



THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Spécialité

Sciences de l'environnement d'Ile-de-France

Mention

Physique de l'atmosphère

présentée par

Adrien Deroubaix

pour obtenir le grade de

Docteur de l'université Pierre et Marie Curie

Impact des aérosols désertiques et du climat sur les épidémies de méningites au Sahel

Thèse soutenue le 17 septembre 2013 devant la commission d'examen composée de :

Pr. Hervé Le Treut	Président
Dr. Gil Mahé	Rapporteur
Dr. Jacques-André Ndione	Rapporteur
Dr. Isabelle Chiapello	Examineur
Dr. Hélène Broutin	Examineur
Dr. Bernard Fontaine	Examineur
Pr. Sylvie Thiria	Directeur de thèse
Dr. Nadège Martiny	Co-directeur

A Julien, Edouard et Nicolas partis trop tôt.

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier Nadège Martiny, Sylvie Thiria et Bernard Fontaine qui m'ont permis d'aller au bout de ce travail. Je souhaite aussi remercier Béatrice Marticorena et Isabelle Chiapello pour m'avoir accueilli quelques temps. Je tiens aussi à remercier tous les membres de mon jury d'avoir pris le temps de s'intéresser à mes recherches.

Je tiens à remercier Lydiane, Juliette et tout le groupe *MAMEMA*. Merci à tous mes amis pour leur soutien, tout d'abord mes amis de *Créteil* : Benjamin, Camille, Guillaume, Hervé, Marie, Richard, Vincent et toute la team de l'*ASIL* ; mes amis de *Dijon* : Clémence, Paul-Arthur, Julien et toute l'équipe du *CRC* ; les *meudonnais* : Alexia, Antoine, Arnaud, Barbara, Caroline, Charles, Clément, Gregory, Isabelle, Louis, Maxime, Nicolas, Olivier, Roxane, Sarah ; la *tour 65* : Alain, Matthieu, Myriame, Philippe, Léo, Sarah, Yann ; mes amis du *master* : Anne, Constance, Clément et Lucile ; et aussi le vrai *havrais* : Vincent ; la liste n'est bien sûr pas exhaustive. Inhabituellement, merci à Bob, Ludovico et les autres musiciens pour l'accompagnement sonore sur Radio Bax.

Enfin, un grand merci à toute la famille, ma Mam et mon Pap' ainsi que mes reufs π_r et the M@d, et bien sûr à Inga Malle-à-Kuss.

Liste des acronymes

AI	<i>Aerosol Index</i>
AMMA	<i>Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine</i>
AOT	<i>Aerosol Optical Thickness</i>
DTS	<i>Dépression Thermique Saharienne</i>
ERA-Interim	<i>European (Center for Medium Weather Forecast) Re-Analysis-Interim</i>
FIT	<i>Front de convergence InterTropicale</i>
MERIT	<i>Meningitis Environmental Risk Information Technologies</i>
OMI	<i>Ozone Monitoring Instrument</i>
OMS	<i>Organisation Mondiale de la Santé</i>
PM	<i>Particulate Matter</i>
SDT	<i>Sahelian Dust Transect</i>
TOMS	<i>Total Ozone Mapping Spectrometer</i>
ZCIT	<i>Zone de Convergence InterTropicale</i>

Table des matières

Introduction	15
I Climat sahélien et épidémies de méningites	21
I-1 La "ceinture" géographique des méningites	21
I-1.1 La méningite cérébro-spinale en Afrique subsaharienne	21
I-1.1.1 L'étiologie de la maladie et l'histoire des épidémies	21
I-1.1.2 La méningite bactérienne	24
I-1.2 L'épidémiologie de la méningite	26
I-1.2.1 Le contexte actuel des épidémies	26
I-1.2.2 La saisonnalité de l'incidence des méningites	30
I-2 Le climat sahélien et les poussières sahariennes en saison sèche	34
I-2.1 L'Harmattan, un vent chargé de poussières désertiques	34
I-2.1.1 Les régimes de mousson et d'Harmattan	34
I-2.1.2 Les caractéristiques et l'observation des poussières désertiques	36
I-2.2 La variabilité spatio-temporelle du climat sahélien	39
I-2.2.1 La télédétection des poussières désertiques : une vue lagrangienne	39
I-2.2.2 La saisonnalité du climat et des poussières : une vue eulérienne	42
I-3 L'importance du climat et des poussières dans les épidémies de méningites	45
I-3.1 La diversité des échelles des facteurs impliqués	45
I-3.2 Le facteur atmosphérique	46
I-3.2.1 L'impact sur le démarrage des épidémies	46
I-3.2.2 L'impact sur l'intensité des épidémies	49
I-3.3 Le rôle spécifique des poussières	52
0 La synthèse et les hypothèses méthodologiques	53
II Base de données "climat-poussières-méningites"	59
II-1 L'incidence des méningites et les variables atmosphériques	60
II-1.1 Les jeux de données	60
II-1.1.1 Les bulletins épidémiologiques de l'OMS à l'échelle du district	60
II-1.1.2 Les champs météorologiques réanalysés	62
II-1.1.3 Les produits satellites d'aérosols	65
II-1.2 L'analyse des variables atmosphériques en Afrique dans la ceinture des méningites	69
II-1.2.1 Les caractéristiques du climat	69
II-1.2.2 Les champs de l'Aerosol Index	74
II-1.3 Les stations de mesures des aérosols désertiques	78

II-1.3.1	Les instruments de références	78
II-1.3.2	Le cycle annuel des AOT et des PM aux stations sahéliennes	80
II-2	La constitution d'une base de données conjointe	84
II-2.1	Les variables atmosphériques à l'échelle des districts	84
II-2.1.1	L'agrégation spatiale et la classification de l'AI-OMI	84
II-2.1.2	Les classifications spatiales des variables ERA-Interim	86
II-2.2	Les liens entre le climat et les poussières aux deux stations	93
II-2.2.1	Analyse individuelle à Banizoumbou et Cinzana	94
II-2.2.2	Analyse conjointe à Banizoumbou et Cinzana	96
III	Transformation de l'Aerosol Index	103
III-1	La validation spécifique de l'AI dans le cadre des études d'impact des poussières désertiques sur les épidémies de méningites	104
III-1.1	Introduction de l'article "Suitability of OMI aerosol index to reflect mineral dust surface conditions : Preliminary application for studying the link with meningitis epidemics in the Sahel"	104
III-1.2	Résultats principaux de l'article	118
III-2	Développement d'une série temporelle d'AI adaptée aux impacts sur la santé au Sahel	119
III-2.1	Mise en évidence du potentiel des mesures de concentrations des poussières en surface pour la correction de l'AI	119
III-2.1.1	La variabilité des AI, AOT et PM aux stations	119
III-2.1.2	Analyse du rapport des mesures intégrées avec la concentration de poussières en surface aux deux stations	124
III-2.2	La méthodologie du raffinement de l'AI	126
III-2.2.1	La définition d'un facteur correctif valable aux stations sahéliennes	126
III-2.2.2	L'évaluation de l'AI transformé	130
III-2.3	L'application de l'AI transformé	132
III-2.3.1	L'extension temporelle à la période de l'AI-TOMS	132
III-2.3.2	L'AI transformé dans les districts du Burkina Faso, du Mali et du Niger	135
IV	Modélisation de l'incidence de la méningite par l'atmosphère	141
IV-1	La recherche des périodicités communes entre les chroniques de poussières, du climat et de la méningite : le cas des districts du Niger	142
IV-1.1	Introduction de l'article "Seasonality of meningitis in Africa and climate forcing : aerosols stand out"	142
IV-1.2	Résultats principaux de l'article	155
IV-2	L'incidence des méningites modélisée à partir de l'atmosphère	155
IV-2.1	La description du complexe formé par les épidémies, le climat et les poussières	156
IV-2.1.1	Les liens entre les variables atmosphériques à l'échelle du district durant la saison de la méningite	156
IV-2.1.2	L'effet de la sélection des années épidémiques	158
IV-2.2	La prévisibilité de l'incidence des méningites par le climat et les poussières .	163
IV-2.2.1	Les variables atmosphériques explicatives de l'incidence	163
IV-2.2.2	La modélisation statistique de l'incidence hebdomadaire de la méningite à partir de la température et des poussières	166
IV-2.3	L'évaluation du modèle de l'incidence des méningites	168
IV-2.3.1	L'analyse de la phase ascendante des épidémies à l'échelle nationale	168
IV-2.3.2	Les structures spatiales de l'incidence des méningites modélisée .	171

Conclusion	175
Annexes	185

Table des figures

1	Pays à haut risque d'épidémie de méningites et la ceinture des méningites (Rapport OMS, 1998).	16
2	Nombre de cas de méningites (à gauche) et nombre de décès (à droite) dans 14 pays de la ceinture des méningites de 2004 à 2009 (Martiny et Chiapello, 2013).	16
3	Saisonnalité des épidémies de méningites à partir des relevés épidémiologiques hebdomadaires sur la période 1995-1999 dans la ceinture des méningites (Rapport OMS, 1998).	17
4	Implémentation du programme AMMA avec (a) les géosciences, (b) la dimension humaine (dont les impacts sur la santé) et (c) l'intégration des connaissances acquises dans divers outils d'alertes (http://www.amma-international.org).	19
I.1	Description des méninges (les deux illustrations supérieures ; http://fr.wikipedia.org/wiki/Méninges), schéma (en bas, à gauche) de l'acquisition ou de la transmission du méningocoque (Virji, 2009) et photographie de méningocoques par un microscope électronique à balayage (en bas à droite ; bioquell.com).	22
I.2	Isohyètes 1100 mm et 300 mm délimitant la ceinture des méningites définie par Lapeysonnie en 1963.	23
I.3	Distribution mondiale des principales sérogroupes de méningocoques (Stephens <i>et al.</i> , 2007)	25
I.4	Distribution spatiale des méningites entre 1950-1979 en gris et 1980-1999 en jaune (Cuevas <i>et al.</i> , 2007).	27
I.5	Chronologie des années épidémiques des pays sahéliens entre 1980 et 1999 (d'après Molesworth <i>et al.</i> (2002)).	28
I.6	Incidence mensuelle des méningites au Burkina Faso pour les années non-épidémiques et pour deux années épidémiques 1957 et 1970 (Rapport OMS, 1998).	31
I.7	Modèle épidémiologique exploratoire des épidémies de méningites dans la ceinture des méningites (Mueller et Gessner, 2010).	33
I.8	Position du Front de convergence Inter-Tropical (en vert) en janvier-février (à gauche) et en juillet-août (à droite). Les flèches représentent la direction du vent avec les alizés continentaux (l'Harmattan, à gauche) et au sud les alizés océaniques (la mousson, à droite). Les contours en bleu montrent la pluviométrie (à partir de l'atlas de l'intégration régionale en Afrique de l'Ouest de 2008 disponible à l'adresse : www.oecd.org/fr/csao/publications/40121057.pdf).	35
I.9	Coupe méridionale de la mousson africaine. Le front d'Harmattan marque la différence entre les masses d'air humide de la mousson et les masses d'air sec de l'Harmattan (Haywood <i>et al.</i> , 2008).	36
I.10	Processus d'érosion éolienne des poussières désertiques dans l'atmosphère (Pye, 1987).	37

I.11	Distributions massiques des sols et des aérosols désertiques collectés à différentes distances de leur source (Schütz, 1980).	38
I.12	Carte des sources de poussières désertiques par (a) 15-minute MSG SEVIRI IR dust index, (b) AOT-MODIS "Deep Blue" (c) AI-OMI de mars 2006 à février 2010. Les fréquences élevées (jaune-orange) représentent les sources fréquemment observées. Les contours sont les isohypses (Schepanski <i>et al.</i> , 2012).	41
I.13	Saisonnalité des sources sahariennes de poussières désertiques (Goudie et Middleton, 2006).	42
I.14	Moyenne glissante sur 30 jours des concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) aux 3 stations du transect sahélien : M'Bour au Sénégal, Cinzana au Mali et Banizoumbou au Niger, sur la période 2006-2008 (Marticorena <i>et al.</i> , 2010).	43
I.15	Evolution du nombre de jour de brumes sèches et du cumul annuel de précipitation entre 1952 et 1986 à Gao au Mali (N'Tchayi <i>et al.</i> , 1994).	44
I.16	Les échelles spatiotemporelles des différentes composantes du facteur environnemental : le climat, les poussières et la société (Adapté de Martiny et al. 2010, conférence AMMA à Toulouse).	46
I.17	Anomalies de la circulation atmosphérique pendant les principales étapes d'une épidémie de MCS au Mali. Les couleurs représentent l'humidité spécifique à 1000 hPa (en Kg/Kg), les isolignes le module du vent à 1000 hPa et les vecteurs la vitesse horizontale du vent (Sultan <i>et al.</i> , 2005).	48
I.18	Relation entre la semaine du démarrage de l'épidémie au Mali (en ordonnées) et la semaine du maximum de l'hiver (en abscisses). La semaine du maximum de l'hiver a été déterminée à partir d'une analyse en composantes principales sur le module du vent issu des réanalyses NCEP/NCAR (Sultan <i>et al.</i> , 2005).	49
I.19	(A) Logarithme de l'incidence annuelle des méningites au Niger (jaune) et résultats de la prévision statistique basée sur une régression linéaire avec le vent d'Harmattan en hiver (rouge) ; (B) idem au Burkina Faso (Yaka <i>et al.</i> , 2008).	51
I.20	Nombre de cas de méningites, humidité absolue et température à Zaria au Nigeria pour la période 1977 à 1979 ; les moyennes sont calculées par période de deux semaines (Greenwood <i>et al.</i> , 1984).	52
I.21	Cycle saisonnier moyen standardisé de méningite, superposé aux cycles des aérosols et de l'humidité spécifique au Niger sur la période 2004-2009 et au Mali sur la période 2005-2009 (Martiny et Chiapello, 2013).	54
I.22	Séries temporelles (A) et cycles annuels moyens (B) de l'incidence hebdomadaire des méningites au Niger (en gris), au Burkina Faso (en noir) et au Mali (en pointillé) sur la période 1996-2007 (Agier <i>et al.</i> , 2013b).	56
II.1	Boxplots hebdomadaires et cycle annuel moyen (en vert) de l'incidence hebdomadaire de la méningite (nombre de cas pour 100 000 habitants par semaine) des districts du Niger (1989-2006), du Mali (1994-2006) et Burkina Faso (1997-2007) ; seuil épidémique (en violet) et seuil d'alerte (en violet pointillé).	61
II.2	Nombre de districts ayant dépassé le seuil épidémique (normal : 15 cas par semaine pour 100 000 habitants ; quand le risque est élevé : 10 cas par semaine pour 100 000 habitants) au Niger (1989-2006), au Mali (1994-2006) et au Burkina Faso (1997-2007).	63
II.3	Moyenne trimestrielle de la température (échelle de couleurs), de l'humidité relative (les contours) et de vent (symbolisé par les flèches) sur la période 1989-2008. JFM est le premier trimestre de l'année ; AMJ le 2 ^{ème} ; JAS le 3 ^{ème} ; OND le 4 ^{ème} ; la ceinture des méningites est représentée en violet et les régions des trois pays en blanc.	66

II.4	Moyenne du premier trimestre de l'AI obtenu par le capteur OMI sur la période 2005 à 2008 (en haut) et TOMS (en bas) sur la période 1997 à 2001 (à gauche) et sur la période 2002 à 2004 (à droite), le minimum de l'échelle de couleur est à 0,5 ; la ceinture des méningites est représentée en violet et les régions des trois pays en blanc.	68
II.5	a) Anomalies du cycle annuel moyen du 3 ^{ème} axe factoriel (F ₃) du module du vent b) Carte de corrélations entre les séries temporelles de chaque pixel du module du vent et le 3 ^{ème} axe factoriel sur la période 1989-2008 (les corrélations supérieures à un seuil de significativité de 1% sont représentées) ; la ceinture des méningites est représentée en violet sur la carte (OMS).	70
II.6	a) Anomalies du cycle annuel moyen du 1 ^{er} axe factoriel (F ₁) de l'angle du vent ; b) Carte de corrélations entre les séries temporelles de chaque pixel de l'angle du vent et le 1 ^{er} axe factoriel sur la période 1989-2008 (les corrélations supérieures à un seuil de significativité de 1% sont représentées) ; la ceinture des méningites est représentée en violet sur la carte.	71
II.7	a) Anomalies du cycle annuel moyen du 1 ^{er} axe factoriel (F ₁) de l'humidité relative (RH) ; b) Carte de corrélations entre les séries temporelles de chaque pixel de l'humidité relative et le 1 ^{er} axe factoriel sur la période 1989-2008 (les corrélations supérieures à un seuil de significativité de 1% sont représentées) ; la ceinture des méningites est représentée en violet sur la carte.	72
II.8	Anomalies du cycle annuel moyen du 2 ^{ème} axe factoriel (F ₂) de la température ; b) Carte de corrélations entre les séries temporelles de chaque pixel de la température et le 2 ^{ème} axe factoriel sur la période 1989-2008 (les corrélations supérieures à un seuil de significativité de 1% sont représentées) ; la ceinture des méningites est représentée en violet sur la carte.	73
II.9	Anomalies du cycle annuel moyen du 2 ^{ème} axe factoriel (F ₂) de l'AI-TOMS (période 1997-2001) ; b) Carte de corrélations entre les séries temporelles de chaque pixel de l'AI-TOMS et le 2 ^{ème} axe factoriel (les corrélations supérieures à un seuil de significativité de 1% sont représentées) ; la ceinture des méningites est représentée en violet sur la carte.	75
II.10	Anomalies du cycle annuel moyen du 2 ^{ème} axe factoriel (F ₂) de l'AI-TOMS (période 2002-2004) ; b) Carte de corrélations entre les séries temporelles de chaque pixel de l'AI-TOMS et le 2 ^{ème} axe factoriel (les corrélations supérieures à un seuil de significativité de 1% sont représentées) ; la ceinture des méningites est représentée en violet sur la carte.	76
II.11	Anomalies du cycle annuel moyen du 2 ^{ème} axe factoriel (F ₂) de l'AI-OMI (période 2005-2008) ; b) Carte de corrélations entre les séries temporelles de chaque pixel de l'AI-OMI et le 2 ^{ème} axe factoriel (les corrélations supérieures à un seuil de significativité de 1% sont représentées) ; la ceinture des méningites est représentée en violet sur la carte.	77
II.12	Carte topographique de l'Afrique au nord de l'équateur avec les stations AERONET utilisées (Point rouge) et les stations du SDT utilisées (carré rouge) ; Agou. pour Agoufou ; Bani. pour Banizoumbou ; Cinz. pour Cinzana ; Ouag. pour Ouagadougou ; la ceinture des méningites est représentée en violet.	79
II.13	Séries temporelles des AOT (en bleu) et des PM (en rouge) sur la période 2006-2008 au pas de temps hebdomadaire à Cinzana (a) et à Banizoumbou (b).	81
II.14	Cycles annuels moyens des AOT (en bleu) et des PM (en rouge) au pas de temps hebdomadaire sur la période 2006-2008 aux stations de (a) Cinzana et de (b) Banizoumbou.	82

II.15	Périodes d'utilisation des données d'incidence des méningites au Burkina Faso (Inc. BF) au Mali (Inc. Ma) et au Niger (Inc. Ni); des données ERA-interim; de l'AI (TOMS et OMI); d'AOT et de PM des stations de Banizoumbou et de Cinzana.	83
II.16	(en haut) Structure spatiale de l'AI-OMI en Afrique de l'Ouest pour la semaine de l'événement du 8 mars 2006; en blanc les limites des districts du Burkina Faso, Mali et Niger; (en bas) Champ de l'AI-OMI agrégé sur les districts du Burkina Faso, Mali et du Niger pour la semaine de l'événement du 8 mars 2006.	85
II.17	Classification spatiale de l'Aerosol Index (AI-OMI) des districts du Burkina-Faso, Mali, Niger pour 4 classes et moyennes hebdomadaires des 4 classes.	87
II.18	Classification spatiale du module du vent des districts du Burkina-Faso, Mali, Niger pour 4 classes et les cycles annuels moyens hebdomadaires des 4 classes.	89
II.19	Classification spatiale de l'angle du vent des districts du Burkina-Faso, Mali, Niger pour 4 classes et les cycles annuels moyens hebdomadaires des 4 classes.	90
II.20	Classification spatiale de l'humidité relative des districts du Burkina-Faso, Mali, Niger pour 4 classes et les cycles annuels moyens hebdomadaires des 4 classes.	91
II.21	Classification spatiale de la température des districts du Burkina-Faso, Mali, Niger pour 4 classes et les cycles annuels moyens hebdomadaires des 4 classes.	92
II.22	Projection des variables dans le plan principal (CP_1 , CP_2) en considérant les semaines 1 à 18 des années 2006-2008 à Cinzana (Mali) et à Banizoumbou (Niger); variables ERA-Interim : Temp pour la température, RH pour l'humidité relative, Vmod pour le module du vent, Vangle pour l'angle du vent; PM pour les concentrations de poussières; AOT pour l'épaisseur optique en aérosols; AI pour l'Aerosol Index.	95
II.23	(en haut) Projection des variables dans le plan principal (CP_1 , CP_2) en considérant les semaines 1 à 18 des années 2006-2008 pour les deux stations ensemble; variables ERA-Interim : Temp pour la température, RH pour l'humidité relative, Vmod pour le module du vent, Vangle pour l'angle du vent; PM pour les concentrations de poussières; AOT pour l'épaisseur optique en aérosols; AI pour l'Aerosol Index.	97
II.24	Projection des observations dans le plan factoriel formé par la première et la deuxième composante principale (CP_1 , CP_2) en considérant les semaines 1 à 18 pour les deux stations ensembles sur la période 2006-2008; (échelle de couleur à droite) chaque semaine est associée à une couleur différente sur une échelle allant du bleu pour la 1 ^{ère} semaine de l'année, au orange pour la 13 ^{ème} semaine, enfin le rouge pour la 18 ^{ème} semaine.	99
II.25	Schéma n°1 de synthèse des résultats.	101
III.1	Comparaison des séries temporelles des PM (en dégradé de rouge : la plus claire est l'année 2006 et la plus foncée 2008) avec la moyenne des trois années (en noir) à Cinzana (a) et à Banizoumbou (b) de 2006 à 2008 au pas de temps hebdomadaire. . .	121
III.2	Comparaison des séries temporelles des AOT (en dégradé de violet : la plus claire est l'année 2006 et la plus foncée 2008) avec la moyenne des trois années (en noir) à Cinzana (a) et à Banizoumbou (b) de 2006 à 2008 au pas de temps hebdomadaire. . .	122
III.3	Comparaison des séries temporelles des AI (en dégradé de bleu : la plus claire est l'année 2006 et la plus foncée 2008) avec la moyenne des trois années (en noir) à Cinzana (a) et à Banizoumbou (b) de 2006 à 2008 au pas de temps hebdomadaire. . .	123
III.4	Cycles annuels moyens des rapports PM/AOT (a), AOT/AI (b) et PM/AI (c) à partir des valeurs hebdomadaires de la période 2006-2008 à Banizoumbou (en violet), à Cinzana (en vert) et la moyenne des deux stations (en noir); (sur l'axe des ordonnées à droite) Cycle annuel moyen de la température sur la même période.	127

III.5	Valeurs hebdomadaires (a) du ratio PM/AOT et (b) du ratio PM/AI, à Banizoumbou (points violets) et à Cinzana (points verts) ; moyenne des stations (ligne violette à Banizoumbou et verte à Cinzana) ; moyenne commune aux deux stations (ligne noire) ; Tendence sahélienne du rapport PM/AI (ligne noire épaisse) ; valeurs hebdomadaires des rapports associées à $PM > 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (gros points).	129
III.6	Séries temporelles de l'AI hebdomadaire (en bleu sur l'axe des ordonnées à gauche), de l'AI.tr (en noir) et de PM hebdomadaire de 2006 à 2008 (en rouge sur l'axe des ordonnées à droite), à Cinzana (a) et à Banizoumbou (b).	131
III.7	(sur l'axe des ordonnées à gauche) Séries temporelles brutes de l'AI _{TOMS} de 1997 à 2005 (en bleu clair) puis la série homogénéisée de 12 ans de l'AI-TOMS/OMI (en bleu foncé) pour la période 1997-2008 ; (sur l'axe des ordonnées à droite) Mesures de PM (en rouge) et de l'AI.tr (en noir) à Cinzana (a) et à Banizoumbou (b).	134
III.8	Classification spatiale de l'AI.tr des districts du Burkina-Faso, Mali, Niger pour 4 classes et les cycles annuels moyens hebdomadaires des 4 classes.	136
III.9	Séries temporelles des 4 classes de l'AI.tr associées aux districts du Burkina-Faso, Mali, Niger.	137
III.10	Schéma n°2 de synthèse des résultats.	139
IV.1	Cycles annuels moyens des variables atmosphériques de la base de données sur la période 1997-2008 moyennés à l'échelle de tout le Niger ; d'après la figure supplémentaire 6 de l'article Agier <i>et al.</i> (2013b).	143
IV.2	Projection des variables dans le plan principal (CP ₁ , CP ₂) en considérant les semaines 1 à 18 des années 1997-2007 dans les 141 districts du domaine (sans critère de sélection).	157
IV.3	Projection des observations dans le plan principal (CP ₁ , CP ₂) en considérant les semaines 1 à 18 des années 1997-2007 des 141 districts du domaine (sans critère de sélection) ; Chaque semaine est associée à une couleur différente sur une échelle allant du bleu pour la 1 ^{ère} semaine de l'année, au orange pour la 13 ^{ème} semaine, enfin le rouge pour la 18 ^{ème} semaine.	159
IV.4	Projection des observations dans le plan factoriel (CP ₁ , CP ₂) en considérant les semaines 1 à 18 des années 1997-2007 des 141 districts du domaine (point gris sans critère de sélection) ; les points colorés correspondent aux semaines des années épidémiques (sur une échelle allant du bleu pour la 1 ^{ère} semaine de l'année au rouge pour la 18 ^{ème} semaine) ; La courbe (en noir) est la moyenne hebdomadaire de la CP ₁ et de la CP ₂ (à partir des points de la IV.3).	160
IV.5	Séries temporelles de l'incidence observée (en vert) et modélisée (en bleu) à l'échelle nationale pour le Niger, le Mali et le Burkina Faso ; la ligne horizontale (en rouge) est le seuil épidémique sur la période 1997-2007.	169
IV.6	Dates de dépassement de seuil (fixé à 5 cas pour 100 000 habitants par semaine) l'incidence modélisée en fonction de l'incidence observée au Burkina-Faso et au Niger où chaque année est associée à une couleur différente.	170
IV.7	Classification spatiale de l'incidence des méningites modélisée dans les districts du Burkina-Faso, Mali, Niger pour 5 classes et les cycles moyens hebdomadaires des 5 classes entre la 1 ^{ère} semaine et la 18 ^{ème} semaine en nombre de cas pour 100 000 habitants par semaine.	172
IV.8	Schéma n°3 de synthèse des résultats.	174
IV.9	Schéma de la phase de diffusion précédant l'épidémie et la phase épidémique avec le nombre de porteurs asymptomatiques et le nombre de personnes infectées (à partir du rapport de l'OMS, 1998).	180

IV.10 Schéma exploratoire des deux effets de l'atmosphère sur les phases de l'épidémie dans la ceinture des méningites avec la phase de diffusion et la phase de démarrage. .	181
IV.11 Anomalies trimestrielles de température (pour les mois de mars, avril et mai) entre la période future (pour la moyenne de 8 modèles CMIP5 sur la période 2031-2070 avec le scénario rcp4.5) et la période de référence (sur la période 1960-1999) ; à partir des données et de la méthode proposée par (Monerie <i>et al.</i> , 2012).	183
IV.12 Extrait de l'article de Pearson (1901), la recherche de la "droite du meilleur ajustement"	186

Liste des tableaux

I.1	Incidence annuelle moyenne et maximale des méningites (à partir de Molesworth <i>et al.</i> (2002)).	27
II.1	Contribution de chaque variable à la variance des deux premières composantes principales (CP ₁ , CP ₂) de l'ACP réalisée à Banizoumbou, à Cinzana et aux deux stations ensemble pour les semaines 1 à 18 des années 2006-2008.	97
III.1	Moyenne (Moy), écart-type (Ect), maximum (Max) et minimum (Min) trimestriels à partir des valeurs de PM hebdomadaire et de l'AI hebdomadaire à Cinzana et à Banizoumbou (2006-2008).	120
III.2	Coefficients de corrélation (R) entre les valeurs hebdomadaires observées à Cinzana et à Banizoumbou des PM, des AOT et de l'AI sur la période 2006-2008.	124
III.3	Coefficients de corrélation (R) des rapports (PM/AOT ; AOT/AI ; PM/AI) entre les valeurs hebdomadaires observées à Cinzana et à Banizoumbou sur la période 2006-2008.	126
III.4	Coefficients de corrélation entre l'AI et les PM à Cinzana et à Banizoumbou pour les 3 ans de mesures (soit $52 \times 3 = 156$ valeurs) et pour chaque année de la période 2006-2008.	131
III.5	Validation croisée de la tendance sahélienne "tr" du rapport PM/AI à partir des coefficients de corrélation entre les PM et l'AI.tr à Cinzana et à Banizoumbou pour la période 2006-2008.	132
III.6	Moyenne et l'écart-type annuels de l'AI-OMI et AI-TOMS à Banizoumbou et Cinzana pour la période 1997-2008.	133
IV.1	Contribution des variables aux deux premières des composantes principales (CP ₁ , CP ₂) avec : la température, l'humidité relative, l'angle du vent, le module du vent et l'AI.tr (en moyennes hebdomadaires) pour tous les districts entre la 1 ^{ère} semaine et la 18 ^{ème} semaine, sans critères de sélection puis en sélectionnant les années ayant dépassé le seuil épidémique.	158
IV.2	Coefficients de corrélation des composantes principales (CP ₁ , CP ₂ et CP ₃) avec l'incidence (le logarithme), la température, l'humidité relative, l'angle du vent, le module du vent et l'AI.tr (en moyennes hebdomadaires) pour tous les districts entre la 1 ^{ère} semaine et la 18 ^{ème} semaine, sans critères de sélection puis en sélectionnant les années ayant dépassé le seuil épidémique.	162

IV.3	Contribution des variables aux trois premières composantes principales (CP ₁ , CP ₂ et CP ₃) avec l'incidence (le logarithme), la température, l'humidité relative, l'angle du vent, le module du vent et l'AI.tr (en moyennes hebdomadaires) pour tous les districts entre la 1 ^{ère} semaine et la 18 ^{ème} semaine, sans critères de sélection puis en sélectionnant les années ayant dépassé le seuil épidémique.	163
IV.4	Coefficients de régression (b), valeur-p et ordre d'entrée de la variable dans le modèle de l'incidence des méningites (parmi les variables suivantes : la température, l'humidité relative, l'angle du vent, le module du vent et l'AI.tr) pour les valeurs des districts ou des régions si le seuil d'incidence épidémique (de 15) est dépassé entre la 1 ^{ère} semaine et la 18 ^{ème} semaine sur la période (1997-2007).	165
IV.5	A) étape d'apprentissage : Coefficients de régression (b) expliqués par différentes moyennes glissantes de 1 à 4 semaines de la température et de l'AI.tr (décalés d'une semaine) pour les valeurs des districts ou des régions si le seuil d'incidence épidémique (de 15) est dépassé entre la 1 ^{ère} semaine et la 18 ^{ème} semaine sur la période (1997-2007) ; B) étape d'évaluation : biais, la racine carrée des écarts quadratiques moyens (REQM) et le coefficient de corrélation.	167

Introduction générale

Entre la fin de l'hiver et le début du printemps de l'hémisphère nord, des épidémies de méningites ont lieu chaque année en Afrique sub-saharienne et plus précisément dans la "ceinture" géographique de la méningite (Figure 1). Depuis les années cinquante, ce problème de santé publique n'a cessé de prendre de l'importance malgré les multiples campagnes de vaccination de l'Organisation Mondiale de la Santé (Rapport OMS, 1998). En 1996, une des épidémies la plus importante du siècle a touché environ 250 000 personnes et environ 25 000 personnes ont été tuées.

