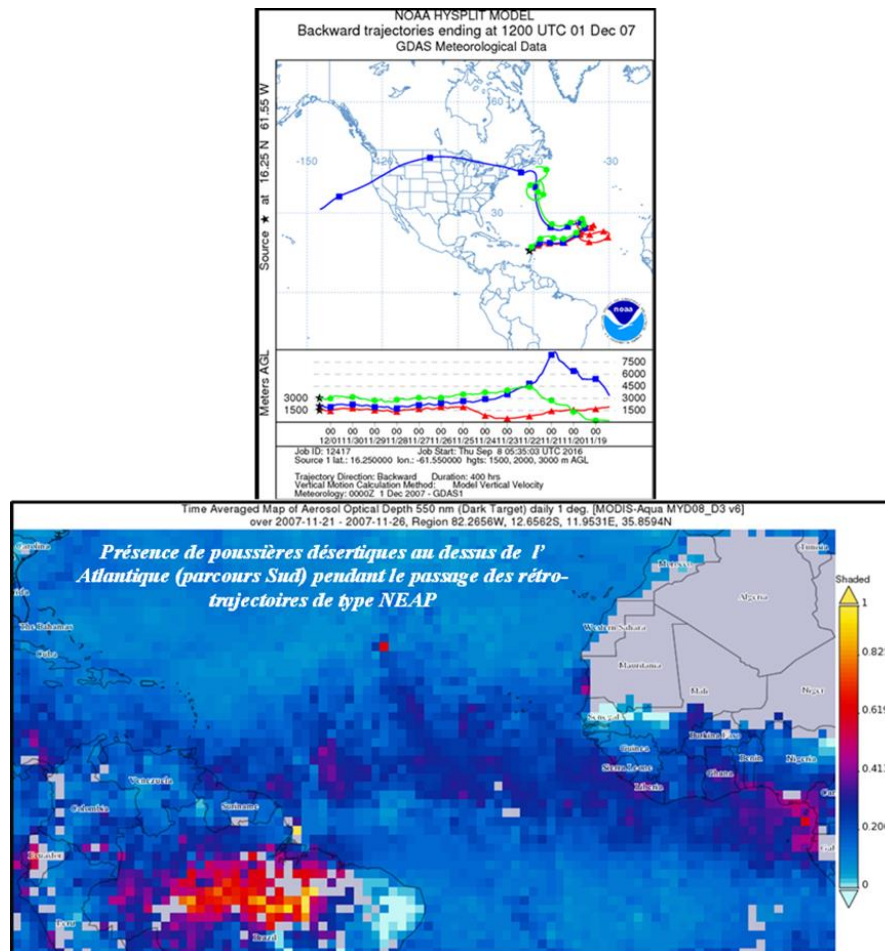


Figure 57 : Détection des aérosols minéraux au-dessus de l'Atlantique (MODIS, GIOVANNI) et rétro-trajectoires de type NEAP (HYSPLIT)

Atmosphère en transition : MA

La période de MA a particulièrement retenu notre attention. Cette dernière semble vraiment réunir les caractéristiques d'une saison de transition. Tous les types de circulations s'y retrouvent, bien que NOAP et NEAP soient les plus prépondérantes. C'est la seule saison durant laquelle les circulations SOAP et SA ont une telle importance (37% des cas pour les trois îles, 42% des cas à Porto-Rico pourtant situé au Nord de l'arc). La circulation NEAP d'origine Nord-américaine est celle qui reste marginale, toutes saisons confondues (8% des cas). Ces observations viennent corroborer les observations des études de circulations atmosphériques caribéennes récentes de Chadee and Clarke (2015) et Jury (2017) [Exemple Figure 54 : correspond à la Fig.4 (f) extraite de Jury (2017)].

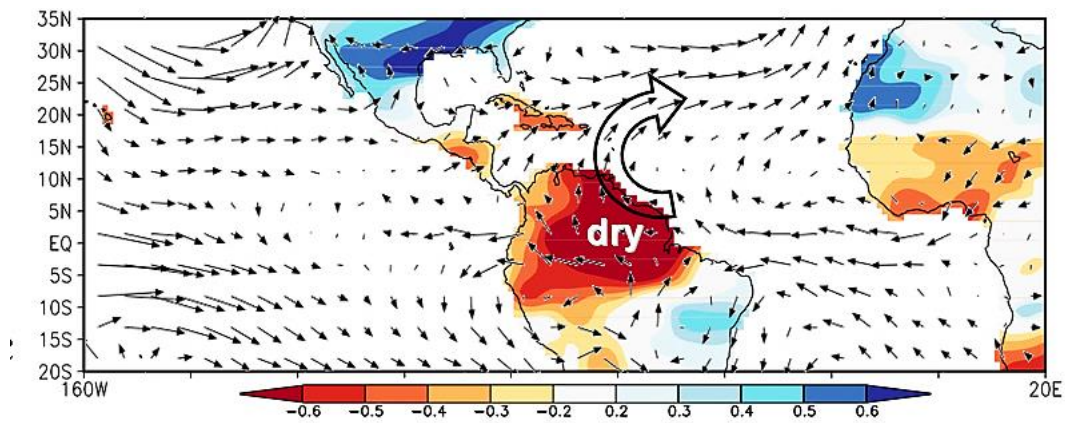


Figure 58 : Humidité du sol et vent des basses couches de 1000-850 hPa ; [Fig. 4(f) (Jury, 2017)]

Ainsi, nous avons analysé deux types de transports poussiéreux classiques : NOAP et SAOP ; déjà identifiés auparavant dans la littérature (Semmelhack, 1934 ; Schutz, 1980). Toutefois, notre étude a permis de mettre en évidence un type de parcours particulier des masses d'air poussiéreuses : NEAP. Enfin, nous n'avons pas pu établir de lien entre les rétro-trajectoires de type « Nord » et la présence de poussières désertiques dans la Caraïbe définie par des concentrations journalières $PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$. Dans l'absolu, ce faible nombre de cas (inférieur à 2%) pourrait correspondre à un événement de pollution anthropique inhabituel, ou à une pollution naturelle par des sels marins par exemple.

Ces résultats viennent également appuyer la cohérence de notre seuil de concentration PM_{10} relatif aux événements de poussières désertiques dans la Caraïbes. De plus, cette approche a permis d'enrichir notre compréhension du cycle de transport des poussières dans la Caraïbe. Au prochain chapitre, nous aborderons la caractérisation de la taille des aérosols désertiques au départ des côtes Africaines et dans la Caraïbe.

CHAPITRE 4 : CARACTERISATION DE LA TAILLE DES AEROSOLS DESERTIQUES AU DEPART DES COTES AFRICAINES ET DANS LA CARAÏBE

La première partie de ce chapitre est consacrée à l'analyse des données de répartition de la taille volumique des particules : VPSD pour « Volume Particle Size Distribution » (produit d'inversion AERONET). Ce paramètre permet d'évaluer les propriétés microphysiques des aérosols au départ des côtes Africaines et dans la Caraïbe. Le but est d'observer les effets du transport, en comparant la distribution de la taille des particules, au départ et à l'arrivée des poussières.

Dans la seconde partie, nous nous sommes intéressés au ratio $PM_{2.5}/PM_{10}$ des concentrations journalières afin de caractériser les mélanges de plusieurs types d'aérosols (désertiques, marins, biomasses). Ce ratio peut être considéré comme un indicateur du type de pollution particulaire pour la zone caribéenne.

4.1. Analyse mensuelle de la répartition volumique de la taille des particules (VPSD)

Afin de renforcer notre analyse sur la caractérisation des particules désertiques transportées de la zone Africaine vers la Caraïbe, nous avons représenté le cycle mensuel des VPSD pour tous les sites étudiés précédemment : Porto Rico, Guadeloupe et Barbade.

Les précédentes études sur le VPSD pour la zone Africaine montraient une prédominance des particules de grande taille (rayon $> 0,6 \mu m$). Les courbes de distributions laissaient apparaître deux pics traduisant deux principaux modes de répartition des tailles des particules : un mode fin (rayon $\approx 0.12 \mu m$) et un mode grossier (rayon $\approx 2 \mu m$) [Dubovik et al., 2002 ; Eck et al., 2010].

4.2. Répartition volumique de la taille des particules (VPSD) en Afrique

Les courbes de VPSD sont obtenues à partir des produits d'inversion fournis par AERONET (qualité 1.5, filtrage nuage), sur la base de 2769 et 2041 valeurs moyennes journalières pour Dakar et le Cap Vert respectivement (Figure 59).

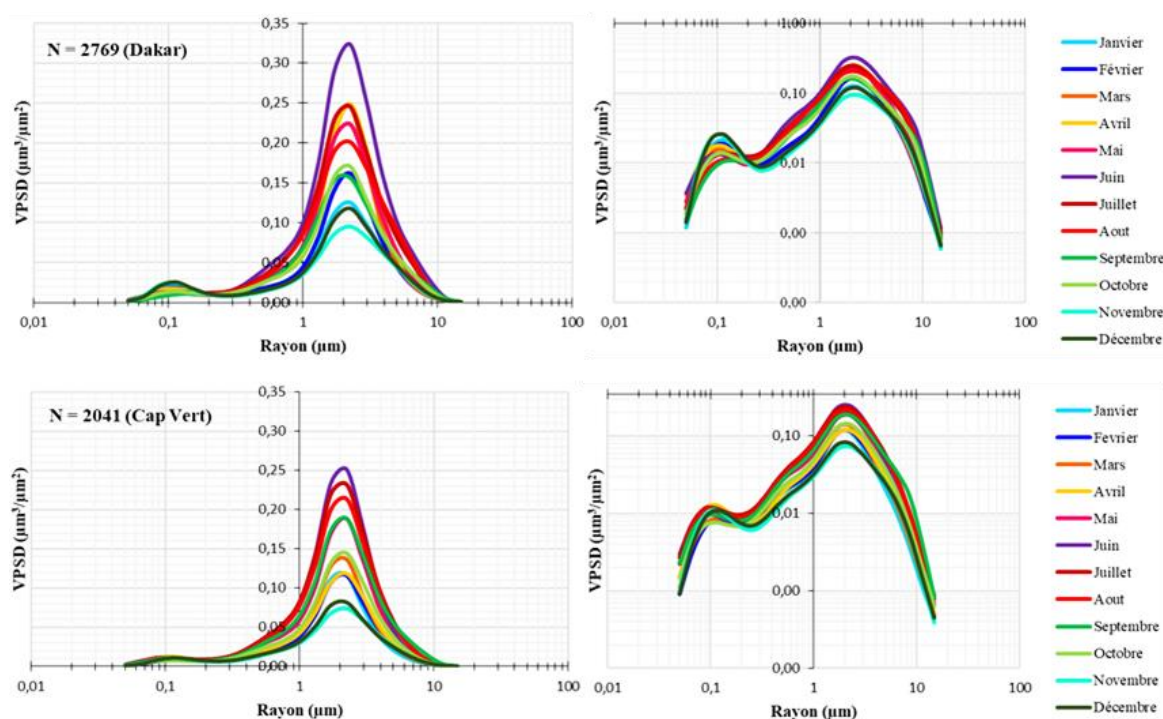


Figure 59 : Représentation des VPSD mensuelles de la zone Ouest-Africaine (Dakar et Cap Vert) pour la période de 2006 à 2016 : (gauche) distribution linéaire ; (droite) distribution logarithmique

Ces courbes montrent que la zone Africaine présente une répartition bimodale saisonnière caractérisée par deux pics de concentration : un pic maximal au rayon $\sim 2.24 \mu\text{m}$ et un faible pic au rayon $\sim 0.11 \mu\text{m}$. Ce dernier joue un rôle presque négligeable tout au long de l'année pour les deux sites et plus particulièrement pour le site du Cap Vert. La forme du cycle saisonnier du VPSD pour la zone Africaine (Dakar, Cap Vert) ne montre aucun changement significatif en termes de taille des particules au cours de l'année. Toutefois, pour les deux sites, les concentrations maximales du mode grossier semblent être influencées par les saisons. En effet, pour le site de Dakar, les concentrations des particules grossières sont maximales en Juin ($0.32 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$) et minimales de de Novembre-Décembre ($0.12 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$). Pour le site du Cap Vert, elles sont maximales en Juin ($0.25 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$) et minimales entre Novembre et Décembre ($0.07 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ et $0.08 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ respectivement).

Reid et al. (2003) se sont intéressés au mode fin (diamètres allant de 0.2 à $0.3 \mu\text{m}$) en comparant différentes méthodes d'inversions AERONET proposées par Dubovik and King (2000) et par Nakajima et al. (1996).

4.3. Répartition volumique de la taille des particules (VPSD) dans la Caraïbe

Pour la Caraïbe, les courbes du VPSD sont obtenues à partir des produits d'inversion fournis par AERONET (qualité 1.5, filtrage nuage) sur un ensemble de 1171, 1168 et 1528 valeurs moyennes journalières pour les sites respectifs de Porto Rico, Guadeloupe et Barbade (Figure 60).

Pour les trois sites de la Caraïbe, la forme de la VPSD varie selon le cycle saisonnier : les trois courbes obtenues pour les sites de Porto Rico, Guadeloupe et Barbade montrent un changement dans la taille des particules au cours de l'année. On distingue plusieurs modes grossiers et un mode fin général pour les 3 sites de l'arc.

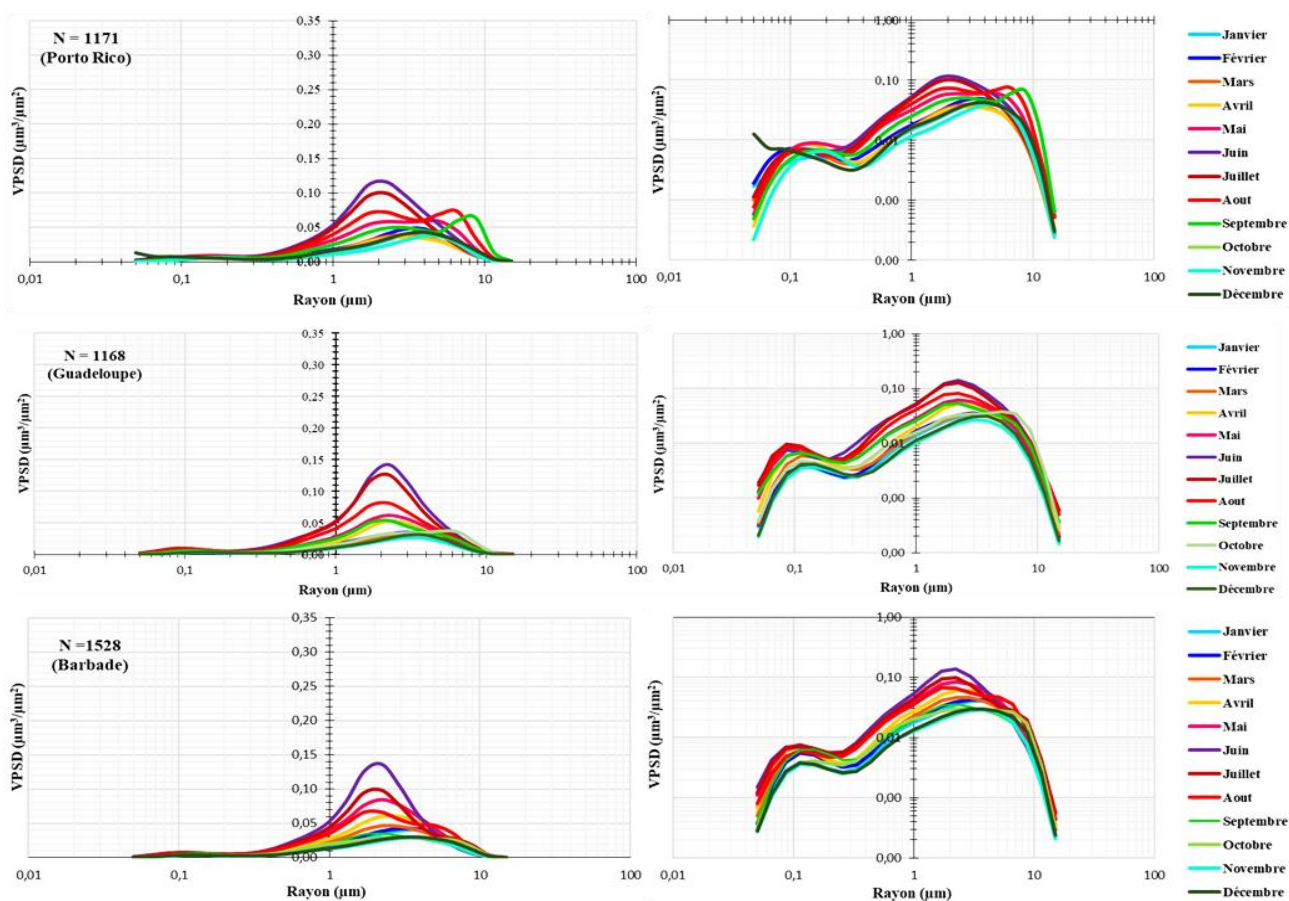


Figure 60 : Représentation des VPSD mensuelles de la zone caribéenne (Porto Rico, La Guadeloupe et la Barbade) pour la période de 2006 à 2016 : (gauche) distribution linéaire ; (droite) distribution logarithmique.

4.3.1. *Cas de Porto Rico*

- Les mois de Mai à Juillet présentent un mode grossier de rayon $\sim 2.24 \mu\text{m}$ (caractéristique des poussières désertiques), pour une concentration volumique minimale de $\sim 0.07 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ en Mai, et maximale de $\sim 0.10 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ en Juin.
- Les mois d'Octobre, Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars et Avril montrent un mode grossier de rayon $\sim 3.86 \mu\text{m}$ [caractéristique des aérosols marins : Sellegri et al. (2001)], avec une concentration minimale de $\sim 0.02 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ en Avril, et maximale de $\sim 0.04 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ en Février.
- Il apparaît d'autres modes grossiers aux mois de Mai ($\sim 5.06 \mu\text{m}$), Août ($\sim 6.64 \mu\text{m}$) et Septembre ($\sim 8.71 \mu\text{m}$) pour des concentrations maximales variant entre 0.06 et $0.08 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ [caractéristique des larges aérosols marins : Sellegri et al. (2001)]
- Le mode fin ($\sim 0.15 \mu\text{m}$) présente des concentrations de $\sim 0.01 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$.

4.3.2. *Cas de la Guadeloupe*

- D'Avril à Septembre, le principal mode grossier $\sim 2.24 \mu\text{m}$ est lié aux poussières désertiques, avec une concentration volumique minimale de $\sim 0.05 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ en Avril et le maximale de $\sim 0.14 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ en Juin.
- Les mois de Janvier, Février, Mars, Novembre et Décembre montrent un mode grossier de $\sim 3.86 \mu\text{m}$ avec une concentration de $\sim 0.03 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ (aérosols marins).
- Seul le mois d'Octobre se distingue avec un mode grossier $\sim 6.64 \mu\text{m}$ et une concentration de $0.04 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ (aérosols marins).
- Le mode fin ($\sim 0.11 \mu\text{m}$) présente une concentration de $\sim 0.01 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$, tout comme pour Porto Rico.

4.3.3. *Cas de la Barbade*

- D'Avril à Septembre le principal mode grossier est de $\sim 2.24 \mu\text{m}$ (poussières désertiques), avec une concentration volumique minimale de $\sim 0.06 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ en Avril, et maximale de $\sim 0.14 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ en Juin.
- Les mois de Janvier, Février, Mars, Novembre et Décembre montrent un mode grossier de $3.86 \mu\text{m}$ avec une concentration minimale de $\sim 0.04 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ (attribuable aux aérosols marins).
- Les mois d'Août et d'Octobre et présentent respectivement des modes grossiers de $\sim 5.06 \mu\text{m}$ et $\sim 6.64 \mu\text{m}$ avec une concentration de $0.02 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ (attribuable aux aérosols marins).

→ Le mode fin ($\sim 0.11 \mu\text{m}$) présente une concentration maximale de $\sim 0.007 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$.

D'un point de vue général, la haute saison des poussières pour l'ensemble de la Caraïbe est caractérisée par le mode grossier **2.24 μm** représenté par des pics de concentrations volumiques maximales aux mois de Juin, Juillet et Août. Les précédentes données AERONET de VSPD que nous avons traitées pour la zone Africaine montraient les mêmes caractéristiques en mode grossier à $2.24 \mu\text{m}$, avec toutefois des concentrations volumiques 2 fois supérieures, en moyenne. La période faible en poussières (Octobre à Mars) a montré des modes grossiers avec des rayons $\geq 3.86 \mu\text{m}$ (pour les trois sites de l'arc caribéen), mettant en évidence la prédominance des grandes particules qui pourraient correspondre à des aérosols marins [cet effet a été observé sur des sites côtiers (Prats et al., 2011 ; Sellegri et al., 2001)].

D'autres types d'aérosols sont également présents dans la zone Caribéenne. Le transport saisonnier des biomasses et des PDA (Polluted Dust Aerosol, mélange d'aérosols désertiques avec des biomasses) vers la Caraïbe, durant la période allant de Novembre à Mars, a été modélisé par Adams et al. (2012). Les campagne de mesure SAMUM et SALTRACE ont permis de mettre en évidence le transport saisonnier d'aérosols :

- Mélanges biomasses-poussières (en Hiver)
- Poussières désertique (en Eté)
- Les aérosols marins sont présents toute l'année mais prédominent en saison d'Hivers

Les mélanges sont caractérisés par des VPSD bimodaux marqués (*exemple : VPSD Août et Septembre de Porto Rico*).