Les pays les plus touchés sont au centre de la ceinture des méningites (Figure 2). Entre 2004 et 2009, plus de 200 000 personnes ont été infectées avec un taux de mortalité d'environ 10% (Rapport OMS, 1998; Martiny et Chiapello, 2013). Les épidémies de méningites sont liées principalement à une bactérie, le méningocoque. La méningite est associée dans l'esprit populaire au *Purpura Fulminans* capable de "foudroyer" un enfant en quelques heures ; c'est en fait une forme aiguë de méningite bactérienne. Alors que cette infection bactérienne n'est responsable que de cas sporadiques en Europe, c'est un grave problème de santé publique en Afrique sub-saharienne. Pour comprendre la dynamique des épidémies, il faut analyser les interactions entre cette bactérie, son hôte et son environnement. L'environnement et particulièrement l'atmosphère joue un rôle important dans ces interactions car les épidémies surviennent essentiellement pendant la période la plus sèche de l'année dans la ceinture des méningites (Rapport OMS, 1998).

Il y a de nombreux effets du climat sur la santé et dans la perspective du changement climatique, un changement de la répartition ou de l'occurrence de certaine pathologie aura lieu (Patz *et al.*, 2005). La vulnérabilité de la population aux infections respiratoires varie en fonction des capacités d'adaptation à la variabilité climatique (Lam et Ayers, 2011). La méningite fait partie des douze maladies reconnues par l'OMS comme étant liées au climat (Kuhn *et al.*, 2005), c'est une maladie météorosensible (Oke, 1994). Dans les régions tropicales, des liens entre le climat et la santé ont été établis depuis longtemps mais ces liens restent encore à préciser aujourd'hui notamment pour le paludisme (Boyd, 1949; Craig *et al.*, 1999), la fièvre de la vallée du Rift (Digoutte et Peters, 1987; Ndione *et al.*, 2005), ou encore la méningite (Lapeyssonnie, 1963; Martiny et Chiapello, 2013).

Au Sahel, l'hiver est la période du vent d'Harmattan venant du Sahara plus au nord transportant de grandes quantités de poussières. Le Sahel est une des régions habitées où les concentrations de poussières mesurées sont à la fois les plus élevées mais aussi les plus persistantes (Marticorena *et al.*, 2010). Par exemple, le seuil européen journalier¹ d'exposition aux poussières utilisé pour surveiller la qualité de l'air, est dépassé presque tous les jours pendant la période de l'Harmattan. Les poussières

1. Le seuil européen de concentration de poussières (PM10) est fixé à 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 24 heures ; ce seuil ne doit pas être dépassé plus de 35 jours par an.

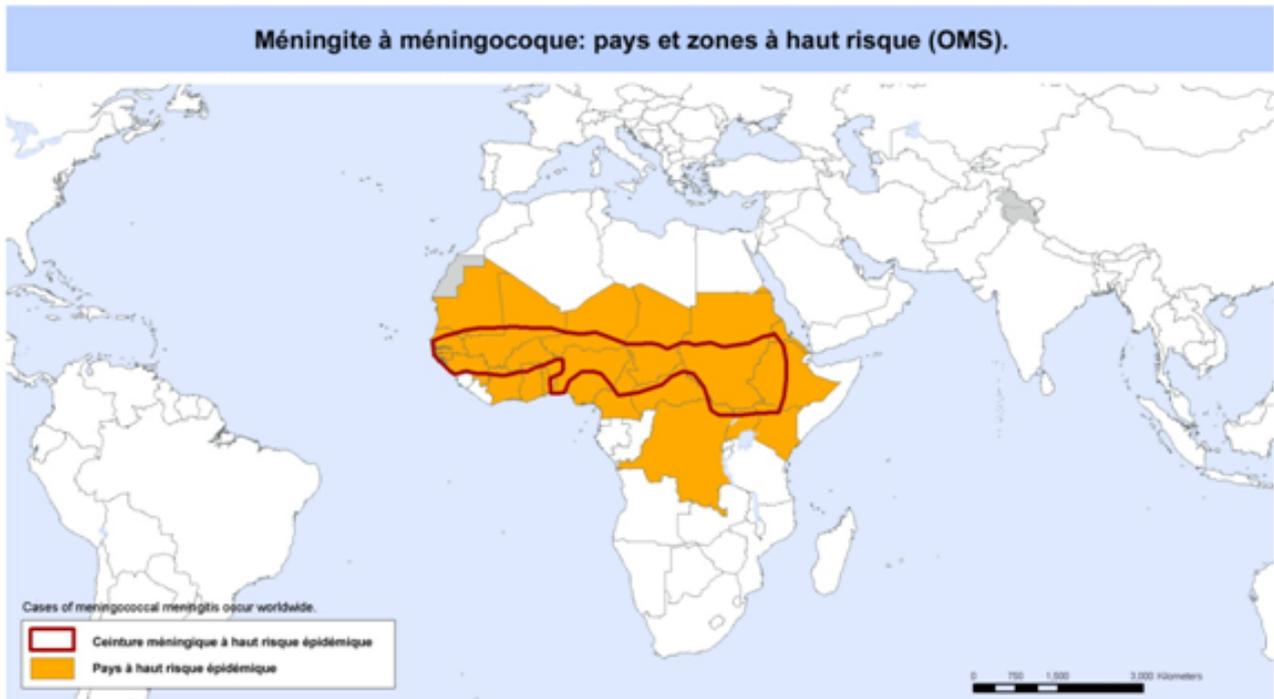


Figure 1. – Pays à haut risque d'épidémie de méningites et la ceinture des méningites (Rapport OMS, 1998).

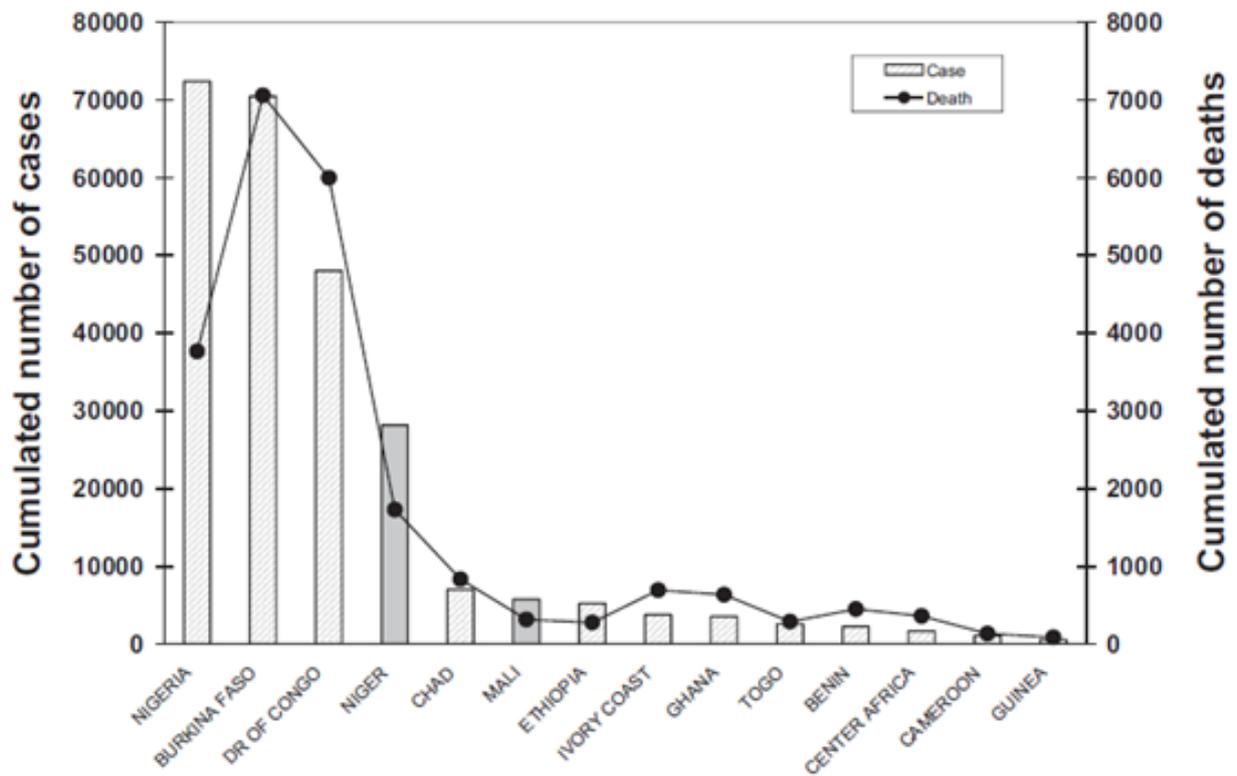


Figure 2. – Nombre de cas de méningites (à gauche) et nombre de décès (à droite) dans 14 pays de la ceinture des méningites de 2004 à 2009 (Martiny et Chiapello, 2013).

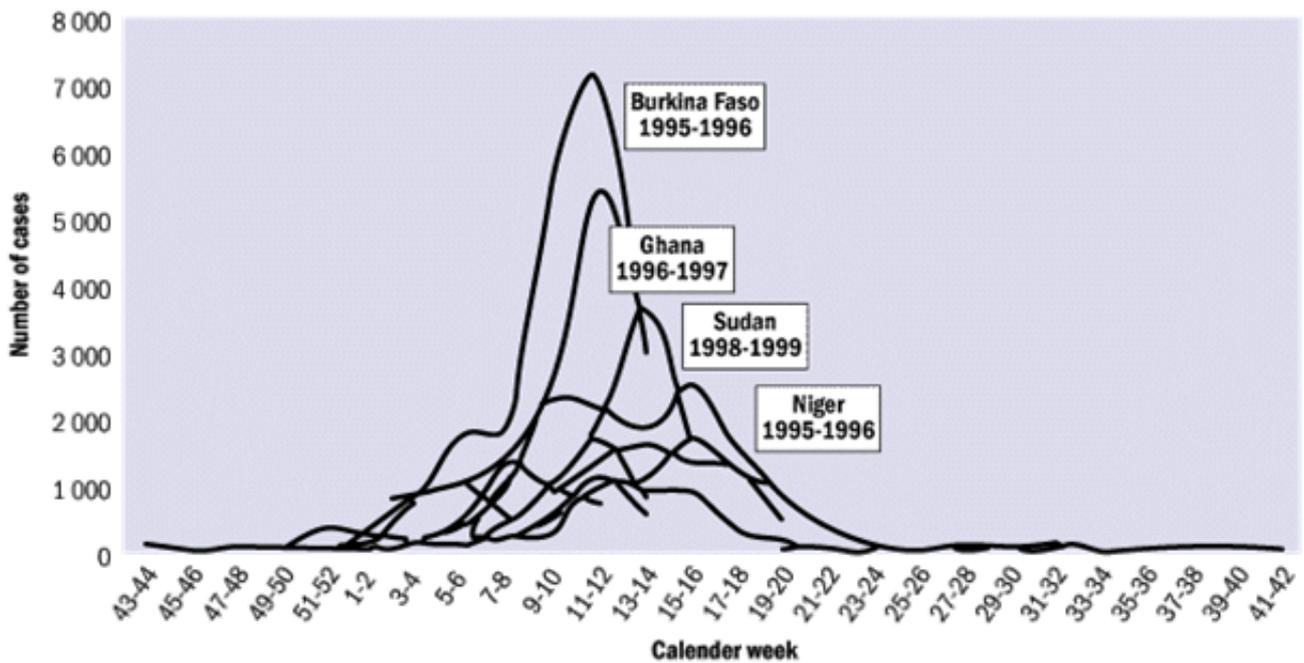


Figure 3. – Saisonnalité des épidémies de méningites à partir des relevés épidémiologiques hebdomadaires sur la période 1995-1999 dans la ceinture des méningites (Rapport OMS, 1998).

respirées ont des effets sur la santé puisqu'elles irritent les voies respiratoires (Sandstrom et Forsberg, 2008). Par conséquent, des impacts importants sur la santé sont attendus au Sahel (Adefolalu, 1984; De Longueville *et al.*, 2010). Bien que des impacts aient été démontrés dans d'autres régions (Perez *et al.*, 2008; Prospero *et al.*, 2008), il y a encore peu d'études qui concernent les divers impacts des poussières sahariennes sur la santé au Sahel (De Longueville *et al.*, 2009).

A l'échelle d'un district, d'une région ou d'un pays, les épidémies de méningites ont une saisonnalité marquée (Figure 3). Les conditions atmosphériques sont suspectées depuis longtemps de jouer un rôle important et, plus récemment, les fortes concentrations de poussières sahariennes a aussi été suspectées d'avoir un rôle important pour expliquer l'augmentation de l'incidence des méningites (i.e. le nombre de cas rapporté à la population). En effet, l'irritation des voies respiratoires par les poussières pourrait notamment participer au déclenchement des épidémies (Thomson *et al.*, 2009; Mueller et Gessner, 2010). Un décalage est attendu entre l'augmentation du niveau de poussières et l'augmentation de l'incidence des méningites à cause du temps d'incubation de la bactérie d'une dizaine de jours (Stephens *et al.*, 2007). Il faut donc employer une méthode permettant de vérifier qu'il y ait un décalage systématique pour appuyer cette hypothèse. Dès 1984, un décalage de quelques semaines a été mis en évidence entre ces deux augmentations à l'échelle d'une ville (Greenwood *et al.*, 1984), puis récemment à l'échelle de deux pays au centre de la ceinture des méningites, le Mali et le Niger (Martiny et Chiapello, 2013).

Depuis les années soixante-dix, la stratégie de vaccination de l'OMS consiste à suivre l'incidence des méningites dans tous les districts des pays de la ceinture. Lorsque l'incidence dépasse un certain seuil, un plan de vaccination est lancé, c'est ce que l'on appelle la vaccination réactive. Depuis 2010, un nouveau vaccin plus efficace a été mis au point et il devrait protéger toute la population de la ceinture des méningites rapidement. A la fin de l'année 2012, plus de 100 millions de vaccins avaient déjà été distribués. Mais la question de la saisonnalité des épidémies reste une préoccupation

importante pour l'OMS car le nouveau vaccin n'agit pas sur tous les méningocoques et même si tel était le cas, les vaccins n'ont pas une efficacité totale. C'est d'ailleurs dans ce but que l'OMS réunit les différents groupes de recherches qui travaillent sur la méningite bactérienne à l'occasion du congrès annuel MERIT (Meningitis Environmental Risk Information Technologies) lancé en 2007. C'est grâce au mini-groupe MAMEMA (Multidisciplinary Approach for Meningitis Epidemiology & Modeling in Africa) regroupant des épidémiologistes (communauté MERIT entre autres) et des climatologues (communauté AMMA entre autres) que nous avons eu l'opportunité de travailler avec le nombre de cas relevés dans la ceinture afin de confronter les résultats de différents modèles avec la réalité des épidémies (Irving *et al.*, 2012; Agier *et al.*, 2013a).

Pour correspondre aux données épidémiologiques, des données spatialisées caractérisant l'état (physique) de l'atmosphère sont aussi disponibles. L'association des sorties des modèles numériques de météorologie et des observations permet de créer des données atmosphériques fiables dont la résolution ou la qualité ne cesse d'être améliorée grâce à la multiplication des satellites dédiés aux géosciences et grâce aux meilleures performances des modèles numériques. Cependant la mousson africaine est un phénomène complexe qui est encore mal décrit par les simulations numériques de météorologie. Le programme AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) a pour but d'améliorer la compréhension du système de mousson par l'accroissement d'observations (stations, ballons-sondes, ...) pour contraindre la modélisation. Ce programme possède également un volet concernant les impacts du climat sur la santé, la sécurité alimentaire ou encore les ressources en eau (Redelsperger *et al.*, 2006). Puisque les épidémies de méningites s'arrêtent dès le début de la mousson africaine lorsque l'air humide arrive (Martiny et Chiapello, 2013), un des objectifs du programme AMMA est aussi d'étudier les liens statistiques existant entre les épidémies de méningites et l'atmosphère (Figure 0 4). Le but, à termes, est de créer un système d'alertes précoces des épidémies à partir de la variabilité de l'atmosphère. Cette anticipation pourrait permettre de prendre des mesures de précautions ou de placer plus précisément le personnel qualifié, les vaccins et les antibiotiques.

Depuis 2010 au Burkina Faso, une prévision de l'ampleur de la prochaine saison épidémique est donnée en automne par l'analyse de plusieurs variables météorologiques (Sultan *et al.*, 2005; Yaka *et al.*, 2008). Cependant cette prévision faite à l'échelle nationale est limitée car elle concerne que l'intensité des épidémies intégrée sur l'ensemble de la saison épidémique et pour tout le pays. Des progrès importants pourraient être faits en descendant d'échelle spatiale et aussi en précisant la semaine de démarrage de l'épidémie en avance. En fait, si les prévisions sont faites sur l'ensemble de la saison des épidémies, c'est avant tout parce que le nombre de cas que fournissait l'OMS, était le nombre de cas annuel. Le nombre de cas hebdomadaire issu des données de la vaccination réactive mise en place par l'OMS, a permis d'étudier l'échelle nationale (Sultan *et al.*, 2005; Martiny et Chiapello, 2013) et récemment l'échelle du district (Agier *et al.*, 2013a). La construction d'une base de données constituée conjointement de l'incidence des méningites à l'échelle des districts et des données atmosphériques (i.e. concernant le climat et les poussières), pourrait permettre de sonder leurs liens statistiques. En effet, lors d'une épidémie c'est à cette échelle spatiale que les décideurs examinent les réponses possibles en fonction des informations mises à leurs dispositions.

Dans cette thèse différentes questions seront abordées. La question principale est :

- **La saisonnalité de l'incidence des méningites est-elle liée à la saisonnalité des conditions atmosphériques ?**

D'autres questions découlent de cette question principale et ces questions corollaires sont :

- Le climat de la ceinture des méningites correspond-il à un climat particulier ?
- Y a-t-il un décalage systématique entre certaines conditions atmosphériques spécifiques et les

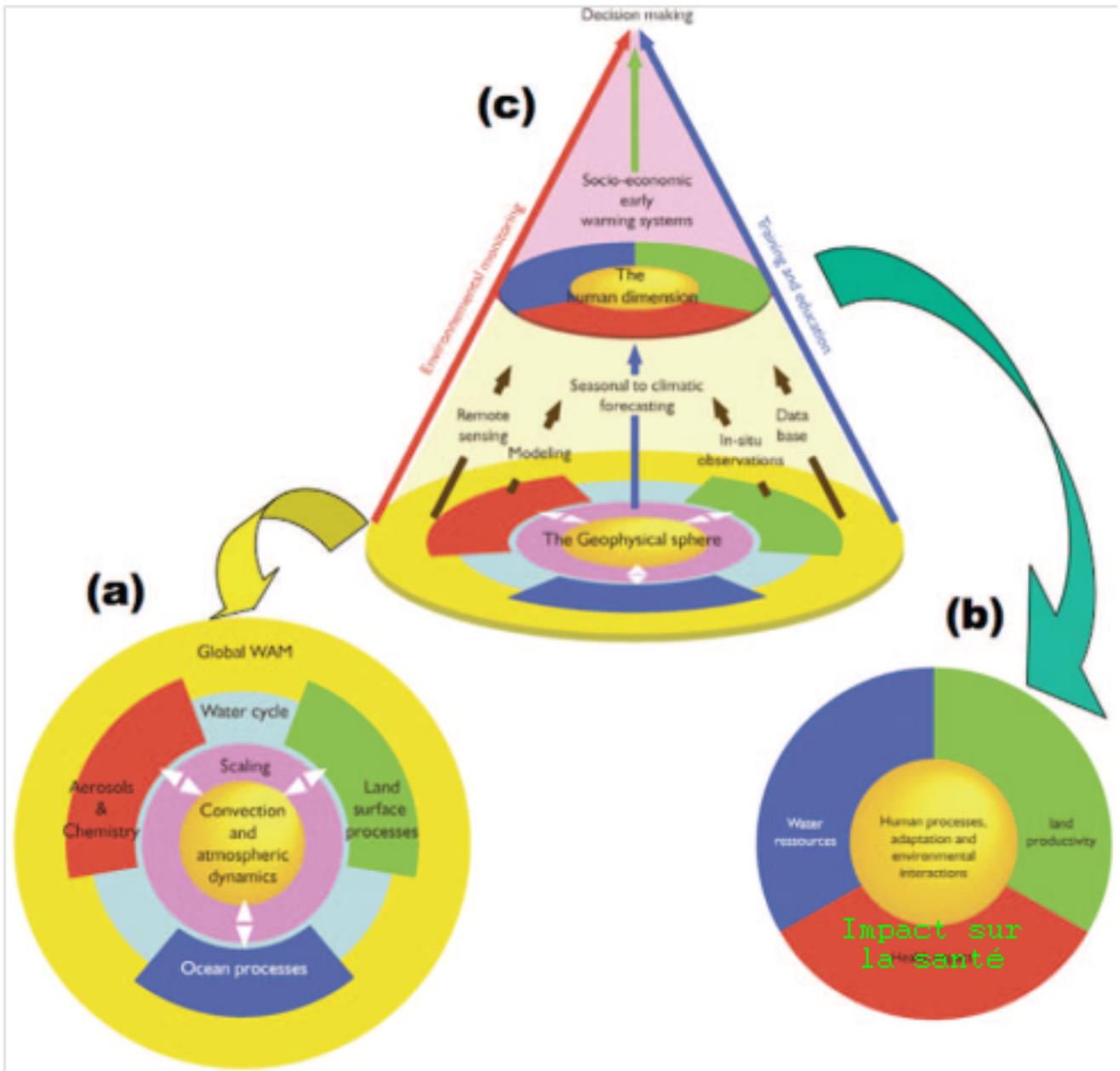


Figure 4. – Implémentation du programme AMMA avec (a) les géosciences, (b) la dimension humaine (dont les impacts sur la santé) et (c) l'intégration des connaissances acquises dans divers outils d'alertes (<http://www.amma-international.org>).

départs d'épidémies ?

- Dans quelles mesures, est-il possible de prévoir l'augmentation de l'incidence hebdomadaire à partir de la variabilité atmosphérique ?

Pour répondre à ces questions, la thèse s'articulera autour de quatre chapitres. Le premier chapitre de la thèse sera consacré à la présentation des principales caractéristiques des épidémies de méningites et du climat sahélien ainsi que des liens entre les deux. Le deuxième chapitre décrira le choix des variables et la constitution d'une base de données ayant conjointement des données d'incidence des méningites et des données caractérisant le climat et les poussières au pas de temps de la semaine et à l'échelle des districts. Le troisième chapitre sera composé dans une première partie d'un article publié dans la revue de télédétection *Remote Sensing of Environment (RSE)* en 2013 testant les capacités d'un produit d'aérosols télédéfectés, l'*Aerosol Index*, pour décrire la variabilité des poussières au sol. Puis, dans une deuxième partie, une méthode sera proposée afin d'améliorer la représentativité du sol obtenue par l'*Aerosol Index*. Le quatrième et dernier chapitre s'articulera autour d'un article publié dans la revue interdisciplinaire *Interface, International Journal of the Royal Society* en 2013 en partenariat avec des épidémiologistes et traitant du phasage temporel entre variables atmosphériques et l'incidence des méningites. Après s'être concentré sur les relations temporelles, un modèle de l'incidence hebdomadaire de la méningite sera proposé à partir de variables atmosphériques.

- Chapitre I -

Le climat sahélien et les épidémies de méningites

1. La "ceinture" géographique des méningites

1.1. La méningite cérébro-spinale en Afrique subsaharienne

1.1.1. L'étiologie de la maladie et l'histoire des épidémies

La méningite cérébro-spinale est un symptôme correspondant à une inflammation aigüe ou chronique des méninges qui sont les trois enveloppes entourant le cerveau et la moelle épinière, faites de minces lames de tissu (Figure I.1) : le Dure-mère, l'Arachnoïde et le Pie-mère. Les causes de ce symptôme sont diverses car l'infection des méninges peut être d'origine virale, fongique, bactérienne, parasitaire ou même non infectieuse comme un cancer. Les méningites bactériennes sont les plus dangereuses car elles sont la cause de cas isolés et surtout d'épidémies. Les trois principales bactéries responsables de méningites sont *Haemophilus influenzae b*, *Streptococcus pneumoniae*, et *Neisseria meningitidis*. Cette dernière, aussi appelée méningocoque, est l'agent pathogène principal des méningites bactériennes. L'incidence (ou le taux d'attaque) permet de caractériser l'importance d'une maladie en calculant le nombre de cas relatif pour une population donnée (dans le cas de la méningite, ce nombre est généralement multiplié par 100 000). L'incidence des méningites est donc le nombre de cas rapporté à une population de 100 000 personnes.

La première description de cas de méningites pourrait avoir été faite par Hippocrate (460 - 377 avant J-C). Jusqu'en 1805, aucune description de nombreux cas multiples et simultanés de ce symptôme ne semble avoir été faite. La première épidémie de méningite fut décrite à Genève. L'apparition de cette première épidémie a été suivie d'autres épidémies au cours du 19^{ème} siècle, notamment décrites en France, en Allemagne et aux Etats-Unis (Tyler, 2009). En 1887, la bactérie *Neisseria meningitidis* a été isolée et mise en culture pour la première fois par Anton Weichselbaum. En 1906, des chercheurs ont constaté que les chevaux peuvent servir à créer des anticorps contre les méningocoques. Les premières guérisons ont ainsi commencé avec l'introduction de ce sérum dans la thérapie (Tyler, 2009).