En ce qui concerne le changement dans la taille des particules au cours du transport au-dessus de l'Atlantique, des études ont montré que le taux d'élimination des grosses particules (super-micron) était plus lent que dans les cas de sédimentation simples (Weinzierl et al., 2017). Des résultats similaires ont été obtenus sur des comparaisons entre les mesures effectuées sur les sites des îles Canaries et de Porto Rico (Maring et al., 2003). On pourrait également prendre en compte le possible vieillissement de l'aérosol désertique par condensation et/ou coagulation lors du transport.

Travaux de Publication :

L'article récent de Velasco-Merino et al. (2018) [travaux auxquels nous avons participé] présente « l'impact du transport longue distance, à travers l'océan Atlantique, sur les propriétés optiques et microphysiques de la poussière saharienne ». L'analyse de l'épaisseur optique en aérosols (AOD), de la taille des particules, de l'albédo de simple diffusion (SSA) et des indices de réfraction ont permis de caractériser le changement dans les propriétés des aérosols. Nous avons d'abord représenté les caractéristiques locales des aérosols de chaque site, puis nous avons identifié les jours présentant une connexion reliant les masses d'air d'Afrique à la Caraïbe (rétro-trajectoires). Pour la période de 1996-2014, on compte 3 174 jours (soit une moyenne de 167 jours par an) pour lesquels les masses d'air des sites de la Caraïbe sont liées à au moins l'un des deux sites d'Afrique. Pour 1 162 jours d'entre eux, les données d'AOD sont disponibles pour les sites caribéens ; puis environ 5 à 7 jours plus tôt, au passage de la masse d'air sur les sites d'Afrique (Dakar et Cap Vert). Nous avons identifié les événements de poussières par rapport aux critères d' $AOD \geq 0.2$ et d' $AE \leq 0.6$. Au total 484/1 162 jours correspondent aux critères d'épisodes de « brumes désertiques ». On observe que les valeurs d'AOD (440 nm) diminuent d'environ 0.16 jusqu'à 30% pendant le transport. Les VPSD montrent une diminution similaire de la concentration volumique, principalement en mode grossier. Le SSA, les indices de réfraction et le facteur d'asymétrie restent inchangés. La différence du rayon effectif des particules au-dessus des sites Africains par rapport aux sites caribéens, se situent entre 0 et $-0.3 \mu m$. Enfin, pour environ la moitié des cas, les particules de poussières qui sont présentes dans l'atmosphère sur l'ensemble des sites étudiés sont **non-sphériques**, bien que pour certains cas, les particules de poussières soient mélangées avec d'autres types d'aérosols.

4.4. Caractérisation des VPSD attribué aux particules des sels marins, poussières désertique, continentales, biomasses (BB pour « Biomass Burning) et mélange

Nous revenons sur la caractérisation microphysique des particules en suspension dans la zone caribéenne, abordé au premier chapitre des « résultats et discussions ». La Figure 61 montre la répartition générale des AOD en fonction des AE, en ciblant les cas correspondant aux aérosols marins, poussières, Continental/biomasses [critères basés sur les classifications décrite par Toledano et al.(2007)].

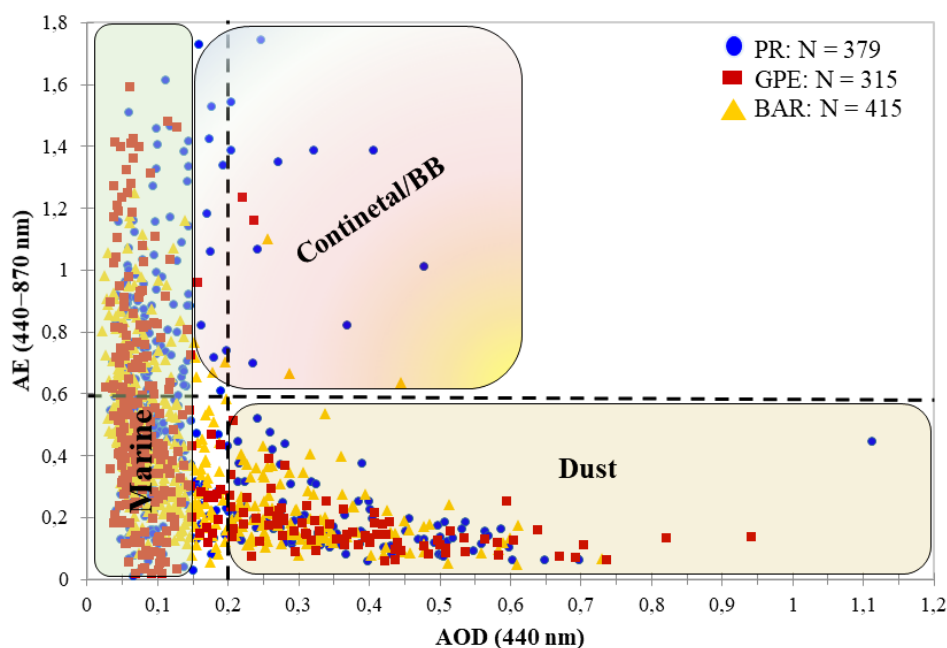


Figure 61 : Répartition des AE en fonction des AOD pour Porto Rico (PR), Guadeloupe (GPE) et Barbade (BAR) de 2006 à 2016. Le nombre de données se trouve réduit, puisque nous avons utilisé la base de données issue des travaux de Velasco-Merino et al. (2018) : amélioration de la qualité des données AERONET 1.5 : voir Burgos et al. (2016) et Mateos et al. (2014).

4.4.1. *Contribution du mode grossier désertique versus mode grossier marin à la distribution en taille globale dans la Caraïbe*

En Figure 62, nous avons représenté la distribution en taille des cas journaliers répondant aux critères optiques d'aérosols marins ($AOD \leq 0.15$ et $AE < 2$) et désertiques ($AOD \geq 0.2$ et $AE \leq 0.6$) .

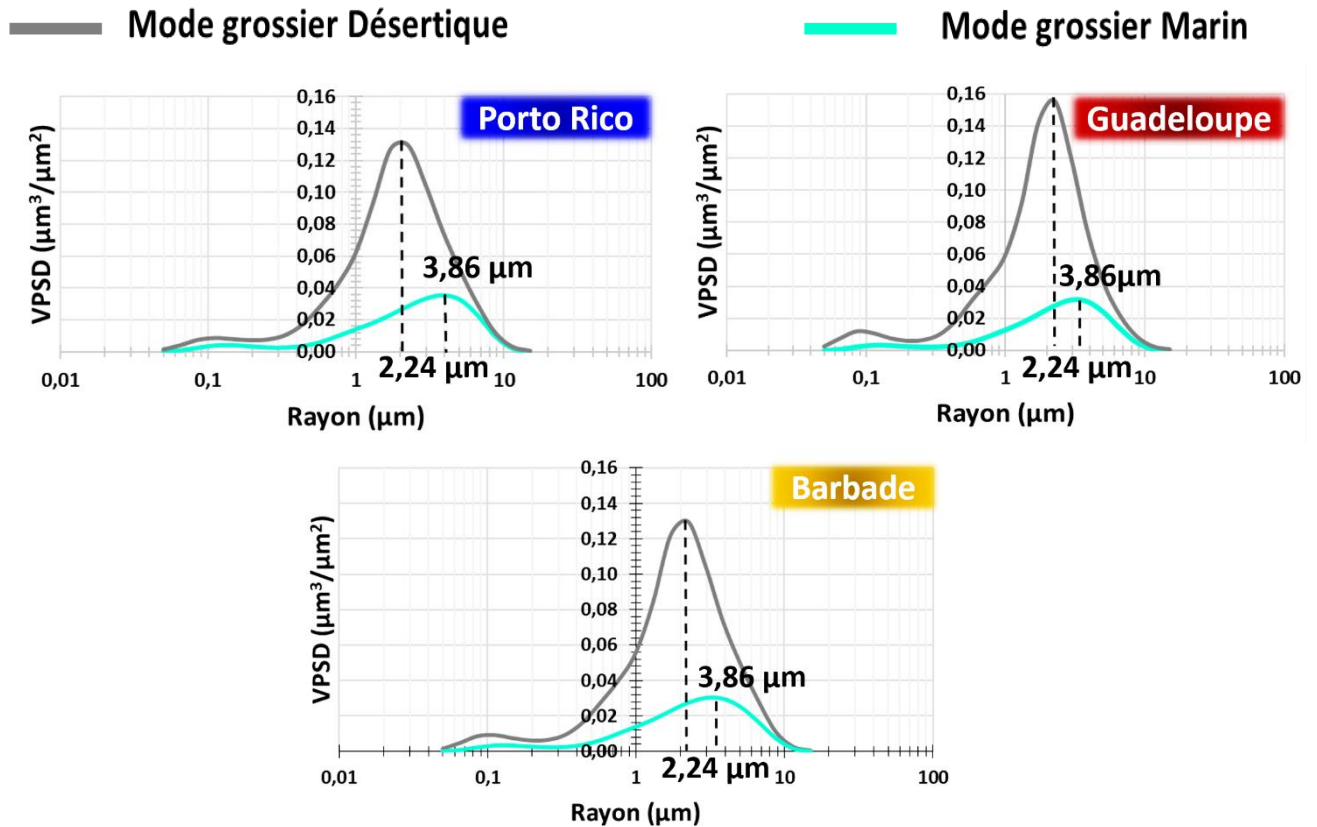


Figure 62 : VPSD moyen des Modes grossiers désertique versus marin

Mode aérosols désertiques :

On remarque tout de suite la forme de distribution bimodale caractéristique des aérosols désertiques, avec un léger pic en mode fin et un pic marqué en mode grossier au rayon 2.24 μm . Les courbes des 3 îles sont analogues, néanmoins la Guadeloupe affiche le pic de concentration maximale avec $\sim 0.16 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$; Barbade et Porto Rico ont des concentrations autour de $\sim 0.13 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$. On retrouve la même illustration (VPSD) pour les mois de haute saison des poussières : Mai à Août. Ce qui confirme la prédominance des particules de poussières désertique dans la colonne atmosphérique à cette période de l'année.

Mode aérosols marins :

On constate que les courbes attribuées aux aérosols marins présentent généralement un mode unimodale avec un pic de concentration maximale au rayon 3.86 μm . Comparé à la courbe des aérosols désertiques, le pic de concentration est plus atténué, ce qui implique que la gamme de taille des aérosols marins est plus large que celle des poussières minérales (supermicronique) dans la Caraïbe. On ne distingue pas de différence de concentration entre les îles : maximum de $\sim 0.03 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$.

Ainsi, ces résultats viennent appuyer nos observations vis-à-vis de l'interprétation du comportement saisonnier des VPSD traités dans la section précédente. On voit clairement que les particules de sel marins et désertiques sont les aérosols les plus actifs de la zone caribéenne.

4.4.2. VPSD : aérosols continental, biomasses, mélange

Nous avons également mis en évidence quelques cas de mélanges d'aérosols. Ces cas ont été sélectionnés selon les propriétés optiques suivantes : $AOD \geq 0.15$ et $AE \geq 0.6$ [mélange d'aérosols, voir classification de Toledano et al. (2007)].

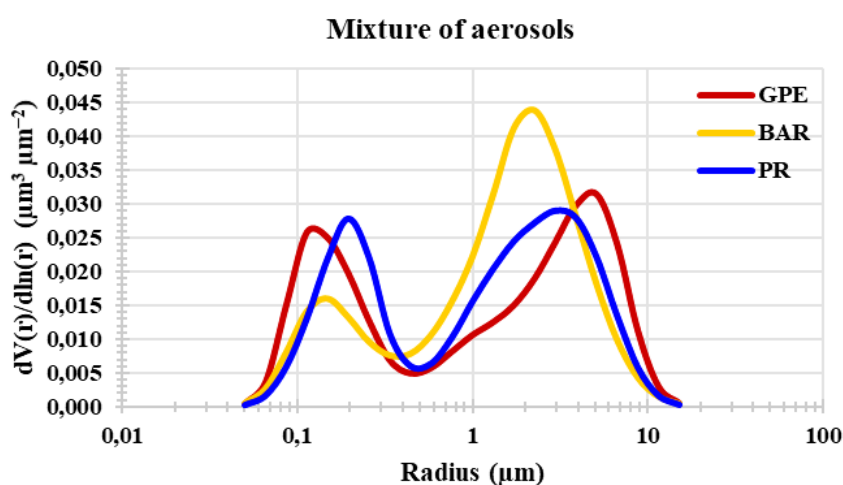


Figure 63 : VPSD moyen des cas associés aux critères optiques : $AOD \geq 0.15$ et $AE \geq 0.6$.

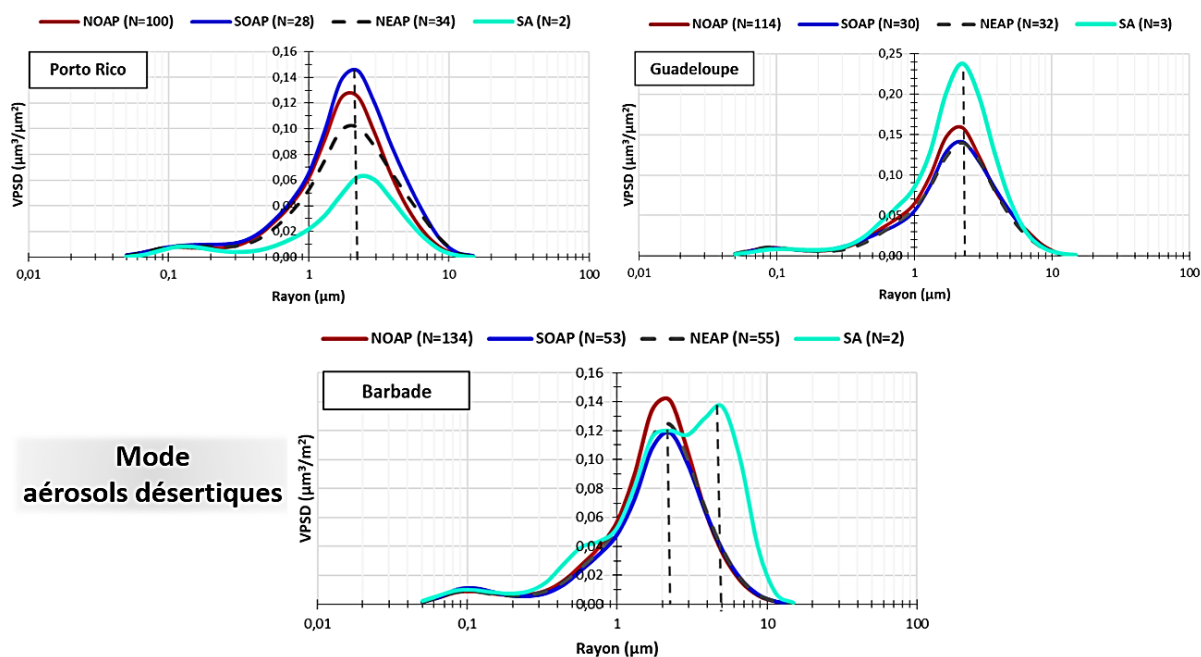
D'après la Figure 63, les cas potentiels d'aérosols «Continental/Biomasses» montrent une distribution bimodale significative en mode grossier et fin, surtout pour le Porto Rico et Guadeloupe, ce qui pourrait refléter un mélange d'aérosols [voir Dubovik et al. (2001) ; Roman et al. (2018)]. La courbe de Barbade affiche une concentration maximale pour le rayon 2,24 μm , principalement associée aux particules de poussières minérales ; tandis que Guadeloupe et Porto Rico présentent des pics de concentration maximale à 5,06 μm et 3,86 μm respectivement, ceci soulignant la prédominance des particules grossières d'aérosols marins.

Les concentrations en mode grossier sont respectivement de $0,032 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ et $0,028 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ pour Porto Rico et Guadeloupe ; elles atteignent le maximum de $0,044 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ pour Barbade. Les concentrations liées au mode fin (intervalle de rayon compris entre 0,15 μm et 0,19 μm) varient du minimum de $0,022 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ (Barbade) au maximum de $0,028 \mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}$ (Porto Rico).

Soulignons tout de même que l'échantillon statistique de ces données n'est pas suffisant (31 cas en tout, soit moins de 3% de l'ensemble des cas) pour en tirer un comportement standard.

En définitive, concernant les aérosols désertiques, le mode grossier dominant présente une forme pratiquement monomodale avec une concentration maximale à environ 2 μm . Les conditions atmosphériques générales sont définies la prévalence du mode grossier dû à l'influence des aérosols marins (rayon $\geq 3 \mu\text{m}$). Il est également intéressant de souligner que la distribution bimodale des modes grossier et fin, pourrait refléter les PDA mentionnées par Adams et al. (2012), ou encore la présence de biomasses (Jury, 2017).

4.4.3. *Impact de la provenance des poussières et de leur temps de trajet sur la distribution en taille globale (VPSD)*



Rappel : NOAP et NEAP (6-7 jours) ; SOAP et SA (10-12 jours)

46

Figure 64 : VPSD moyen associée aux jours poussiéreux ($\text{PM}_{10} \geq 35 \mu\text{g m}^{-3}$)

Lorsqu'on analyse les VPSD reliés au types de transport que nous avons étudié au troisième chapitre des « résultats et discussions », on s'aperçoit que le principal impact du transport réside dans l'effet de dilution (Figure 64). C'est-à-dire que seule la concentration semble varier en fonction du parcours emprunté par les masses d'air poussiéreuses.

Les cas SA (cas isolés : $N = 7$ en tout) présentent tout de même certaine particularité incluant l'influence supposée des aérosols marins.

En termes de concentrations, les cas NEAP et SOAP montrent des courbes très proches pour Barbade et Guadeloupe, et les valeurs maximales sont attribuées au cas NOAP. La tendance est différente pour Porto Rico, où les valeurs de concentration décroient selon les parcours SOAP, NOAP et NEAP.

Les observations en Guadeloupe et Barbade, sont cohérentes avec le fait que le parcours NOAP soit plus direct, donc ce dernier présenterait potentiellement une concentration plus élevée de particules désertiques. Cependant, cela ne se vérifie pas pour Porto Rico, qui rappelons le, est impacté par des flux de circulation particuliers, notamment à la saison du Printemps. Cet axe d'étude mérite d'être approfondi.

4.5. Etude de la relation entre PM10 et PM2.5

En première étape, nous avons cherché à estimer la part des PM2.5 (particules de diamètre inférieur à 2.5 μm) dans les PM10 (particules de diamètre inférieur à 10 μm) pour caractériser la nature des événements de pollution particuliers survenu dans la Caraïbe ces dix dernières années. La finalité de ce développement, est que nous avons su déceler un comportement particulier mis en évidence par les données de mesure d'empoussièrement à la surface et ensuite le recoller aux observations de détection satellitaires.

4.6. PM2.5 versus PM10

La part de PM2.5 dans les particules de poussières désertiques est généralement faible, néanmoins, elle n'est pas nulle (Petit et al., 2005 ; Institut de veille sanitaire, 2015). En effet, les PM2.5 sont davantage reliées à la pollution locale (particules plus fines). Afin d'analyser l'interaction des particules d'origines désertiques et anthropiques, nous avons effectué les régressions linéaires entre les concentrations journalières de PM2.5 et celles de PM10 pour les îles de Porto Rico et de la Guadeloupe, puis nous avons déterminé leurs coefficients de corrélation. Cette étude n'inclue pas la Barbade, qui ne dispose pas de mesure de PM10 et PM2.5. La Martinique a également été exclue, car, contrairement à Porto Rico (stations urbaines de San Juan) et à la Guadeloupe [stations urbaines de Pointe-à-Pitre (PM10) et de Baie-Mahault (PM10 et PM2.5) distantes de moins de 9 km], elle ne possédait pas une base de données de PM2.5 suffisamment conséquente pour être exploitée. Nous avons sélectionné, 629 données pour Porto Rico sur une période allant de 2006 à 20014, et 1736 données pour la Guadeloupe sur une période s'étendant de 2006 à 2012.

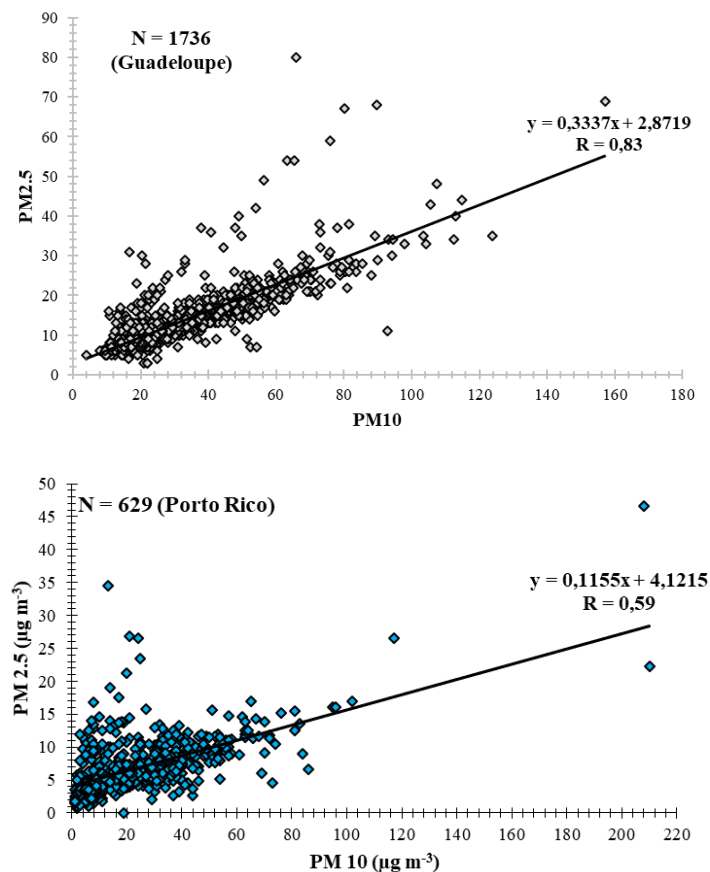


Figure 65 : Concentrations journalières moyennes des PM2.5 en fonction des concentrations journalières moyennes des PM10 pour les sites de Porto Rico (stations urbaines de San Juan) et de la Guadeloupe [stations urbaines de Pointe-à-Pitre (PM10) et Baie-Mahault (PM10 et PM2.5)].

Les régressions linéaires obtenues pour les deux îles (Porto Rico et Guadeloupe) sont présentées en Figure 65. On trouve un coefficient de corrélation $R = 0.59$ avec une pente de 0.116 pour Porto Rico ; et un coefficient de corrélation $R = 0.85$ avec une pente de 0.334 pour la Guadeloupe. Dans le cas de Porto Rico, le coefficient de corrélation est relativement moyen, ce qui indique que les concentrations de PM10 et celles de PM2.5 sont moyennement corrélées. En tenant compte du fait que la ville de San Juan (Porto Rico) est beaucoup plus développée sur le plan industriel que Pointe-à-Pitre et Baie-Mahault (Guadeloupe), et donc davantage soumise aux particules fines (PM2.5). La régression obtenue pour Porto Rico aurait dû montrer une pente plus marquée que celle obtenue pour la Guadeloupe. Toutefois, en zone urbaine, les aérosols peuvent être impactés par la redistribution dans les basses couches atmosphériques, des particules grossières provenant des poussières de route et des constructions de bâtiment (Evangelopoulos et al., 2006). Dans de tels cas, les concentrations de PM2.5 s'amoindrissent par rapport à celles de PM10. On peut donc en conclure que les PM2.5 du site de Porto Rico demeurent plus fortement impacté par les pollutions d'origine anthropique que par les transports de poussières désertiques (mode grossier) provenant du Sahara.

Dans le cas de la Guadeloupe, le coefficient de corrélation élevé (0.85) indique que les PM10 et PM2.5 sont généralement issues du même type de pollution. Toutefois, les régressions linéaires pour nos deux sites d'étude semblent montrer deux allures de variation des PM2.5 en fonction des PM10. Nous approfondirons par la suite ce comportement particulier.

4.7. Ratio PM2.5/PM10

Le ratio PM2.5/PM10 est un indicateur permettant la caractérisation de la pollution d'une région et l'évaluation de son impact sanitaire (Querol et al., 2001 ; Koçak et al., 2007 ; Zapata et al., 2016). En effet, plus la part de PM2.5 est importante (ratio élevé), plus le risque pour la santé humaine est important. Nous avons représenté le cycle de variation mensuel des ratio PM2.5/PM10 à Porto Rico (de 2006 à 2014) et en Guadeloupe (de 2006 à 2012) en Figure 66.

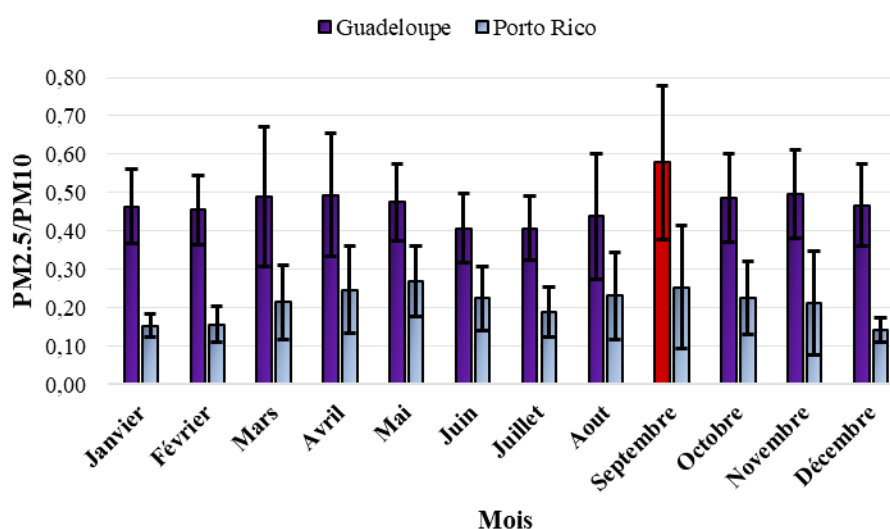


Figure 66 : Cycle mensuel du ratio PM2.5/PM10 à Porto Rico (2006-2014) et en Guadeloupe (2006-2012)

La Figure 66 présente des niveaux de ratio PM2.5/PM10 significativement supérieurs en Guadeloupe (soit 2 fois plus élevés qu'à Porto Rico). Les valeurs minimales, ~ 0.4 en Guadeloupe et ~ 0.2 à Porto Rico, correspondent à la période où l'influence des événements de poussières est maximale (Juin et Juillet). Cette diminution s'explique par le caractère grossier des particules désertiques, c'est-à-dire que la part liée aux PM10 dominant par rapport aux PM2.5. En dehors de la haute saison des poussières, les ratios sont généralement plus élevés et les valeurs moyennes maximales atteignent près de 0.58 ± 0.20 en Septembre (en Guadeloupe) et près de 0.27 ± 0.10 en Mai (à Porto Rico). Soulignons également que l'ensemble de ces

fluctuations mensuelles sont analogues au cycle saisonnier des AE (taille des particules) présenté antérieurement (voir Figure 34). Parallèlement, il est à noter que pour la Caraïbe les mois de Septembre et d'Octobre sont marqués par de fortes pluies (Anthony Chen and Taylor, 2002). Ces pluies ont la particularité de limiter la suspension des particules de poussière en mode grossier (PM10) et favorisent l'accroissement des ratios PM2.5/PM10. D'ailleurs, c'est pour le mois de Septembre qu'en Guadeloupe le ratio PM2.5/PM10 atteint leur valeur extrême (0.41).

Ces résultats montrent que les îles de Guadeloupe et Porto Rico ne sont pas soumises aux mêmes types de pollution anthropiques, ou plus précisément aux mêmes taux de présence de particules fines mesurées dans les basses couches.

4.8. PM2.5 versus PM10 et ratio PM2.5/PM10

Afin d'affiner notre analyse, nous avons mis en relation les PM2.5, les PM10 et le ratio PM2.5/PM10, en classant l'ensemble des jours, selon la valeur du ratio PM2.5/PM10. Une récente étude menée à l'observatoire d'Izaña, situé à Ténérife, ont permis d'identifier la composition des aérosols (au travers des PM10 et PM2.5) transportés par les vents d'Ouest chargés de particules de poussières sahariennes (García et al., 2017). Les résultats ont montré que les flux poussiéreux de la SAL (Saharan Air Layer) étaient caractérisés par une valeur de ratio PM2.5/PM10 compris entre environ 0.4 et 0.5 [consultables dans la Tab.1 de García et al. (2017)]. En se basant sur les résultats des études effectuées en Méditerranée (Mustafa Koçak, 2007 ; Evagelopoulos et al., 2006) et en Asie (Xu et al., 2017), portant sur l'impact des émissions de particules fines dans les zones fortement industrialisées et isolées, nous avons considéré deux familles de ratio :

- Groupe A caractérisé par des **ratios** < 0.6 : correspondant à des cas de poussières désertiques classiques
- Groupe B caractérisé par des **ratios** ≥ 0.6 : correspondant à un autre type de pollution, probablement d'origine anthropique.

A partir des données de la Figure 65, nous avons identifié les données appartenant aux groupes A et B dans la représentation des PM2.5 par rapport aux PM10 et tracé les régressions linéaires PM2.5 versus PM10 afin de déterminer les corrélations entre les deux modes de particules en suspension, ceci pour chacun des groupes A et B (Figure 67).

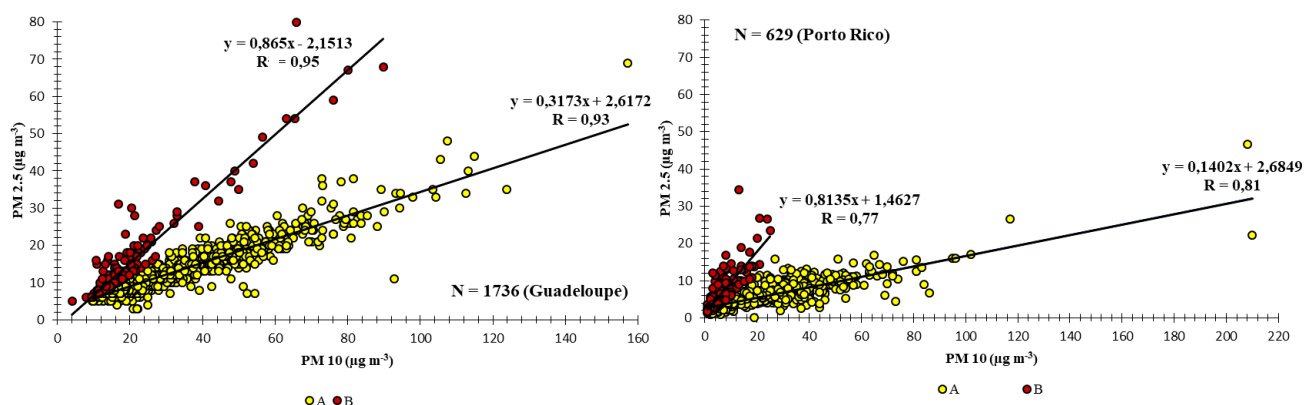


Figure 67 : Régressions linéaires des concentrations journalières moyennes de PM2.5 et de PM10 pour Porto Rico (à gauche) et la Guadeloupe (à droite), selon deux types de pollution (groupe A avec un ratio < 0.6 et groupe B avec un ratio ≥ 0.6) ; https://presentations.copernicus.org/EMS2017-866_presentation.pdf)

La figure 67 montre qu'en distinguant deux types de pollution selon le ratio $PM_{2.5}/PM_{10} \geq 0.6$, les corrélations entre les concentrations journalières moyennes des particules fines et celles des particules grossières sont significativement améliorées. Dans le cas de Porto Rico, la part de PM2.5 dans les PM10 liée aux poussières désertiques est comprise entre 0.10 et 0.15 avec un coefficient de corrélation $R = 0.81$, alors que celle liée aux pollutions d'origines anthropiques est comprise entre 0.80 et 0.82 ($R = 0.77$). Dans le cas de la Guadeloupe, la part de PM2.5 dans les PM10 liées aux poussières désertiques est comprise entre 0.30 et 0.32, avec un coefficient de corrélation $R = 0.93$, alors que celle liée aux pollutions d'origines anthropiques est comprise entre 0.85 et 0.87 ($R = 0.95$).

De manière générale, la classification des données en fonction des groupes A et B a permis de faire apparaître les deux tendances observées précédemment en Figure 65. On distingue alors deux comportements particuliers :

- Pour Porto Rico, les cas appartenant au groupe B (18.2 % des 629 données) ne semblent pas être liés aux événements de poussières désertiques puisque la globalité d'entre eux sont associés à des concentrations journalières de PM10 inférieures à $22 \mu g m^{-3}$ (« atmosphère de fond »).
- En Guadeloupe, la majorité des cas liés au groupe B (11.8 % des 1736 données) se situent dans les gammes des concentrations journalières de PM10 inférieures à $22 \mu g m^{-3}$. Néanmoins, 1/5 des valeurs correspondent à de fortes concentrations de PM10 (attribuées aux poussières désertiques). La seconde particularité de ces cas est que la plupart se sont produits à la même période, en Septembre 2006.

Nos investigations se sont donc portées sur les cas du groupe B de la Guadeloupe. Dans un premier temps nous avons vérifié la fiabilité des données de cette période. Puis nos recherches se sont tournées vers les données satellitaires. Ces dernières ont montré qu'au mois de Septembre 2006 la zone de la Caraïbe avait été impactée par un mélange d'aérosols minéraux (poussières désertiques) et organiques (issue des brulis de l'Afrique du Sud) comme on peut le voir sur la Figure 68 [animation de simulation de transport d'aérosol avec GEOS-5 par William Putman and Arlindo da Silva (February 2013)]. Ce type de mélange est communément appelé Polluted Dust Aérosols (PDA) (Mielonen et al., 2009 ; Adams et al., 2012).

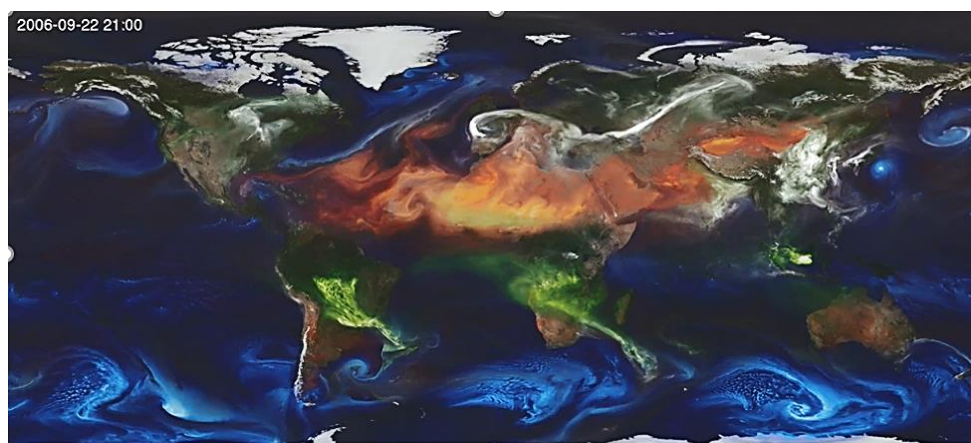


Figure 68 : Illustration par image satellite de l'épaisseur optique en aérosols : brulis représentés par les aérosols organiques (vert), aérosols désertiques (rouge-orange) et sel marin (bleu) [simulation de transport d'aérosol avec GEOS-5 (résolution 10 Km) par William Putman and Arlindo da Silva (Février 2013) ; https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/aerosol/modeling/nr1_movie/)

Ainsi les ratios de PM_{2.5}/PM₁₀ supérieurs à 0.6 pourraient être attribuables aux PDA pour la région de la Guadeloupe. Toutefois, le manque de données de PM_{2.5} ne nous permet pas de vérifier s'il s'agit d'un cas isolé ou récurrent sur plusieurs années à la même période.

Nous avons poussé notre analyse sur les ratios PM2.5/PM10 en réitérant cette étude pour les ratios suivants (Figure 69) :

- Groupe A caractérisé par des ratios < 0.4 : correspondant à des cas de poussières désertiques classiques.
- Groupe B caractérisé par des $0.4 \leq \text{ratios} < 0.6$: correspondant aux poussières désertique potentiellement associées aux particules de sel marins.
- Groupe C caractérisé par des $0.6 \leq \text{ratios} < 0.8$: correspondant à des cas particuliers de mélange de poussières désertiques-biomasses.
- Groupe D caractérisé par des ratios ≥ 0.8 : correspondant à des cas particuliers de mélange de poussières désertiques-biomasses.

Ces résultats ont été présentés au European Meteorological Society 2017 (EMS 2017) (https://presentations.copernicus.org/EMS2017-866_presentation.pdf).

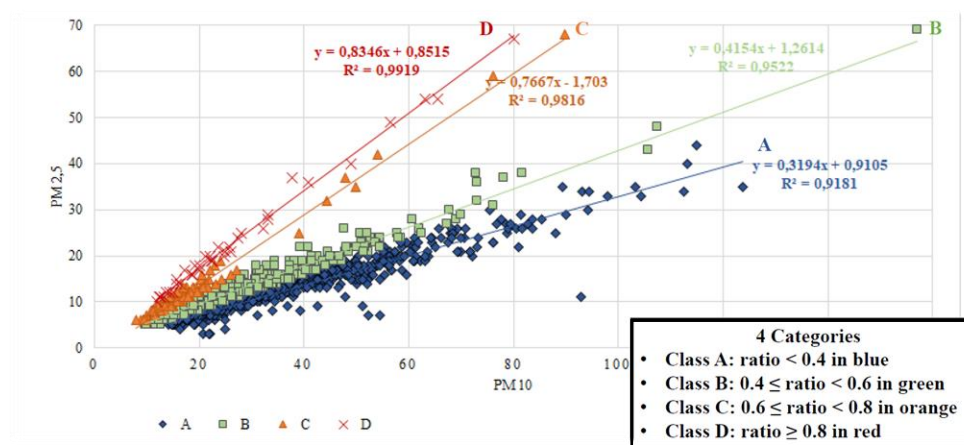


Figure 69 : Régressions linéaires des concentrations journalières moyennes de PM2.5 versus PM10 pour la Guadeloupe

CHAPITRE 5 : STRATIFICATION VERTICALE DE L'ATMOSPHERE LORS D'EPISODES DE POUSSIÈRES

Les résultats de notre étude climatologique sur le phénomène de pollution liés aux brumes désertiques dans l'arc des Petites Antilles, ont montré que le transport des poussières était effectif tout au long de l'année, avec une fréquence accrue durant la période de l'Été et le début d'Automne (période MJJA et SO). Ces flux d'air poussiéreux d'origine saharienne sont impulsés vers l'Ouest au-dessus de la zone tropicale Atlantique. Les masses d'air chargées d'aérosols minéraux parcourent plus de 4 000 km avant d'atteindre les îles de l'arc antillais, tels que la Guadeloupe et Porto Rico. Cette traversée au-dessus de l'océan influence donc très probablement leurs propriétés thermodynamiques (température, rapport de mélange). C'est précisément sur cet aspect que porte notre étude : à savoir quelle est la stratification atmosphérique verticale associée aux événements poussiéreux mesurés au sol ? Une autre caractéristique importante de la SAL est sa rotation anticyclonique et ses vents forts généralement maximaux autour de 650 hPa. Ces derniers sont favorisés par le fort contraste de température entre le flux saharien et les masses d'air environnantes (Carlson and Prospero, 1972).

La représentation de la structure verticale atmosphérique de la zone tropicale caribéenne a débuté en 1946, avec l'étude des cyclones tropicaux (Schacht, 1946). Elle a ensuite été complétée par Jordan (1958), qui a présenté les profils mensuels de température et d'humidité faisant apparaître les variations saisonnières de la configuration thermodynamique de la région caribéenne. Il apparaît que le cycle saisonnier des poussières désertiques dans les Petites Antilles, correspond à une modification de la structure verticale de l'atmosphère.

Carlson et Prospero (1972) ont été les pionniers de la caractérisation thermodynamique de la Saharan Air Layer (SAL), masse d'air sec transportant les aérosols minéraux au-dessus de l'Atlantique Nord. Pour définir la configuration atmosphérique du phénomène de brumes désertiques dans la zone tropicale Atlantique, ils ont analysé les valeurs de concentration en Radon-222. Ainsi, ils se sont servis des concentrations de Radon-222 mesurées à bord de l'avion DC-6 RFF au cours de la campagne de mesure BOMEX (Mai 1969 à Juillet 1970) comme indicateur de présence des amas poussiéreux lors de vols effectués entre la côte Africaine et la Barbade. Ensuite, ils ont analysé les sondages (radiosondages effectués à la Barbade pendant les vols de la campagne BOMEX) liés à ces épisodes poussiéreux. Ils ont abouti à la caractérisation de la Saharan Air Layer (SAL) en établissant les profils de variation

de température, d'humidité (rapport de mélange et humidité relative), de vents (intensité et direction) en fonction de l'altitude. La Figure 70 illustre les caractéristiques de la SAL telle que définie par Carlson et Prospero en 1972.

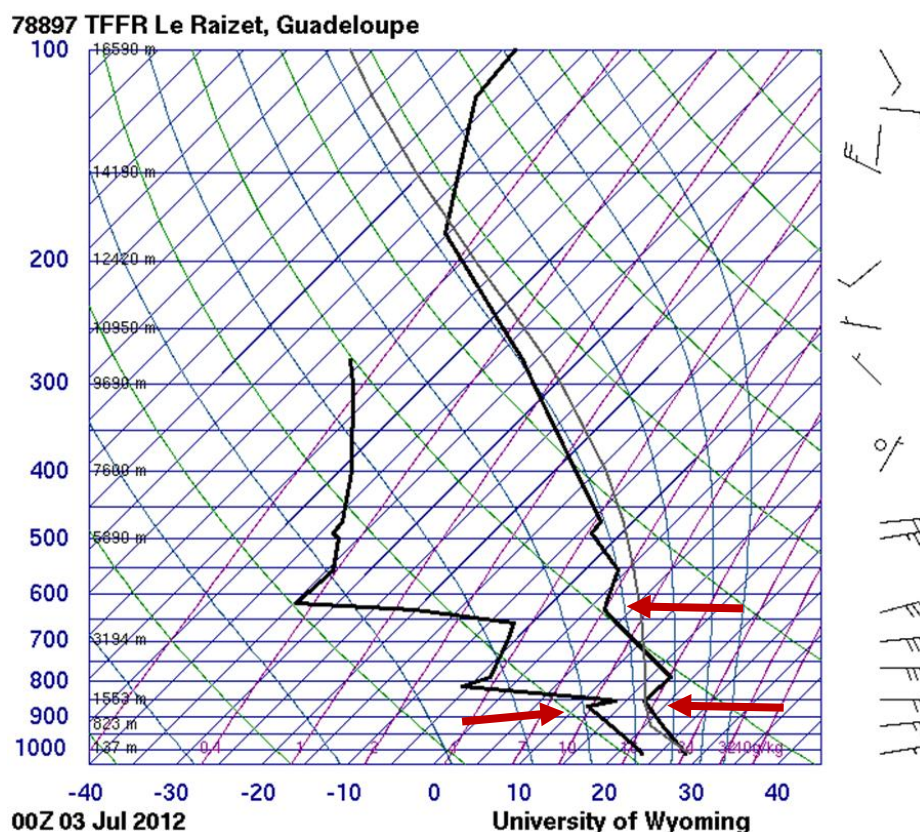


Figure 70 : Radiosondage du 3 Juillet 2012 mesuré à la station du Raizet (code :78897, Guadeloupe)

Cette Figure 70 présente un exemple de radiosondage lié à un événement poussiéreux (PM_{10} journalier = $60.33 \mu\text{g m}^{-3}$) qui s'est produit en Guadeloupe le 3 Juillet 2012. L'inversion de température (courbe de température à droite) qui délimite la base de la SAL se situe à 1 553 m d'altitude (~ 850 hPa), et on remarque simultanément le dessèchement brutal de la couche atmosphérique (courbe d'humidité à gauche) caractérisant la base de SAL. La seconde inversion de température autour de 3 500 m (~ 650 hPa) marque le sommet de la SAL. On distingue également des vents d'Est soutenus ($\sim 15 \text{ m s}^{-1}$, symboles tout à droite) qui accompagnent la SAL entre les niveaux 750 à 650 hPa.