C'est probablement par les garnisons militaires venues d'Europe que la bactérie est arrivée sur le continent africain (Greenwood, 1999). Les troupes françaises basées en Algérie ont connu deux épidémies importantes en 1840 et 1847, comme les troupes britanniques en Egypte en 1889 et au

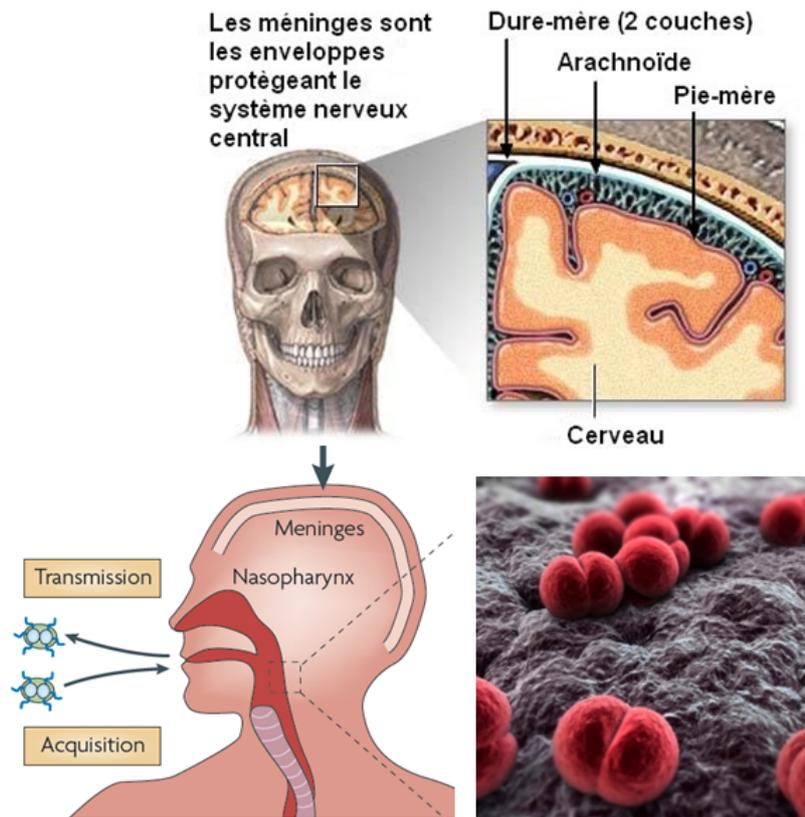


Figure I.1. – Description des méninges (les deux illustrations supérieures ; <http://fr.wikipedia.org/wiki/Méninges>), schéma (en bas, à gauche) de l'acquisition ou de la transmission du méningocoque (Virji, 2009) et photographie de méningocoques par un microscope électronique à balayage (en bas à droite ; bioquell.com).

LA CEINTURE DE LA MÉNINGITE CÉRÉBRO-SPINALE

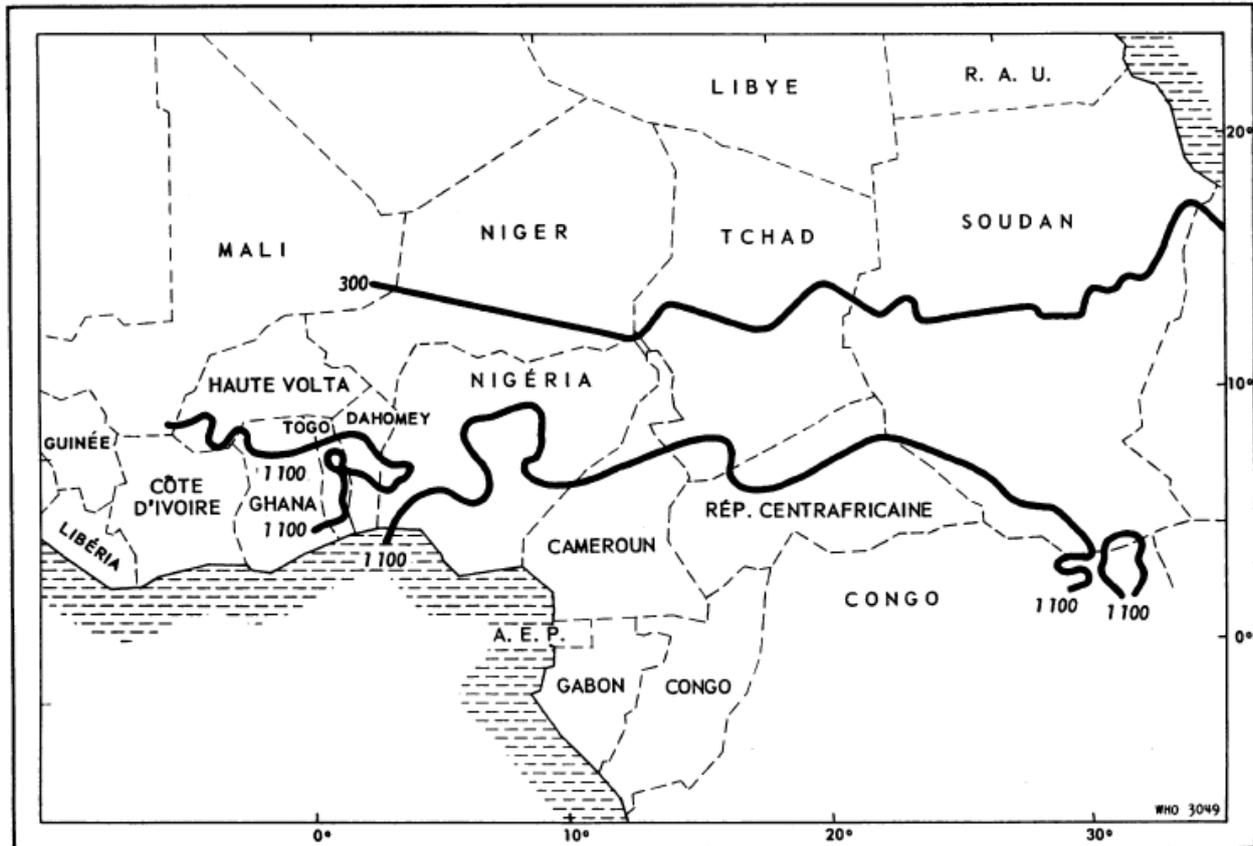


Figure I.2. – Isohyètes 1100 mm et 300 mm délimitant la ceinture des méningites définie par Lapeysonnie en 1963.

Soudan en 1899 (Chalmers et O'Farrell, 1916). Cela montre l'importance du facteur humain car les soldats vivent en groupe dans des conditions de promiscuité importante. Ensuite des épidémies ont été décrites en Afrique de l'Ouest, notamment au Nigeria en 1905 et au Ghana en 1906 (Greenwood, 1999). Les premiers auteurs ayant qualifié les épidémies de récurrentes en Afrique de l'Ouest, c'est-à-dire saisonnière, accusèrent les regroupements de personnes associés aux conditions de sécheresse (Sicé *et al.*, 1940; Waddy, 1957).

L'article de Lapeysonnie en 1963 a marqué un tournant dans l'étude des épidémies. Sur la base de visites qu'il a lui-même effectuées dans les hôpitaux de la région, il a pu documenter son étude et suggérer que l'occurrence des épidémies est la plus élevée dans une zone restreinte de l'Afrique de l'Ouest. Cette zone est la ceinture des méningites, délimitée au Nord par le Sahara et au sud par la forêt tropicale (Figure I.2). Bien que la zone étudiée par Lapeysonnie est limitée à l'ouest et à l'est, la définition de la frontière est claire car elle est basée sur la pluviométrie annuelle allant jusqu'à l'isohyète 300 mm au nord et 1100 mm au sud (Lapeysonnie, 1963).

Il n'y a pas d'épidémies de méningites décrites au 17^{ème} et 18^{ème} siècle, le méningocoque pourrait être issu d'une mutation d'une autre bactérie contenue dans le système respiratoire qui a eu lieu en Europe (Tyler, 2009). Le méningocoque semble donc être parvenu en Afrique au 19^{ème} siècle et la méningite bactérienne est devenue une pathologie endémique en Afrique de l'Ouest à partir de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. Enfin, les épidémies sont décrites sensibles au climat dès les années 50 car elles surviennent pendant la période la plus sèche de l'année dans une zone géographique

précise, délimitée par la pluviométrie.

1.1.2. La méningite bactérienne

Même si à l'échelle mondiale l'essentiel des méningites est d'origine virale et l'infection est bénigne (pour environ 3 cas sur 4), les méningites bactériennes sont mortelles si elles ne sont pas correctement soignées. Par conséquent, cette maladie doit toujours être considérée comme une urgence médicale.

Les symptômes fréquemment associés aux méningites sont : la raideur de la nuque, une fièvre élevée, la photophobie, un état confusionnel, des céphalées et des vomissements. Le tableau clinique est la liste la plus exhaustive possible des caractéristiques et des symptômes d'une pathologie. La prophylaxie (l'action pour prévenir la propagation) par des antibiotiques est préconisée pour l'entourage proche afin de limiter la contagion entre les individus. On peut utiliser plusieurs natures d'antibiotiques pour le traitement, comme la pénicilline, l'ampicilline, la ceftriaxone et le chloramphénicol. En Afrique, en cas d'épidémie, le chloramphénicol (huileux) est le médicament de choix dans les régions disposant d'un nombre limité de centres de santé, parce qu'il a été prouvé qu'une dose unique à action prolongée est efficace. L'OMS préconise un traitement antimicrobien dès que la ponction lombaire a été pratiquée (s'il est institué avant, il peut être difficile de cultiver les bactéries et donc de confirmer le diagnostic).

Le diagnostic se fonde souvent uniquement sur le tableau clinique et il y a peu de confirmations en laboratoires du pathogène. Cependant, c'est par une ponction lombaire montrant un liquide céphalo-rachidien purulent (des bactéries sont parfois visibles à l'examen microscopique de ce liquide) qu'il est possible de poser un diagnostic sûr pour un cas présumé. Même lorsqu'elle est diagnostiquée très tôt et qu'un traitement approprié est donné, 10% des malades décèdent quelques jours après l'apparition des symptômes. L'admission à l'hôpital ou dans un centre de santé est donc nécessaire. De plus, la méningite bactérienne peut entraîner des lésions cérébrales (épilepsie, paralysie cérébrale), des troubles de l'apprentissage ou une surdité partielle chez 10 à 20% des survivants ; c'est même la principale cause de surdité à l'échelle mondiale. Les enfants en bas âge sont les plus touchés et le taux de létalité peut atteindre 50% chez les enfants de moins de 2 ans (Campagne *et al.*, 1999).

Les interactions entre l'hôte, la bactérie et l'environnement existent durant les différentes phases de la maladie. Tout d'abord, il y a *la transmission* du méningocoque puis la phase de *portage* sans symptôme (asymptomatique). Ensuite, il peut survenir *l'invasion* de la bactérie vers les méninges. Enfin, il y a *l'immunité* conférée par le portage de la bactérie.

La transmission bactérienne ne s'opère que de personne à personne par les gouttelettes de sécrétions respiratoires appelées plügg (baiser, éternuements, toux). La vie en collectivité (soldats, écoliers, étudiants) favorise la transmission de la bactérie (Rapport OMS 1998). L'isolement des malades n'est pas nécessaire puisque la contagiosité est modérée et disparaît rapidement sous traitement antibiotique. Le méningocoque ne survit pas longtemps à l'extérieur puisqu'il est sensible aux changements de température et à la dessiccation. Il semble qu'il y ait peu d'infections secondaires survenant par contact avec un malade antérieur (Clavaud *et al.*, 1996).

Le portage n'est pas très documenté car les études sont coûteuses. On estime que le portage variant entre 3 et 30% (Trotter et Greenwood, 2007). Depuis les années 80 jusqu'à aujourd'hui, peu d'études ont été réalisées concernant le portage du méningocoque au Sahel, et aucune d'entre elles, n'a démontré de variations saisonnières du portage (Blakebrough *et al.*, 1982; Trotter et Greenwood, 2007). La

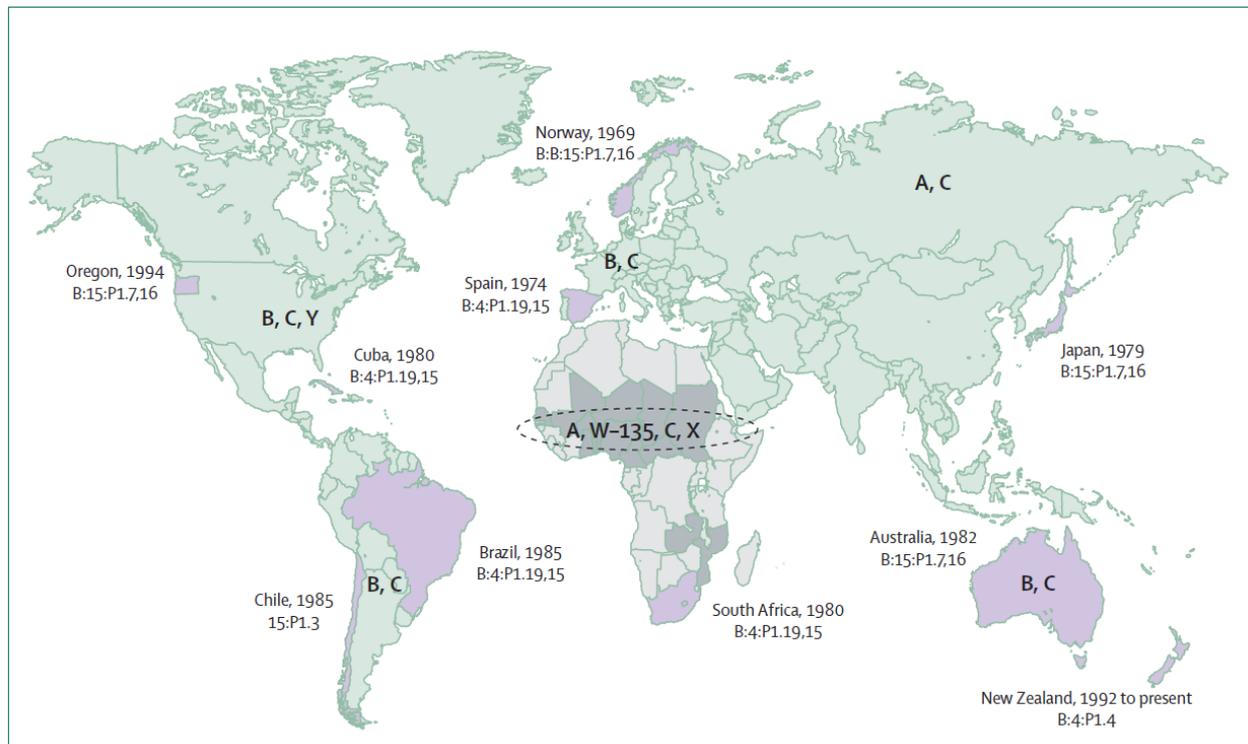


Figure I.3. – Distribution mondiale des principales sérogroupes de méningocoques (Stephens *et al.*, 2007)

durée du portage n'est pas non plus précisément connue, elle pourrait varier de quelques semaines à quelques mois. Comme la diffusion du méningocoque se fait principalement par le contact avec des porteurs asymptomatiques, il est difficile d'envisager un traitement pour toutes les personnes ayant été en contact avec un porteur (Rapport OMS, 1998).

L'invasion du méningocoque se produit lorsque ces bactéries présentes sur les muqueuses de l'appareil respiratoire submergent les défenses de l'organisme et se propagent dans la circulation sanguine ou dans le système nerveux pour finalement atteindre les méninges puis le cerveau (Mueller et Gessner, 2010). *Neisseria meningitidis* ne s'attaque qu'à l'homme. Il n'y a ni réservoir animal ni vecteur comme pour le paludisme. Les infections dues aux méningocoques semblent souvent survenir après une autre infection respiratoire et la période d'incubation est de 1 et 14 jours (Stephens *et al.*, 2007). La capacité à passer la barrière méningée est variable selon les bactéries, le méningocoque possède évidemment cette capacité. En revanche, seuls certains méningocoques ont la capacité de créer des épidémies (Virji, 2009). Des tests de laboratoire spécialisés sont nécessaires pour identifier les sérogroupes et pour définir l'antibiotique le plus adapté. Il a été recensé 12 sérogroupes (ou sérotypes) de *Neisseria meningitidis* (Nm), dont 6 sont connus pour provoquer des épidémies (sérogroupes de Nm : A, B, C, X, Y et W135). Malgré l'accroissement des déplacements à l'échelle mondiale, les sérogroupes restent spatialisés (Figure I.3). Par exemple, le sérotype A semble être principalement présent à proximité du désert du Sahara et aussi du désert de Gobie.

L'immunité conférée par le portage du méningocoque est un facteur essentiel dans la prévention de la méningite. La perte de l'immunité de groupe vis-à-vis d'une nouvelle souche de méningocoques contribue probablement à la régularité des cycles épidémiques de 7 à 12 ans en Afrique sub-saharienne (Broutin *et al.*, 2007). En effet, quand il y a eu un grand nombre de porteurs, la transmission du méningocoque est atténuée et la vague épidémique est interrompue (Rapport OMS, 1998). Il n'y pas

de socle ethnique ou socio-économique. De plus, le risque de déclarer une infection due au méningocoque décroît avec l'âge. Les enfants de moins de 15 ans sont les plus touchés car ils n'ont pas connu d'épidémies, et particulièrement les enfants de moins de 2 ans à cause de la faiblesse de leurs systèmes immunitaires. En effet, au Niger entre 1981 et 1996, 3 cas sur 4 furent des enfants de moins de 15 ans dont 1/4 avaient moins de 5 ans (Campagne *et al.*, 1999).

1.2. L'épidémiologie de la méningite

1.2.1. Le contexte actuel des épidémies

Depuis les années 60, l'Afrique a connu de nombreuses épidémies de plus en plus documentées et l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a étendu l'aire de la ceinture des méningites à d'autres pays compris entre les latitudes 10° et 15° nord qui sont d'ouest en est : la Sénégal, la Gambie, le Mali, le Burkina Faso, le Ghana, le Niger, le Nigeria, le Tchad, le Togo, le Bénin, le Soudan et l'Éthiopie. L'OMS a dénombré dans la ceinture des méningites 300 000 cas entre 1950 et 1961, puis 800 000 cas entre 1972 et 1990, et plus d'un million de cas de méningites ont été signalés en Afrique entre 1988 et 2012. Bien que ces pays connaissent plus fréquemment des épidémies, les autres pays à l'extérieur de cette zone n'en sont exempts. Environ 450 millions de personnes vivent dans la ceinture des méningites et la croissance de la population est rapide selon les estimations du bureau américain du recensement¹. Il y a en plus pour une famille le coût des soins, ce qui impacte l'économie des communautés touchées par les épidémies (Colombini *et al.*, 2009).

Le nombre de régions touchées par les épidémies de méningites a fortement augmenté au cours de la période 1980-1999 suivant notamment l'augmentation de la densité de population (Figure I.4). Les épidémies ont débordé de leur aire d'occurrence de la période 1950-1979. L'évolution de la pluviométrie ne peut pas expliquer à elle seule ces changements. La définition de Lapeysonnie de la ceinture des méningites a été analysée afin de comprendre quelles sont les variables environnementales pouvant expliquer l'augmentation des régions touchées. Les auteurs constatent que des facteurs environnementaux dont des facteurs climatiques peuvent expliquer cette évolution (Cuevas *et al.*, 2007). Des modèles de risque de survenue d'une épidémie ont été élaborés à partir des caractéristiques communes environnementales des zones d'occurrence des épidémies de méningites (Molesworth *et al.*, 2003; Savory *et al.*, 2006; Cuevas *et al.*, 2007). Ce type de modèles ne peut pas donner aux preneurs de décision un moyen d'anticipation de la survenue d'une épidémie. Néanmoins, ils ont permis de définir la notion de zone à risque vis-à-vis de l'émergence d'une épidémie à partir de descripteurs de l'environnement.

Même si l'aire concernée par les épidémies de méningites s'est étendue à de nouvelles régions, la région la plus touchée reste de loin le Sahel (Molesworth *et al.*, 2002). Le Tableau I.1 présente l'incidence annuelle des méningites pour l'Afrique séparée en cinq parties : l'Afrique du nord, l'Afrique sahélienne, l'Afrique centrale, l'Afrique de l'est et le sud de l'Afrique. Les pays du Sahel ont des incidences moyennes et maximales plus fortes que toutes les autres régions. A part en Namibie en 1994, il n'y a pas eu d'épidémie importante en dehors de cette zone. En outre, il y a des différences au sein des pays sahéliens ; le nombre d'épidémies est le plus élevé au Niger et au Burkina Faso et dans une moindre mesure au Mali et au Tchad. La partie de l'Afrique la plus touchée par les épidémies est donc au centre de la ceinture où la population est estimée à 50 millions d'habitants environ (soit moins de 10% de la population de la ceinture).

1. Dans le rapport : World population prospects, The revision 2010

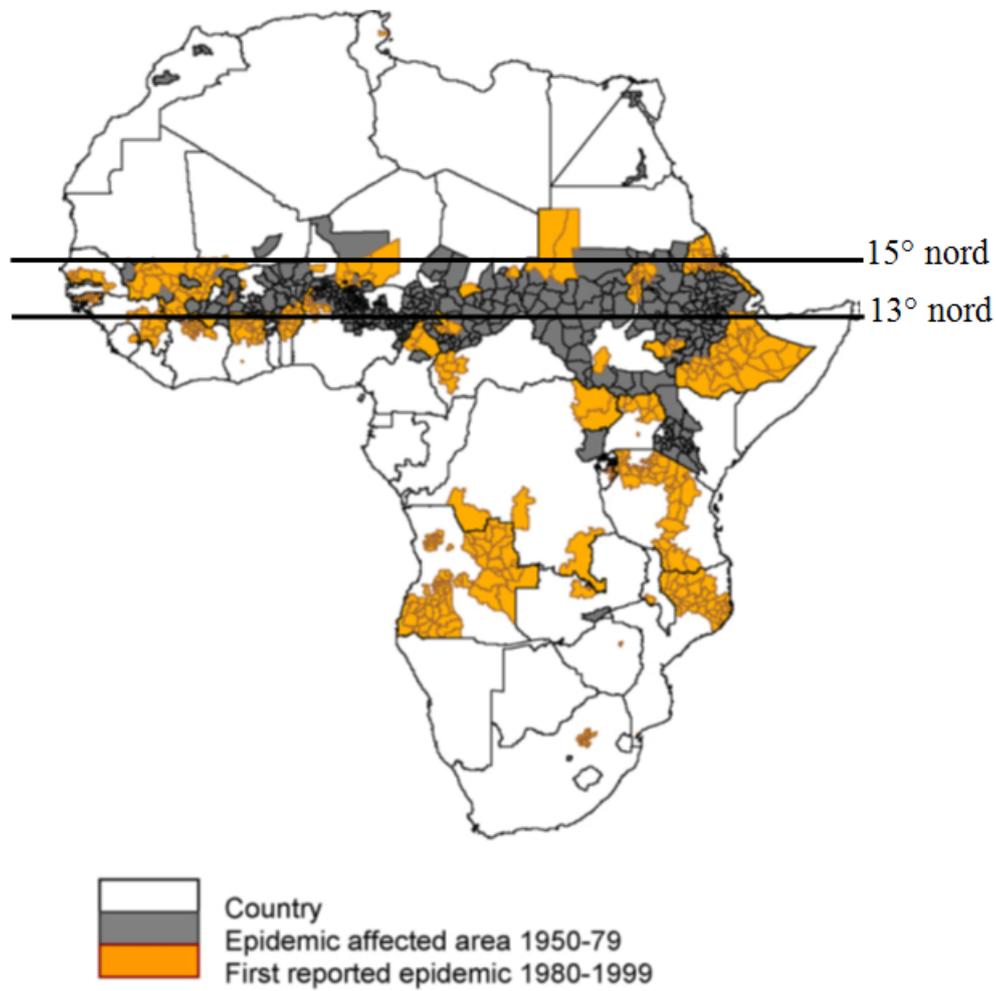


Figure I.4. – Distribution spatiale des méningites entre 1950-1979 en gris et 1980-1999 en jaune (Cuevas *et al.*, 2007).

Tableau I.1. – Incidence annuelle moyenne et maximale des méningites (à partir de Molesworth *et al.* (2002)).

	Afrique du Nord	Afrique sahélienne	Afrique centrale	Afrique de l'est	Sud de l'Afrique
Incidence moyenne	3	9	3	5	4
Incidence maximale	17	490	21	49	165
Année épidémique		cf. Fig 1.5			

1980	Niger
1981	Burkina Faso , Ethiopie, Mali
1982	Burkina Faso
1983	Burkina Faso , Gambie, Sénégal, Tchad
1984	Burkina Faso
1985	Burkina Faso
1986	Burkina Faso, Niger
1987	Tchad
1988	Burkina Faso , Soudan, Tchad
1989	Benin, Ethiopie, Niger , Tchad
1990	Tchad
1991	Niger
1992	Cameroun, Niger
1993	Niger , Tchad
1994	Niger
1995	Niger
1996	Burkina Faso , Mali, Niger , Nigeria
1997	Burkina Faso , Gambie, Ghana, Mali, Niger
1998	Burkina Faso , Tchad
1999	Guinée-Bissau, Niger , Soudan

Figure I.5. – Chronologie des années épidémiques des pays sahéliers entre 1980 et 1999 (d'après Molesworth *et al.* (2002)).

La chronologie des épidémies ayant eu lieu au Sahel, est présentée par la Figure I.5. Elle nous montre que presque chaque année le Niger et le Burkina Faso connaissent une épidémie (i.e une incidence cumulée supérieure à 100 cas pour 100 000 personnes, définition de l'OMS d'une année en épidémie à l'échelle nationale). L'épidémie observée la plus importante a eu lieu entre 1996 et 1997, causant plus de 250 000 cas et de 25 000 décès. Entre 1997 et 2002, 223 000 nouveaux cas de méningites ont été notifiés par l'OMS et les pays les plus touchés ont été le Burkina Faso, le Niger, le Tchad et l'Ethiopie. Enfin, il y a eu en 2009 l'épidémie la plus importante depuis 1996 avec 90 000 cas recensés.

Le méningocoque du sérotype A est la principale cause des épidémies de méningites dans la ceinture des méningites car il est responsable de 80 à 85% des cas recensés (Campagne *et al.*, 1999; Djibo *et al.*, 2003) et pour être plus précis, depuis 1999, une séquence génétique (c'est-à-dire un clone d'un même sérotype) est majoritaire (Teyssou et Muros-Le Rouzic, 2007). Comme le sérotype A, le sérotype C a été associé à de grandes épidémies au Nigeria en 1975 et au Burkina Faso en 1979. On retrouve le sérotype C partout dans le monde mais la virulence de cette souche est inférieure à celle du sérotype A. Durant les trente dernières années, des épidémies de nouveaux sérotypes (X, Y et W135) ont aussi été identifiées. L'identification du sérotype est essentielle car c'est la cible de la vaccination. De plus, le potentiel épidémique varie d'un sérotype à un autre.

Depuis 1995, le sérotype X est observé en Afrique de l'Ouest et principalement au Niger (Boisier *et al.*, 2007). Même s'il est associé plus rarement à des épidémies, la proportion de personnes

infectées a été élevée en 2006 à Niamey au Niger (Djibo *et al.*, 2003). Entre 2006 et 2010, on a constaté l'augmentation de la proportion de ce séro groupe et l'augmentation du nombre d'épidémies recensé au Togo et au Burkina Faso (Delrieu *et al.*, 2011). De plus, l'apparition du séro groupe W135 a causé une épidémie importante en 2002 au Burkina Faso (Traoré *et al.*, 2006). Entre 2000 et 2001, il semble que plusieurs centaines de personnes effectuant le pèlerinage du Hadj en Arabie saoudite aient été infectées, diffusant cette souche à travers le Sahel à leur retour (Taha *et al.*, 2000). Tout porte à croire que le séro groupe W135 est associé à des flambées d'une ampleur aussi considérable que le séro groupe A car au Burkina Faso en 2006, la proportion de A et de W135 a été équivalente pendant l'épidémie (Taha *et al.*, 2002). L'existence d'une spatialisation des séro groupes (c'est-à-dire uniquement présent dans une partie du monde) suggère que les méningocoques sont capables de s'adapter à l'environnement (Clavaud *et al.*, 1996).

Les plans de vaccination ont débuté au Sahel dans les années 70. La vaccination de masse a été essayée et son faible effet a été abondamment discuté. La vaccination réactive a été ensuite utilisée avec les vaccins de première génération disponible depuis les années 70. En effet, les vaccins (poly-saccharides) ne confèrent une protection que chez les enfants âgés de plus de 2 ans car ils peuvent fabriquer des anticorps (Parent du Châtelet *et al.*, 2001). En outre, même avec une couverture à grande échelle par ce vaccin, on ne parvient pas à obtenir une "immunité collective" suffisante et la durée d'immunité vaccinale est courte.

La recommandation actuelle de l'OMS pour lutter contre les flambées épidémiques (ou bouffées ; c'est-à-dire une augmentation rapide de l'incidence hebdomadaire), est de procéder à une vaccination réactive (OMS, 2010). Elle est basée sur une surveillance renforcée à l'échelle du district et sur la définition de deux seuils : le seuil épidémique normal (15 cas/100 000 habitants/semaine) et le seuil épidémique quand le risque est élevé (15 cas/100 000 habitants/semaine). La vaccination est décidée pour un district quand celui-ci dépasse le seuil épidémique ainsi que pour les districts voisins qui ont dépassé le seuil d'alerte. La propagation de l'épidémie est souvent plus rapide que les campagnes de vaccination, en raison du délai entre la prise de décision et la vaccination effective sur le terrain qui peut prendre plusieurs semaines. Si la vaccination débute après le départ de l'épidémie, l'efficacité de la protection de la population est diminuée par ce retard et les effets de la vaccination sont très limités. Cette stratégie réactive peut être améliorée car, par définition, elle ne permet pas de prévenir l'ensemble des cas. Le challenge étant de mettre en place les plans de vaccination le plus tôt possible et donc d'améliorer les systèmes de détection précoces des démarrages épidémiques.

L'OMS s'est engagée à éradiquer la méningite bactérienne en tant que problème de santé publique dans la ceinture des méningites, constatant les limites de la stratégie de vaccination réactive entamée depuis les années 70. Ni les épidémies massives comme en 1996, ni la récurrence saisonnière des épidémies n'ont disparu. C'est pourquoi un nouveau vaccin a été mis au point. Le vaccin MenAfriVac est un vaccin conjugué dit de deuxième génération, qui est introduit depuis décembre 2010 au Sahel (population vaccinée : entre 1 et 29 ans). Ce vaccin ne cible que le séro groupe A mais il devrait conférer une immunité plus longue et diminuer le portage de ce séro groupe. Il a l'avantage de pouvoir être administré dès l'âge de 1 an (La Force *et al.*, 2007; Terranella *et al.*, 2011). Néanmoins, il pourrait favoriser les séro groupes W135 et X qui sont aujourd'hui minoritaires ou en faire émerger de nouveaux.

Le fardeau de la méningite reste donc très lourd au sein de la ceinture des méningites. La région sahé-lienne est la plus touchée puisque, chaque année, des épidémies ont lieu durant la saison sèche malgré la vaccination débutée il y a plus de 40 ans. Ce constat est à mettre en regard de l'environnement,

c'est-à-dire l'évolution de la société et du climat. Pour comprendre l'échec des plans de vaccination, il faut donc analyser les interactions existantes entre le trio formé par l'hôte, la bactérie et leur environnement.

1.2.2. La saisonnalité de l'incidence des méningites

Les épidémies de méningites sont très saisonnières car elles ne concernent que la saison sèche. Le pic épidémique est atteint entre mars et avril plusieurs semaines après le démarrage. Au niveau d'un pays, il y a de forts contrastes car les épidémies résultent de flambées épidémiques locales n'ayant pas un seul foyer mais une multitude qui s'allument tous à quelques semaines d'intervalle. Les flambées épidémiques saisonnières semblent posséder également un cycle conduisant à une épidémie massive (vague épidémique) avec une fréquence d'une dizaine d'années (Rapport OMS, 1998; Broutin *et al.*, 2007).

Certes de nombreux facteurs semblent impliqués dans la progression de la maladie, mais les capacités d'évolution génétique des méningocoques semblent être à l'origine des vagues épidémiques (Taha *et al.*, 2002). Cependant aucun facteur n'explique seul la saisonnalité des épidémies. Par exemple, la saison des marchés en Afrique de l'Ouest coïncide avec la saison des épidémies mais les épidémies ne suivent pas les marchés. La dynamique des maladies infectieuses est l'un des sujets les plus étudiés de nos jours, les articles proposant des modèles exploratoires conduisent fréquemment à des publications dans des revues majeures depuis 30 ans (May et Anderson, 1979; Earn *et al.*, 2000; Morens *et al.*, 2004; Stone *et al.*, 2007). Un des défis majeurs est de reproduire la saisonnalité des épidémies dans la mesure où les mécanismes sont complexes et chaotiques (Altizer *et al.*, 2006; Grassly et Fraser, 2006). Bien que l'augmentation du rythme des naissances, la vaccination ou les rythmes scolaires sont les facteurs déterminants dans la saisonnalité de plusieurs maladies, les conditions climatiques de l'hiver sont étudiées pour comprendre la recrudescence de nombreuses infections saisonnières hivernales comme la grippe, la rougeole, la varicelle ou encore les diarrhées aiguës.

A propos de la saisonnalité des épidémies, une question s'énonce simplement : *Pourquoi y a-t-il un pic marqué chaque année et non pas une multitude de pics montrant que l'épidémie atteint une grande ville puis une autre ?* La réponse est cependant loin d'être triviale. Dans le cas de la méningite bactérienne, le maximum se produit systématiquement à la fin de la saison sèche, pourtant la diffusion du méningocoque n'est pas aussi rapide qu'une infection virale telle que la grippe. Certaines infections virales possèdent des caractéristiques semblables avec un pic saisonnier marqué comme la grippe ou la diarrhée aiguë² car la transmission du virus est rapide. A l'inverse, plusieurs pics sont observés dans l'incidence de la varicelle ou de la rougeole. En France, les épidémies de gripes sont très variables car elles surviennent de l'automne au printemps lorsqu'il fait froid et que l'humidité est plus faible. Elles concernent tous les départements français, parfois en six semaines seulement. On peut considérer que l'épidémie de gripes touche tout le territoire de manière homogène alors que dans le cas de la méningite, la répartition ne semble être homogène à aucune échelle spatiale (ville, district, région ou national).

Le calendrier des épidémies de méningites semble être contraint par certaines conditions atmosphériques puisque les épidémies ont toujours lieu à la fin de la saison sèche. A l'échelle nationale au Burkina Faso, on constate que la saisonnalité est identique pour les années épidémiques et non-épidémiques car le maximum de l'incidence se produit au mois de mars dans les deux cas (Figure I.6). Le facteur environnemental est composé d'une part d'aspects sociétaux tels que l'urbanisation,

2. Données accessibles et visualisables par le réseau sentinelle : www.sentiweb.fr

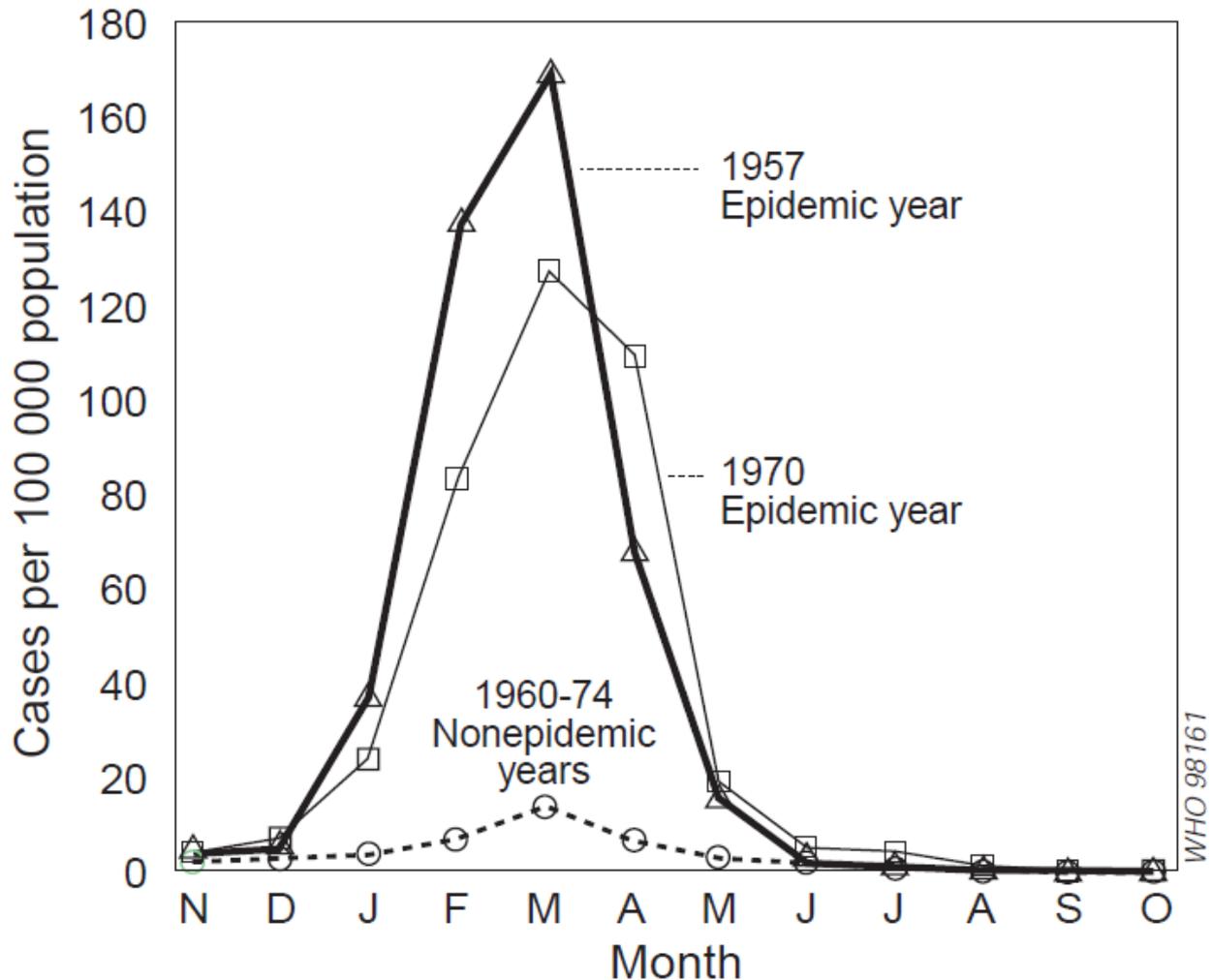


Figure I.6. – Incidence mensuelle des méningites au Burkina Faso pour les années non-épidémiques et pour deux années épidémiques 1957 et 1970 (Rapport OMS, 1998).

la densité de population, les axes de déplacements ou les us et coutumes, et d'une autre part de conditions atmosphériques spécifiques telles qu'un vent fort, des températures élevées, une humidité faible et des poussières venant du Sahara. Comme la société n'évolue guère d'une saison à l'autre, l'atmosphère est ainsi suspectée de jouer un rôle important dans la saisonnalité des épidémies mais les mécanismes ne sont pas totalement élucidés.

L'explication la plus communément admise est le fait que la sécheresse et les poussières de l'air abiment les muqueuses du système respiratoire. Par conséquent, l'invasion du méningocoque devient plus probable pour toutes les personnes porteuses du méningocoque (Mueller et Gessner, 2010). D'un côté, l'atmosphère semble donc avoir un rôle dans le déclenchement de l'épidémie favorisant l'étape d'invasion de la bactérie qui précède l'infection de quelques jours car il y a le délai d'incubation. D'un autre côté, les conditions climatiques les plus rudes conduisent à des regroupements plus nombreux et entraînent une augmentation du nombre de personnes qui toussent et éternuent (Thomson *et al.*, 2009; Mueller et Gessner, 2010). Cette dichotomie de l'influence de l'atmosphère sur les épidémies, nous permet d'envisager des effets à des échelles spatiotemporelles différentes.

Les "grains" de matière solide contenus dans l'atmosphère sont nommés aérosols. Ils causent l'ir-

ritation des voies respiratoires par la fraction fine des aérosols d'un diamètre inférieur à $2,5 \mu\text{m}$ comme à la fraction grossière d'un diamètre supérieur à $2,5 \mu\text{m}$ (Stanwell-Smith, 1994; Sandstrom et Forsberg, 2008). La granulométrie des aérosols au Sahel est centrée sur un diamètre moyen de $8 \mu\text{m}$ (cf. section I-2.1.2). Les aérosols fins peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires alors que les aérosols grossiers irritent principalement la partie supérieure du système respiratoire (pharynx et larynx). Les aérosols pourraient changer le rapport de méningocoques virulents (encapsulés) dans les colonies bactériennes par des micros saignements des muqueuses (Mueller *et al.*, 2008).

Lapeysonnie a décrit la ceinture des méningites comme une zone endémique qui connaît un renforcement saisonnier et des vagues épidémiques. Des modèles épidémiologiques ont été proposés pour expliquer l'émergence des épidémies de méningites mais ces modèles n'intègrent pas le climat (Griffiss, 1982; Moore, 1992). Le modèle épidémiologique proposé par Mueller et Gessner (2010) en 2010 intègre le facteur climatique. Ce modèle explique les vagues épidémiques d'échelle régionale à partir de l'échelle de la communauté en passant d'une situation endémique à hyperendémique, puis à des épidémies localisées (Figure I.7). Comme l'incidence est élevée toute l'année comparée à l'incidence moyenne mondiale, la méningite y est endémique. L'hyperendémicité désigne la période de l'année où il y a l'augmentation saisonnière de l'incidence des méningites, c'est-à-dire la saison sèche. Les conditions atmosphériques de la saison sèche expliquent dans ce modèle le passage de l'incidence épidémique à l'incidence hyperendémique au niveau d'une communauté. Le passage d'un niveau d'incidence épidémique est lié à d'autres facteurs qui semblent s'ajouter. A l'échelle d'une communauté (ou d'une aire de santé), ce sont principalement les infections respiratoires qui démultiplient la transmission et donc le portage alors qu'à l'échelle régionale, ce sont les évolutions génétiques de la bactérie qui pourraient expliquer les vagues épidémiques.

Les hétérogénéités dans la distribution spatiale des foyers épidémiques constatées à l'échelle de l'aire de santé ne peuvent pas s'expliquer par la variabilité des conditions atmosphériques qui est très faible à cette échelle spatiale. A l'échelle du district, l'épidémie est due à un petit nombre de foyers répartis de manière discontinue dont l'incidence augmente fortement (Tall *et al.*, 2012). Pour modéliser la dynamique des épidémies, il est nécessaire de traduire mathématiquement la variation de l'incidence en fonction du nombre de personnes susceptibles d'être infectées, du nombre de porteurs asymptomatiques et du nombre d'infections, basée sur des modèles exploratoires des relations entre ces trois nombres (Griffiss, 1982; Moore, 1992; Mueller et Gessner, 2010). Il est ensuite nécessaire de connaître le rythme de la transmission, le temps de portage et la durée de l'immunité. L'incidence ainsi modélisée (cas/population) comme le taux de portage (porteur/population) et le taux d'invasion (cas/porteur), permettent alors de valider les résultats du modèle en comparant ces résultats avec les valeurs connues.

Une variation saisonnière de certains paramètres (comme le taux d'invasion et le taux de portage) a été testée pour valider ou infirmer certaines hypothèses expliquant de la saisonnalité de l'incidence (Irving *et al.*, 2012). Une des conclusions importantes est la nécessité d'envisager une transmission comportant une variation saisonnière. Mais les incidences reproduites ne sont pas suffisantes, pour y parvenir il conviendrait d'introduire un forçage saisonnier plus marqué (lié à l'atmosphère par exemple) qui pourrait être lié à une augmentation des capacités d'invasion de la bactérie. Mais une des principales limitations de ces modèles est l'absence de valeur précise pour la plupart des paramètres du modèle. Par exemple, on estime que le taux de portage varie de 3 à 30% et que le taux d'invasion est probablement supérieur à 1% (Trotter et Greenwood, 2007). Il y a donc une large gamme de solutions décrivant la saisonnalité de l'incidence. De plus pour être complet, il faut intégrer les effets spatiaux qui sont aussi à prendre en compte pour beaucoup de paramètres pour reproduire

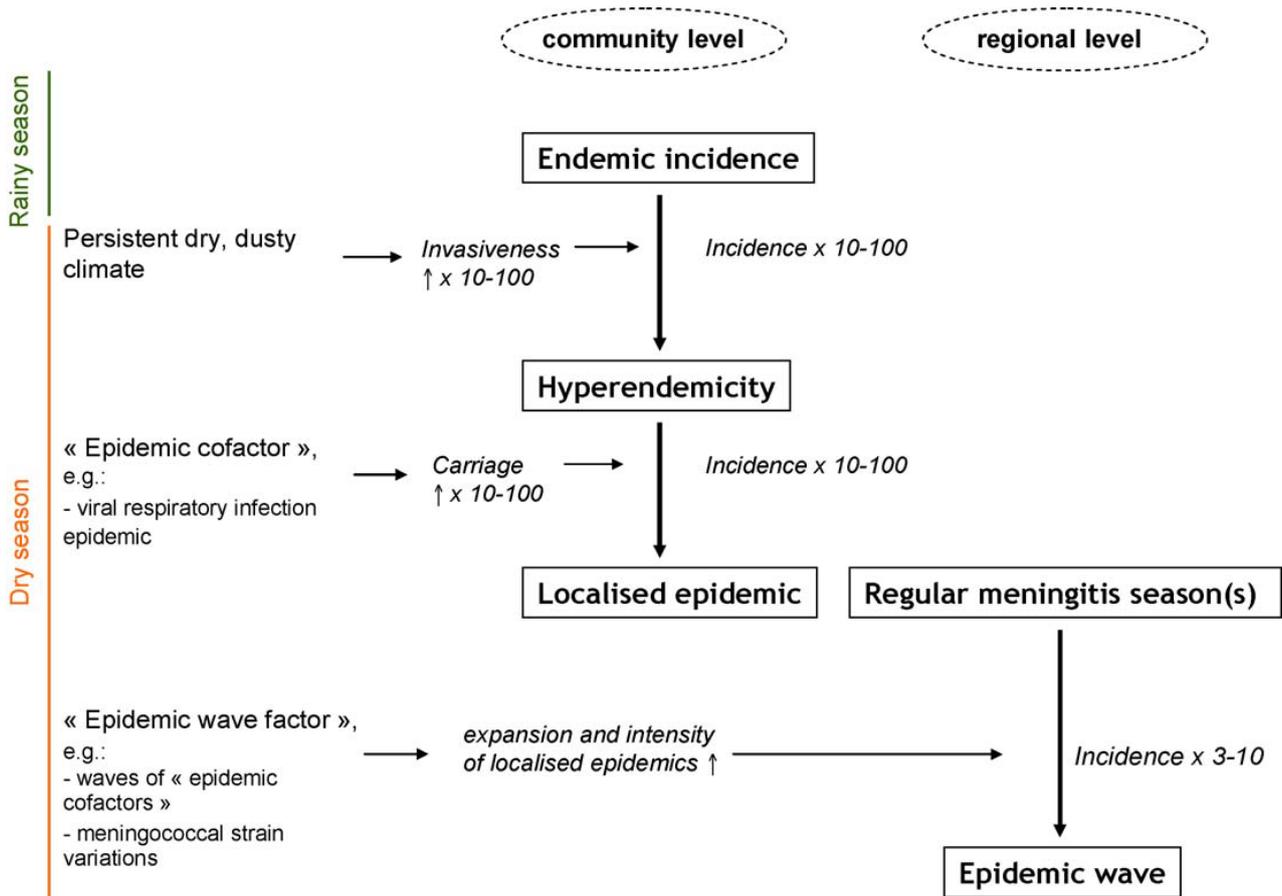


Figure I.7. – Modèle épidémiologique exploratoire des épidémies de méningites dans la ceinture des méningites (Mueller et Gessner, 2010).

la dynamique des épidémies.

2. Le climat sahélien et les poussières sahariennes en saison sèche

2.1. L'Harmattan, un vent chargé de poussières désertiques

2.1.1. Les régimes de mousson et d'Harmattan

Le Sahel est connu pour son climat particulier marqué par l'alternance du vent d'Harmattan provenant du Sahara pendant l'hiver boréal et par les pluies de la mousson africaine pendant l'été boréal³. La première description de la circulation atmosphérique globale faite au 18^{ème} siècle par Hadley a permis d'expliquer d'une part les alizés qui sont les vents d'est tropicaux comme l'Harmattan, et d'autre part les vents d'ouest dans les régions tempérées. La circulation atmosphérique y est décrite fermée et cyclique formant deux cellules symétriques par rapport à l'équateur.

La cellule de Hadley est le mécanisme intra-tropical qui redistribue l'énergie en altitude alors qu'au-delà des tropiques, ce sont les gradients de température qui permettent la redistribution de l'énergie (Janicot et Fontaine, 1993). Une zone de convection à l'équateur (c'est-à-dire la partie de la cellule de Hadley ayant un mouvement ascendant) sépare les deux hémisphériques météorologiques dans la troposphère autour du globe. Elle est nommée la Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT). C'est la zone où converge l'humidité apportée par les alizés océaniques, qui se traduit par les fortes humidités de certaines régions équatoriales.

La côte du golfe de Guinée est quasi-parallèle à la latitude 5° nord. La ZCIT se déplace de part et d'autre de cette côte entraînant des différences d'énergie (de température et de pression) au sol entre le continent et l'océan (Dhonneur, 1985). La position la plus au nord de la ZCIT est 10° nord. Les régions plus au sud observent deux passages annuels de la ZCIT et deux périodes de pluie alors qu'au nord, il n'y a qu'une période de pluie. Enfin, il est important de noter que le déplacement de la ZCIT ne se fait pas linéairement mais par saut (Sultan et Janicot, 2000). La première saison des pluies en Afrique de l'Ouest est observée à partir de mai près de la côte, cela correspond au premier saut de la ZCIT vers le nord de 2° nord à 5° nord que l'on nomme la pré-mousson ou "pré-onset". Le deuxième saut de mousson se traduit par une rapide migration de la ZCIT de 5° nord à 10° nord (Sultan *et al.*, 2003; Sultan et Janicot, 2003)).

La ZCIT est une zone de convection de l'air et elle diffère de la zone de convergence des vents (i.e. mouvement parallèle à la surface) surtout en Afrique de l'Ouest. Du fait de la différence de densité des vents des alizés en provenance du nord ou du sud, ces deux zones peuvent être distantes de 800 kilomètres l'une de l'autre en été au Sahel (Beucher, 2010). La discontinuité de la direction des vents au sol est nommée le Front de convergence InterTropicale (FIT). Cet écart entre la ZCIT et le FIT naît de l'importante surface du continent africain se trouvant sous le tropique du Cancer à 30° nord, qui durant l'été, renvoie plus d'énergie que les océans.

Les déserts ne captent pas la chaleur et l'air est chauffé par contact avec le sol durant la journée. Par conséquent, en été, le mouvement vers le nord de la ZCIT est amplifié par le gradient méridien de pression et de température entre le Sahara et le golfe de Guinée. Le Sahara est une zone de

3. Dans la suite l'hiver (ou l'été) désigne toujours l'hiver (ou l'été) boréal.

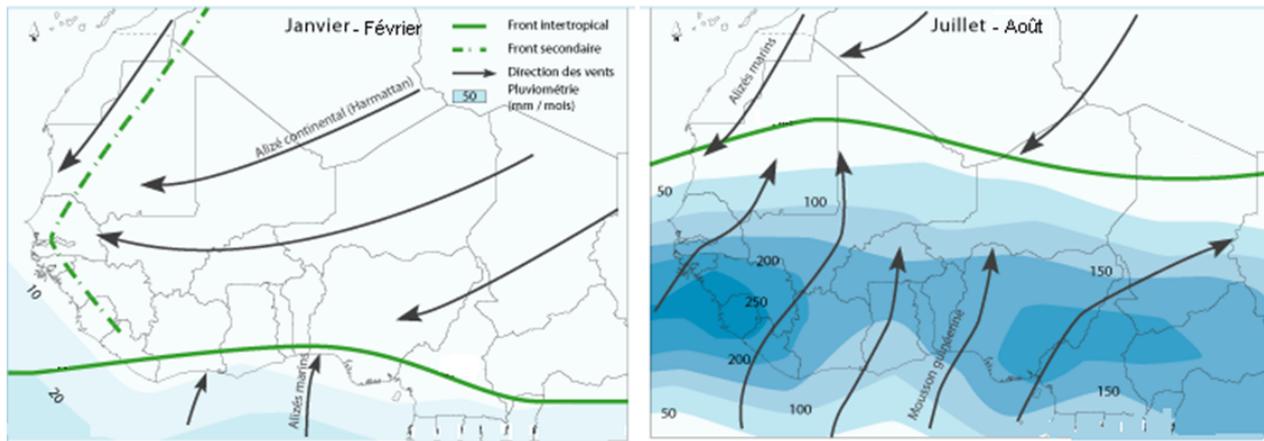


Figure I.8. – Position du Front de convergence Inter-Tropical (en vert) en janvier-février (à gauche) et en juillet-août (à droite). Les flèches représentent la direction du vent avec les alizés continentaux (l’Harmattan, à gauche) et au sud les alizés océaniques (la mousson, à droite). Les contours en bleu montrent la pluviométrie (à partir de l’atlas de l’intégration régionale en Afrique de l’Ouest de 2008 disponible à l’adresse : www.oecd.org/fr/csao/publications/40121057.pdf).

subsidence mais, dans les premiers kilomètres de la troposphère l’air chauffé par la surface s’élève par la convection de l’air chauffé par le sol. Une dépression thermique se place systématiquement dès le printemps jusqu’à la fin de l’été sur l’ensemble Sahara-Sahel (Lavaysse *et al.*, 2009; Lafore *et al.*, 2011). C’est la Dépression Thermique Saharienne (notée DTS dans la suite).

Durant la saison sèche en Afrique de l’Ouest, les vents proviennent du secteur nord-est correspondant à l’alizé continental nommé Harmattan (Figure I.8), ces masses d’air traversent le Sahara avant de rejoindre l’océan Atlantique (Nicholson, 1995). En revanche, durant la saison humide (durant l’été boréal), les alizés de l’hémisphère sud prennent une composante sud-ouest au dessus du golfe de Guinée du fait de la rotation de la Terre (Leroux, 1983). Les masses d’air humide progressent alors à travers le continent et le flux de mousson rencontre les masses d’air de l’Harmattan au-dessus du Sahel obligeant l’air moins dense de l’Harmattan (sec et chaud) à passer au-dessus du flux d’air de la mousson (Hall et Peyrillé, 2006). Une couche d’air se forme à environ 2 km d’altitude et lorsque elle atteint l’océan Atlantique elle est nommée la couche d’air saharienne (Prospero et Carlson, 1972).

Au Sahel, la saison sèche se distingue par l’importante variabilité spatiotemporelle du vent d’Harmattan. Le maximum de l’Harmattan correspond à la position la plus au sud du FIT et à l’inverse, l’expansion maximale de la mousson correspond à la position la plus au nord du FIT (Sultan et Janicot, 2003). Les alizés continentaux provenant de l’hémisphère nord rencontrent les alizés du sud humides et donc plus denses, au-dessus du continent en été ou au-dessus de l’océan en hiver (Figure I.9). Cette rencontre donne lieu à de la convection qui s’organise de différentes manières au-dessus du continent ou au-dessus de l’océan (Beucher, 2010).

La pluviométrie s’interprète par le déplacement de la ZCIT qui amène l’air humide en été en Afrique de l’Ouest (Hayward et Oguntoyinbo, 1987) et il y a trois climats principaux :

- Le climat saharien (au-delà de 16° nord)
- Le climat sahélien (de 8° nord à 16° nord)
- Le climat soudano-guinéen (de 0° nord à 8° nord)

Des distinctions plus fines sont possibles comme une bande soudano-sahélienne mais ces différences s’interprètent par la structure méridienne des isohyètes. C’est d’ailleurs sur cette base que Lapeyson-

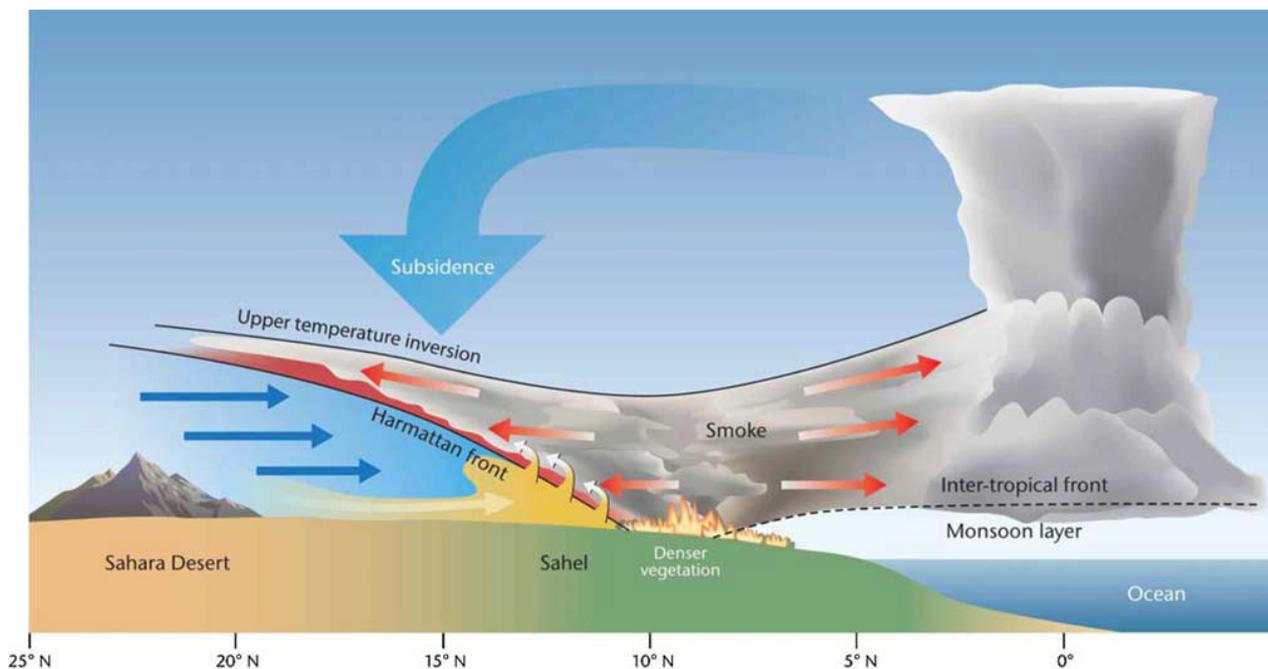


Figure I.9. – Coupe méridionale de la mousson africaine. Le front d’Harmattan marque la différence entre les masses d’air humide de la mousson et les masses d’air sec de l’Harmattan (Haywood *et al.*, 2008).

nie a défini la ceinture des méningites (c.f. section I-1.1.1) car les cumuls annuels de pluie sont un bon descripteur du climat régional de l’Afrique de l’Ouest.