Plus récemment, Dunion (2010) a établi des profils standards de température, d'humidité et de vent pour la SAL. L'approche employée par Dunion (2010), a reposée essentiellement sur la détection satellite pour différencier les différents types de masses d'air (SAL, MLDAI, MT) propres à la zone caribéenne. Il a ensuite proposé des profils atmosphériques moyens pour

chaque type de masse d'air. Son étude concerne la période cyclonique (Juillet à Octobre) entre 1992 à 2002.

En partant de l'hypothèse établie, que le transport des poussières s'effectue uniquement au travers de la SAL, la présence d'aérosols minéraux dans l'atmosphère sous-entend une structuration thermodynamique de l'air dénotant l'existence de cette dernière. Dans le cadre de notre étude sur la configuration thermodynamique en présence de « brumes de désertiques » dans la Caraïbe, nous proposons une nouvelle approche basée sur la climatologie des épisodes de poussières établie à partir du seuil que nous avons proposé : concentration journalière en $PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$. L'originalité de notre étude, consiste à analyser les profils standard de température et d'humidité en nous basant sur les jours poussiéreux entre 2006 et 2016. L'avantage d'utiliser des données obtenues à partir de mesures in situ, permet de prendre en compte des évènements que la détection satellitaire pourrait omettre, particulièrement dans le contexte régional des îles de la Caraïbe. En effet, certaines observations fournies par les instruments embarqués sur les satellites peuvent fournir des mesures qui s'éloignent des valeurs réelles, et présentent un caractère assez aléatoire.

De plus, la stratification verticale de l'atmosphère caribéenne est présentée pour le Nord et le centre de l'arc antillais. Cette nouvelle approche permettra d'affiner la représentation atmosphérique préétablie. Nos investigations se portent uniquement sur les profils verticaux de température et d'humidité liés à une atmosphère poussiéreuse pour les sites de Porto Rico et Guadeloupe de 2006 à 2016. Nous précisons que nous ne nous attarderons pas sur le commentaire des profils types en ce qui concerne la direction et la vitesse du vent pour les évènements poussiéreux à cause des variations conséquentes des données mis en évidence par les valeurs importantes d'écarts types associés aux valeurs moyennées pour notre période d'étude. Ainsi, nous ne pouvons clairement affirmer que les profils établis par ces données, soient représentatifs du comportement moyen du vent.

Au cours de ce chapitre, nous comparons nos profils à celui de de la SAL (Dunion and Marron, 2008) afin d'étayer la discussion. Comme pour la représentation de la SAL de Dunion and Marron (2008), nos profils sont moyennés exclusivement pour les altitudes de pression standard : 1000, 925, 850, 700, 500, 400 et 300 hPa (nous nous sommes limités à 300 hPa pour le niveau le plus haut).

5.1. Profils de température associés aux jours poussiéreux dans la Caraïbe

Pour rappel, Dunion and Marron (2008) ont proposé un profil de température de la SAL propre à la région caribéenne. Ce profil correspond à la moyenne des sondages journaliers des stations de Miami, Grand Cayman, Porto Rico et Guadeloupe, associés aux jours où la présence de la SAL était établie [méthode de détection satellitaire présentés dans (Dunion & Velden, 2004)]. Ces travaux concernent uniquement la saison cyclonique (Juillet à Octobre) de 1995 à 2002 (Dunion & Marron, 2008).

En se basant sur notre description d'évènements de brumes désertiques dans la Caraïbe, nous proposons de tracer le profil de température des Jours Poussiéreux (JP), présentant une concentration journalière de $PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$, et non-poussiéreux (JNP) liés à une concentration journalière $PM_{10} < 28 \mu g m^{-3}$. Cette étude s'applique uniquement aux îles des Petites Antilles pourvues de mesures de concentration de PM_{10} et de sondages, c'est-à-dire Porto Rico et Guadeloupe.

Nous estimons que la description de la stratification verticale thermique est plus pertinente lorsqu'elle est déclinée en fonction du cycle des saisons d'Hivernage et du Carême, variations saisonnières atmosphériques propre à la zone caribéenne ; d'autant plus que les évènements de brumes désertiques se produisent tout au long de l'année (à des fréquences différentes).

Ainsi, nous avons comparé le profil de température de la SAL de Dunion and Marron (2008) [saison cyclonique, 1992-2002] aux courbes de température des JP et JNP en fonction des saisons de poussières NDJF, MA, MJJA, SO (Figure 71).

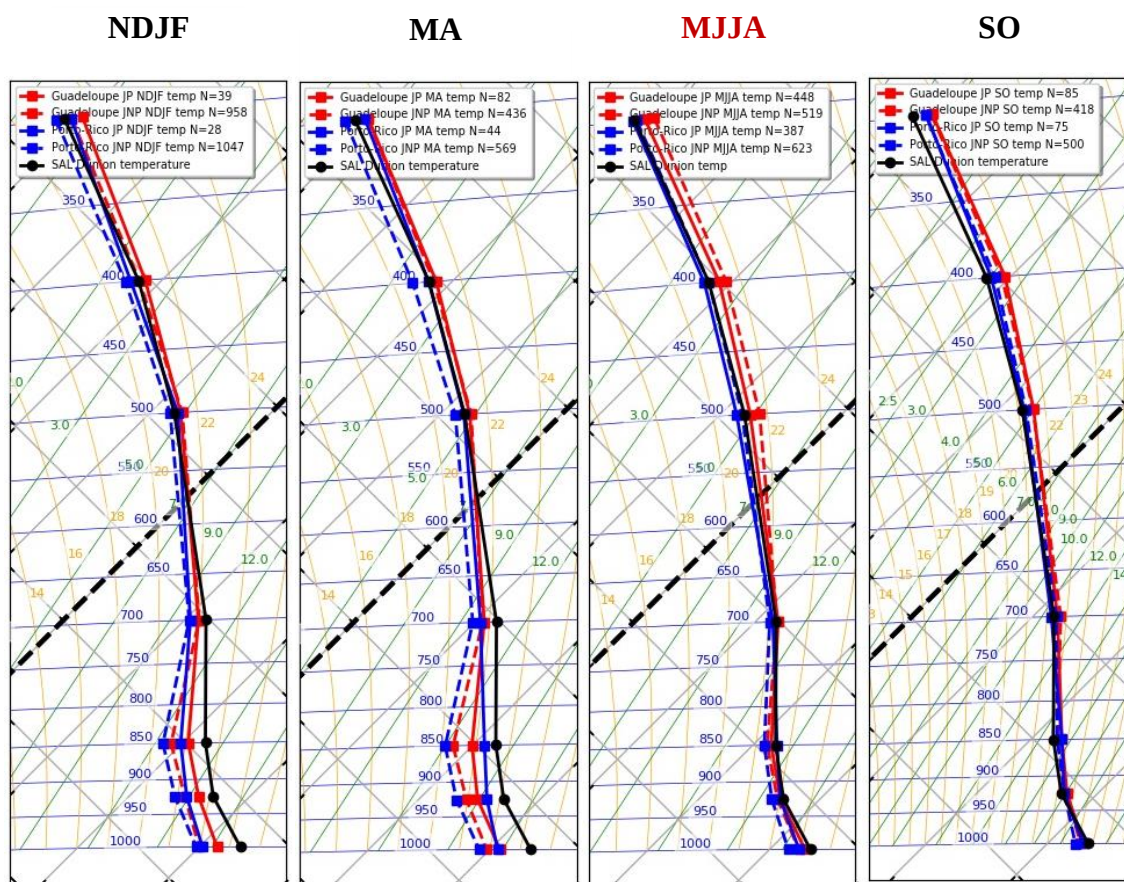


Figure 71 : Représentation saisonnière des profils moyens de températures des JP (courbes continues) et JNP (courbes en pointillés) de Porto Rico (bleu) et de la Guadeloupe (rouge), profil SAL [Dunion and Marron (2008)]

D'après la Figure 71, on observe deux comportements saisonniers.

Période de NDJF et MA :

Le premier reflète la structure thermodynamique des JP et JNP au cours de la saison sèche, dite « Carême », incluant NDJF et MA. Les profils JNP se distinguent toujours de ceux des JP par une température plus froide dans les basses couches et un gradient de température plus grand jusqu'à 850 hPa indiquant une configuration plus instable.

Toutefois, les profils des JP se différencient cette fois-ci du profil de la SAL de Dunion and Marron (2008) avec des écarts maximaux significatifs de $\sim -1.9^{\circ}\text{C} \pm 1.2^{\circ}\text{C}$ dans les basses couches (1 000 et 925 hPa) durant la période MA. Ces résultats sont cohérents avec le fait que le profil de la SAL de Dunion and Marron (2008) a été déterminé pour la période cyclonique (Juillet-Octobre), coïncidant avec la haute saison des poussières et la seconde saison intermédiaire. L'écart notable entre les JP et JNP de Porto Rico et Guadeloupe reste inférieur aux valeurs d'écarts types. Néanmoins celui du niveau 850 hPa, généralement associé à la base de la SAL, se distingue des autres (écart $\approx -1.2^{\circ}\text{C} \pm 1.6^{\circ}\text{C}$). Cela n'est pas étonnant si l'on se

rappelle les résultats du chapitre 3 des « résultats et discussions », portant entre autres sur la saisonnalité des origines et des modes de transport des poussières : La période de MA reflétait une atmosphère en transition. Il est donc normal que les caractéristiques enregistrées pour la SAL dans ces conditions, soient définies avec des écart-types plus importants. A partir de 700 hPa (sommet de la couche SAL) les courbes se rejoignent et les écarts s'atténuent dans la plupart des cas. Notons que Porto Rico affiche des températures généralement inférieures à celle de la Guadeloupe.

Période de MJJA et SO :

Comme attendu, pour les périodes de MJJA et SO, les profils de températures JP, JNP et SAL de Dunion and Marron (2008) sont quasiment confondus. Il apparaît que les fréquents épisodes de brumes désertiques durant ces périodes pourrait impacter la configuration thermodynamique générale, ce qui se traduit par une indifférenciation de la structure atmosphérique thermique entre les cas JP et JNP.

En conclusion, deux comportements sont mis en avant sur les profils saisonniers : l'un correspondant à la saison cyclonique (Mai à Octobre) et l'autre à la période de Novembre à Mars. Cette analyse nous a permis de démontrer que le profil standard de température de la SAL (Dunion and Marron, 2008) était bien représentatif des conditions thermodynamiques de température d'une atmosphère poussiéreuse en Guadeloupe et à Porto Rico entre les mois de Mai et Octobre. L'influence des poussières sur la température est marquée dans la couche limite marine située sous l'inversion de température jusqu'à 700 hPa. Notons que Jury and Winter (2010) ont montré que les poussières Africaines, transportées vers l'Ouest à travers l'Atlantique, renforcent l'effet de serre dans la couche atmosphérique situé entre 1-3 km (entre 1000 et 700 hPa), et ont donc contribué au réchauffement et dessèchement de la région caribéenne au cours du XXe siècle.

5.2. Stratification verticale saisonnière en fonction de l'intensité des évènements poussiéreux

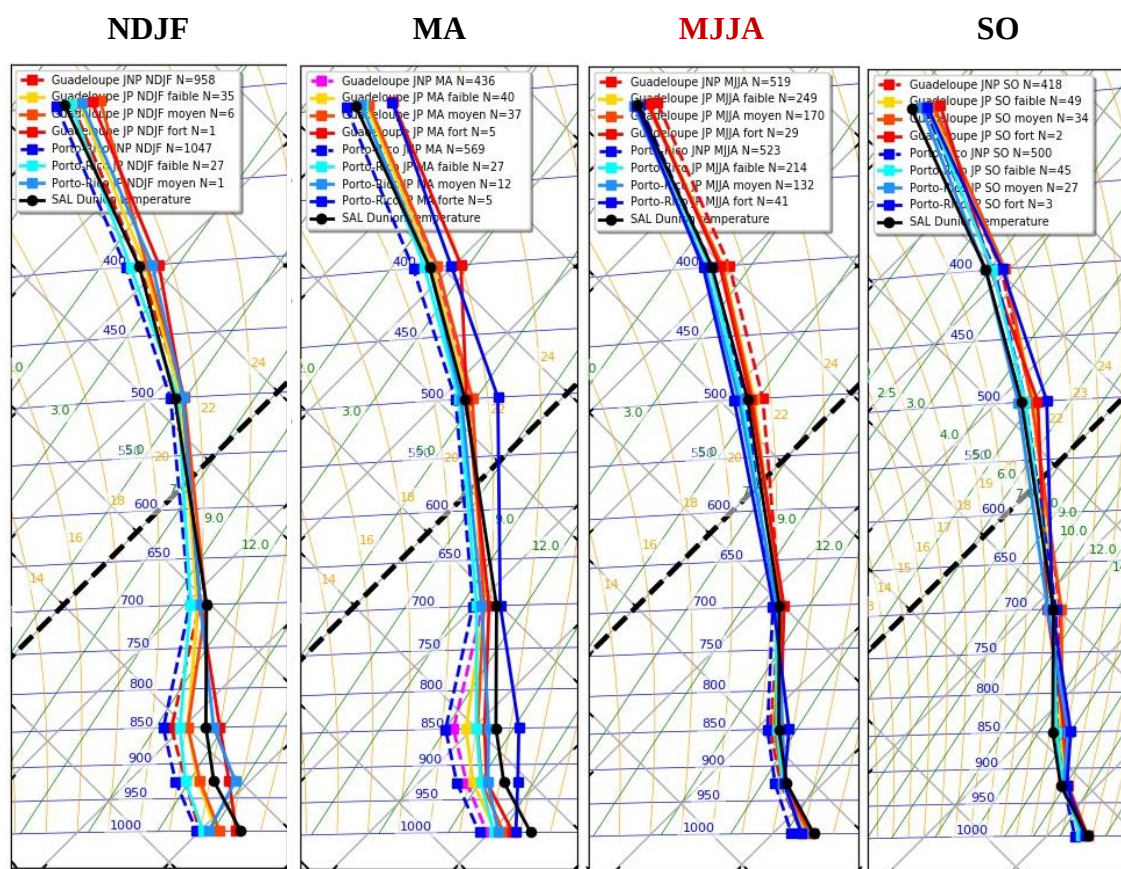


Figure 72 : Profils de température des JP de faible, moyenne et forte intensité en fonction des saisons NDJF, MA, MJJA, SO (2006-2016) en Guadeloupe et à Porto Rico ; Profil SAL Dunion and Marron (2008)

La Figure 72 présente les profils saisonniers moyens de température présentés séparément en fonction du niveau d'intensité des JP. En premier lieu, soulignons que les évènements de moyenne et forte intensité se produisent très rarement à la période NDJF. Le même constat est établi pour les forts évènements durant les périodes intermédiaires (MA et SO). Ces cas exceptionnels ne sont pas assez nombreux pour établir un comportement standard pour la zone, les profils obtenus ne sont donc pas représentatifs. Les deux types de stratification thermique de l'atmosphère observés précédemment sans distinguer les intensités, regroupaient les saisons NDJF-MA d'une part, et MJJA-SO d'autre part. Cette tendance se confirme à travers la représentation des intensités des JP en fonction des saisons. Les profils de NDJF-MA se démarquent nettement de ceux de MJJA-SO.

Pendant la saison sèche NDJF-MA, les écarts de température sont principalement visibles entre 1000 et 700 hPa. D'un point de vue général, les profils des JNP sont caractérisés par des températures plus faibles. Les courbes liées aux forts épisodes de brumes désertiques se distinguent nettement des autres. On remarque que l'intensité des événements poussiéreux coïncide avec l'élévation de température dans les basses couches comme à l'intérieur de la SAL. En même temps, l'inversion de température à la base de la SAL, tout comme la stabilité des basses couches de la surface jusqu'au sommet de la SAL, s'intensifient (infléchissement des pentes des courbes de température) dans les cas exceptionnels de forts épisodes poussiéreux de la zone caribéenne. Les profils moyens des événements forts ont des caractéristiques saisonnières plus marquées en saison sèche mais il faut se rappeler que l'échantillon statistique utilisé ne regroupe que quelques cas (un seul événement fort en Guadeloupe pour la période NDJF, cinq événements forts en Guadeloupe et à Porto-Rico en période MA). Les écarts de température entre les courbes d'intensité des JP sont davantage marqués pour la période de MA, et tout particulièrement aux niveaux de pression 925 et 850 hPa : écart maximal de $\sim -2^{\circ}\text{C} \pm 1.2^{\circ}\text{C}$ entre les JNP et les JP forts événements (respectivement moyens événements) dans les basses couches.

Au cours de la haute saison des poussières (MJJA) et de la deuxième saison intermédiaire (SO), l'intensité des épisodes poussiéreux ne semble pas impacter la configuration atmosphérique de la température qui reste assez inchangée (tous niveaux d'intensité confondus), ce qui rejoint les conclusions déjà émises à travers les résultats de la figure 71. L'ensemble des profils sont quasiment indifférenciés. On note cependant là encore un infléchissement des courbes semblant indiquer que les événements les plus forts entraînent une augmentation de la stabilité atmosphérique.

5.3. Profils d'humidité associés aux jours poussiéreux dans la Caraïbe

Concernant l'interaction entre la vapeur d'eau dans l'atmosphère et les poussières désertiques, Carlson and Prospero (1972) ont montré que la SAL est caractérisée par une diminution brutale du rapport de mélange en vapeur d'eau apparaissant conjointement avec l'inversion de température signalant la base de la couche saharienne. Après avoir étudié la stratification thermique de la couche atmosphérique des JP et JNP de Guadeloupe et Porto Rico, nous complétons notre analyse avec les moyennes des profils de rapport de mélange, de vitesse et direction du vent. C'est l'analyse du comportement de ces trois paramètres physiques qui permet de décrire la structure thermodynamique de la SAL. Ainsi, nous avons choisi de

représenter ces trois paramètres sur un diagramme de type Skew-T afin de mieux illustrer la configuration atmosphérique de l'air aux Antilles en situation de brumes désertiques. Néanmoins, nous nous sommes davantage focalisés sur les variations de la teneur en vapeur d'eau de l'air (au regard des variations de température analysées précédemment), tout en consignant les composantes générales du vent pour la période de 2006 à 2016.

Dans cette section, le profil de la SAL de Dunion and Marron (2008) n'est pas représenté, puisque pour tracer ce profil sur un diagramme Skew-T, les valeurs de la température du point de rosée sont nécessaires.

Les JP sont pour la très grande majorité, se produisent pendant la période de l'Hivernage qui est plus humide. Les JNP surviennent majoritairement pendant le Carême, période plus sèche d'un point de vue climatique.

Afin d'analyser plus finement la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère en présence de poussière, nous proposons d'étudier les profils en fonction des saisons caractéristiques définies précédemment. La même comparaison entre les profils JP et JNP, devrait permettre de mieux mettre en évidence l'assèchement de l'atmosphère liée aux poussières désertiques, à partir de caractéristiques atmosphériques de « fond » similaires.