2.1.2. Les caractéristiques et l’observation des poussières désertiques

Dans les aéroports de l’Afrique de l’Ouest, la visibilité horizontale est observée et relevée depuis près d’un siècle. La saison de l’Harmattan est connue pour être associée à des jours où la visibilité est très réduite. Cette baisse de la visibilité est due à la présence de poussières venant du Sahara. Les aérosols de l’atmosphère peuvent avoir des origines diverses telles que marine, volcanique, biogénique, issue de combustion, ou encore issue de l’érosion éolienne des sols. Les aérosols sont formés par la mise en mouvement des particules des sols érodés par le vent. Ils sont principalement issus du Sahara et amenés au Sahel par le vent d’Harmattan. La mise en suspension et le transport des poussières⁴ du Sahara sont conditionnés par le vent qui est le paramètre clé (Dubief, 1979).

Tout d’abord, la couche la plus basse de la troposphère est définie par l’importante turbulence créée par les obstacles sur l’écoulement du vent. A l’intérieur de cette couche nommée couche limite de surface, le vent exerce sur le sol une force de friction qui peut dépasser localement les forces de cohésion des particules du sol permettant leur mise en mouvement (Alfaro, 1997). Il y a trois forces qui maintiennent les particules ensemble créant des agrégats de particules, ce sont la gravité, les forces de capillarité dues à l’eau du sol, et les forces de cohésion inter-particulaires. Il faut une force de friction supérieure à ces trois forces pour mettre en mouvement les agrégats de particules, par conséquent il y a un seuil de vitesse de vent au-delà duquel ils se mettent en mouvement (Bagnold, 1973). Ce seuil dépend des caractéristiques du sol, il varie donc géographiquement (Junge, 1979).

4. Les aérosols sont la matière solide en suspension dans l’air. Au Sahel, les aérosols sont essentiellement désertiques car ils proviennent du Sahara. Dans la suite du manuscrit, les aérosols désertiques sont simplement nommés les poussières quand la distinction n’est pas nécessaire.

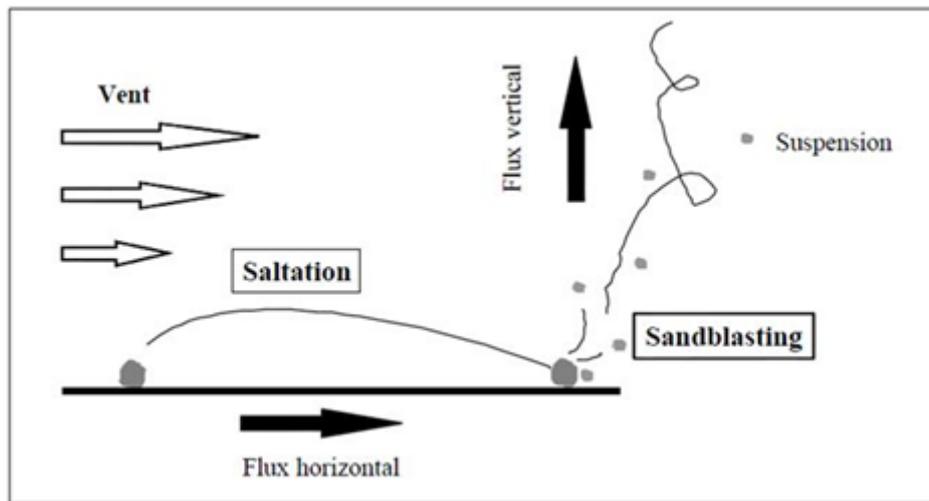


Figure I.10. – Processus d'érosion éolienne des poussières désertiques dans l'atmosphère (Pye, 1987).

Les sols secs sont plus érodables par le vent car la force de capillarité y est plus faible (McKenna-Neumann et Nickling, 1989; Fécan *et al.*, 1998). Ainsi les régions sources sont principalement les déserts et donc le Sahara est la région source la plus importante (Petitjohn *et al.*, 1972). Pour décrire de manière simplifiée l'effet du vent, il est possible de considérer ces agrégats sphériques, le diamètre étant alors le seul paramètre décrivant les particules du sol. La mobilisation des particules les plus grossières (diamètre $> 500 \mu\text{m}$) est difficile à cause de leurs poids. A l'inverse pour les particules les plus fines (diamètre $< 20 \mu\text{m}$), les forces de cohésion entre les particules sont importantes (Greeley et Iversen, 1985). Par conséquent, il existe une gamme de tailles dont la mise en suspension est plus facile, celle-ci étant centrée sur un diamètre d'environ $100 \mu\text{m}$ (Chepil, 1951), ce qui a été confirmé par des expériences en soufflerie (Shao *et al.*, 1993). Cependant la distribution granulométrique en taille des poussières est comprise entre $0,1$ et $20 \mu\text{m}$ et centrée sur un diamètre moyen de $8 \mu\text{m}$ (Todd *et al.*, 2007). Il existe donc un autre mécanisme expliquant cette granulométrie.

Après leur mise en suspension, les poussières grossières (i.e. les agrégats de particules) retombent rapidement sur le sol par sédimentation (Figure I.10). L'énergie du choc diminue la cohésion de l'agrégat et permet à des poussières fines de se libérer (Gillette et Goodwin, 1974; Gillette et Walker, 1977; Pye, 1987). Près des sources, il existe une distribution bimodale mais ces modes ont des temps de vie dans l'atmosphère différents car la sédimentation est plus efficace pour les grosses particules (D'Almeida, 1986; Gomes *et al.*, 1990). En d'autres termes, le flux vertical de poussières créé par la turbulence et la convection thermique est plus important pour les poussières les plus fines (Coudé-Gaussen *et al.*, 1987).

Durant le transport des poussières, la granulométrie change encore pour se déplacer vers une fraction plus fine. La Figure I.11 illustre la distribution massique par gamme de taille (la distribution de taille en masse de particules de diamètre D , par unité de volume d'air) collectée à différentes distances des sources (Schütz, 1980). Le diamètre médian de cette distribution diminue à mesure que la distance augmente et donc que le temps de résidence dans l'atmosphère augmente (Morales, 1986).

Le rayonnement solaire interfère avec les aérosols de l'atmosphère par absorption et par diffusion de ce rayonnement. La composition minéralogique des poussières ainsi que leurs tailles et leurs formes,

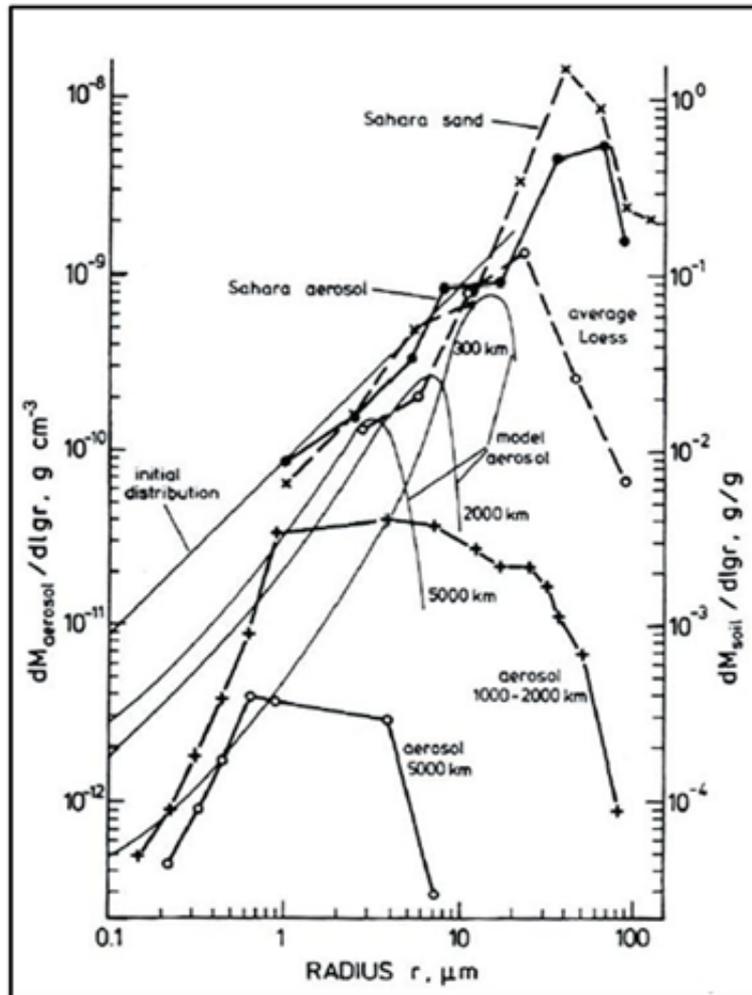


Figure I.11. – Distributions massiques des sols et des aérosols désertiques collectés à différentes distances de leur source (Schütz, 1980).

définissent les propriétés optiques. Pour décrire les caractéristiques optiques, trois paramètres sont généralement utilisés le coefficient d'extinction, l'albédo de simple diffusion et le facteur d'asymétrie (Seinfeld et Pandis, 1997). Le coefficient d'extinction k_{ext} représente la diminution (l'extinction) du rayonnement incident par diffusion et absorption. Il est égal à la somme des coefficients de diffusion k_{dif} et d'absorption k_{abs} tel que :

$$k_{ext}(z, \lambda) = k_{dif} + k_{abs} ; \text{ avec } z \text{ la dépendance en altitude et } \lambda \text{ la dépendance spectrale.} \quad (1.i)$$

L'épaisseur optique est une mesure intégrée du coefficient d'extinction définie comme la diminution d'un rayonnement incident sur son trajet optique suivant la loi de Beer-Lambert. L'atténuation du rayonnement ou l'épaisseur optique (τ) est proportionnelle à la longueur du trajet du rayonnement :

$$\tau(\lambda) = \int k_{ext}(z, \lambda).dz \quad (1.ii)$$

Il est possible de différencier les effets des aérosols ou des gaz (Van de Hulst, 1957). L'épaisseur optique en aérosols (noté AOT pour l'acronyme anglais Aerosol Optical Thickness) est définie comme l'intégration du coefficient d'extinction du sol au sommet de l'atmosphère uniquement lié à l'effet des aérosols.

Comme l'AOT dépend de la longueur d'onde, la comparaison des AOT mesurées à deux longueurs d'onde permet quantifier la dépendance spectrale des aérosols (de la colonne atmosphérique) qui est caractéristique de la taille des particules. Le coefficient d'Angström noté α , quantifie cette dépendance par la relation :

$$\alpha = -\frac{\ln(AOT_2/AOT_1)}{\ln(\lambda_2/\lambda_1)} ; \text{ où } \lambda_1 \text{ et } \lambda_2 \text{ sont deux valeurs spécifiques de longueurs d'onde.} \quad (1.iii)$$

Le coefficient d'Angström est proche de zéro pour les aérosols désertiques et proche de un pour les aérosols plus fins comme ceux issus des feux de brousses. Puisque les propriétés optiques des aérosols sont de mieux en mieux connues, les sondes embarquées sur les satellites ont permis de documenter la climatologie de l'aérosol désertique depuis plus de 20 ans au Sahel (une discussion sur cette climatologie sera détaillée au chapitre 3).

2.2. La variabilité spatiotemporelle du climat sahélien

2.2.1. La télédétection des poussières désertiques : une vue lagrangienne

L'étude des aérosols sahariens est possible grâce à la télédétection par satellite bien qu'il y ait de nombreux facteurs qui limitent les capacités des satellites. Deux indices semi-quantitatifs ont été élaborés pour renseigner les contenus en aérosols. Dans l'infrarouge thermique, la sensibilité au soulèvement des poussières a permis de créer l'IDDI (Infrared Difference Dust Index) par Legrand *et al.* (1989). Parallèlement, l'AI (absorption Aerosol Index) a été conçu dans l'UV par Herman et Torres (Herman et Celarier, 1997; Torres *et al.*, 1998). L'AI permet de mesurer quotidiennement et à l'échelle mondiale la quantité d'aérosols absorbants comme les aérosols désertiques contenus sur toute la colonne atmosphérique. Cependant l'AI est sensible à la hauteur de la couche d'aérosols (Torres *et al.*, 1998). La comparaison de l'AI avec les AOT du réseau AERONET à travers le monde (AEROSOL ROBOTIC NETWORK) a permis de valider la charge en aérosols estimée par l'AI (e.g. Hsu *et al.*, 1999; Torres *et al.*, 2002, 2007). Ensuite, des algorithmes plus complexes sont utilisés pour obtenir une mesure quantitative d'AOT car il faut faire des hypothèses sur les caractéristiques des

aérosols observés. L'algorithme "Deep Blue" appliqué aux mesures de MODIS (MODerate Imaging Spectro-radiometer) ont été recalculées pour la période 1999 à 2010 (Hsu *et al.*, 2004). L'instrument permettant la mesure la meilleure d'AOT par satellite est MISR (Multi-angle Imaging Spectro Radiometer) profitant d'angles de visée différents. Cependant sa fauchée⁵ est faible et il couvre le Sahel en sept jours environs (Martonchik *et al.*, 2004). Enfin, l'intercomparaison des produits d'aérosols avec les stations AERONET montre des différences dues à la fois à la sonde et à l'algorithme d'inversion (Carboni *et al.*, 2012). Il n'y a pas un produit plus adapté à l'étude des aérosols car chaque produit possède des qualités qui diffèrent selon l'application.

L'observation des sources d'aérosols par satellite comme les résultats issus de modélisation numérique montrent que plus de 40% de la masse en suspension dans l'atmosphère à l'échelle mondiale provient des sources sahariennes (Ramanathan *et al.*, 2001; Zender et Kwon, 2005; Laurent *et al.*, 2008). Dans le Sahara, les caractéristiques du vent peuvent changer localement à cause de la topographie qui peut conduire localement à des accélérations du vent. L'Afrique de l'Ouest ne présente pas de reliefs importants comparée à l'Asie, le continent se situe à une altitude moyenne d'environ 200 mètres avec quelques reliefs importants (dépassant 1000 mètres) comme l'Hoggar au sud de l'Algérie, ou le Tibesti et l'Ennedi à la frontière commune entre le Tchad, la Lybie, ou encore l'Atlas au Maroc.

L'Aerosol Index a permis de nombreux progrès dans la spatialisation des zones sources de poussières et de leur saisonnalité (Goudie et Middleton, 2001; Prospero *et al.*, 2002; Washington *et al.*, 2003; Engelstaedter et Washington, 2007b). Les trois régions sources principales ayant été déterminées par l'AI, sont : le sud de l'Algérie active en été, la frontière entre le Mali et la Mauritanie active au printemps et la région de Bodélé. Bien que Schepanski *et al.* (2012) mettent en avant les différences entre les produits d'aérosols (Figure I.12), les régions sources principales sont identiques pour les trois produits présentés (AI, AOT "deep-blue", IDDI). Seulement quelques régions sources peu étendues spatialement sont responsables de la majorité des émissions sahariennes car les caractéristiques locales du vent y sont spéciales (Engelstaedter et Washington, 2007b,a).

La région de Bodélé diffère des autres sources car elle est active toute l'année avec un maximum de janvier à mars et un minimum en août (Todd *et al.*, 2007). Le désert de Djourab est à la sortie d'un couloir large de 500 km environ formé par les massifs du Tibesti (dont le sommet est l'Emi Koussi culminant à 3415 mètres) et de l'Ennedi (dont le sommet est le mont Basso à 1450 mètres). On constate à la sortie de ce couloir qui est dans la direction des alizés, la formation d'un courant-jet dans les basses couches (vers 920 hPa) qui n'existe pas plus au nord (Washington, 2005; Goudie et Middleton, 2006). La campagne de mesure BODEX a montré l'importance de ce jet de basse altitude dans l'émission de poussières (Washington *et al.*, 2006). Enfin, cette source est aussi spéciale par la nature de son sol car la région de Bodélé est une dépression (géographique) qui a été un lac durant l'holocène. Les particules constituant ce sol sont des particules sédimentaires très fines, les diatomées (Gasse, 2002).

Durant la période de l'Harmattan pendant le cœur de la saison sèche (de janvier à mars), les poussières sahariennes sont transportées dans la couche de surface (de 0 à 2 km) à travers le Sahel en direction du golfe de Guinée (Goudie et Middleton, 2001; Sunnu *et al.*, 2008; Léon *et al.*, 2009). A l'inverse, les poussières sahariennes sont transportées sur de très grandes distances vers l'océan atlantique durant le printemps et l'été. L'air chaud et sec venant du Sahara rencontre l'air humide (donc plus

5. Lorsqu'un satellite est en orbite autour d'une planète, ses capteurs observent une certaine partie de la surface, cette surface porte le nom de fauchée.

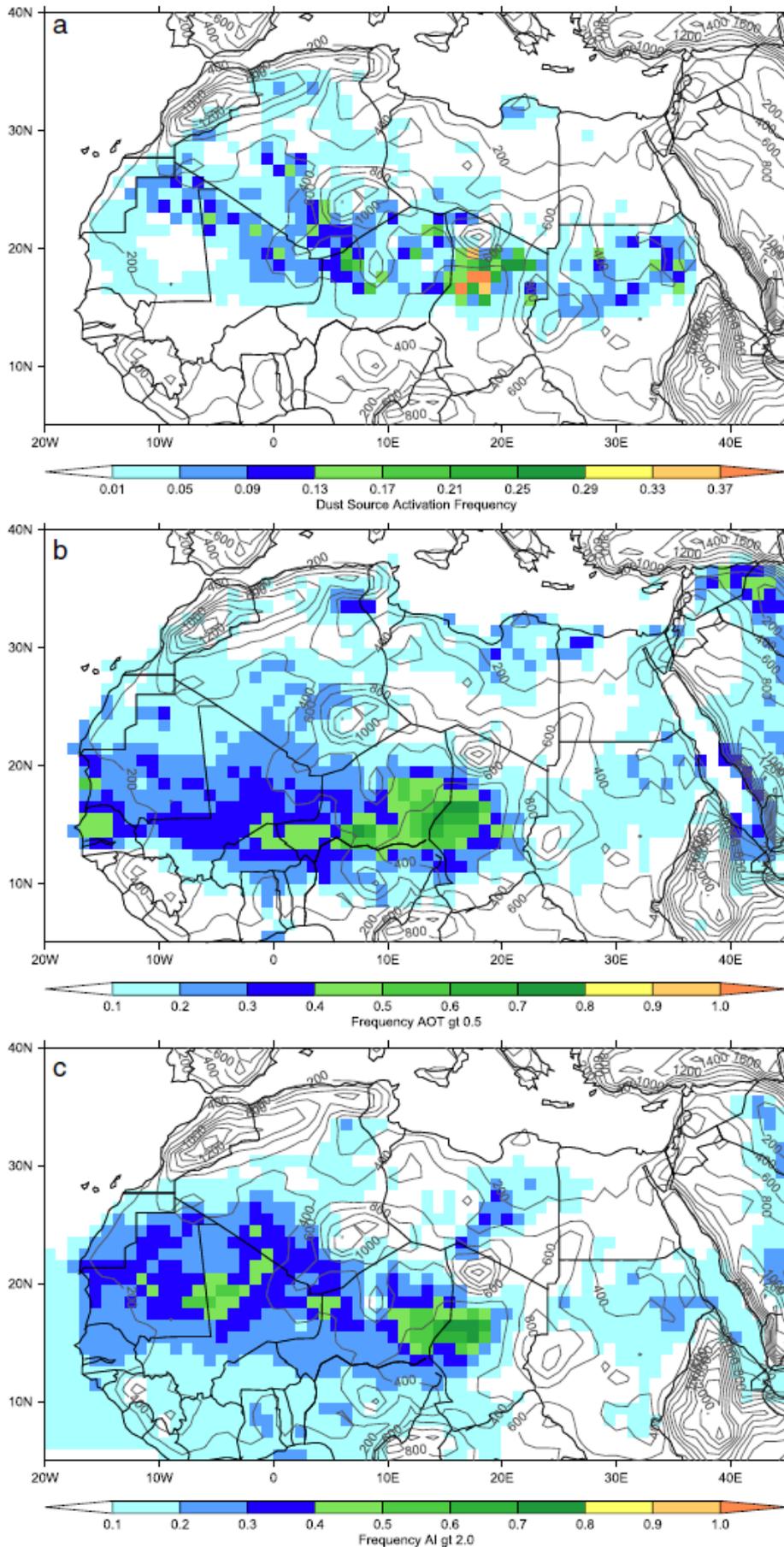


Figure I.12. – Carte des sources de poussières désertiques par (a) 15-minute MSG SEVIRI IR dust index, (b) AOT-MODIS "Deep Blue" (c) AI-OMI de mars 2006 à février 2010. Les fréquences élevées (jaune-orange) représentent les sources fréquemment observées. Les contours sont les isohypses (Schepanski *et al.*, 2012).

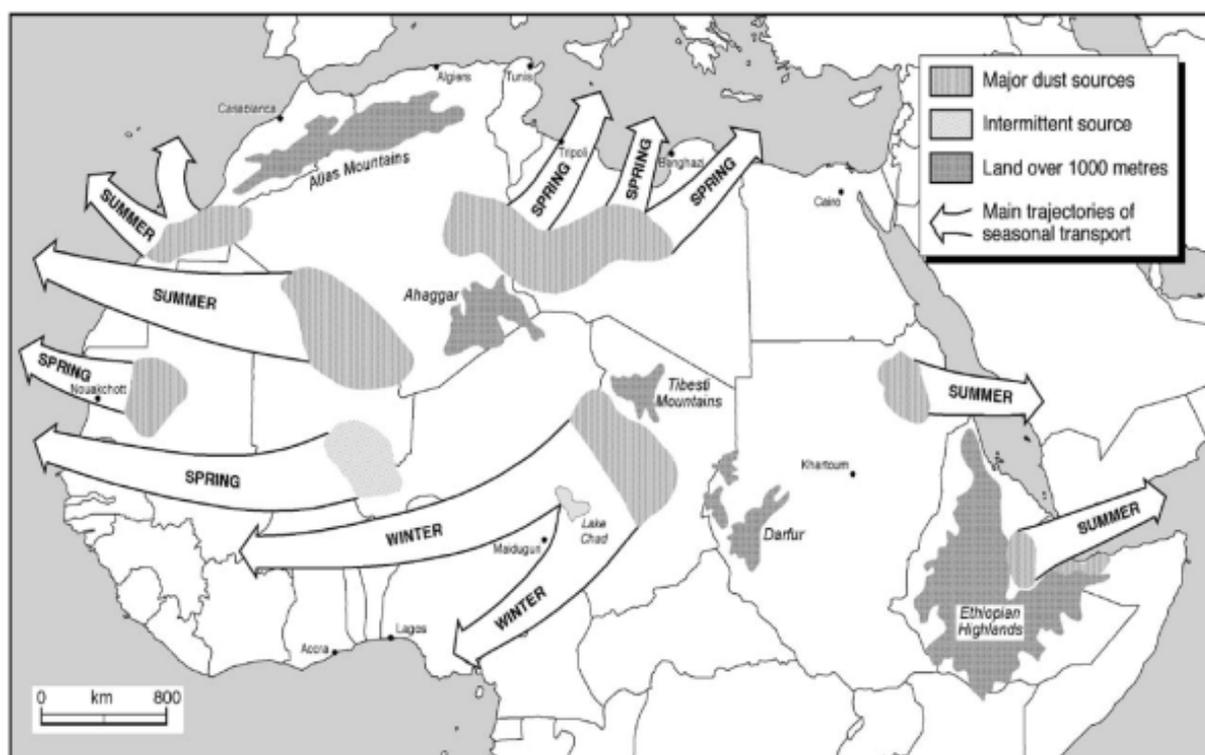


Figure I.13. – Saisonnalité des sources sahariennes de poussières désertiques (Goudie et Middleton, 2006).

dense) et passe au-dessus au niveau du Sahel, ceci forme une couche d'aérosols en altitude (Cavaliere *et al.*, 2010). Puis, cette couche d'aérosols poursuit son trajet vers l'ouest au-dessus de l'océan à une altitude comprise entre 2 et 4 km au sein de la couche d'air saharienne (Prospero et Carlson, 1972). Les poussières peuvent également être transportées vers la Méditerranée au printemps ou la péninsule Arabique pendant l'été (Figure I.13). Enfin, le dépôt des poussières peut se faire, soit par la pluie, soit par la sédimentation.

L'emploi du mot cycle peut prêter à confusion car il peut représenter deux visions différentes de la description des poussières. Le cycle de vie des poussières minérales commence par l'émission au Sahara, puis le transport par les vents, et enfin le dépôt dans des régions éloignées. C'est la première vision dite "lagrangienne" car on suit le mouvement de la particule ; l'autre description est dite "eulérienne" car l'observation est localisée à un point fixe géographiquement. Le cycle est alors l'évolution annuelle transitant d'une période de maximum à une période de minimum qui se répète chaque année.

2.2.2. La saisonnalité du climat et des poussières : une vue eulérienne

Le Sahel est une zone de transport de poussières sahariennes de décembre à avril (Nicholson, 1995). Ainsi, les séries temporelles de concentrations de poussières montrent un cycle saisonnier très prononcé (Figure I.14). Trois stations de mesures des concentrations de poussières ont été mises en place le long du trajet principal des poussières, c'est-à-dire d'est en ouest à 13° de latitude nord. Les mesures faites de janvier 2006 à décembre 2008 ont démontré un gradient de concentrations d'est en ouest entre les trois stations durant la saison sèche. On peut constater qu'il y a une forte variabilité à l'échelle journalière comme à l'échelle interannuelle. Le cœur de la saison sèche a lieu de janvier à mars lorsque les plus fortes concentrations de poussières désertiques sont mesurées chaque année.

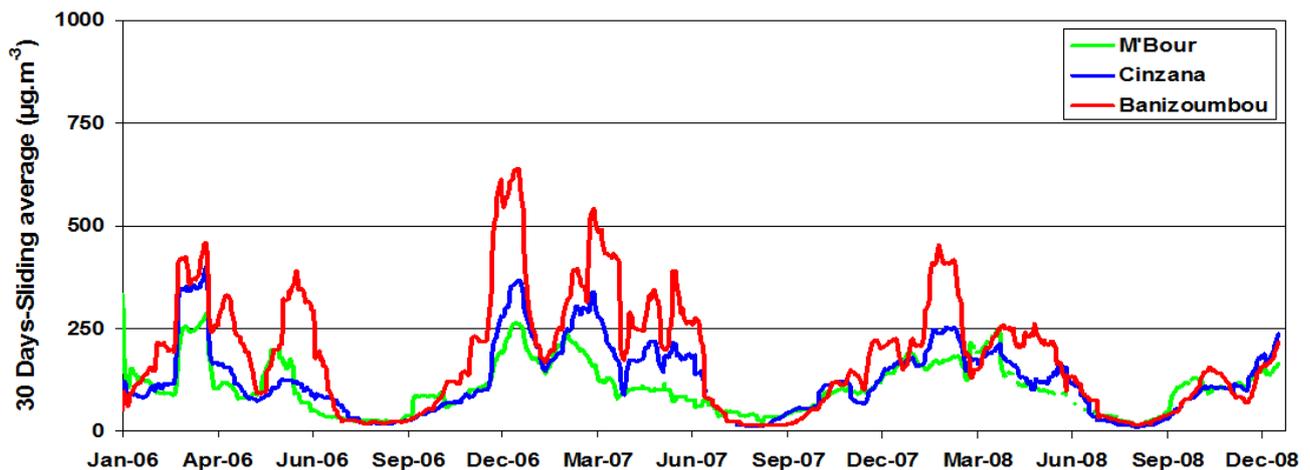


Figure I.14. – Moyenne glissante sur 30 jours des concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) aux 3 stations du transect sahélien : M'Bour au Sénégal, Cinzana au Mali et Banizoumbou au Niger, sur la période 2006-2008 (Marticorena *et al.*, 2010).

Pour être plus précis, en moyennant sur plusieurs années afin d'obtenir le cycle annuel moyen, on observe qu'il y a un maximum saisonnier de poussières chaque année en mars (Marticorena *et al.*, 2010).

La majeure partie des poussières désertiques de la saison sèche ne sont pas dues à de l'émission locale car elles sont transportées du Sahara vers le Sahel selon les conditions météorologiques depuis quelques zones sources (Engelstaedter et Washington, 2007a). Il n'y a donc pas de lien entre la concentration de poussières et la vitesse du vent au Sahel. En revanche, il y a un lien entre la direction du vent et la concentration de poussières ou l'épaisseur optique en aérosols (Yahi *et al.*, 2013). Une analyse en type de temps a montré que les fortes concentrations de poussières sont enregistrées pour certaines configurations météorologiques qui concernent tout le Sahel. En effet, sur la base de 5 types de temps décrivant la saison sèche, l'alternance de ces types de temps a été constatée similaire à deux stations (Cinzana et Banizoumbou) distantes de plus de 1000 km, malgré la forte variabilité de ces situations pour un même mois d'une année à l'autre (Yahi *et al.*, 2013).

Des événements de poussières d'échelle continentale sont enregistrés chaque année en Afrique de l'Ouest durant la saison sèche (Morales, 1986; N'Tchayi *et al.*, 1994; Marticorena *et al.*, 2010). Ils sont dus au transport de poussières depuis les sources sahariennes et ils durent entre un et six jours avec une durée moyenne de 2,5 jours (Marticorena *et al.*, 2010). Les événements de la saison sèche sont dus principalement à des incursions de front froid venant du nord de l'Afrique (Jankowiak et Tanré, 1992; Washington *et al.*, 2003; Knippertz et Fink, 2006). De plus, durant le cœur de la saison sèche, la hauteur de la couche contenant ces événements est faible puisque la subsidence est forte (Mahowald et Dufresne, 2004; Slingo *et al.*, 2006; Léon *et al.*, 2009). Puis, au printemps la DTS augmente la hauteur de la couche de surface car la convection est plus prononcée (Knippertz et Fink, 2006; Bou Karam *et al.*, 2009).

Sur une plus grande période de temps, la sécheresse des années 70 à 90 au Sahel s'est vue accompagnée d'une augmentation très forte de l'occurrence des brumes sèches (c'est-à-dire la baisse de visibilité à quelques kilomètres due à la présence de poussières)(Figure I.15). Cette augmentation s'est accompagnée d'une diminution des précipitations en zone sahélienne de 1952 à 1987 (N'Tchayi

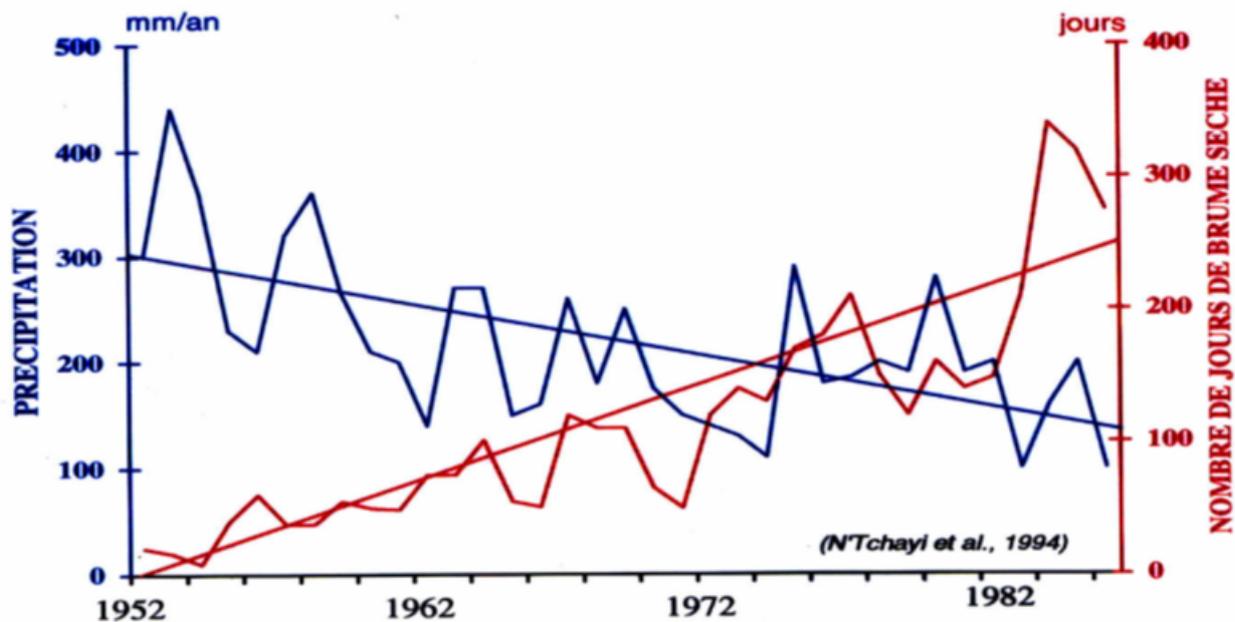


Figure I.15. – Evolution du nombre de jour de brumes sèches et du cumul annuel de précipitation entre 1952 et 1986 à Gao au Mali (N'Tchayi *et al.*, 1994).

et al., 1994) et d'une augmentation d'un facteur quatre des concentrations d'aérosols désertiques observées au-dessus de l'Atlantique nord (Prospero et Nees, 1977). Cela a été interprété comme un signe de l'augmentation des émissions locales de poussières. Elle serait induite par la diminution du couvert végétal causée par la baisse des précipitations (Tucker *et al.*, 1991).

Les poussières impactent aussi le climat à travers des effets de forçage radiatif direct et indirect (Sokolik *et al.*, 2001). La variabilité du transport de poussières et l'intensité de la mousson africaine ont été connectées à d'autres phénomènes climatiques de grande échelle comme avec l'oscillation Nord Atlantique (Chiapello et Moulin, 2002) ou les températures de surface de l'océan en lien avec le phénomène climatique el Niño (Janicot *et al.*, 2001). Il est aussi intéressant de noter que, sur une échelle de temps géologique, le Sahel était 300 km plus au sud durant le dernier maximum glaciaire alors que des périodes humides plus récentes ont conduit la limite du Sahel 300 km plus au nord (Durand et Lang, 1991). Malgré l'assèchement du Sahel constaté de 1970 à 1990 (Zeng, 2003), de nos jours il semble qu'il y ait un reverdissement (Delehanty, 1990; Herrmann *et al.*, 2005; Hickler *et al.*, 2005; Olsson *et al.*, 2005; Lebel et Ali, 2009).

Le lien entre les aérosols désertiques et le climat sahélien se manifeste donc à plusieurs échelles temporelles. Les événements intenses de poussières de la saison sèche ont un effet sur la dynamique atmosphérique (Heinold *et al.*, 2008) et vice-versa. A plus long terme, le forçage radiatif induit par les aérosols est à prendre en compte pour prévoir l'évolution du climat. Le climat du Sahel est donc indissociable des aérosols désertiques, et par conséquent les aérosols désertiques sont à intégrer dans les études d'impact du climat sur les épidémies de méningites.

3. L'importance du climat et des poussières dans les épidémies de méningites

3.1. La diversité des échelles des facteurs impliqués

Pour analyser la dynamique des épidémies de méningites, il faut prendre en compte le facteur environnemental qui peut être décomposé en deux. D'une part, il y a les aspects liés à la société et d'autre part, il y a les aspects atmosphériques c'est-à-dire le climat et les poussières. En effet, le facteur environnemental intègre le mode de vie, les déplacements de population, dont l'échelle de variation est la communauté (un foyer, un dortoir ou un village) mais aussi aux conditions atmosphériques de sécheresse et de poussières qui concernent une échelle spatiale supérieure. Il faut prendre en compte ces deux composantes de l'environnement pour expliquer les départs d'épidémies à l'échelle d'une communauté. Les impacts des conditions atmosphériques ne permettent pas de différencier des communautés proches les unes des autres puisque la variabilité atmosphérique est faible à cette échelle (Figure I.16). Néanmoins, les concentrations de poussières varient sur des échelles spatiotemporelles plus faibles que les variables climatiques.

Du point de vue du facteur société et à l'échelle du district, la persistance des épidémies pourrait varier en fonction de la densité de population (Philippon *et al.*, 2009). La localisation des voies de communication pourraient avoir aussi un impact sur les épidémies (Balk *et al.*, 2004) comme le suggère la distribution spatiale des épidémies (Pollard et Maiden, 2003). A l'échelle d'une ville, la pollution au monoxyde de carbone pourrait avoir une influence sur l'irritation des voies respiratoires (Dukic *et al.*, 2012). A l'échelle d'une communauté, les échanges de verres et de couverts seraient susceptible d'augmenter le taux de portage (Rapport OMS, 1998). A l'échelle d'un foyer, certaines habitudes pourraient aussi conduire à fragiliser le système respiratoire comme la fumée des cuisines au bois (Hodgson *et al.*, 2001) ou des cigarettes (Stanwell-Smith, 1994).

Les conditions atmosphériques de la saison sèche augmentent les regroupements pendant la saison sèche et la ventilation des lieux est réduite pour se protéger des poussières transportées par l'Harmattan (Thomson *et al.*, 2009). Ces conditions provoquent des éternuements et de la toux, favorisant la transmission de la bactérie. Dès 1980, l'hypothèse d'une évolution vers le sud de la ceinture des méningites a été émise à cause de la sécheresse provoquée par le déboisement du Sahel (Monnier, 1980). Du point de vue des poussières uniquement, celles-ci pourraient diminuer la résistance des muqueuses du système respiratoire (Moore, 1992; Cheesbrough *et al.*, 1995; Thomson *et al.*, 2009; Mueller et Gessner, 2010). Ce rôle pourrait aussi être moins direct, l'augmentation d'autres infections du système respiratoire favorisée par la fragilité des muqueuses pourrait être la cause de l'invasion du méningocoque (Alonso et Taha, 2003). Cela peut entraîner une baisse des défenses immunitaires profitant à des virus comme la rougeole ou la grippe (Bharti *et al.*, 2012). D'autres mécanismes plus anecdotiques peuvent aussi avoir une influence sur les méningocoques comme l'apport de nutriment (par exemple le fer) par les poussières (Jordan et Saunders, 2009) mais cette hypothèse est à prendre avec précaution au vu des faibles proportions de fer soluble dans les poussières désertiques (Zhu *et al.*, 1997). En outre, les propriétés de l'air sec pourraient augmenter le transport de germes par les poussières puisque la flottabilité dans des lieux peu ventilés serait plus importante (Griffiss, 1982; McCarthy, 2001; Shinn *et al.*, 2003).

L'effet des poussières sahariennes sur la santé est déjà avéré dans divers endroits plus éloignés du Sahara que le Sahel, par exemple avec la mortalité journalière en Espagne (Perez *et al.*, 2008), avec l'augmentation des admissions hospitalières pour des crises d'asthme dans les îles des Caraïbes

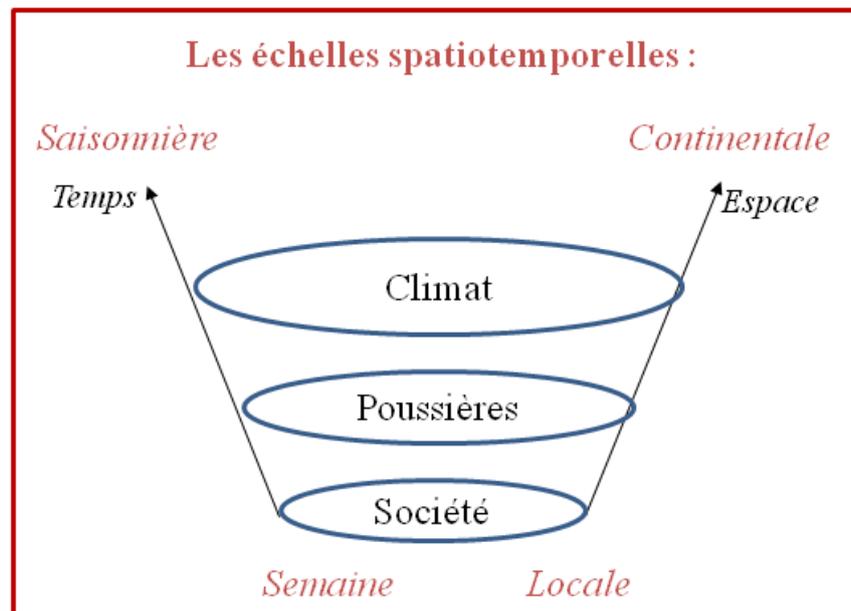


Figure I.16. – Les échelles spatiotemporelles des différentes composantes du facteur environnemental : le climat, les poussières et la société (Adapté de Martiny et al. 2010, conférence AMMA à Toulouse).

(Gyan *et al.*, 2005; Prospero *et al.*, 2008). De Longueville *et al.* (2009) déplorent un effet sanitaire grave attendu au Sahel car les seuils définissant un air de bonne qualité en vigueur en Europe ou aux Etats-Unis y sont largement dépassés (De Longueville *et al.*, 2009, 2010). L’hypothèse de ces travaux est que les poussières fragiliseraient les voies respiratoires supérieures par un effet mécanique, ce qui permettrait aux bactéries localisées sur les parois des voies respiratoires supérieures de passer plus facilement dans le sang. Néanmoins, pour vérifier et quantifier cette hypothèse, des personnes doivent être équipés d’appareils permettant de suivre précisément l’exposition aux poussières et d’analyser la dégradation des muqueuses pour différentes durées d’exposition et à différentes concentrations de poussières.

En conclusion, le facteur environnemental influence les épidémies de méningites à différentes échelles spatiales. Mais il semble clair qu’à une échelle spatiale suffisamment fine, les caractéristiques de l’atmosphère sont identiques partout. Par conséquent, les hétérogénéités des épidémies s’expliquent alors principalement par les aspects sociétaux. Il est donc primordial de déterminer à partir de quelle échelle le facteur atmosphérique est nécessaire pour comprendre les démarrages et l’intensité des épidémies.

3.2. Le facteur atmosphérique

3.2.1. L’impact sur le démarrage des épidémies

La diversité des facteurs impliqués dans les épidémies explique la difficulté d’anticipation de leurs départs. La variabilité des champs de vent à grande échelle a été étudiée par rapport aux épidémies de méningites au Mali en analysant les champs météorologiques réanalysés par les centres de recherche américains NCEP et NCAR⁶ (Sultan *et al.*, 2004, 2005). Des moyennes composites du vent de basses

6. National Centers for Environmental Prediction - National Center for Atmospheric Research

couches et de l'humidité spécifique en surface ont été réalisées afin d'étudier la variabilité hebdomadaire des phases du climat correspondantes aux phases des épidémies. La semaine de démarrage de l'épidémie a été déterminée chaque année par un test de rupture de pente (semaine S_0 définie par un test de Pettitt) sur l'incidence hebdomadaire nationale au Mali de 1994 à 2002. Durant les trois semaines précédant l'épidémie (S_0-3 à S_0), on remarque que l'humidité spécifique est très faible et le vent d'Harmattan parcourt le Sahel (Figure I.17). Lorsque le vent commence à changer de direction venant alors du sud du Mali, l'incidence des méningites augmente rapidement (entre S_0 et S_0+6). Ensuite, la période d'activité maximale de l'épidémie (entre S_0+6 et S_0+10) correspond à un vent faible sur le Mali et à une humidité croissante. Enfin, l'épidémie s'arrête avec l'établissement de la mousson (entre S_0+10 et S_0+20).

A l'échelle du Mali, la phase de démarrage semble coïncider avec un renforcement du vent d'Harmattan et une accentuation de la sécheresse sur la zone soudano-sahélienne. Ensuite, le vent d'Harmattan ne concerne plus que des latitudes plus septentrionales quand l'épidémie atteint son pic. A partir d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) appliquée aux champs de surface de vent et d'humidité (NCEP/NCAR), un indicateur de la circulation atmosphérique a été élaboré. Dans le cas du vent de surface en Afrique de l'Ouest, le premier et le deuxième mode distinguent les zones de vents forts associées à l'hiver ou à l'été. En revanche, le troisième mode retrouve le déplacement de la zone de vent faible (i.e. le FIT). De même, les résultats sont proches pour les champs d'humidité puisque le vent et l'humidité covarient en Afrique de l'Ouest.

Le maximum de l'hiver a été défini par Sultan *et al.* (2005) comme la position la plus au sud du FIT à partir de la troisième composante des champs de vent. Pour chaque année, la date de maximum a été déterminée et comparée à la semaine de démarrage des épidémies (S_0). Cette composante principale qui est un indicateur de la circulation d'Harmattan, montre une évolution très proche de celle du nombre de cas de méningite au Mali. En effet, la comparaison des cycles standardisés de la méningite et du cycle de la troisième composante montre que la première valeur positive de l'incidence des méningites se produit la 7^{ème} semaine et pour le maximum de l'hiver, c'est à la 6^{ème} semaine.

La date de maximum de l'Harmattan a été comparée avec la date de démarrage de la saison des épidémies au Mali. Un coefficient de corrélation de 0,92 sur les années de 1994 à 2002 a permis de montrer un lien statistique convaincant entre ces dates (Figure I.18). Par conséquent, une saison sèche plus précoce (ou à l'inverse tardive) au Mali est associée à un démarrage plus précoce (tardif) de l'épidémie de méningite (Sultan *et al.*, 2004, 2005). Les conditions climatiques à large échelle telles que le déplacement du FIT ont donc été liées au démarrage des épidémies au niveau national. De plus, un décalage d'environ six semaines est constaté entre le maximum de l'hiver et le maximum des épidémies, ceci démontre un phasage entre les vents dominants et les épidémies. Bien que la méthode proposée par Sultan *et al.* (2004, 2005) ait permis de lier le climat et les épidémies à large échelle, celle-ci ne permet pas d'expliquer les différences entre les pays. En effet, les bons résultats obtenus au Mali ne s'extrapolent pas au Burkina Faso. Pourtant quand les conditions climatiques sont équivalentes, les impacts sur les épidémies devraient être les mêmes.

Le calendrier des épidémies semble être conditionné par des changements météorologiques puisqu'il y a un lien entre le départ de l'épidémie et le maximum de l'hiver. Cependant les conditions climatiques pourraient aussi jouer un rôle pendant l'épidémie, et même jusqu'à en définir la fin. De plus, les conditions atmosphériques associées au départ des épidémies ne sont pas clairement définies par des variables causales. Cependant le vent covarie avec les variables quantifiant le stress des muqueuses qui est dû au manque d'humidification des muqueuses et à l'irritation des voies respiratoires par

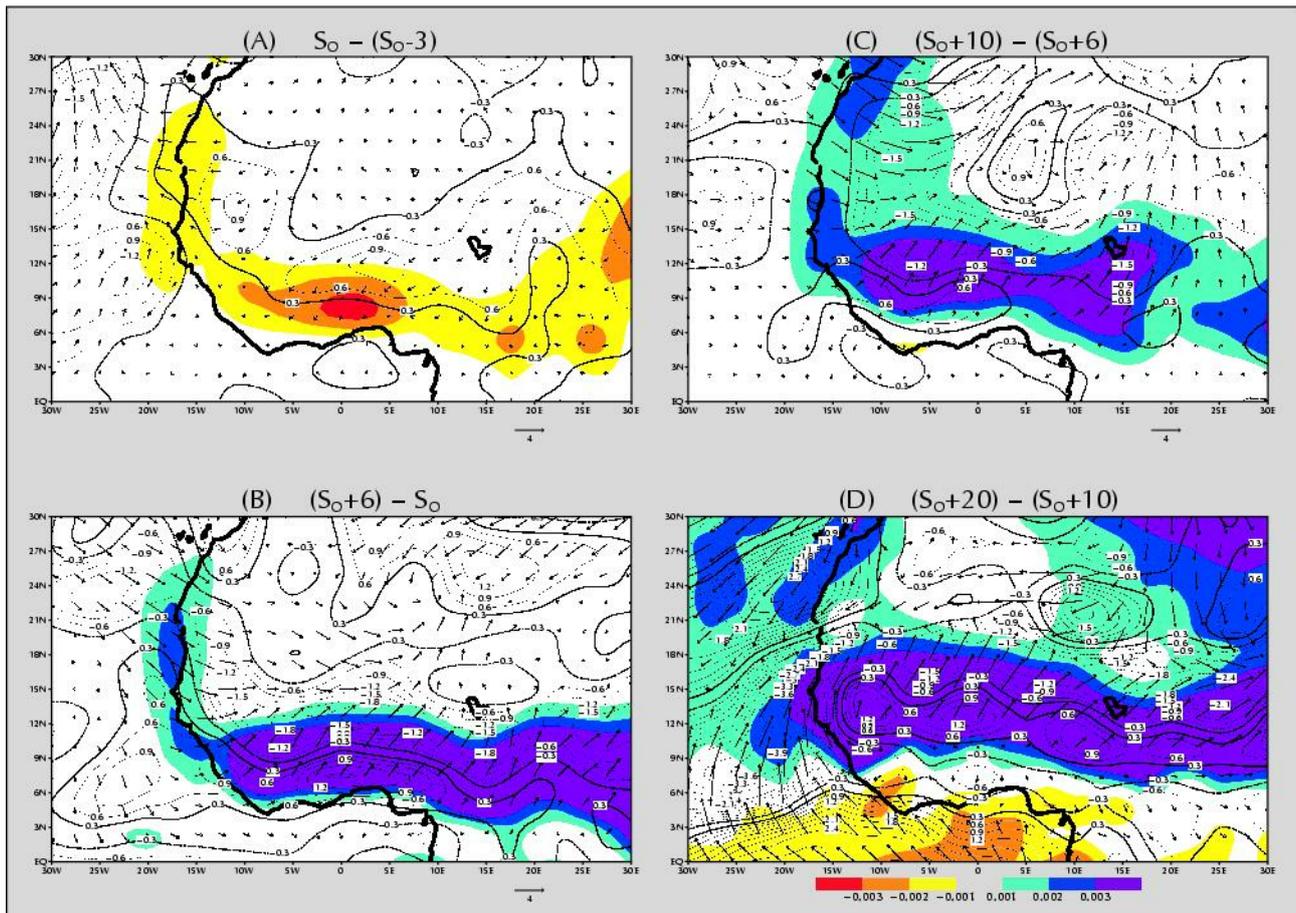


Figure I.17. – Anomalies de la circulation atmosphérique pendant les principales étapes d’une épidémie de MCS au Mali. Les couleurs représentent l’humidité spécifique à 1000 hPa (en Kg/Kg), les isolignes le module du vent à 1000 hPa et les vecteurs la vitesse horizontale du vent (Sultan *et al.*, 2005).

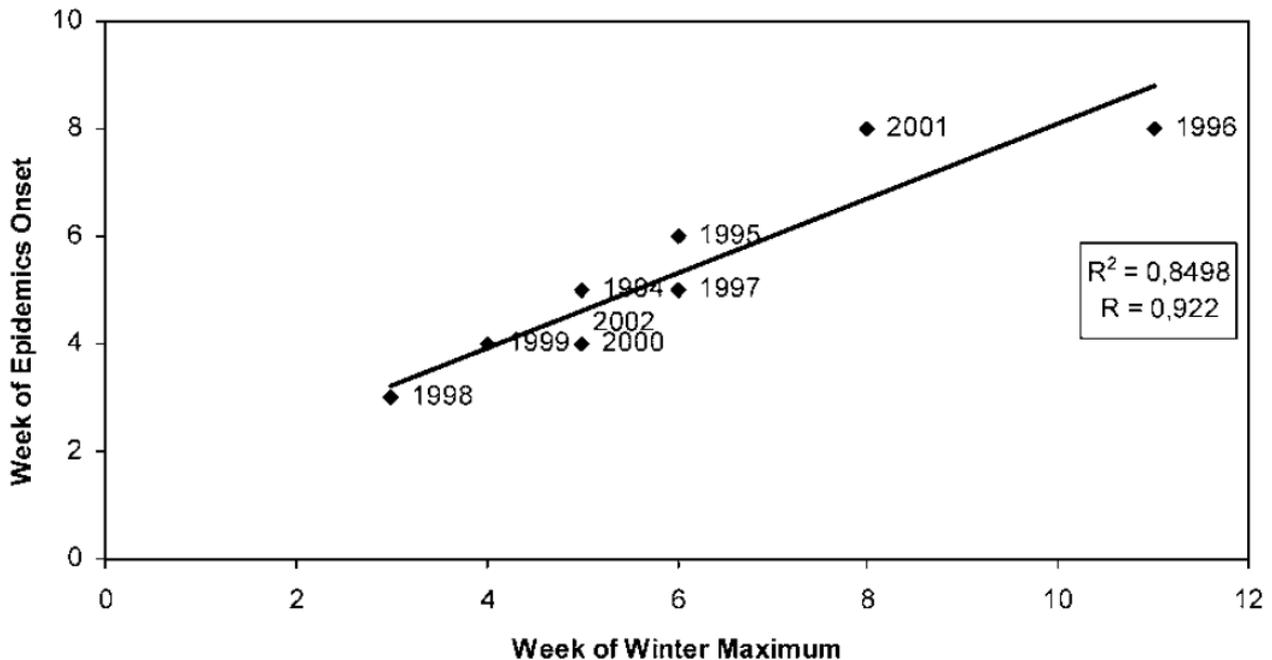


Figure I.18. – Relation entre la semaine du démarrage de l'épidémie au Mali (en ordonnées) et la semaine du maximum de l'hiver (en abscisses). La semaine du maximum de l'hiver a été déterminée à partir d'une analyse en composantes principales sur le module du vent issu des réanalyses NCEP/NCAR (Sultan *et al.*, 2005).

les poussières inspirées. La concentration de poussières et les conditions de sécheresse sont donc plus appropriées pour décrire le stress des muqueuses que le vent. Le vent est un bon indicateur des variations climatiques à large échelle car il intègre tous les paramètres atmosphériques (température, humidité, poussière). Mais, à l'échelle du district, le vent n'intègre plus les poussières car elles sont transportées à large échelle par les vents dominants depuis les sources sahariennes (cf. section I-2.2.2).

L'utilisation de variables plus causales vis-à-vis de l'irritation des muqueuses pourrait permettre de gagner en cohérence pour démontrer un lien avec la santé (Fayers et Hand, 2002). A l'échelle d'une communauté, les données épidémiologiques représentent à la fois la variation à large échelle (comme la variation du climat) et aussi des détails idiosyncratiques (locaux). La petite échelle permet de distinguer les propriétés locales alors que l'agrégation de ces données permet d'effacer les détails locaux dus à des processus aléatoires et permet de dévoiler les caractéristiques contraintes par des forçages agissant à large échelle. Aujourd'hui, la géographie des pathologies est étudiée dans le but de déterminer les échelles spatiotemporelles les plus adaptées pour expliquer leurs dynamiques (Guégan *et al.*, 2005).

3.2.2. L'impact sur l'intensité des épidémies

L'atmosphère semble influencer le calendrier des épidémies et pourrait donc influencer aussi leur intensité. L'ampleur d'une épidémie est déterminée par la valeur intégrée de l'incidence sur toute la saison épidémique mais l'intensité des épidémies est très variable à l'échelle des districts. Bien que le climat et les poussières semblent agir sur le calendrier et aussi l'intensité, il est plus difficile de prévoir l'importance d'une saison épidémique que de prévoir son démarrage (Sultan *et al.*, 2005; Drake, 2006; Martiny et Chiapello, 2013).

L'hypothèse de base est qu'il existe un lien causal entre l'extrême sécheresse associée à la présence de poussières et l'augmentation de l'incidence des méningites. Pour confirmer cette hypothèse, des liens statistiques doivent être mis en évidence (i.e. une corrélation positive) entre l'incidence des méningites et les variables atmosphériques en supposant qu'il y existe un mécanisme de causalité. Le choix des variables climatiques est essentiel pour la comparaison avec l'incidence. Lapeyssonnie (1963) a utilisé les cumuls annuels de pluie qui constituent un bon indicateur de la zone climatique. La distribution géographique des épidémies a été liée à la nature des sols, l'humidité (absolue), la densité de population et les poussières (Molesworth *et al.*, 2003; Savory *et al.*, 2006; Cuevas *et al.*, 2007). Hormis la densité de population, les autres facteurs sont des descripteurs du climat dont les évolutions hebdomadaires (ou mensuelles) sont corrélées.