5.4. Profils saisonniers des jours poussiéreux

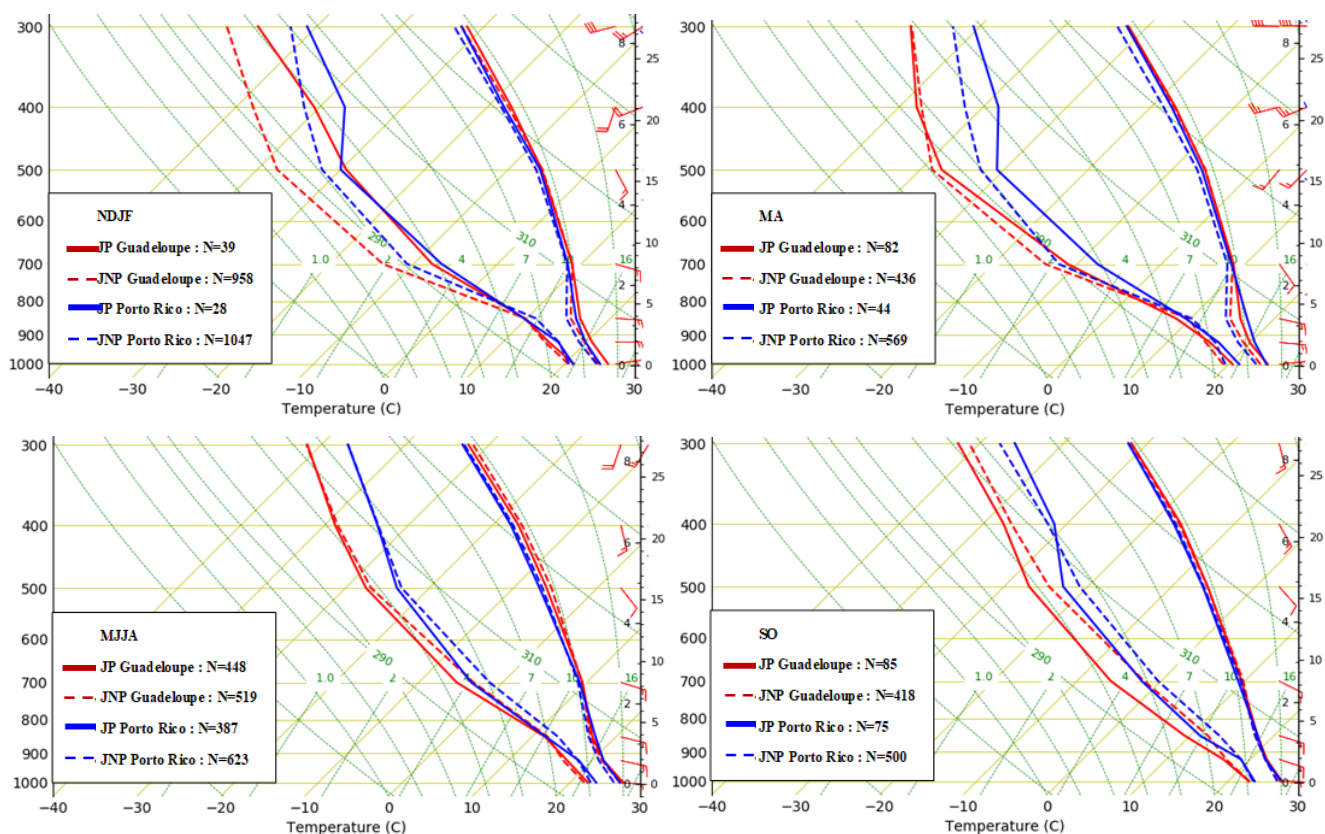


Figure 73 : Profils de rapport de mélange (courbes de gauche), de température (courbes de droite) et de vents (barbules et hampes) des JP (courbes continues) et JNP (courbes en pointillés) de Guadeloupe (rouge) et Porto Rico (bleu) ; périodes NDJF, MA, MJJA et SO de 2006-2016]

Similairement au comportement thermique de l'atmosphère observé précédemment, on observe deux régimes d'humidité distincts opposant les périodes de NDJF-MA et MJJA-SO associées respectivement au « Carême » (saison sèche) et à « l'Hivernage » (saison humide) [Figure 73]. Quelle que soit l'époque de l'année, la Guadeloupe est soumise à un air plus sec que celui de Porto Rico. Par ailleurs, Porto Rico montre un niveau de renforcement de la stabilité et de l'assèchement atmosphériques en liaison avec la présence des poussières plus bas (925 hPa) que celui observé pour la Guadeloupe (850 hPa). Le régime des vents d'Alizés (~ 15 nœuds) domine toute l'année [régime Est pour la période NDJF-MA et plutôt Est-Sud-Est pour la période MJJA-SO en liaison avec les modifications saisonnières de la circulation générale].

Le profil atmosphérique du Carême est caractérisé par des particularités qui ne correspondent pas à celles généralement décrites pour la SAL. L'assèchement constaté lors des événements

poussiéreux est moindre que celui qui se produit en dehors des évènements pour les deux îles, alors que l'on s'attendrait à un renforcement de l'assèchement du fait de la présence des poussières sahariennes. Comme nous l'avons déjà montré, le nombre d'évènements enregistrés à cette période est faible. De plus, l'analyse des rétro-trajectoires associées à ces évènements a révélé que les scénarios pouvant conduire à de fortes concentrations journalières de PM10 à la surface, étaient beaucoup plus diversifiés durant les périodes NDJF-MA. La probabilité que d'autres types de particules que les aérosols désertiques influencent également l'accroissement des concentrations PM10 n'est pas négligeable pour cette période. C'est une éventualité que nous avons soulevée dès le Chapitre 1 des « résultats et discussions » en établissant le seuil PM10 permettant d'identifier la présence des poussières désertiques. Nous avons déjà constaté que certaines des données PM10 supérieures ou égales à $35 \mu\text{g m}^{-3}$ ne présentaient pas les caractéristiques photométriques des aérosols désertiques (**AE** ≤ 0.6 et **AOD** < 0.2 au lieu de **AE** ≤ 0.6 et **AOD** ≥ 0.2) ; ces données pouvant être le résultat de fortes concentrations en aérosols marins.

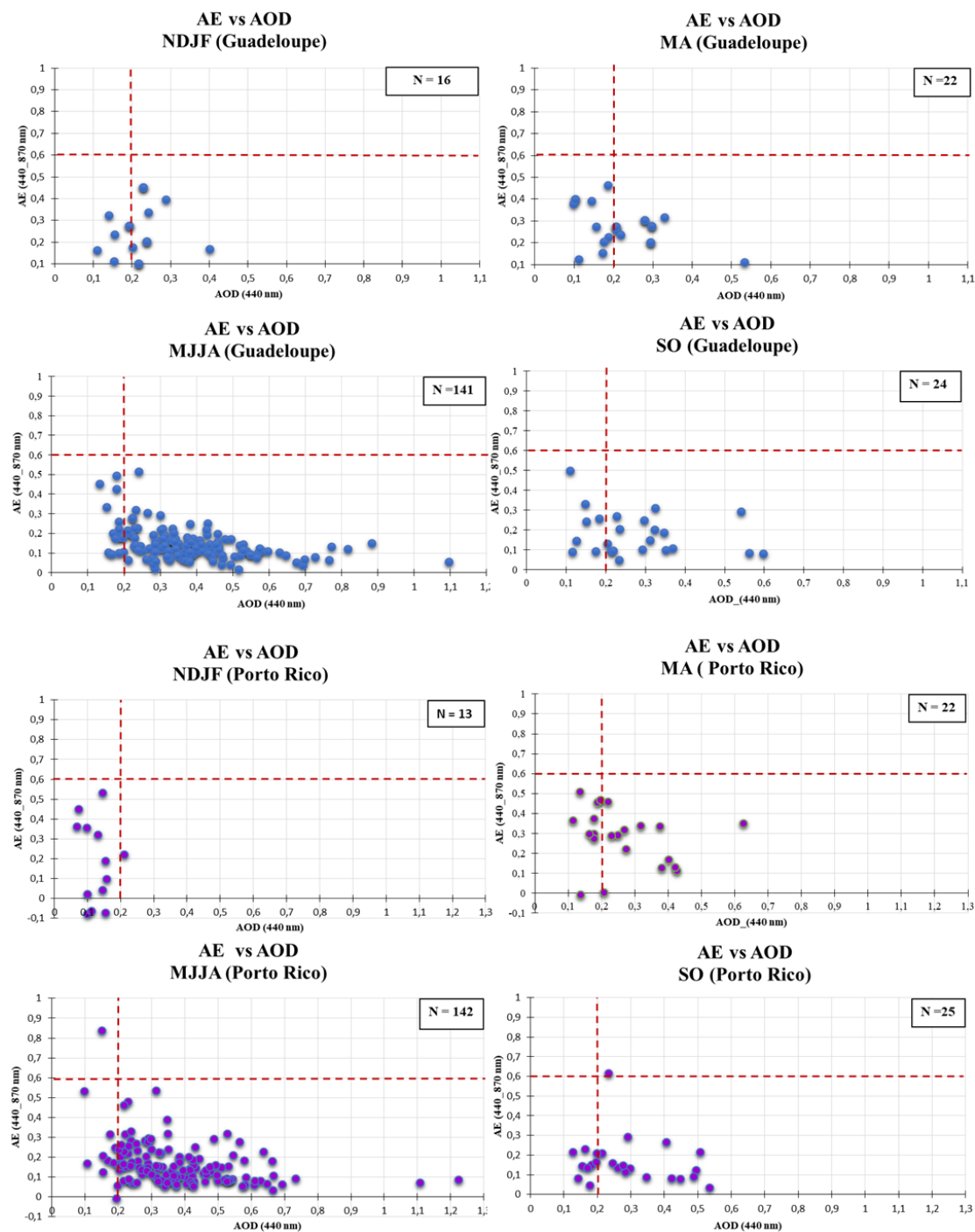


Figure 74 : Répartition des AE (440-870 nm ; qualité 2.0) en fonction des AOD (440 nm ; qualité 2.0) pour les jours de concentration $\text{PM}_{10} \geq 35 \mu\text{g m}^{-3}$ en Guadeloupe et à Porto Rico (2006-2016) pour les quatre saisons préalablement définies NDJF, MA, MJJA et SO ; critère de qualité appliqué : seules les données journalières fournissant au minimum 12 mesures d'AOD par jours ont été sélectionnées pour cette étude

La Figure 74 présente les répartitions des données AE en fonction des AOD pour les jours de concentration supérieure ou égale à $35 \mu\text{g m}^{-3}$ à Porto Rico et en Guadeloupe. Nous constatons immédiatement que durant la période sèche du Carême, une partie des données PM_{10} sont

associées aux caractéristiques photométriques $AE \leq 0.6$ et $AOD \leq 0.2$. Pour la période NDJF, c'est la quasi-totalité des données de Porto-Rico qui sont concernées. Pour la période MA, la moitié des données de Porto-Rico ont ces mêmes caractéristiques. Pour la Guadeloupe, à peu près la moitié des données PM10 entrent dans la gamme $AE \leq 0.6$ et $AOD \leq 0.2$ pendant la période sèche du Carême. Néanmoins, compte tenu de l'incertitude sur la mesure, il est difficile de tirer des conclusions définitives. D'après la Figure 74, ~70% des cas correspondent aux critères optiques (AOD) et microphysiques (AE) des poussières désertiques.

Ces observations nous confortent dans notre volonté de considérer avec précaution les profils de température et de rapport de mélange potentiellement associés à la SAL durant la période sèche. Ce sont des pistes de réflexion qui mériteraient d'être approfondies dans le cadre d'études ultérieures.

Vis-à-vis de cette étude thermodynamique sur les jours que nous qualifions de « poussiéreux », nous pouvons seulement conclure que le seuil journalier de $PM_{10} \geq 35 \mu g m^{-3}$ est plus fiable pour la saison humide (MJJA-SO). A ce stade, pour la période du Carême, nous ne sommes pas en mesure de déterminer de façon précise sans des travaux de caractérisation plus poussés, la part d'aérosols marins et désertiques impactant les mesures de poussières à la surface (PM10) dans la région de l'arc des Petites Antilles.

5.5. Impact de la provenance des poussières et de leur temps de trajet sur la thermodynamique atmosphérique

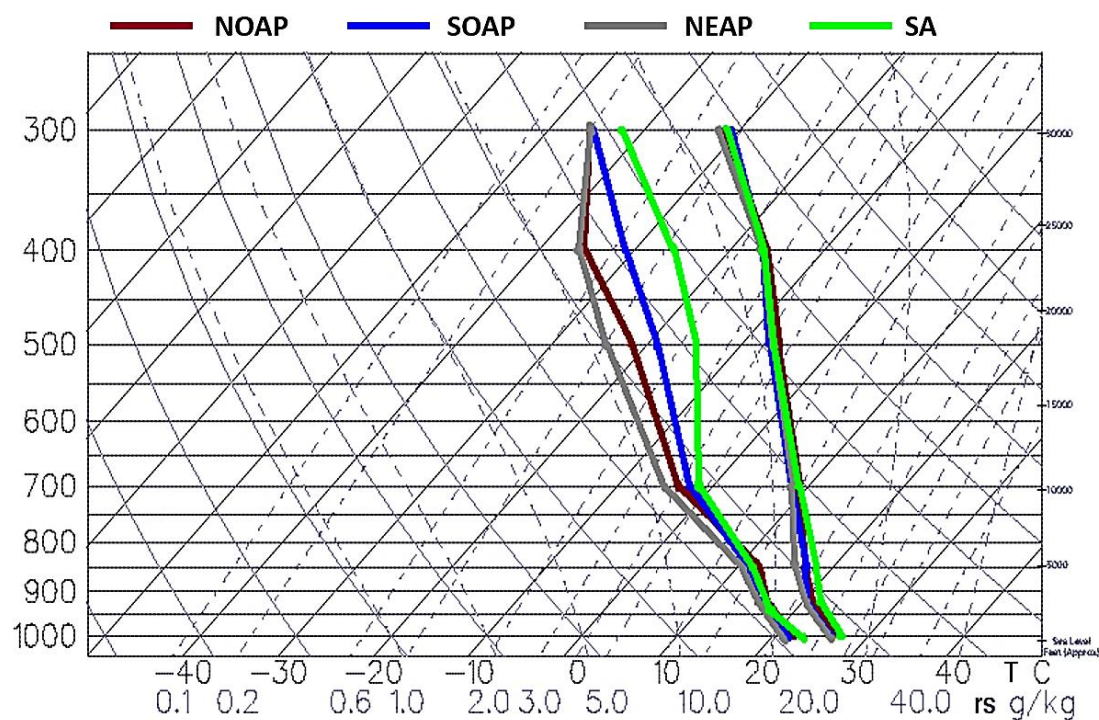


Figure 75 : Profils verticaux de température et d'humidité associé aux JP reliés aux types de parcours NOAP, SOAP, NEAP et SA (voir chapitre 3 des « résultats et discussions »)

A priori, jusqu'à 700 hPa, la stratification du profil d'humidité ne varie pas « significativement » selon le type de parcours emprunté par les masses d'air poussiéreuses (Figure 75). Néanmoins, les courbes ne sont pas totalement indifférenciées ; au-dessus de 700 hPa, chaque cas se distingue. Les profils de température sont quasi-indifférenciés à partir de 700 hPa. On note plus ou moins, de légers écarts dans les basses couches.

Nos travaux axés sur la caractérisation thermodynamique des masses d'air selon leur origines et leur temps de parcours au-dessus de l'Atlantique sont actuellement en cours de développement et seront présentés ultérieurement.

CHAPITRE 6 : RELATION ENTRE POUSSIÈRES DESERTIQUES ET ENERGIE DES SYSTEMES CYCLONIQUES

Récemment, des études ont montré que l'exportation des amas poussiéreux dans la zone océanique Nord-Atlantique tropicale inhiberait l'intensification des ondes tropicales ou le développement des phénomènes cycloniques déjà formés. Ceci en raison de l'ingestion d'air sec et stable par les perturbations, du renforcement des cisaillements de vent occasionnés à proximité de la couche d'air saharien et de l'accentuation de l'inversion des alizés qui contribue à stabiliser l'atmosphère (Dunion and Velden, 2004). Nous avons donc comparé le nombre d'évènements poussiéreux, ainsi que leur intensité au paramètre ACE (pour « Accumulated Cyclone Energy » ou énergie cumulative des cyclones tropicaux) : c'est un indice estimant la quantité d'énergie globale d'un ou de plusieurs cyclones et qui est basé sur le nombre de systèmes cycloniques, leur durée et leur degré d'intensité (s'exprime en 10^4 noeuds²). Il est calculé en quadrillant le vent de surface soutenu maximal dans le système cyclonique toutes les six heures. Ce paramètre représente la moyenne des évènements cycloniques sur toute l'année.

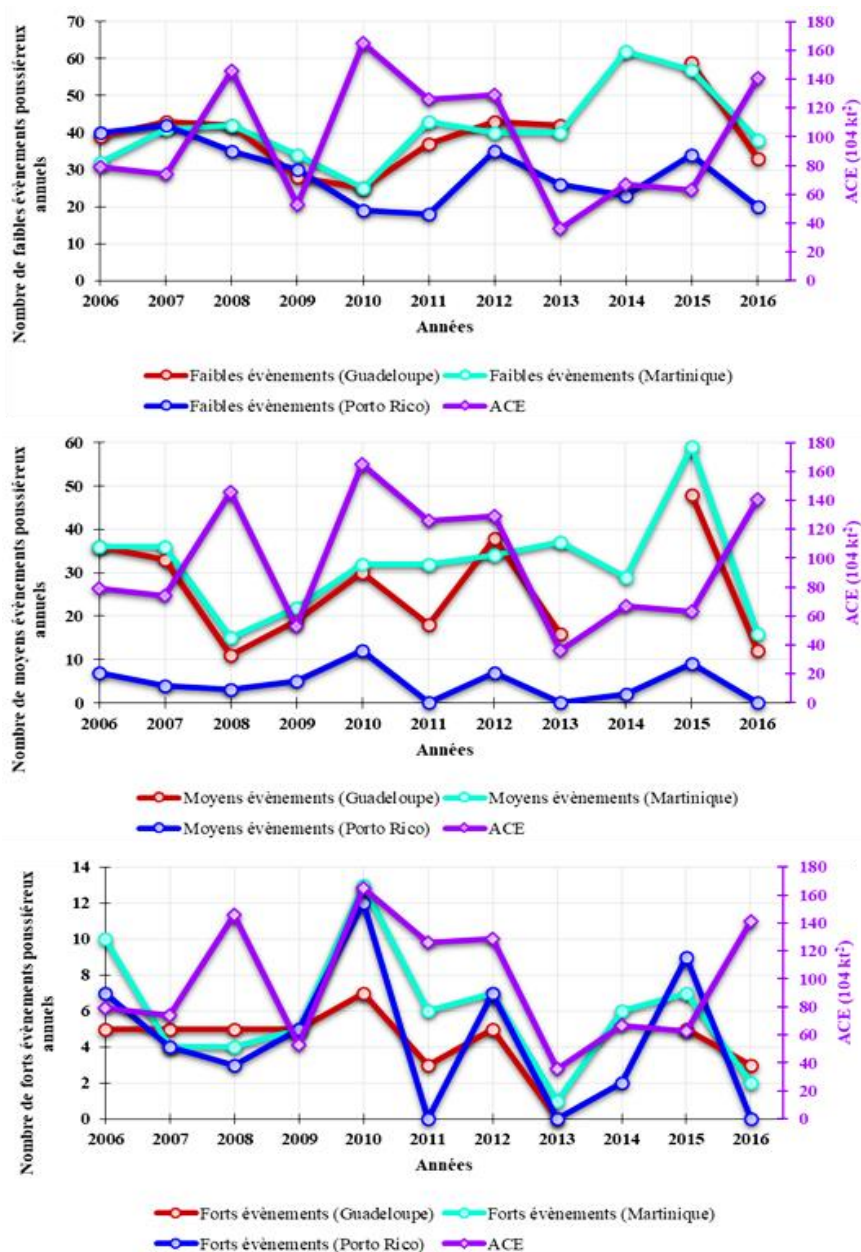


Figure 76 Variations de l'indice ACE de 2006 à 2016 dans l'Atlantique Nord comparées au nombre d'événements de poussières faibles, moyens ou forts comptabilisés pour chacune de ces années.

La Figure 76 indique les variations de l'indice ACE en fonction du nombre d'événements faibles, moyens et forts comptabilisés de 2006 à 2016. Concernant les données de Porto Rico, il ne semble pas y avoir de lien direct entre l'évolution de l'ACE et celle du nombre d'événements de poussières quelle que soit l'intensité de ces derniers.

Pour les deux îles situées plus au centre de l'arc antillais, Guadeloupe et Martinique, on remarque que plus les événements de poussières de faible à moyenne intensité sont nombreux, moins l'activité cyclonique est importante. Pour les événements forts, c'est le comportement

inverse qui semble se produire. Mais dans ce dernier cas, l'échantillon statistique est moins important ce qui nous amène à être plus prudents concernant les conclusions à en tirer.

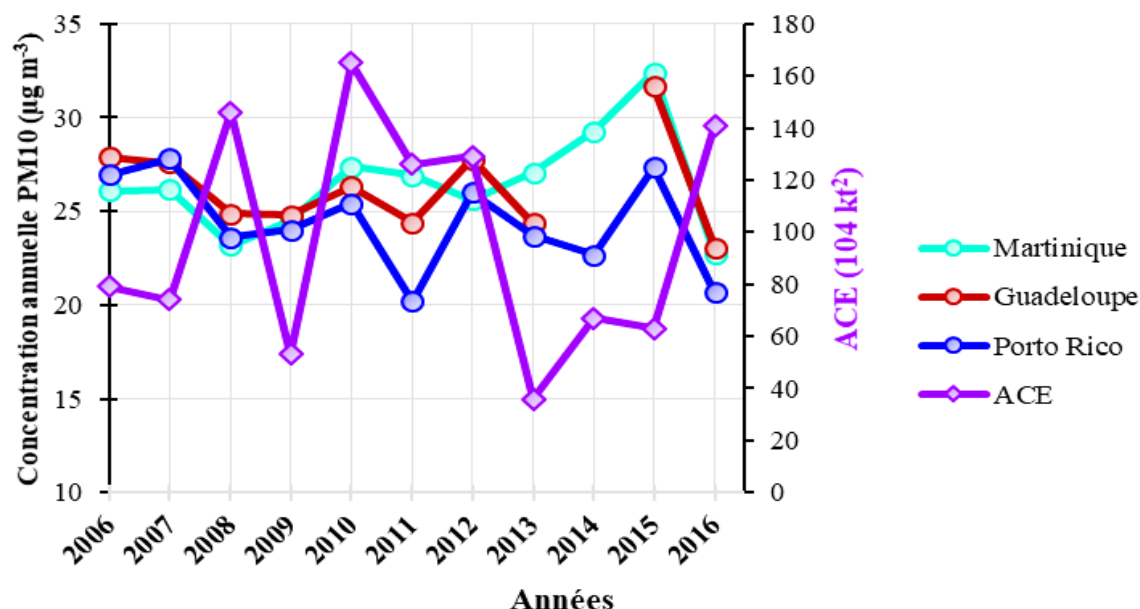


Figure 77 : Variations de l'indice ACE de 2006 à 2016 dans l'Atlantique Nord comparées à la concentration moyenne annuelle en PM10 pour chacune de ces années.

Quand on compare sur la Figure 77 les valeurs de l'indice ACE aux concentrations moyennes annuelles en PM10, il est plus difficile de dégager un lien entre les évolutions de ces deux paramètres. Les cyclones se produisent principalement durant la haute saison de poussières et la deuxième saison intermédiaire. Comme nous l'avons vu précédemment, les événements de poussières se produisent toute l'année. Il est possible que les événements de poussières qui sont enregistrés hors saison cyclonique créent un biais qui atténue le lien éventuel qu'il pourrait y avoir avec l'activité cyclonique.

CONCLUSION

La région Caraïbe est régulièrement survolée par des masses d'air chargées en poussières désertiques d'origines saharienne et subsaharienne.

En Guadeloupe et en Martinique, régions françaises d'Amérique, ces épisodes de pollution naturelle donnent lieu à des procédures d'information et d'alerte, lorsque les concentrations de PM10 mesurées par les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) dépassent $50 \mu\text{g m}^{-3}$. Ce seuil dérive d'études européennes établies essentiellement en faisant considérant le contexte de pollution d'origine anthropique en Europe. Il est cependant nécessaire de se questionner sur la pertinence de cette valeurs limite liée à la détection de poussières désertiques dans le cadre géographique des Petites Antilles et en Guyane.

Sur d'autres îles de l'arc Antillais, telles que Porto-Rico et la Barbade, ce phénomène fait également l'objet d'une surveillance quotidienne et est particulièrement bien documenté depuis plusieurs dizaines d'années. Pour les quatre îles de l'arc antillais : Porto Rico, Guadeloupe, Martinique et Barbade ; nous avons évalué l'origine de la pollution particulaire et son impact sur la qualité de l'air, en effectuant une étude statistique et climatologique des évènements de poussières qui s'appuie sur les réseaux de mesure de qualité de l'air implantés sur chacune des îles, sur le réseau international de mesures photométriques AERONET et sur les données de radiosondages réalisés localement. Ces travaux ont été exécutés en considérant les effets de la pollution par les poussières désertiques sur chacune des îles distinctement, de façon à déterminer si l'ensemble de l'arc antillais était soumis aux mêmes processus d'empoussièrement et suivant un cycle saisonnier similaire.

Caractérisation de la pollution particulaire : activité anthropique versus brumes désertiques

La première étape de notre travail, exposée au premier Chapitre de la partie « résultats et discussions », a visé à définir ce que l'on pouvait qualifier d'épisode de poussières désertiques dans notre région en établissant des critères utilisant le jeu de données dont nous disposions.

L'étude des profils horaires moyens des concentrations de PM10 a montré que la pollution d'origine anthropique aux Antilles se manifestait par des pics de concentration aux heures de pointe, avec toutefois des valeurs horaires plutôt faibles au regard des normes sanitaires, oscillant entre 14 et $23 \mu\text{g m}^{-3}$. Lorsque l'activité locale est réduite (les week-end) les niveaux de concentration en PM10 sont généralement inférieurs à $20 \mu\text{g m}^{-3}$ tout au long de la journée. En contraste avec la pollution anthropique locale, les concentrations moyennes horaires des

journées marquées par le passage des « brumes désertiques » sont deux à trois fois supérieures durant les épisodes désertiques, et ce sur toute la durée du jour et de la nuit. Ceci implique que contrairement à la pollution locale d'origine anthropique caractérisée ponctuellement par l'élévation de concentrations associée à des pics horaires, le phénomène de poussières désertiques présente une dimension temporelle pouvant perdurer au-delà de 24 heures, voire sur plusieurs jours. Ainsi, lors des événements poussiéreux, la contribution des aérosols minéraux vient s'ajouter à la pollution liée à l'activité locale. Les épisodes de brumes désertiques constituent de ce fait, le principal facteur de réduction de la qualité de l'air dans la zone des Petites Antilles, qui présente généralement un faible développement industriel comparé aux Etats-Unis et à l'Europe.

Définition du seuil de présence des brumes désertiques adapté au bassin caribéen

L'étape suivante, cruciale pour la suite de nos travaux, a eu pour objectif l'évaluation d'une valeur PM10 seuil, relative à la présence de poussières désertiques dans l'atmosphère. Pour ce faire, nous avons d'abord établi la corrélation entre les données d'empoussièrement à la surface (PM10) et les données d'épaisseur optique en aérosols (Aérosols Optical Depth, AOD) fournies par le réseau AERONET (empoussièrement sur toute la colonne atmosphérique). Les coefficients de corrélation entre les données PM10 et AOD pour les îles de Porto Rico et de la Guadeloupe sont respectivement de $R = 0.72$ et $R = 0.81$. Puis, nous nous sommes basés sur les critères optiques et microphysiques de détection de poussières désertiques établis dans la littérature, pour déterminer un seuil PM10 pouvant être appliqué aux « jours poussiéreux » de la Caraïbe. Ces critères stipulent que les poussières désertiques dans la Caraïbe sont la plupart du temps associées à une épaisseur optique **AOD ≥ 0.2** et à une valeur du coefficient d'Angström (Angström Exponent, AE) **AE ≤ 0.6** en relation avec la taille grossière des aérosols minéraux. Un des aspect principale concernait l'évaluation de l'impact des aérosols marins qui constituent une composante indiscutable de l'atmosphère des îles entourées d'eau et qui peuvent fausser le diagnostic de détection des poussières Africaines dans notre cas. En effet, les sels marins sont des particules grossières, comparable aux aérosols minéraux, mais qui à l'inverse des poussières d'origine désertique, impactent plus faiblement les données d'épaisseur optique (AOD ≤ 0.15).

Nous avons observé la répartition en fréquence des PM10 journaliers associés aux critères de poussières désertiques (**AOD ≥ 0.2 et AE ≤ 0.6**) pour trois plages de concentrations PM10 définissant les normes de la qualité de l'air :

- **28 $\mu\text{g m}^{-3}$** transition entre un air « bon » et un air « moyen »,
- **35 $\mu\text{g m}^{-3}$** transition entre un air « moyen » et un air « médiocre »
- **50 $\mu\text{g m}^{-3}$** transition entre un air « médiocre » et un air « mauvais »)

Il s'est avéré que parmi les données PM10 remplissant les critères photométriques attestant la présence de poussières désertiques, on retrouve 91.3 % de valeurs journalières **PM10 $\geq$ 28 $\mu\text{g m}^{-3}$** en Guadeloupe (86.8% à Porto Rico), 77.5% de valeurs journalières **PM10 $\geq$ 35 $\mu\text{g m}^{-3}$** en Guadeloupe (73.5% à Porto Rico) et 42.2% de valeurs journalières **PM10 $\geq$ 50 $\mu\text{g m}^{-3}$** en Guadeloupe (39% à Porto Rico).

Afin de déterminer parmi ces trois valeurs limites le seuil PM10 le plus adapté à la détection des poussières désertiques pour les îles de notre étude, nous avons par la suite procédé inversement en étudiant la répartition des données AE en fonction des données AOD pour les trois valeurs seuils 28 $\mu\text{g m}^{-3}$, 35 $\mu\text{g m}^{-3}$ et 50 $\mu\text{g m}^{-3}$. Les résultats de cette analyse ont montré que plus le seuil de concentration PM10 était faible et plus la part potentielle des aérosols marins était importante. Mais parallèlement, le fait d'augmenter la valeur du seuil de concentration PM10 a pour effet de réduire considérablement le nombre effectif d'épisodes de poussières sahariennes. Il convenait d'établir un compromis et de déterminer un seuil de concentration de poussières prenant en compte le maximum d'évènements de brumes désertiques, tout en limitant le nombre de cas pouvant être assimilés aux sels de mer qui impactent, comme nous avons pu le constater, les mesures d'empoussièrement à la surface sans qu'il soit possible de distinguer leur contribution de celle des aérosols terrigènes. **Le seuil de 35 $\mu\text{g m}^{-3}$** s'est avéré concilier ces deux aspects. Il est important de souligner que ce seuil n'exclut pas la possibilité que de faibles évènements poussiéreux puissent se produire en-dessous de cette valeur prise pour référence ou que certaines des données présentant des valeurs PM10 égales ou supérieures à ce seuil aient pour source une importante concentration en sels marins. C'est donc à partir de ce seuil que l'ensemble des travaux de cette thèse ont été réalisés.

Climatologie des évènements de poussières désertiques entre 2006 et 2016 (11 ans)

Deuxièmement, nous avons réalisé une étude climatologique des évènements poussiéreux dans la Caraïbe au cours de la dernière décennie (2006-2016) présentée au deuxième Chapitre de la partie « résultats et discussions ».

Le nombre moyen mensuel d'évènement poussiéreux évalué à partir des jours de concentration supérieures ou égales à 35 $\mu\text{g m}^{-3}$ en Guadeloupe, Martinique et Porto Rico a permis de mettre

en évidence quatre saisons-types dans le cycle de passage des brumes désertiques sur l'arc antillais :

- Une basse saison (Novembre, Décembre, Janvier et Février) : période où les épisodes de poussières restent exceptionnels, soit entre zéro et deux évènements poussiéreux mensuels.
- Deux saisons intermédiaires (Mars-Avril, Septembre-Octobre) : ces deux périodes transitoires présentent généralement entre deux et six jours poussiéreux par mois.
- Une haute saison (Mai à Août) : durant cette période, les évènements de poussière sont fréquents (environ un évènement tous les trois jours). Au cours des mois de Juin et Juillet, il se produit un épisode poussiéreux un peu moins de deux jours sur trois.

Il est primordial de souligner que 55% des évènements poussiéreux présentent des niveaux de concentrations compris entre 35 et 49 $\mu\text{g m}^{-3}$. Ainsi, en abaissant le seuil de détection des poussières à 35 $\mu\text{g m}^{-3}$, nous avons pu considérer un nombre considérable d'évènements poussiéreux, jamais pris en compte dans les précédentes études. Cela nous a permis d'affiner l'analyse climatologique du phénomène.

En se basant sur ces saisons poussiéreuses, nous avons étudié le cycle de transport des aérosols désertiques au-dessus de l'Atlantique Nord, illustré par les images de détection satellite MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) des AOD. On a pu observer que le départ et le transport des brumes désertiques répondent à un cycle saisonnier piloté par l'activation saisonnières des sources désertiques, combinée à la fluctuation périodique de la zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT). Le comportement décrit par la climatologie des départs et des transports de poussières entre les côtes Africaines et la zone caribéenne, montre que la production de particules de poussières est un phénomène relativement continu tout au long de l'année. Toutefois, l'exportation des aérosols minéraux hors d'Afrique est favorisée ou inhibée en fonction des régimes de vents saisonniers et de la configuration atmosphérique au-dessus de l'Océan Atlantique.

Cette analyse a été complétée par l'étude de la circulation atmosphérique saisonnière des masses d'air au-dessus de l'Océan Atlantique, à l'aide de rétro-trajectoires calculées par le modèle HYSPLIT [Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory]. Notre

représentation de la circulation générale (entre 2006 et 2016) a mis en évidence l'origine dominante et le mode de transport privilégié des masses d'air poussiéreuses. En définitive, les quatre saisons de poussières présentent des circulations-types de masses d'air distinctes. La basse saison est principalement caractérisée par une origine Nord-Américaine. Les deux saisons intermédiaires apparaissent comme des périodes de transition en montrant plusieurs tendances de parcours (Nord et Sud Atlantique) et d'origines (Sud-Américaine, Africaine et Nord-Américaine).

Enfin, la circulation caractérisant la haute saison des poussières se démarque des autres périodes en illustrant un couloir stable de transport direct entre l'Afrique et la Caraïbe. Pour ce qui est des variations de circulation des masses d'air liées à la position des îles sur l'arc, la Barbade s'est révélée être plus impactée par les parcours « Sud » que les deux autres îles. Toutefois, dans l'ensemble, la circulation atmosphérique est relativement similaire pour les trois sites. Concernant la circulation établie au préalable pour les masses d'air correspondant effectivement à un dépassement du seuil PM10 de $35 \mu\text{g m}^{-3}$, nous avons répertorié trois types de parcours.

Caractérisation de la taille des particules

Le troisième axe de la thèse repose sur la caractérisation de la taille des particules (VPSD) afin de mettre en relief les effets du transport à longue distance.

Nous avons ainsi comparé les données optiques reflétant la répartition de la taille des aérosols détectés sur la côte Africaine (Dakar, Cap Vert) à celles des îles de l'arc des Petites Antilles (Porto Rico, Guadeloupe et Barbade). Nous avons également utilisé le rapport entre les données PM2.5 et les données PM10 pour Porto Rico et la Guadeloupe afin de caractériser le régime de pollution relatif à la taille des particules.

Il en est ressorti que la haute saison des poussières pour l'ensemble de la Caraïbe est caractérisée par le mode grossier (environ $2 \mu\text{m}$) représenté par des pics principaux des concentrations volumiques des particules, aux mois de Juin, Juillet et Août. Les précédentes données AERONET que nous avons traitées pour la zone Africaine montraient les mêmes caractéristiques pour le mode grossier ($2 \mu\text{m}$) avec toutefois des concentrations volumiques deux fois supérieures, en moyenne. La basse saison des poussières (Octobre à Mars) s'est révélée marquée par des modes grossiers avec des rayons $\geq 3.86 \mu\text{m}$ (pour les trois sites de l'arc caribéen), mettant en évidence la prédominance des grandes particules qui pourraient correspondre à des aérosols marins (observable sur des sites côtiers). Il faut noter que d'autres types d'aérosols sont également présents dans la zone Caraibéenne. A titre d'exemple, le

transport saisonnier des biomasses et des PDA (« Polluted Dust Aerosol », mélange d'aérosols désertiques avec des biomasses) vers la Caraïbe, durant la période allant de Novembre à Mars, a été mentionné dans la littérature (campagnes de mesures).

Ainsi, il apparaît que les caractéristiques microphysiques de l'aérosol désertique ne soient pas modifiées au cours de son transport au-dessus de l'Atlantique, mis à part la diminution des concentrations entre l'Afrique et la Caraïbe (dilution). En définitive, concernant les aérosols désertiques, le mode grossier dominant présente une forme pratiquement monomodale avec une concentration maximale à environ 2 μm . Les conditions atmosphériques générales sont définies la prévalence du mode grossier dû à l'influence des aérosols marins (rayon $\geq 3 \mu\text{m}$). Il est également intéressant de souligner que la distribution bimodale des modes grossier et fin, pourrait refléter les PDA mentionnées par Adams et al. (2012), ou encore la présence de biomasses (Jury, 2017).

Profil thermodynamique de l'atmosphère en situation de brumes désertiques (Petite Antilles)

Nous avons clôturé notre étude par la description de la structure verticale de l'atmosphère de la zone tropicale en situation de « brumes désertiques », afin d'observer les effets thermodynamiques des aérosols minéraux sur la couche atmosphérique.

Nous nous sommes intéressés aux profils moyens de température et d'humidité (rapport de mélange en vapeur d'eau) qui caractérisent la couche de transport des poussières, la Saharan Air Layer (SAL). A travers cette étude, deux comportements des profils thermodynamiques ont été mis en évidence :

- Nos profils poussiéreux collaient parfaitement avec les caractéristiques connues de la SAL pour la période humide incluant la haute saison des poussières (Mai à Août) et la seconde période intermédiaire (Septembre à Octobre).
- La stratification verticale de la période sèche de Carême englobant la basse saison des poussières (Novembre à Février) et la première saison intermédiaire (Mars-Avril) ne correspondait pas au schéma conventionnel de la SAL exhibé dans la littérature ; ce qui nous a amené à nous questionner sur l'impact de la pollution particulaire durant cette saison. Lorsque nous avons poussé nos investigations plus loin, nous avons constaté que les jours de concentration $\text{PM}_{10} \geq 35 \mu\text{g m}^{-3}$ de cette période étaient vraisemblablement marqués par la contribution des aérosols marins. Cela

pourrait expliquer l'inadéquation des profils thermodynamiques avec les propriétés attendues pour une atmosphère chargée en aérosols sahariens.

La définition des évènements de brumes désertiques que nous avons adoptée nous a permis de prendre en considération une grande partie des évènements poussiéreux affectant l'arc antillais, ce qui nous a amené à mieux cerner le cycle de transport des poussières désertiques au terme d'une étude statistique et climatologique basée sur onze années de données. Nous avons beaucoup discuté du seuil de concentration PM₁₀ de 35 $\mu\text{g m}^{-3}$ choisi pour attester d'une pollution par les aérosols désertiques. Nous avons d'ailleurs soumis notre seuil à une récente Evaluation d'Impact Sanitaire (EIS) au travers d'une thèse réalisée au service ORL (Oto-Rhino-Laryngologie) du CHU de Pointe-à-Pitre (Guadeloupe). Cette EIS a montré un effet des poussières quantifiable sur la santé dès 35 $\mu\text{g m}^{-3}$ (Virnot, 2017). Toutefois, des analyses supplémentaires (caractérisation granulométrique, minéralogique, chimique, ...) auraient permis d'affiner ce seuil et/ou les conditions de validité de ce dernier.

L'impact des poussières durant la période sèche mérite d'être davantage approfondi. Par la suite, ces travaux pourraient être complétés par une étude plus fine de la stratification verticale liée aux différents types de transport des poussières mis en avant dans le cadre de cette étude. Nous sommes convaincus que le parcours spécifique des masses d'air, leur durée de transport, ainsi que leur origine influencent leur structure thermodynamique. Un approfondissement de ces aspects permettrait d'introduire de nouvelles caractéristiques associées au transport des poussières au-dessus de l'Atlantique.

Perspectives d'étude

Nous mettons actuellement en place des études visant à anticiper les phénomènes de pollution inhérents au contexte géographique caribéen : éruptions volcaniques, transport saisonnier des brumes désertiques, émanations d'Hydrogène Sulfuré et d'ammoniaque liées à la décomposition des algues Sargasses. Nous avons donc développé d'autres méthodes de traitements statistiques afin d'affiner (confirmer) les résultats avancés dans ces travaux de thèse.

Nous travaillons également à l'élaboration d'un modèle d'impact radiatif adapté à la zone des Petites Antilles afin de mieux définir l'impact des poussières sur la thermodynamique atmosphérique. Nos investigations ont montré que l'impact radiatif des poussières dans la Caraïbe est reflété par le forçage radiatif BOA (pour « Bottom Of Atmosphere ») : Pour les îles de Porto Rico, Guadeloupe, et Barbade. On remarque que le Forçage radiatif (ΔF BOA,

AERONET) présente des valeurs minimales en Juin, mois pour lequel la fréquence des évènements poussiéreux est maximale (Figures 78). Les courbes mensuelles SSA (propriété d'absorption) décrivent un comportement spécifique à chaque îles (Figure 79).

Ces résultats introduisent l'impact des poussières sur le rayonnement à la surface, dans la région de la Caraïbe.