Afin de synthétiser le climat, certaines conditions météorologiques particulières peuvent définir des types de temps à risque. Le climat de la saison sèche au Bénin a été séparé en différentes périodes en créant un indice d'Harmattan basé sur la température, l'humidité et les brumes sèches observées dans les aéroports de la région béninoise (Oke, 1994; Besancenot *et al.*, 1997). L'intensité de ce type de temps a permis d'expliquer dans le nord du Bénin de 14 à 34,5% de la variabilité des épidémies alors que, dans le sud du Bénin, le temps d'Harmattan est un phénomène marginal et les épidémies aussi (Besancenot *et al.*, 1997). Il semble que "le temps d'Harmattan" participe à l'occurrence plus élevée des épidémies dans le nord du Bénin que dans le sud. Malgré la distinction faite entre "le temps d'Harmattan" (i.e. un niveau de poussières élevé mais la température et l'humidité sont faibles) et "le temps de grande saison sèche" (i.e. la température élevée), les auteurs n'ont pas différencié ces deux phénomènes climatiques dans le modèle statistique d'incidence qu'ils ont développé.

Sur la base du lien statistique fort révélé entre la date de démarrage de l'épidémie et le maximum de l'hiver (Sultan *et al.*, 2005), les anomalies de vent au Niger et au Burkina Faso ont été étudiées durant les mois précédents le démarrage des épidémies (Yaka *et al.*, 2007, 2008). Durant les années épidémiques au Niger, le vent d'Harmattan est plus intense en novembre et en décembre. Mais ce résultat n'est pas clair au Burkina Faso. Un modèle de l'incidence saisonnière a été créé à partir de moyennes mensuelles des variables en surface : la pression, le vent (zonal et méridien), la température, l'humidité spécifique, la nébulosité. Cependant, il faut remarquer que le poids des variables modélisant l'incidence annuelle est différent au Niger et au Burkina Faso (Figure I.19). La corrélation entre les incidences observées et modélisées est au Niger de 0.62 (0.50 en réalisant une validation croisée) alors au Burkina Faso avec une corrélation de 0.42 (0.33 en réalisant une validation croisée), les résultats ne sont pas significatifs. Les auteurs constatent que cette performance est inférieure à celle d'un modèle simple uniquement basé sur la persistance de la maladie d'une année sur l'autre. Le travail de Yaka *et al.* (2007) considère l'hypothèse d'un effet du climat agissant avant l'épidémie en automne par un renforcement du vent d'Harmattan, ce qui entraîne une augmentation de la transmission à large échelle. Ensuite, cette augmentation conduit au pic épidémique plusieurs mois plus tard (mars-avril). Ces résultats ont récemment été confirmés par le travail de master de Fluck (2012) au Burkina Faso sur une période plus récente.

Les données des réanalyses météorologiques constituent un jeu fiable mais la résolution de 1,5° est assez grossière en comparaison de la taille moyenne d'un district. Pour résumer, l'intensité des épidémies vis-à-vis des conditions climatiques a été étudiée ces dernières années principalement au cours des mois qui précèdent le pic épidémique. Ces résultats manquent en cohérence car la phase d'augmentation de l'épidémie n'est pas analysée. Pourtant, bien que les foyers ne soient pas répartis de manière homogène au sein de la ceinture, la saisonnalité des épidémies de méningites est très marquée car le départ a lieu en janvier, le maximum entre mars et avril, et la fin en mai.

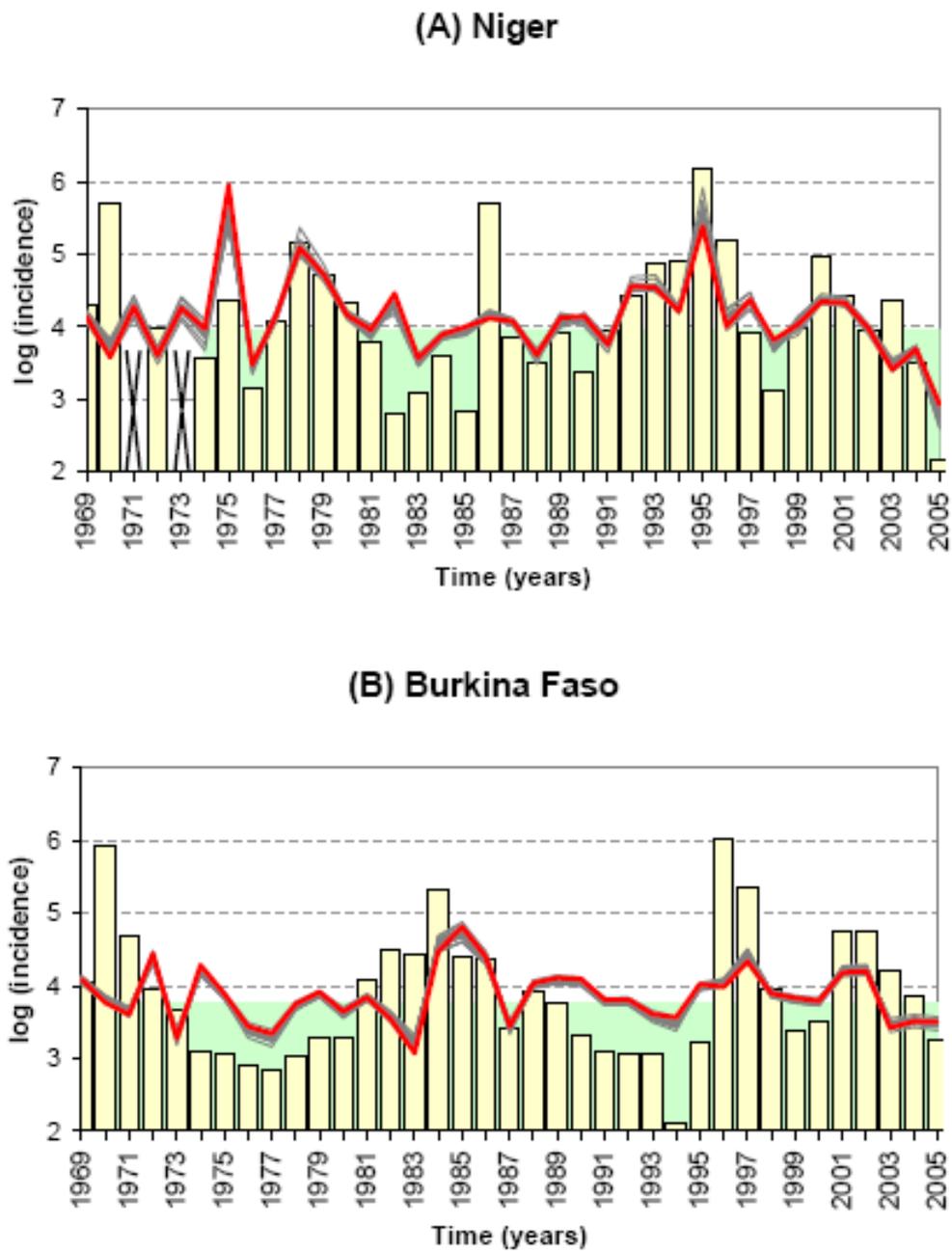


Figure I.19. – (A) Logarithme de l'incidence annuelle des méningites au Niger (jaune) et résultats de la prévision statistique basée sur une régression linéaire avec le vent d'Harmattan en hiver (rouge) ; (B) idem au Burkina Faso (Yaka *et al.*, 2008).

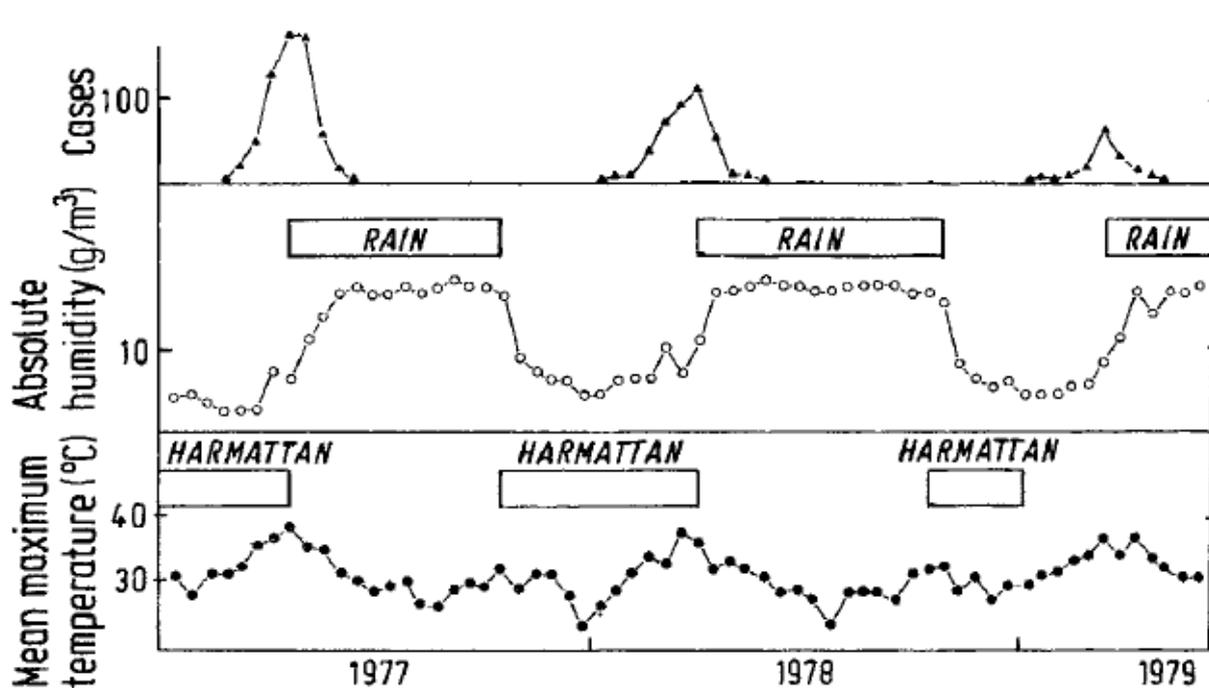


Figure I.20. – Nombre de cas de méningites, humidité absolue et température à Zaria au Nigeria pour la période 1977 à 1979 ; les moyennes sont calculées par période de deux semaines (Greenwood *et al.*, 1984).

3.3. Le rôle spécifique des poussières

Il y a deux hypothèses liant les poussières désertiques aux épidémies. La première concerne une influence sur le portage et la transmission avant la saison des épidémies (Thomson *et al.*, 2006; Mueller et Gessner, 2010; Thomson *et al.*, 2009). La seconde hypothèse porte sur l'augmentation de l'invasivité de la bactérie (Mueller *et al.*, 2008). En effet, lorsque le niveau de poussières augmente rapidement, cette augmentation pourrait être suivie d'une augmentation rapide de l'incidence avec un décalage de quelques semaines lié au temps d'incubation.

A l'échelle d'une ville, Greenwood a utilisé la température, l'humidité et un indice d'Harmattan pour la ville de Zaria (section I-1.2.1). Le coefficient de corrélation entre la température et le nombre de cas est élevé ($R = 0,6$) comparé à l'humidité (absolue), mais ces variables covarient (Figure I.20). De plus, un décalage dans le temps a été testé pour la première fois entre l'augmentation de l'indice d'Harmattan basé sur des mesures de visibilité et le nombre de cas de cette ville du Nigeria (de 0, 4 et 8 semaines). Le coefficient de corrélation maximum a été constaté pour un décalage de quatre semaines.

Au Niger en 2006, le produit IDDI a été utilisé et a montré qu'il y a des similitudes entre les zones les plus touchées par la méningite et les niveaux les plus élevés de ce produit suggérant aussi un décalage (Jeanne *et al.*, communication personnelle). Cette analyse s'est conduite à l'échelle du district avec un jeu de données épidémiologiques confirmées par un laboratoire de références le CERMES (Centre de Recherches Médicales et Sanitaires) à Niamey au Niger.

Une étude préliminaire a confronté l'AI-TOMS et l'incidence nationale des méningites au Niger en valeur hebdomadaire (Kotecka, 2005). Un décalage positif de quelques semaines entre l'augmenta-

tion de cet indice et l'augmentation l'incidence a été observé. A l'inverse, il y a un décalage négatif entre les maximums de ces deux séries de données. Au sol, les AOT du réseau AERONET ont permis de comparer l'AI-OMI durant l'année 2006 (Thomas, 2008). Il a été constaté que les deux séries de données covariant, bien qu'il y ait des différences d'intensités entre les pics d'AOT et ceux d'AI. Notamment en saison sèche, les pics d'AOT sont moins bien détectés par l'AI-OMI. Néanmoins, pour l'étude des impacts des poussières sur la santé, seule la couche de surface est importante et ce résultat semble signifier qu'une même augmentation de poussières ne serait pas également retrouvée par l'AI en fonction de la période de l'année.

Les stations de mesures des AOT au sol permettent d'obtenir une mesure cohérente avec l'exposition de la population aux poussières. Martiny et Chiapello (2013) ont montré que les poussières semblent être un facteur déclenchant des épidémies au Niger et au Mali, confirmant les travaux prometteurs de (Jeanne et al., communication personnelle). En effet à partir de moyenne pluriannuelle, le cycle annuel moyen des AOT a été comparé à l'incidence hebdomadaire moyennée sur la période 2004-2009 au Niger et au Mali sur la période 2005-2009 (Martiny et Chiapello, 2013). Une augmentation du contenu en poussières précède l'augmentation du nombre de cas de méningites avec un décalage moyen de 0 à 2 semaines, et ceci dans les deux pays (Figure I.21). Les résultats de cette étude montrent aussi que l'augmentation de l'humidité des semaines 13 à 16 coïncide avec la phase de diminution du nombre de cas. Puisque ce décalage de 0 à 2 semaines est cohérent avec le temps d'incubation de la maladie, cette étude montre le potentiel rôle des poussières désertiques.

Pour clarifier les mécanismes par lesquels les poussières influencent les épidémies, un jeu de données de plus de 10 ans (pour inclure une vague épidémique) représentatif de l'évolution des concentrations de poussières au sol est nécessaire à une résolution fine (Thomson *et al.*, 2006, 2009). La résolution des instruments embarqués sur les satellites ne cesse d'augmenter, le district est désormais une échelle accessible, comme par exemple avec l'AI de l'instrument OMI résolu à $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Cependant, en saison sèche, l'augmentation des concentrations de poussières est concomitante avec la période des épidémies chaque année. Pour démontrer qu'il y a systématiquement un décalage entre l'augmentation des contenus de poussières et le départ des épidémies (i.e. positif et entre 0 et 2 semaines), il faut qu'il se vérifie chaque année et aussi à une échelle plus fine. Si tel est le cas, des systèmes d'alerte précoce des épidémies pourraient prendre en compte cette information. Ces résultats sont très encourageants pour aller sonder des échelles plus fines et de manière interannuelle. Pour poursuivre et compléter ces résultats obtenus à l'échelle nationale, une approche comparant les échelles spatiales est indispensable pour analyser la synchronisation de l'intensification saisonnière de l'incidence avec l'augmentation des poussières.

■ La synthèse et les hypothèses méthodologiques

Les épidémies de méningites sont apparues en Europe puis se sont propagées en Afrique au cours du 20^{ème} siècle. La fréquence des épidémies est particulière en Afrique de l'Ouest et surtout dans le Sahel où cette maladie est hyperendémique pendant la saison sèche. Cette région possède un climat particulier en saison sèche car cette région est sous le vent d'Harmattan provenant du Sahara.

Chronologiquement, la saison sèche débute au Sahel avec l'établissement du vent d'Harmattan à partir du mois de novembre jusqu'au mois de décembre. Puis, entre janvier et mars, le vent d'Harmattan venant du nord a une expansion spatiale maximale, c'est le cœur de la saison sèche. Depuis les régions sources du Sahara, des poussières sont transportées par l'Harmattan à travers le Sahel au niveau du sol. Des épisodes de fortes concentrations de poussières sont aussi observés chaque année

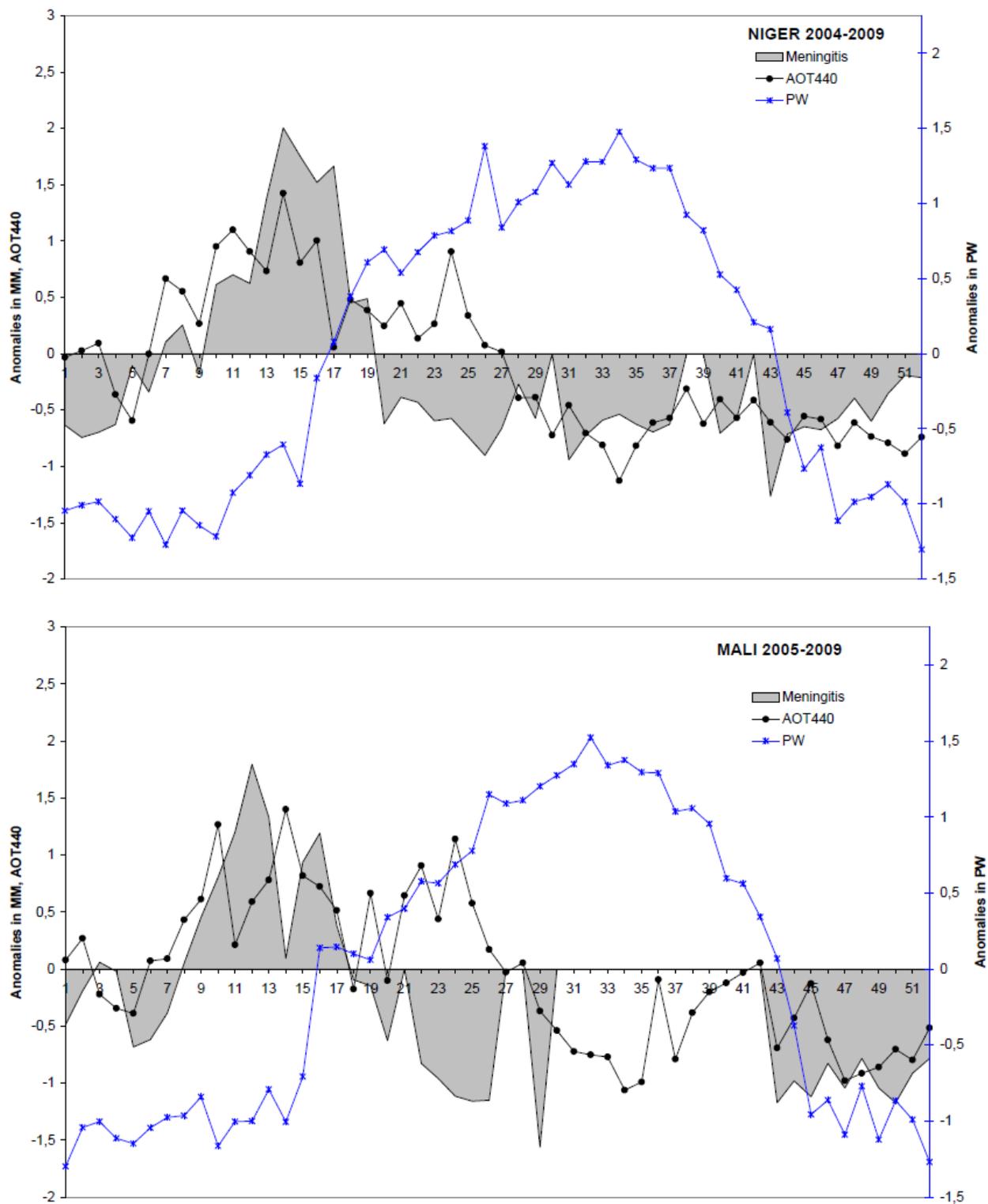


Figure I.21. – Cycle saisonnier moyen standardisé de méningite, superposé aux cycles des aérosols et de l’humidité spécifique au Niger sur la période 2004-2009 et au Mali sur la période 2005-2009 (Martiny et Chiapello, 2013).

durant cette période. A la fin du mois de mars, c'est la période de maximum du cycle annuel des concentrations de poussières lorsque la température augmente et le vent diminue. Entre mars et avril, pendant la période du maximum de l'incidence des méningites, la dépression thermique saharienne associée à de fortes épaisseurs optiques en aérosols atteint le Sahel. Le mois de mai est caractérisé par le passage du front de convergence intertropicale lorsque la vitesse du vent est minimum et la température commence à diminuer avec l'arrivée de masses d'air plus humides. C'est la première phase du démarrage de la mousson. La deuxième phase a lieu en juin quand le flux de mousson en provenance du sud est bien établi. Les concentrations de poussières atteignent alors des niveaux très faibles au sol mais le transport des poussières continue en altitude vers l'océan.

Bien que la saison des épidémies soit concomitante avec la saison sèche chaque année, le rôle des conditions atmosphériques n'est pas clair. Pour expliquer l'ampleur des épidémies, il faut prendre en compte les autres paramètres liés à la société et la bactérie, comme par exemple, le portage, l'immunité, la vaccination, la densité de population, la virulence des différentes souches présentes, ... Le rôle du climat et des poussières est double provoquant un effet direct sur la fragilisation des voies respiratoires et également un effet indirect sur l'augmentation de la toux ou des regroupements de personnes. A large échelle, l'expansion maximale des vents d'Harmattan concorde avec les départs d'épidémies. Cependant, à petite échelle comme à l'échelle d'une communauté, d'autres facteurs sont à prendre en compte car la variabilité du climat ou des poussières est insuffisante pour expliquer les différences entre deux communautés contigües.

Au Sahel, les poussières ont un rôle primordial dans la dynamique atmosphérique. Par conséquent, les études d'impact du climat sur la santé doivent intégrer cette composante de l'atmosphère pour être exhaustives. D'autant plus qu'un effet sanitaire grave est attendu au Sahel étant donné les fortes concentrations mesurées. Il y a une grande diversité de facteurs et d'échelles spatiotemporelles impliqués dans la dynamique des épidémies. Une étude intégrative des variables atmosphériques et de l'incidence hebdomadaire est nécessaire pour comparer les liens à différentes échelles spatiales afin de hiérarchiser les différents paramètres atmosphériques. La base de données épidémiologiques constituée par (Agier *et al.*, 2013b), permet de répondre à ces objectifs car ce sont des données au pas de temps hebdomadaire et à l'échelle des districts (Figure I.22).

Le but du programme ADCEM (impact des Aérosols Désertiques et du climat sur les Epidémies de Méningites) dans lequel s'inscrit cette thèse de doctorat, est de hiérarchiser les variables atmosphériques associées aux épidémies pour comprendre le rôle spécifique des poussières. L'hypothèse de ce travail de doctorat est que la saisonnalité de l'incidence des méningites est liée certaines conditions atmosphériques spécifiques et notamment les fortes concentrations de poussières. Les données satellitaires constituent le moyen d'observation le plus adapté pour rendre compte des niveaux de poussières quotidiennement et de manière spatialisée. Cependant la qualité des produits d'aérosols obtenus par satellite pour représenter les concentrations de poussières au niveau de la surface doit être testée. Une fois l'utilisation d'un produit d'aérosols validée au pas de temps des relevés épidémiologiques et à l'échelle des districts, il est possible de créer une base de données ayant conjointement l'incidence des méningites et les variables atmosphériques au niveau de la surface (poussières et climat).

Pour étudier à l'échelle du district les liens entre l'incidence hebdomadaire et les variables atmosphériques, il est important de disposer de variables causales vis-à-vis de la dégradation des muqueuses. La représentativité spatiotemporelle des variables utilisées doit aussi être connue et, comme toutes les variables du système atmosphérique sont liées, il est nécessaire d'employer une méthode s'affranchissant des redondances. Le choix des variables atmosphériques utilisées à l'échelle du district

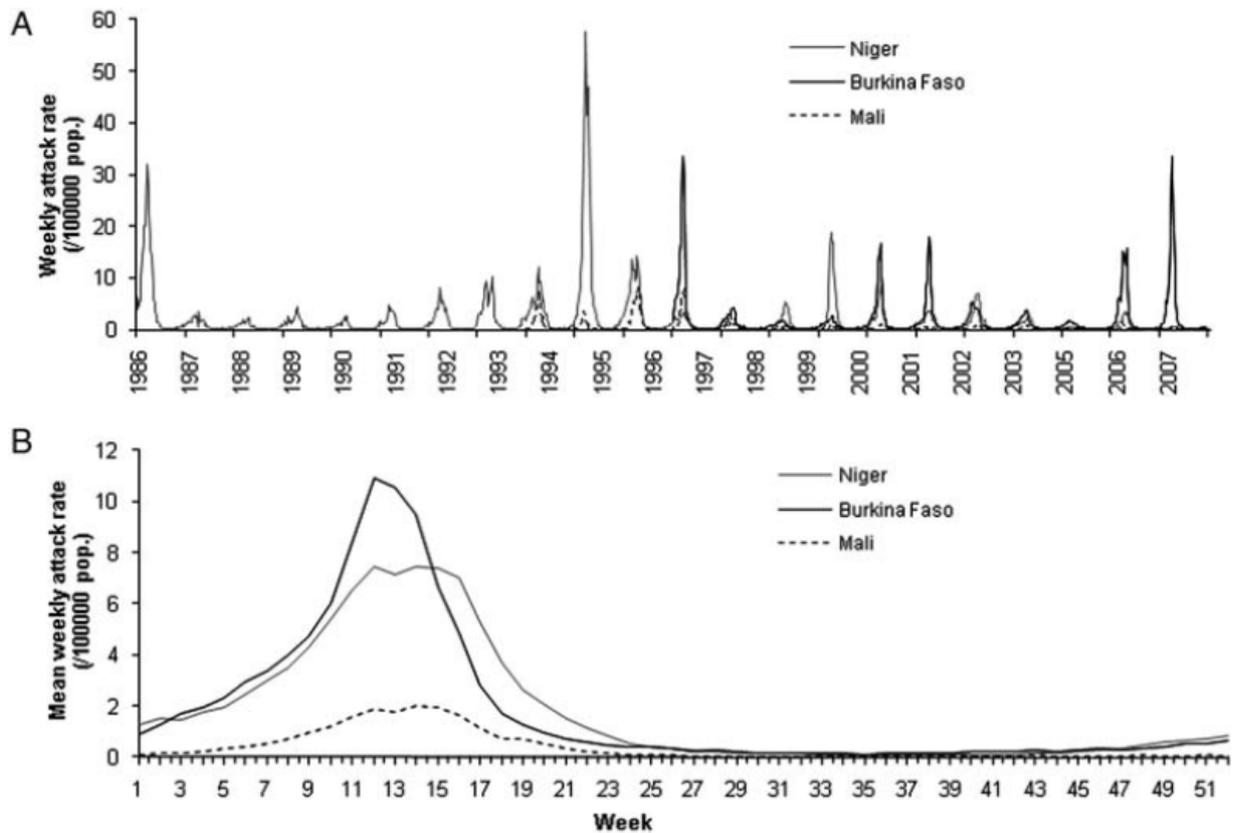


Figure I.22. – Séries temporelles (A) et cycles annuels moyens (B) de l'incidence hebdomadaire des méningites au Niger (en gris), au Burkina Faso (en noir) et au Mali (en pointillé) sur la période 1996-2007 (Agier *et al.*, 2013b).

est déterminant pour l'analyse de la synchronisation du climat avec la phase ascendante comme la phase descendante de la méningite. A l'échelle nationale, la méthode développée par *Martiny et Chiapello (2013)* a permis d'étudier l'hypothèse d'un décalage de quelques semaines (i.e. $0 < \text{décalage} < 2$ semaines). Le fait de confirmer la relation statistique dévoilée par *Greenwood et al. (1984)* puis étendue par *Martiny et Chiapello (2013)* à différentes échelles spatiales, renforcera notre confiance dans l'hypothèse d'un lien entre les fortes concentrations de poussières et l'augmentation de l'incidence.

Enfin, à l'échelle du district, il y a une grande hétérogénéité spatiale entre les districts à cause notamment de la vaccination qui est inconnue. Par conséquent, pour étudier l'échelle des districts, la stratégie adoptée consiste à focaliser l'analyse sur les années ayant connu une épidémie. Les caractères communs des relations statistiques entre l'atmosphère et l'incidence seront donc analysés en fonction de variables causales et au pas de temps hebdomadaire. Les relations seront considérées cohérentes si elles se vérifient aux différentes échelles, dans ce cas un modèle linéaire de l'incidence à partir des variables atmosphériques pourra être créé et sa capacité de modélisation des départs d'épidémies testée.

- Chapitre II -

Développement d'une base de données "climat-poussières-méningites" multi-échelles

■ Introduction

D'après le bilan réalisé au chapitre 1, l'étude des épidémies de méningites vis-à-vis des conditions atmosphériques nécessite que des études intégratives du lien entre le climat, les concentrations de poussières et les incidences des méningites soient réalisées à une échelle spatiotemporelle plus fine (i.e. celle de la vaccination réactive). Afin de créer une base de données appropriée, il est important de connaître la spécificité des variables choisies dans la ceinture des méningites. Dans ce chapitre, l'inventaire des différents jeux de données sera fait dans un premier temps. Ensuite, dans un deuxième temps une base de données rassemblant les relevés épidémiologiques hebdomadaires disponibles et les données atmosphériques adéquates sera constituée à l'échelle des districts. Puis, dans un troisième temps, les données seront agrégées à l'échelle régionale et nationale pour créer une base de données multi-scalaires et multi-échelles.