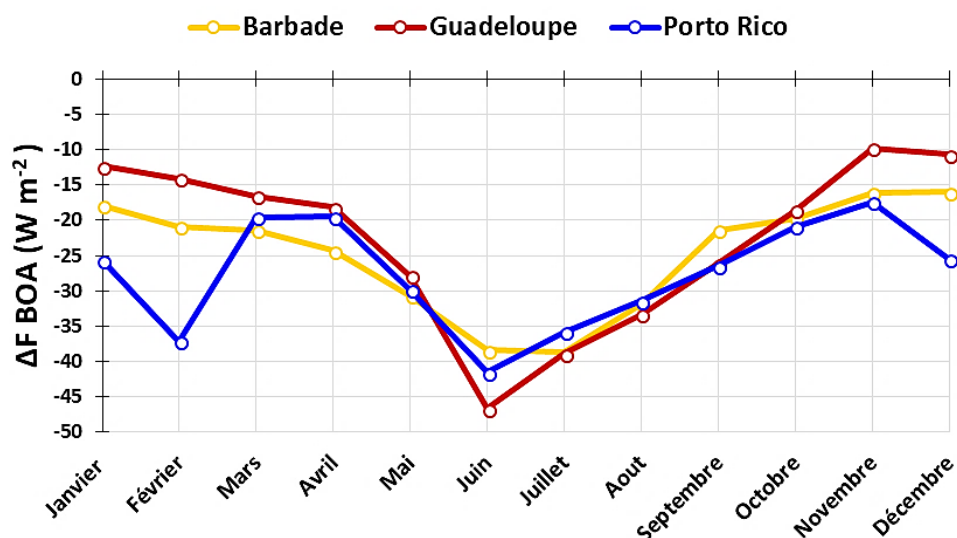


Figure 78 : Forçage radiatif (ΔF_{BOA}) mensuel entre 2006-2016 ; données fournies par AERONET

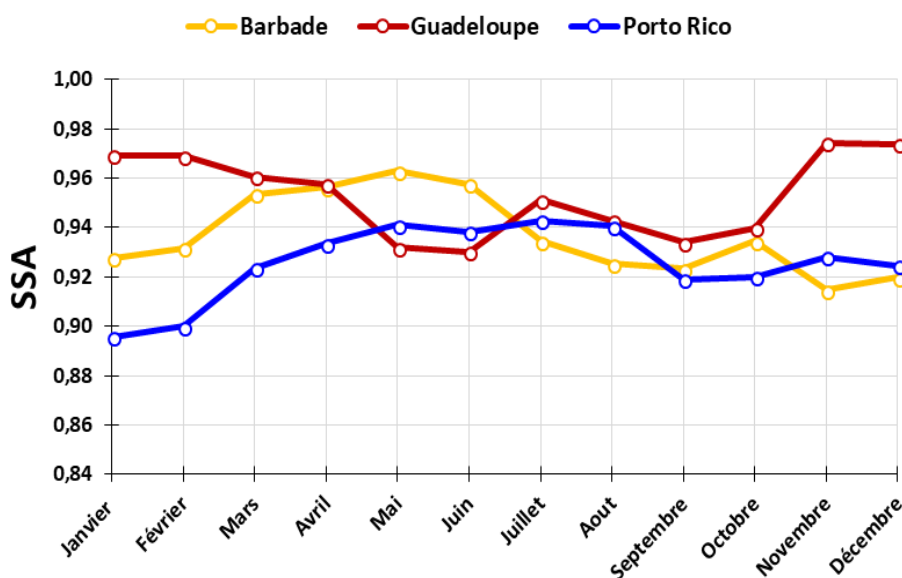


Figure 79 : Albedo de simple diffusion (SSA) mensuel entre 2006 et 2016 ; données fournies par AERONET

BIBLIOGRAPHIE

- Adams, A. M., Prospero, J. M. and Zhang, C.: CALIPSO-derived three-dimensional structure of aerosol over the Atlantic Basin and adjacent continents, *Journal of Climate*, 25, 6862 –6879, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00672.1>, 2012.
- Anthony Chen, A. and Taylor, M. A.: Investigating the link between early season Caribbean rainfall and the El Nino+1-year, *International Journal of Climatology*, 22, p. 87–106, <https://doi.org/10.1002/joc.711>, 2002.
- Arimoto, R., Ray, BJ., Lewis, NF., Tomza, U and Duce, RA.: Mass-particle size distributions of atmospheric dust and the dry deposition of dust to the remote ocean; *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102, p. 15867-15874, <https://doi.org/10.1029/97JD00796>, 1997.
- Ben-Ami, Y., Koren, I., Altaratz, O., Kostinski, A., Lehahn, Y: Discernible rhythm in the spatio/temporal distributions of transatlantic dust; *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, p. 2253–2262, <https://doi.org/10.5194/acp-12-2253-2012>, 2012.
- Ben-Ami, Y., Koren, I., Rudich, Y., Artaxo, P., Martin, ST and Andreae, MO.: Transport of North African dust from the Bodélé depression to the Amazon Basin: a case study; *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, p. 7533-7544, <https://doi.org/10.5194/acp-10-7533-2010>, 2010.
- Blackadar, A. K.: Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions; *Bull. Amer. Meteor. Soc*, Volume 38, p. 283-290, <https://www.jstor.org/stable/26245463>, 1957
- Bolloorani, A. D., Nabavi, S. O., Bahrami, H. A., Mirzapour, F., Kavosi, M., Abasi, E. and Azizi, R.: Investigation of dust storms entering Western Iran using remotely sensed data and synoptic analysis; *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12, p. 124, <https://doi.org/10.1186/s40201-014-0124-4>, 2014.
- Bou Karam, D. : Mécanismes de soulèvement des aérosols désertiques en Afrique de l'Ouest, thèse, 2008.
- Karam, D. B. Flamant, C., Knippertz, P., Reitebuch, O., Pelon, J., Chong, M. and Dabas, A.: Dust emissions over the Sahel associated with the West African monsoon intertropical discontinuity region: A representative case-study; *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume 134, p. 621-634, <https://doi.org/10.1002/qj.244>, 2008.

Brooks N. and Legrand M.: Dust variability over northern Africa and rainfall in the Sahel, 1–25, https://doi.org/10.1007/0-306-48086-7_1, 2000.

Cadelis, G., Tourres, R. & Molinié, J.: Short-term effects of the particulate pollutants contained in Saharan dust on the visits of children to the emergency department due to asthmatic conditions in Guadeloupe (French Archipelago of the Caribbean); PloS one, 3, p. 91136, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091136>, 2014.

Carlson, T. N. and Prospero, J. M.: The large-scale movement of Saharan air outbreaks over the northern equatorial Atlantic; Journal of applied meteorology, Volume 11, p. 283-297, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1972\)011<0283:TLSMOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1972)011<0283:TLSMOS>2.0.CO;2), 1972.

Cavalieri, O., Cairo, F., Fierli, F., Donfrancesco, G. D., Snels, M., Viterbini, M., Cardillo, F., Chatenet, B., Formenti, P., Marticorena, B. and others.: Variability of aerosol vertical distribution in the Sahel; Atmospheric Chemistry and Physics, 10, p. 12005-12023, <https://doi.org/10.5194/acp-10-12005-2010>, 2010.

Chadee, X. T. and Clarke, R. M.: Daily near surface large scale atmospheric circulation patterns. Climate Dynamics, 44(11-12), 2927–2946, <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2621-2>, 2015.

Chamley, H. : Contribution éolienne à la sédimentation marine au large du Sahara ; Bulletin de la Société Géologique de France, Volume 4, p. 1091-1100, <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.IV.6.1091>, 1988.

Chiapello, I. and Moulin, C.: TOMS and METEOSAT satellite records of the variability of Saharan dust transport over the Atlantic during the last two decades (1979-1997), Geophysical Research Letters, 29, 17–1, <https://doi.org/10.1029/2001GL013767>, 2002.

Clergue, C., Dellinger, M., Buss, H. L., Gaillardet, J., Benedetti, M. F. and Dessert, C: Influence of atmospheric deposits and secondary minerals on Li isotopes budget in a highly weathered catchment, Guadeloupe (Lesser Antilles), Elsevier, 414, 28–41, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.08.015>, 2015.

Colarco, P. R., Toon, O. B. and Holben, B. N.: Saharan dust transport to the Caribbean during PRIDE: 1. Influence of dust sources and removal mechanisms on the timing and magnitude of downwind aerosol optical depth events from simulations of in situ and remote sensing observations; Journal of Geophysical Research, 108, <https://doi.org/10.1029/2002JD002658>, 2003.

Coudé-Gaussen, G. : Les poussières sahariennes ; livre, 1991.

d'Almeida, G. A.: A model for Saharan dust transport; Journal of climate and applied meteorology, 25, p. 903-916, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025<0903:AMFSDT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025<0903:AMFSDT>2.0.CO;2), 1986.

Declercq, C., Pascal, M., Chanel, O., Corso, M., Lefranc, A., Medina, S. and others: Impact sanitaire de la pollution atmospherique dans neuf villes francaises. Resultats du projet aphekom, Saint-Maurice: Institut de veille sanitaire, Revue d'epidemiologie et de Sante Publique, 60, <http://www.invs.sante.fr>, 2012.

Diaz, H. F., Carlson, T. N. and Prospero, J. M.: A study of the structure and dynamics of the Saharan air layer over the northern equatorial Atlantic during BOMEX, 1976.

Dubovik, O., Holben, B., Eck, T. F., Smirnov, A., Kaufman, Y. J., King, M. D., Tanre, D. and Slutsker, I.: Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations, Journal of the atmospheric sciences, 59, 590–608, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059<0590:VOAAOP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<0590:VOAAOP>2.0.CO;2), 2002.

Dubovik, O., Holben, B. N., Lapyonok, T., Sinyuk, A., Mishchenko, M. I., Yang, P. and Slutsker, I.: Non-spherical aerosol retrieval method employing light scattering by spheroids; Geophysical Research Letters, 29, p.54-1, <https://doi.org/10.1029/2001GL014506>, 2002.

Dubovik, O. and King, M. D.: A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements; Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 105, p. 20673-20696, <https://doi.org/10.1029/2000JD900282>, 2000.

Dunion, J. P.: Rewriting the climatology of the tropical North Atlantic and Caribbean Sea atmosphere, Journal of Climate, 24, 893–908, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3496.1>, 2011.

Dunion, J. P. and Marron, C. S.: A reexamination of the Jordan mean tropical sounding based on awareness of the Saharan air layer: Results from 2002; Journal of Climate, Volume 21, p. 5242-5253, <https://doi.org/10.1175/2008JCLI1868.1>, 2008.

Dunion, J. P. and Velden, C. S.: The impact of the Saharan air layer on Atlantic tropical cyclone activity; Bulletin of the American Meteorological Society, 85, p. 353-366, <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-353>, 2004.

Eck, T. F., Holben, B. N., Sinyuk, A., Pinker, R. T., Goloub, P., Chen, H., Chatenet, B., Li, Z., Singh, R. P., Tripathi, S. N. and others.: Climatological aspects of the optical properties of

fine/coarse mode aerosol mixtures.; Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115, <https://doi.org/10.1029/2010JD014002>, 2010.

Ehrenberg, Erläuterungen eines neuen wirklichen Passatstaubes aus dem atlantischen Dunkelmeere vom 29 Okt. 1861. s.l.:Monatsber. Kgl. Preuss. Akad. Wiss, 1862.

Engel-Cox, J. A., Holloman, C. H., Coutant, B. W. and Hoff, R. M.: Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality. Atmospheric Environment, 38, 2495–2509, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.039>, 2004.

Engelstaedter S. and Washington R.: Atmospheric controls on the annual cycle of North African dust, Journal of geophysical research atmospheres, 112, <https://doi.org/10.1029/2006JD007195>, 2007.

Euphrasie-Clotilde, L., Molinie, J., Feuillard, T. and Brute, F.-N.: The relationship between coastal west African dust level and Caribbean island dust; Air Pollution 2017, 2017.

Evangelopoulos, V., Zoras, S., Triantafyllou, A. and Albanis, T. : PM10-PM2. 5 time series and fractal analysis; Global Nest J, 8, p. 234-240, 2006.

Flamant, C., Chaboureaud, J-P., Parker, D. J., Taylor, C. M., Cammas, J-P., Bock, O., Timouk, F. and Pelon, J.: Airborne observations of the impact of a convective system on the planetary boundary layer thermodynamics and aerosol distribution in the inter-tropical discontinuity region of the West African monsoon; Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 133, p. 1175-1189, <https://doi.org/10.1002/qj.97>, 2007.

Formenti, P., Schutz, L., Balkanski, Y., Desboeufs, K., Ebert, M., Kandler, K., Petzold, A., Scheuven, D., Weinbruch, S. and Zhang, D.: Recent progress in understanding physical and chemical properties of African and Asian mineral dust; Atmospheric Chemistry and Physics, 11, 8231–8256, doi:10.5194/acp-11-8231-2011 (<https://www.atmos-chem-phys.net/11/8231/2011/acp-11-8231-2011.pdf>), 2011.

García, M. I., Rodríguez, S. and Alastuey, A.: Impact of North America on the aerosol composition in the North, Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 7387, <https://doi.org/10.5194/acp-17-7387-2017>, 2017.

Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J. M., Holben, B., Dubovik, O. and Lin, S.-J.: Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model; Journal of geophysical research, Volume 106, p. 20255–20273, <https://doi.org/10.1029/2000JD000053>, 2001.

- Gläser, G., Wernli, H., Kerkweg A. and Teubler L.: The transatlantic dust transport from North Africa to the Americas—Its characteristics and source regions, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 231–252, <https://doi.org/10.1002/2015JD023792>, 2015.
- Goudie, A. S: Desert dust and human health disorders; *Environment international*, Volume 63, p. 101-113, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011>, 2014.
- Goudie, A. S. and Middleton, N. J.: Saharan dust: sources and trajectories, *Transactions of the Institute of British Geographers*, 26, 165–181, <https://doi.org/10.1111/1475-5661.00013>, 2001.
- Huang, Z. and Prospero, J. M.: African dust outbreaks: A satellite perspective of temporal and spatial variability over the tropical Atlantic Ocean, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115, <https://doi.org/10.1029/2009JD012516>, 2010.
- Huneus, N., Schulz, M., Balkanski, Y., Griesfeller, J., Prospero, M. J., Kinne, S., Bauer, S., Boucher, O., Chin, M., Dentener, F. and others.: Global dust model intercomparison in AeroCom phase I; *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume 11, p. 7781-7816, [doi:10.5194/acp-11-7781-2011](https://doi.org/10.5194/acp-11-7781-2011), 2011.
- Institut de veille sanitaire : Note de synthèse relative à la problématique des vents de sable en provenance des déserts, 2015.
- Jaenicke, R. and Schutz, L.: Comprehensive study of physical and chemical properties of the surface aerosols in the Cape Verde Islands region; *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Volume 83, p. 3585-3599, <https://doi.org/10.1029/JC083iC07p03585>, 1978.
- Jordan, C. L.: Mean soundings for the West Indies area; *Journal of Meteorology*, Volume 15, p. 91-97, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1958\)015<0091:MSFTWI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1958)015<0091:MSFTWI>2.0.CO;2), 1958.
- Jury, M. R.: Caribbean Air Chemistry and Dispersion Conditions, *Atmosphere*, 8, 151, <https://doi.org/10.3390/atmos8080151>, 2017.
- Jury, M. R. and Winter, A.: Warming of an elevated layer over the Caribbean; *Climatic Change*, 99, p. 247-259, [DOI 10.1007/s10584-009-9658-3](https://doi.org/10.1007/s10584-009-9658-3), 2010.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J. and others: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project; *Bulletin of the American meteorological Society*, 77, 437–471, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2), 1996.

Karaca, F., Anil, I. and Alagha, O.: Long-range potential source contributions of episodic aerosol events to PM₁₀ profile of a megacity; *Atmospheric Environment*, 43, p. 5713-5722, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.005>, 2009.

Karyampudi, V. M. and Carlson, T. N.: Analysis and numerical simulations of the Saharan air layer and its effect on easterly wave disturbances; *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45, p. 3102-3136, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1988\)045<3102:AANSOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1988)045<3102:AANSOT>2.0.CO;2), 1988.

Kaufman, Y. J., Koren, I., Remer, L. A., Tanre, D., Ginoux, P. and Fan, S.: Dust transport and deposition observed from the Terra-Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) spacecraft over the Atlantic Ocean, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110, <https://doi.org/10.1029/2003JD004436>, 2005.

Kitto, M., Anderson, D. and Zoller, W.: Simultaneous collection of particles and gases followed by multielement analysis using nuclear techniques; *Journal of atmospheric chemistry*, 7, p. 241-259, 1988.

Koçak, M., Mihalopoulos, N. and Kubilay, N.: Contributions of natural sources to high PM₁₀ and PM_{2.5} events in the eastern Mediterranean; *Atmospheric Environment*, 2007.

Koren, I., Joseph, J. H. and Israelevich, P.: Detection of dust plumes and their sources in northeastern Libya; *Canadian journal of remote sensing*, 29(6), pp. 792-796, 2003.

Koren, I., Kaufman, Y. J., Washington, R., Todd, M. C., Rudich, Y., Martins, J. V. and Rosenfeld, D.: The Bodele depression: a single spot in the Sahara that provides most of the mineral dust to the Amazon forest; *Environmental Research Letters*, 1,p. 014005, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/1/1/014005>, 2006.

Laurent, B.: Simulation des émissions d'aérosols désertiques à l'échelle continentale: Analyse climatologique des émissions du nord-est et de l'Asie et du nord de l'Afrique ; thèse, 2005.

Li-Jones, X. and Prospero, J.: Variations in the size distribution of non-sea-salt sulfate aerosol in the marine boundary layer at Barbados: Impact of African dust; *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103, p. 16073-16084. 1998.

Lippman: Semi-continuous speciation analyses for ambient air particulate matter :an urgent need for health effect studies.; *J Expo Sci Environ Epidemiol*, 2009.

Malardel, S. : Fondamentaux de météorologie ; Cépadues éditions éd. , 2005.

Maring, H. et al.: Mineral dust aerosol size distribution change during atmospheric transport; *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Volume 108, 2003.

Menu, L. et al.: Impact of realistic hourly emissions profiles on air pollutants concentrations modelled with CHIMERE; *Atmospheric environment*, Volume 49, p. 233-244, 2012

Mielonen, T. et al.: Comparison of CALIOP level 2 aerosol subtypes to aerosol types derived from AERONET inversion data; *Geophysical Research Letters*, 36, 2009.

Monteil, M. et al.: Comparison of prevalence and severity of asthma among adolescents in the Caribbean islands of Trinidad and Tobago: results of a nationwide cross-sectional survey; *BMC Public Health*, 5, p. 96, 2005.

Morman, S. A. & Plumlee, G. S.: The role of airborne mineral dusts in human disease; *Aeolian Research*, Volume 9, p. 203-212, 2013.

Mustafa Koçak, N. M. N. K: Contributions of natural sources to high PM₁₀ and PM_{2.5} events in the eastern Mediterranean; *Elsevier*, p. 3806-3818, 2007.

Nakajima, T. et al.: Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions; *Applied Optics*, 35, p. 2672-2686, 1996.

Patashnick, H. & Rupprecht, E. G.: Continuous PM-10 measurements using the tapered element oscillating microbalance; *Journal of the Air & Waste Management Association*, 41, p. 1079-1083, 1991.

Pelletier, B., Santer, R. and Vidot, J.: Retrieving of particulate matter from optical measurements: a semiparametric approach, *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, 112, <https://doi.org/10.1029/2005JD006737>, 2007.

Pere, J.-C., Pont, V., Mallet, M. and Bessagnet, B.: Mapping of PM₁₀ surface concentrations derived from satellite observations of aerosol optical thickness over South-Eastern France, *Atmospheric Research*, 91, 1–8, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.05.001>, 2009.

Perez, N. et al.: Partitioning of major and trace components in PM₁₀-PM_{2.5}-PM₁ at an urban site in Southern Europe; *Atmospheric Environment*, 42, p. 1677-1691, 2008.

Petit, R.-H., Legrand, M., Jankowiak, I., Molinie, J., Asselin de Beauville, C., Marion, G. and Mansot, J. L.: Transport of Saharan dust over the Caribbean Islands: Study of an event, 10, <https://doi.org/10.1029/2004JD004748>, 2005.

Pietryk, G. : Panorama de la physique, 2015.

Prats, N., Cachorro, V. E., Berjon, A., Toledano, C. and De Frutos, A. M.: Column-integrated aerosol microphysical properties from AERONET Sun photometer over southwestern Spain, 11, 12535–12547, doi:10.5194/acp-11-12535-2011, 2011.

Prospero, J. M., Collard, F.-X., Molinié, J. & Jeannot, A.: Characterizing the annual cycle of African dust transport to the Caribbean Basin and South America and its impact on the environment and air quality; *Global Biogeochemical Cycles*, 28, p. 757-773, 2014.

Prospero, Blades, Mathison & Naidu: Interhemispheric transport of viable fungi and bacteria from Africa to the Caribbean with soil dust. *Aerobiologia*, 21, p. 1-19, 2005.

Prospero, Bonatti, Schubert & Carlson, Dust in the Caribbean atmosphere traced to an African dust storm. Elsevier, Volume 9, p. 287-293. 1970.

Prospero, Glaccum and Nees: Atmospheric transport of soil dust from Africa to South America; *Nature*, 289, p. 570-572, 1981.

Prospero, J. M., Bonatti, E., Schubert, C. & Carlson, T. N.: Dust in the Caribbean atmosphere traced to an African dust storm; *Earth and Planetary Science Letters*, 9, p. 287-293, 1970.

Prospero, J. M. and Carlson, T. N.: Vertical and areal distribution of Saharan dust over the western equatorial North Atlantic Ocean; *Journal of Geophysical Research*, Volume 77, p. 5255-5265, 1972.

Prospero, J. M. et al.: Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product; *Reviews of geophysics*, Volume 40, 2002.

Prospero, J. M. and Lamb, P. J.: African droughts and dust transport to the Caribbean: Climate change implications; *Science*, 302, p. 1024-1027, 2003.

Prospero, J. M. and Nees, R. T: Dust concentration in the atmosphere of the equatorial North Atlantic: Possible relationship to the Sahelian drought; *Science*, Volume 196, p. 1196-1198, 1977.

Prospero, J. M., Olmez, I. & Ames, M.: Al and Fe in PM 2.5 and PM 10 suspended particles in south-central Florida: The impact of the long-range transport of African mineral dust; *Water, Air, and Soil Pollution*, 125, p. 291--317. 2001.

Prospero, J. M., Savoie, D. L., Carlson, T. N. & Nees, R. T.: Monitoring Saharan aerosol transport by means of atmospheric turbidity measurements. *Saharan Dust: Mobilization, Transport, Deposition*, p. 171-186, 1979.

Prospero and Mayol-Bracero: Understanding the transport and impact of African dust on the Caribbean basin. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, p. 1329-1337, 2013.

Querol, X. et al: PM₁₀ and PM_{2.5} source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain; *Atmospheric Environment*, p. 6407-6419. 2001.

Rastelli, E., Corinaldesi, C., Dell'Anno, A., Martire, M. L., Greco, S., Facchini, M. C., Rinaldi, M., O'dowd, C., Ceburnis, D. and Danovaro, R.: Transfer of labile organic matter and microbes from the ocean surface to the marine aerosol: an experimental approach, *Scientific reports*, 7, 11475, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10563-z>, 2017.

Reid: Preliminary Mission Plan for a Puerto Rico Dust Experiment (PRIDE) for Summer 2000, 2000.

Reid, J. S. et al. : Analysis of measurements of Saharan dust by airborne and ground-based remote sensing methods during the Puerto Rico Dust Experiment (PRIDE); *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Volume 108, 2003.

Reyes, D. R., Rosario, O., Rodriguez, J. F. & Jimenez, B. D: Toxic evaluation of organic extracts from airborne particulate matter in Puerto Rico; *Environmental health perspectives*, 108, p. 635-640, 2000.

Rolph, G., Stein, A. and Stunder, B.: Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY, *Environmental Modelling & Software*, 95, 210–228, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>, 2017.

Savoie, D. L. & Prospero, J. M.: Aerosol concentration statistics for the northern tropical Atlantic; *Journal of Geophysical Research*, Volume 82, p. 5954-5964, 1977.

Schacht, E. J.: A mean hurricane sounding for the Caribbean area; *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Volume 27, p. 324-327. 1946.

Schepanski, K., Tegen, I. & Macke, A.: Saharan dust transport and deposition towards the tropical northern Atlantic; *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume 9, p. 1173-1189, 2009.

Schepanski, K., Tegen, I., Todd, M. C., Heinold, B., Bonisch, G., Laurent, B. and Macke, A.: Meteorological processes forcing Saharan dust emission inferred from MSG-SEVIRI observations of subdaily dust source activation and numerical models, *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, 114, <https://doi.org/10.1029/2008JD010325>, 2009.

Schutz, L.: Long range transport of desert dust with special emphasis on the Sahara, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 338, 515–532, <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1980.tb17144.x>, 1980.

Schutz, L., Jaenicke, R. & Pietrek, H.: Saharan dust transport over the North Atlantic Ocean; *Geological Society of America Special Papers*, Volume 186, p. 87-100, 1981

Schwanghart, W. and Schutt, B.: Meteorological causes of Harmattan dust in West Africa; *Geomorphology*, 95, p. 412-428, 2008.

Sellegri, K., Gourdeau, J., Putaud, J.-P. and Despiiau, S.: Chemical composition of marine aerosol in a Mediterranean coastal zone during the FETCH experiment, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106, 12023–12037, <https://doi.org/10.1029/2000JD900629>, 2001.

Semmelhack, W.: Die Staubfalle im nordwest-afrikanischen Gebiet des Atlantischen Ozeans; *Ann. Hydr*, Volume 62, p. 273-277, 1934.

Shenk, W. E. and Curran, R. J.: The detection of dust storms over land and water with satellite visible and infrared measurements; *Monthly Weather Review*, Volume 102, p. 830-837, 1974.

Shinn, E. A. et al. : African dust and the demise of Caribbean Coral Reefs; *Geophysical research Letter*, Volume 27, p. 3029–3032, 2000.

Smirnov, A., Holben, B. N., Savoie, D., Prospero, J. M., Kaufman, Y. J., Tanre, D., Eck, T. F. and Slutsker, I.: Relationship between column aerosol optical thickness and in situ ground-based dust concentrations over Barbados, *Geophysical Research Letters*, 27, 1643–1646, <https://doi.org/10.1029/1999GL011336>, 2000.

Sportisse, B. : *Pollution atmosphérique : des processus à la modélisation*, 2008.

Stohl, A.: Computation, accuracy and applications of trajectories—a review and bibliography, *Atmospheric Environment*, 32, 947–966, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00457-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00457-3), 1998.

- Takemura, T., Nakajima, T., Dubovik, O., Holben, B. N. and Kinne, S.: Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model, *Journal of Climate*, 15, 333–352, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0333:SSAARF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0333:SSAARF>2.0.CO;2), 2002.
- Toledano, C., Cachorro, V. E., De Frutos, A. M., Sorribas, M., Prats, N. and De la Morena, B. A.: Inventory of African desert dust events over the southwestern Iberian Peninsula in 2000–2005 with an AERONET Cimel Sun photometer, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112, <https://doi.org/10.1029/2006JD008307>, 2007.
- Tombette, M., Mallet, V. & Sportisse, B.: PM10 data assimilation over Europe with the optimal; *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume 9, p. 59-70, 2009.
- Triplet, J. & Roche, G.: *Météorologie générale* 3ème édition, 1996
- Ung, et al. : Comment réaliser une évaluation sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine ? Saint-Maurice, 2012.
- Velasco-Merino, C., Mateos, D., Toledano, C., Prospero, J. M., Molinie, J., Euphrasie-Clotilde, L., Gonzalez, R., Cachorro, V. E., Calle, A. and de Frutos, A. M.: Impact of long-range transport over the Atlantic Ocean on Saharan dust optical and microphysical properties based on AERONET data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 9411–9424, <https://doi.org/10.5194/acp-18-9411-2018>, 2018.
- Virnot, C. : Effet de la brume de sable sur les symptômes évocateurs de rhinite allergique chez l'adulte et l'enfant de plus de 12 ans en Guadeloupe ; thèse, 2017.
- Wang, C., Zhang, Z. and Yue, S.: Correlating aerosol optical thickness measurement with PM10 mass concentration in Wuhan area, 8201, <https://doi.org/10.1117/12.904464>, 2011.
- Wang, J., Christopher, S. A., Reid, J. S., Maring, H., Savoie, D., Holben, B. N., Livingston, J. M., Russel, P. B. and Yang, S.-K.: GOES 8 retrieval of dust aerosol optical thickness over the Atlantic Ocean during PRIDE, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108, 8595, <https://doi.org/10.1029/2002JD002494>, 2003.
- Wang, Z., Chen, L., Tao, J., Zhang, Y. and Su, L.: Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method, *Remote sensing of environment*, 114, 50–63, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.009>, 2010.

Washington, et al.: Dust as a tipping element: the Bodélé Depression, Chad; Proceedings of the National Academy of Sciences, 106, p. 20564-20571, 2009.

Weinzierl, B., Ansmann, A., Prospero, J. M., Althausen, D., Benker, N., Chouza, F., Dollner, M., Farrell, D., Fomba, W. K., Freudenthaler, V. and others: The Saharan Aerosol Long-range Transport and Aerosol--Cloud-Interaction Experiment: Overview and selected highlights; Bulletin of the American Meteorological Society, 98, pp. 1427-1451, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00142.1>, 2017.

Wu, Y., de Graaf, M. and Menenti, M.: Improved MODIS Dark Target aerosol optical depth algorithm over land: angular effect correction. Atmospheric Measurement Techniques, 9, p. 5575, 2016.

Xu, G. et al.: Spatial and temporal variability of the PM_{2.5}/PM₁₀ ratio in Wuhan, Central China; Aerosol and Air Quality Research, 17, p. 741-751, 2017.

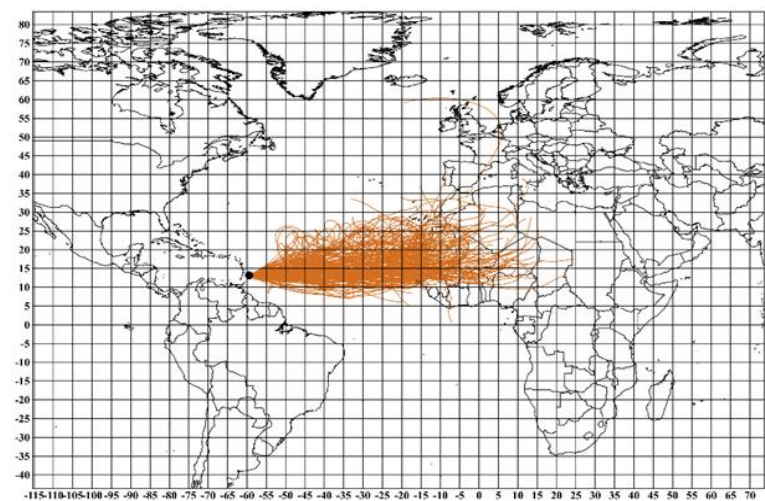
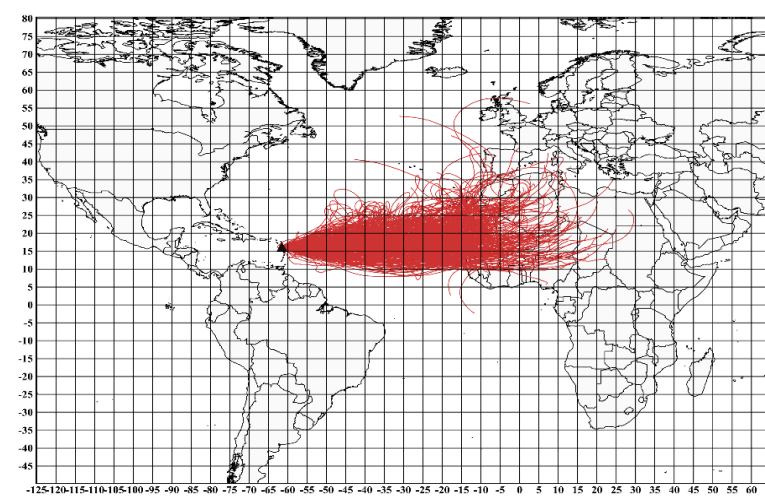
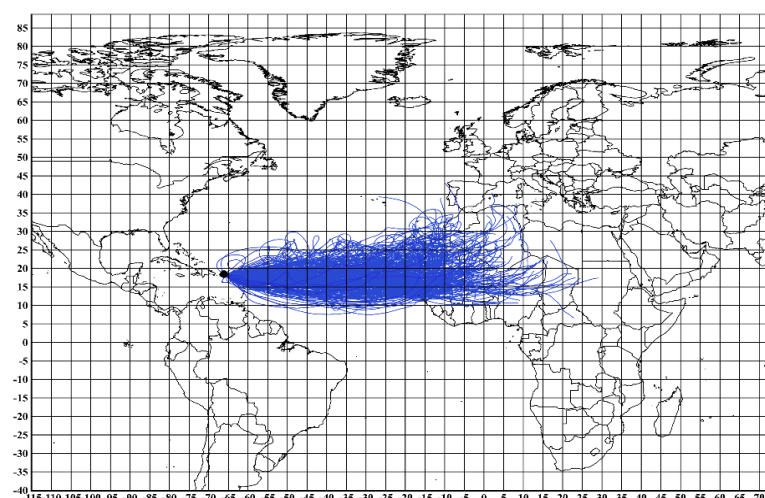
Zapata, C., Cano, N. and Ramirez, M.: PM_{2.5}/PM₁₀ relationship in the Metropolitan Area of Valle de Aburrá; Air Pollution 2016, Vol 207, 2016.

Zender, C. S., Bian, H. and Newman, D.: Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology; Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Volume 108, 2003.

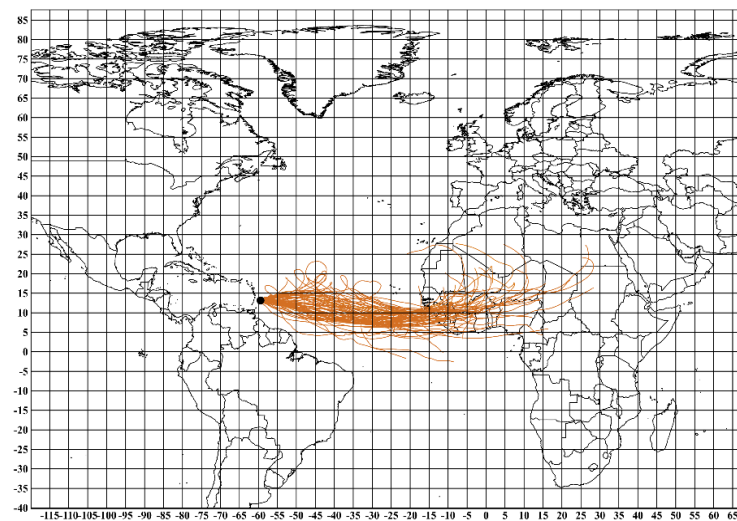
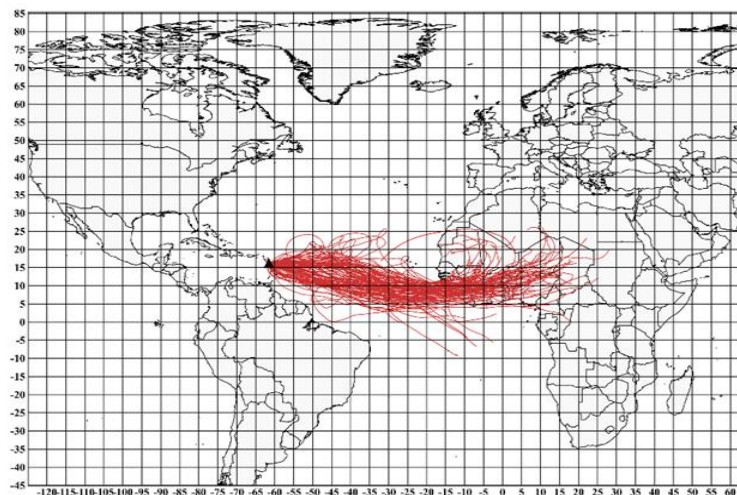
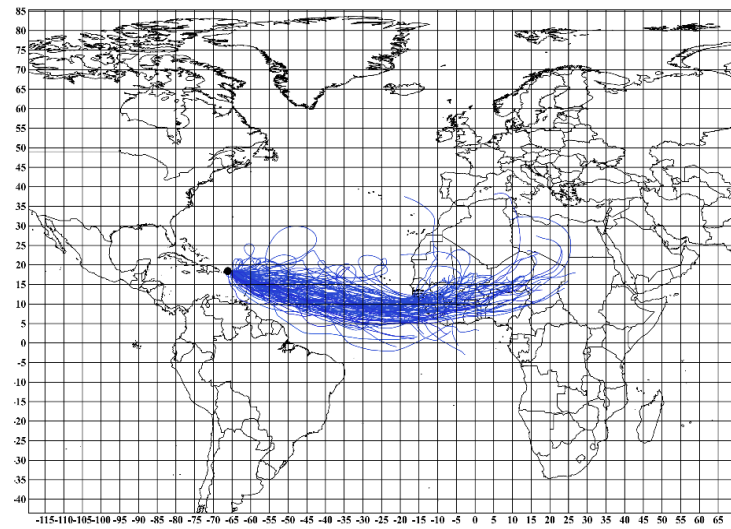
ANNEXES

Représentation graphique de la classification des retro-trajectoires associées aux Jours poussiéreux des îles de la Caraïbe : Porto Rico, Guadeloupe, Barbade

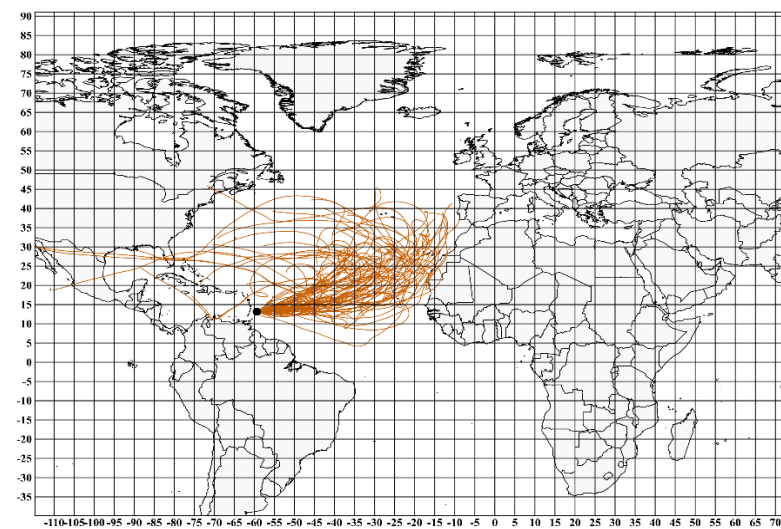
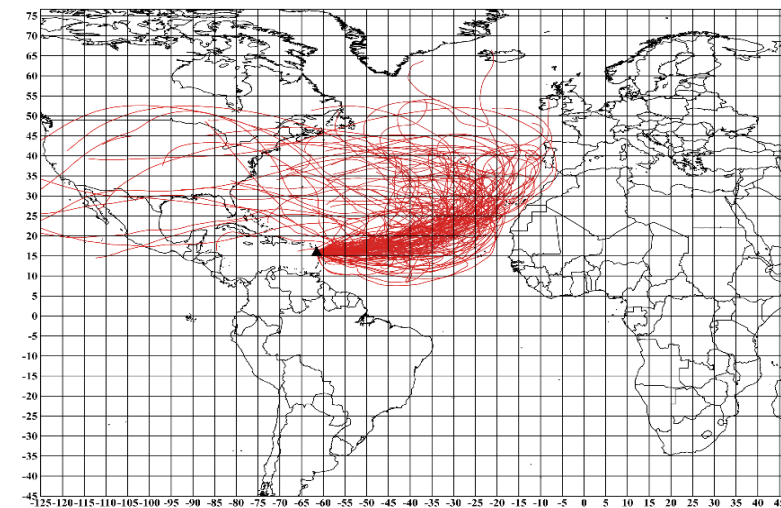
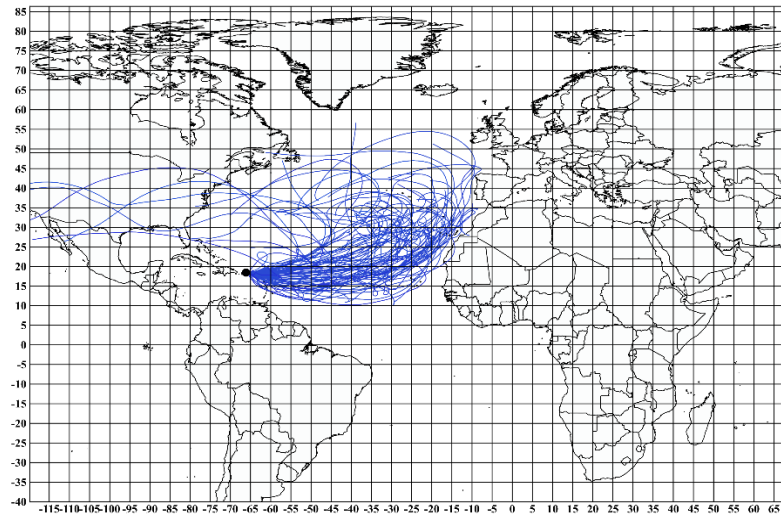
NOAP



SOAP



NEAP



LISTE DES PUBLICATIONS

ARTICLES PUBLIES DANS DES REVUES A COMITE DE LECTURE

- C. Velasco-Merino, D. Mateos, C. Toledano, J. M. Prospero, J. Molinie, L. Euphrasie-Clotilde, R. González, V. E. Cachorro, A. Calle and A. M. Frutos, **“Impact of long-range transport over the Atlantic Ocean on Saharan dust optical and microphysical properties”**, Atmospheric Chemistry and Physics (ACP), July 2018 ;
<https://www.atmos-chem-phys.net/18/9411/2018/>
- L. Euphrasie-Clotilde, J. Molinie et T. Feuillard and F.-N. Brute, **“The relationship between coastal West African dust level and Caribbean island dust”**, Air Pollution 2017 (Conference paper), July 2017
<https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/AIR17/AIR17012FU1.pdf>

ARTICLE SCIENTIFIQUE EN COURS DE SOUMISSION

- **“Assessment of a new detection threshold for PM10 related to dust episodes in the Caribbean Basin”**, Atmospheric Environment, Septembre 2018

ARTICLE SCIENTIFIQUE EN PREPARATION

- **“Influence of Saharan dust on atmospheric temperature behavior in the Caribbean region”**, soumission prévue pour Octobre 2018 à Atmospheric Environment

PRESENTATIONS ORALES A DES CONGRES INTERNATIONAUX

- **European Meteorology Society 2017* (Dublin, Irlande)**
“Desert dust PM 2.5 and PM 10 ratio over a Caribbean island atmosphere”, EMS2017-866, 4–8 September 2018, https://presentations.copernicus.org/EMS2017-866_presentation.pdf
- **Air Pollution 2017 (Cadiz, Espagne)**

L. Euphrasie-Clotilde, J. Molinie, T. Feuillard and F. Brute “Caribbean islands dusty air masses long range transport characteristics : a climatological study”, *présentation orale assurée par J. Molinie*, <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/AIR17/AIR17012FU1.pdf>

→ **Caribbean Academy of Sciences 2016 (Deshaies, Guadeloupe)**

“Dust event intensity statistics related to air masses trajectories climatology over Guadeloupe”; <https://ahp.li/9f869e2f2f9699e325d9.pdf>

POSTERS (CONGRES INTERNATIONAUX)

→ **Dustworkshop9th 2018 (Ténérife, Espagne)**

Euphrasie-Clotilde L., J. Molinie, C. Bassette, F. Brute, T. Feuillard, S. Jacoby-Koaly, T. Plocoste, C. Virnot, “Climatology of dust aerosols transportation over the Atlantic Ocean towards Caribbean area”, 22-24 May 2018, <https://ahp.li/3436285a009748b378f8.pdf>

→ **European Meteorology Society 2016 (Trieste, Italie)**

J. Molinie, L. Euphrasie-Clotilde, T. Feuillard, F.N. Brute, “Desert dust over a Caribbean island with North West Atlantic air masses”, EMS2016-572, 12-16 September 2016, <https://ahp.li/60b7697d5693573410d1.pdf>

→ **American Geophysical Union 2015 (San Francisco , USA)**

J. Molinie, J.-L. Henry, J. Clement, L. Euphrasie-Clotilde, F.-N. Brute, “Correlation between AERONET AOT and VIIRS EDR AOT: A new EDR cell”, AGU2015, A23C-0326, December 14-18, 2015, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015AGUFM.A23C0326M>

→ **European Geoscience Union 2015 (Vienne, Autriche)**

L. Euphrasie-Clotilde, J. Molinie, J. Prospero, T. Feuillard, F.N. Brute, A. Jeannot, “Dusty air masses transport between Amazon Basin and Caribbean Islands”, EGU 2015-14727, 12-17 April 2015, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015EGUGA..1714727E>

→ **European Geoscience Union 2014 (Vienne, Autriche)**

J. Molinie, BERNARD M.L., Komorowski J.C., L Euphrasie-Clotilde, Brute F.N., Roussas A., “ Particle size distribution and PM10 of volcanic ashes in Guadeloupe during the major

eruption of Soufrière Hills in February 2010”, EGU2014-16357-1, 27 April-02 May 2014
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2014EGUGA..1616357M>