Deux questions principales se posent quant à la création d'une base de données intégrant des variables hétérogènes à plusieurs échelles spatiales : *Quelles sont les variables atmosphériques qui pourraient rendre compte d'un lien causal entre l'irritation des muqueuses du système respiratoire et les épidémies de méningites ?* Comme les variables atmosphériques sélectionnées seront agrégées au pas de temps hebdomadaire, du fait de la disponibilité des données épidémiologiques : *Est-il justifié d'utiliser les variables atmosphériques à ce pas de temps, et quelles sont les caractéristiques du climat et des poussières à ce pas de temps ?*

Une fois la base de données créée, une analyse des caractéristiques sahéliennes des variables atmosphériques dans la ceinture des méningites va permettre de vérifier la cohérence spatiale attendue sur notre domaine ainsi que la variabilité saisonnière au pas de temps hebdomadaire.

1. L'incidence des méningites et les variables atmosphériques

1.1. Les jeux de données

1.1.1. Les bulletins épidémiologiques de l'OMS à l'échelle du district

Les études mêlant l'épidémiologie et la climatologie sont le plus souvent contraintes par la disponibilité des relevés épidémiologiques. A l'échelle nationale, un décalage de 0 à 2 semaines entre l'augmentation du niveau de poussières et l'augmentation des incidences des méningites, a été démontré récemment (Martiny et Chiapello, 2013). Pour confirmer ce décalage, il faut s'intéresser aux échelles spatiales inférieures comme la région ou le district car un décalage identique est attendu à ces deux échelles. En effet, nous supposons que le décalage est dû au temps d'incubation de la bactérie qui est compris entre 1 à 14 jours (Stephens *et al.*, 2007) qui ne dépend pas de l'échelle spatiale choisie.

Dans les dispensaires où sont pratiqués les soins, le nombre de cas présumés est relevé chaque semaine et envoyé pour être comptabilisé à l'échelle du district. L'OMS surveille les incidences hebdomadaires depuis plus de vingt ans à l'échelle du district pour décider de commencer la vaccination sur la base de deux seuils (cf. chapitre 1, section I-1.2.1). Il y a des incertitudes dans un tel jeu de données car, par exemple, la population rurale se déplace pour obtenir le vaccin, traversant la frontière du Niger et du Nigeria entre autres. Le diagnostic fait à partir du tableau clinique, est entaché d'une erreur puisqu'il y a peu de confirmations bactériologiques (Paireau *et al.*, 2012).

Dans trois pays de la ceinture des méningites (Burkina Faso, Mali, Niger), ces données épidémiologiques ont été homogénéisées et elles ont déjà permis de montrer l'importance de vacciner les districts voisins d'un district étant en épidémie (Agier *et al.*, 2013a). L'évolution de la démographie a été prise en compte dans chaque district afin de calculer l'incidence (c'est-à-dire le nombre de cas rapporté à la population). Le jeu de données homogénéisées d'incidences à l'échelle du district, concerne trois pays parmi les plus touchés : le Burkina Faso, le Niger et le Mali. A partir de ce jeu de l'OMS, la distribution (et la moyenne) des incidences observées a été représentée sous la forme d'un "boxplot" pour chaque semaine tracée et pour chacun des trois pays afin d'observer la variabilité des incidences hebdomadaires des districts (Figure II.1).

Les incidences de la méningite sont présentées sur la Figure II.1 et les trois périodes d'acquisition sont : au Niger la période 1989-2006, au Mali la période 1994-2006 et au Burkina Faso la période 1997-2007. Le cycle annuel moyen de l'incidence (en vert) montre qu'il y a une période de fortes incidences entre la semaine 12 (fin mars) et la semaine 16 (fin avril). Sur les boxplots, on voit que la médiane (en rouge dans la boîte), le 3^{ème} quartile (la valeur définissant le trait supérieur de la boîte) et la valeur de la "moustache" supérieure (la longueur des "moustaches" est définie comme 1,5 fois l'écart interquartile) changent aussi durant cette période dans les trois pays ainsi que les valeurs extrêmes (i.e. au-delà de la valeur de la "moustache" supérieure, symbolisées par les croix rouges). Il est intéressant de noter que les incidences hebdomadaires les plus élevées semblent être plus précoces au Burkina Faso (en mars) qu'au Niger (en avril). De plus au Mali, l'incidence moyenne est inférieure aux deux autres pays mais de fortes valeurs sont parfois relevées à la même période.

Bien qu'il y ait encore débat sur la valeur de l'incidence définissant une année épidémique, les deux seuils utilisés actuellement par l'OMS pour définir une année épidémique (pour une population de plus de 30 000 personnes) sont : le seuil épidémique quand le risque est élevé correspondant à

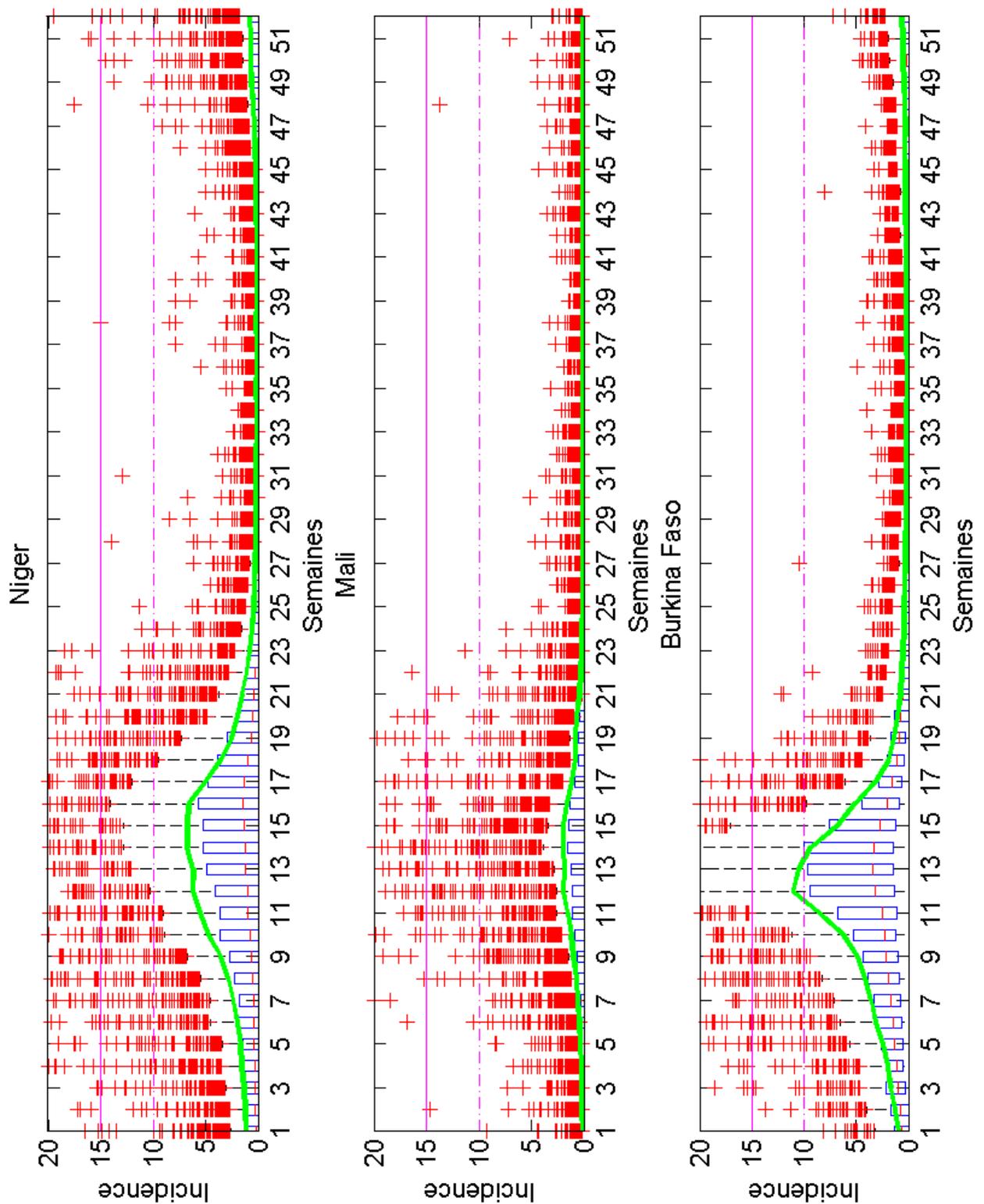


Figure II.1. – Boxplots hebdomadaires et cycle annuel moyen (en vert) de l'incidence hebdomadaire de la méningite (nombre de cas pour 100 000 habitants par semaine) des districts du Niger (1989-2006), du Mali (1994-2006) et Burkina Faso (1997-2007); seuil épidémique (en violet) et seuil d'alerte (en violet pointillé).

une incidence de 10 cas pour 100 000 habitants et le seuil épidémique normal correspondant à une incidence de 15 cas pour 100 000 habitants (OMS, 2010). Ce sont essentiellement les incidences extrêmes qui dépassent les deux seuils représentés sur la Figure II.1, principalement entre mars et avril, cela montre la grande variabilité de l'incidence entre les districts à cette période. L'étude du logarithme de l'incidence au niveau des districts permet ainsi de diminuer l'importance des valeurs extrêmes pour la comparaison avec les moyennes des variables décrivant l'atmosphère (Yaka *et al.*, 2007).

Chaque année de chaque district peut être étudiée séparément et on peut sélectionner les années ayant connu une épidémie. Les années-districts sont les séries hebdomadaires de l'incidence (de 52 valeurs). Comme il y a 38 districts au Niger et 17 années recensées, 51 districts au Mali et 12 années recensées, 52 districts au Burkina Faso et 10 années recensées, il y a donc 1778 années-districts possibles. Nous avons sélectionné les années en épidémie (normal ou risque élevé), c'est-à-dire lorsqu'il y a eu une valeur supérieure au seuil épidémique (quand le risque est élevé). Le nombre d'années-districts en épidémie (quand le risque est élevé) est présenté sur la Figure II.2 au cours de la période 1989-2007. En prenant le seuil épidémique (respectivement le seuil épidémique quand le risque est élevé) et sur toute la période, on trouve qu'il y a 13% des années-districts qui ont été en épidémie (respectivement 19%). Cela correspond à 360 (512) années-districts en épidémie dont 138 (209) au Niger, 67 (99) au Mali et 155 (204) au Burkina Faso.

On voit sur la Figure II.2 que l'évolution du nombre de districts ayant dépassé ces deux seuils est très similaire car les années-districts ayant dépassé le seuil correspondant à 10 cas par semaine pour 100 000 habitants, dépassent ensuite souvent le seuil épidémique correspondant à 15 cas par semaine pour 100 000 habitants. Les années importantes sont : au Mali 1994 et 1996 ; au Niger 1995-1996 et 2000-2003 ; au Burkina Faso 1997, 2001-2002 et 2006-2007.

Cette partie montre avant tout que les incidences hebdomadaires les plus fortes ont lieu durant une période précise qui se situe entre mars et avril. De plus, le calendrier des épidémies semble être décalé entre le Burkina Faso et le Niger (Figure II.1). L'incidence est très variable d'un district à l'autre et d'une année à l'autre (Figure II.2). Dans la partie suivante, il sera question de rassembler les données atmosphériques pouvant avoir un lien causal avec les épidémies, au pas de temps hebdomadaire et à l'échelle du district .

1.1.2. Les champs météorologiques réanalysés

Depuis les années 80, des réanalyses des données météorologiques sont mises à la disposition de la recherche scientifique par les centres américain et européen de météorologie. A Reading au Royaume-Uni, le centre d'ECMWF (European Center for Medium Weather Forecast) fournit des réanalyses des champs météorologiques qui représentent à l'heure actuelle la meilleure documentation existante de l'état de l'atmosphère car les mesures des instruments météorologiques (sondes, ballons, satellites) sont assimilées avec les sorties des modèles climatiques afin d'obtenir les champs les plus réalistes possible. Le premier jeu de données météorologiques obtenu par une analyse globale de données assimilées fut FGGE¹ (Bengtsson *et al.*, 1982), et rapidement ce jeu a été très utilisé pour les sciences de l'atmosphère. Ensuite, cette méthode d'assimilation a été employée rétrospectivement pour créer deux jeux de données météorologiques réanalysés : une série de 15 ans, nommée ERA-15² (Gibson,

1. FGGE signifie First GARP Global Experiment (et l'acronyme GARP signifie Global Atmosphere Research Programme).

2. La série de 15 années ERA (ECMWF Re-Analysis) commençant en 1979.

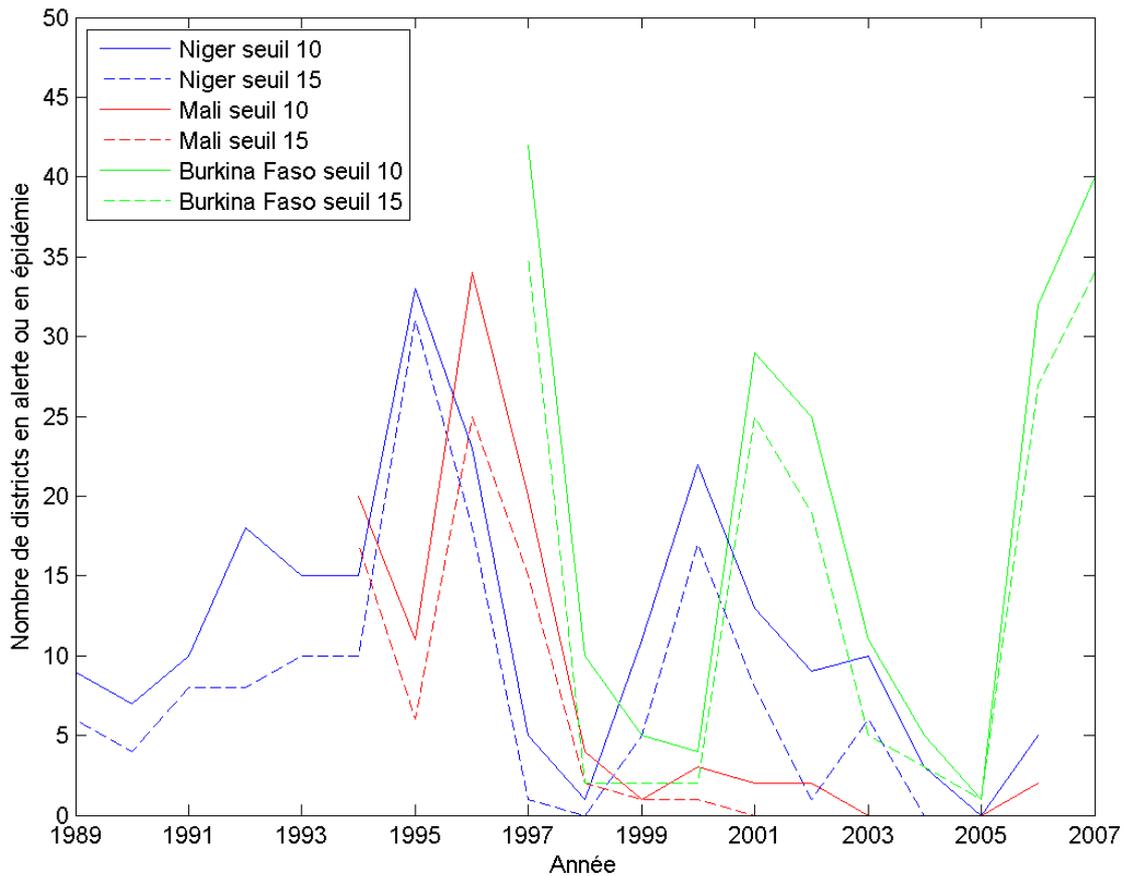


Figure II.2. – Nombre de districts ayant dépassé le seuil épidémique (normal : 15 cas par semaine pour 100 000 habitants ; quand le risque est élevé : 10 cas par semaine pour 100 000 habitants) au Niger (1989-2006), au Mali (1994-2006) et au Burkina Faso (1997-2007).

1997) ; puis de 40 ans, nommée ERA-40³ (Uppala *et al.*, 2005).

La qualité des reconstructions tient en trois points : la représentation du cycle hydrologique, la qualité de la circulation stratosphérique et l'assimilation des données (Uppala *et al.*, 2005). La résolution de la grille d'ERA-40 est de 2,5° (environ 250km x 250km à l'équateur). Les réanalyses⁴ ERA-Interim ont été produites pour faire la transition avec les réanalyses ERA-40, et à terme pour les remplacer (Berrisford *et al.*, 2009). Les données ERA-Interim commencent au 1^{er} janvier 1989 et elles sont toujours actualisées. Elles sont disponibles toutes les 6 heures, à : 00, 06, 12, et 18 UTC avec une résolution spatiale de 1,5° x 1,5° (environ 150km x 150km à l'équateur).

Les réanalyses météorologiques du centre Européen (ECMWF) permettent notamment de reproduire plus fidèlement le jet de basse altitude dans la région de Bodélé que les réanalyses (NCEP/NCAR) du centre américain. En effet, Koren et Kaufman (2004) ont montré que les données NCEP/NCAR sous-estiment l'intensité de ce jet dont l'importance est capitale pour comprendre les émissions de poussières à Bodélé et à plus grande échelle. De plus, le jeu ERA-40 a été utilisé pour décrire les liens entre le vent et l'émission de poussières vue par l'AI-TOMS (Engelstaedter et Washington, 2007b).

Des données météorologiques spatialisées sont donc disponibles à une même résolution et à un même pas de temps pour toute la période couverte par les données épidémiologiques. Les données ERA-Interim constituent une base de données fiable pour les études d'impact du climat sur la santé en fournissant l'état des champs météorologiques à la surface (Giuseppe et Tompkins, 2012). Pour utiliser ces données dans le cadre d'étude sur la santé, seul le niveau du sol est utile (c'est-à-dire le niveau de pression le plus élevé). Dans ce cadre, les variables généralement sélectionnées sont l'humidité et la température (Earn *et al.*, 2000; Altizer *et al.*, 2006; Grassly et Fraser, 2006), comme dans le cadre des études des liens entre le climat et la méningite (Greenwood *et al.*, 1984; Besancenot *et al.*, 1997; Sultan *et al.*, 2005; Yaka *et al.*, 2008; Kinlin *et al.*, 2009).

Il y a différentes variables décrivant la quantité d'eau présente dans l'air (l'humidité absolue, l'humidité spécifique ou l'humidité relative). L'humidité relative est le rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et le contenu maximal que l'air peut contenir à température et à pression données, c'est donc une quantité dépendante de la température et la pression. Pourtant c'est cette quantité qu'il faut utiliser pour caractériser le dessèchement des muqueuses. En effet, selon le centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, une humidité relative inférieure à 50% peut occasionner un inconfort en desséchant les muqueuses. De plus, l'utilisation de la température et de l'humidité relative n'est pas redondante puisque une humidité relative faible (typiquement inférieure à 20%) associée à une température basse (typiquement 20°C), n'aura pas la même influence sur la sensation d'inconfort que la même humidité relative associée à une forte température (typiquement 40°C).

Le vent est souvent utilisé pour décrire le climat car il en constitue un bon descripteur (cf. chapitre 1, section I-3). Il faut deux informations pour le caractériser. Il est possible d'utiliser soit le vent méridien (u) et zonal (v) ; soit la vitesse (i.e. le module) du vent ($\|\vec{vent}\| = \sqrt{u^2 + v^2}$) et l'angle en prenant une fonction de type arctangente (atan2) associant à u et v, une valeur d'angle en radian (de $-\pi$ à π) que l'on convertit ensuite en degré (de -180° à 180° avec le 0° au nord). Comme le module du vent est une variable qui a été liée à l'incidence des méningites (Besancenot *et al.*, 1997; Sultan *et al.*, 2005; Yaka *et al.*, 2008), cette variable a été sélectionnée (et avec l'angle) pour constituer la base de données.

3. La série de 40 années ERA (ECMWF Re-Analysis) commençant en 1957.

4. Des informations supplémentaires sur ces données sont disponibles à l'adresse internet suivante : <http://www.ecmwf.int/research/era>.

Dans cette thèse, quatre variables d'ERA-Interim ont donc été choisies pour la constitution de la base de données climatique : l'humidité relative (RH), la température (T°) et le vent (module et angle). Les valeurs moyennes de chaque pixel de la grille ERA-Interim sont présentées sur toute la période 1989-2007 à partir de moyennes trimestrielles pour chacun des quatre trimestres de l'année (Figure II.3).

Le 1^{er} trimestre (JFM) et le 3^{ème} trimestre (JAS) correspondent à des situations contrastées au Sahel et dans toute la ceinture des méningites. En effet, durant le cœur de la saison sèche (JFM), le vent venant du nord est associé à une humidité relative inférieure à 20% alors que, durant la mousson (JAS), elle atteint plus de 60% dans toute la ceinture. Le 2^{ème} trimestre (AMJ) correspond à la fin de la saison sèche et au début de la saison humide (et inversement OND pour le 4^{ème} et dernier trimestre de l'année), c'est-à-dire la période de transition entre les deux saisons. Pendant ces deux trimestres, les contours d'humidité sont assez proches montrant un fort gradient nord-sud et la température est élevée (elle est la plus élevée durant le 2^{ème} trimestre).

Au niveau du sol, les variables choisies peuvent être extraites pour correspondre aux relevés épidémiologiques hebdomadaires sur la période 1989-2007. Cette présentation des données ERA-Interim en Afrique au nord de l'équateur montre avant tout qu'il y a des conditions atmosphériques différentes pendant chaque trimestre dans la ceinture des méningites. Les différences spatiales des quatre variables sélectionnées semblent essentiellement méridiennes. Cependant, il convient de caractériser l'unicité de la ceinture des méningites vis-à-vis de chacune des variables (section II-1.2.1) mais aussi de détailler la variabilité existant au sein des trois pays de notre domaine (section II-2.1.2).

1.1.3. Les produits satellites d'aérosols

Les données géophysiques spatialisées d'aérosols sont disponibles grâce à la télédétection spatiale. A l'inverse des données météorologiques, il n'y a pas un jeu qui se démarque comme étant le plus fiable pour les études des impacts sur la santé. Le choix du produit d'aérosols est bien sûr conditionné par la profondeur temporelle permettant de faire correspondre avec la période des relevés d'incidences des méningites (1989-2007).

Quatre produits se distinguent : l'AI (Aerosol Index), l'IDDI (infrared difference dust index), les AOT de la sonde MISR (Multi-angle Imaging Spectroradiometer) et les AOT "deep-blue" obtenue par MODIS (MODerate Imaging Spectro-radiometer). Mais l'IDDI (Legrand *et al.*, 1989) est valable uniquement sur la période 1989-1994 ; les AOT-MISR sont reconnues comme étant l'estimation la plus fidèle des AOT en revanche l'échantillonnage temporel est faible (Banks *et al.*, 2013). Enfin, les AOT "deep blue" (Hsu *et al.*, 2004) n'étaient pas disponibles au début de ce travail (elles sont maintenant sur la période 1999-2010). Néanmoins, elles n'ont pas été spécifiquement validées en Afrique au nord de l'équateur.

L'AI a été choisi en premier lieu car il permet le meilleur recouvrement des données épidémiologiques (Torres *et al.*, 1998, 2007). TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) a été lancé sur le satellite Nimbus fonctionnant de 1978 à 1993 (ces données ne sont pas utilisées dans ce travail), puis sur Earth-Probe de juillet 1996 à 2005. La résolution de TOMS est de $1^{\circ} \times 1,25^{\circ}$. Son successeur OMI (Ozone Monitoring Instrument) a pris place sur le satellite Aura au sein de l'A-Train (de l'anglais Afternoon-train) lancé en octobre 2004, et sa résolution a été améliorée atteignant $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$. Le satellite Aura embarquant la sonde OMI fait partie de l'A-train qui est une constellation de satellites

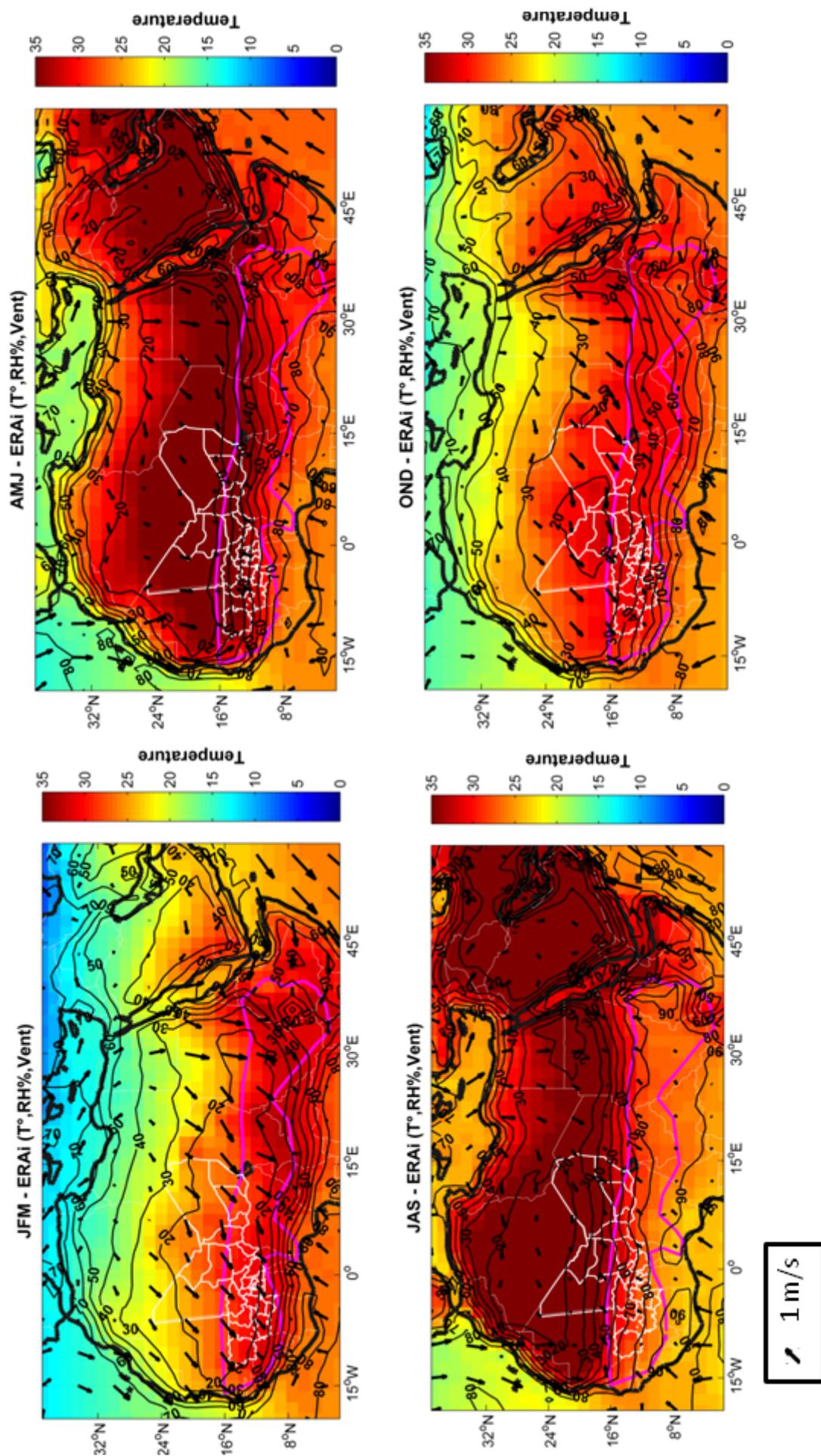


Figure II.3. – Moyenne trimestrielle de la température (échelle de couleurs), de l'humidité relative (les contours) et de vent (symbolisé par les flèches) sur la période 1989-2008. JFM est le premier trimestre de l'année ; AMJ le 2^{ème} ; JAS le 3^{ème} ; OND le 4^{ème} ; la ceinture des méningites est représentée

devant comporter à terme sept satellites franco-américains d'observation de l'atmosphère croisant l'équateur à 13h45 (Levelt *et al.*, 2006).

L'Aerosol Index (AI) est obtenu à partir des mesures de l'intensité du rayonnement solaire à deux longueurs d'onde dans l'ultra-violet des sondes TOMS et OMI. La mesure de l'AI est basée sur le contraste spectral dans l'UV entre l'intensité du rayonnement solaire effectivement mesurée avec la présence d'aérosols et l'intensité calculée en considérant une atmosphère purement moléculaire (i.e. sans les aérosols). L'AI-TOMS a été défini la première fois à partir des longueurs d'onde 340 et 380 nm (Torres *et al.*, 1998) puis modifié pour la sonde OMI en utilisant les longueurs d'onde 354 et 388 nm (Torres *et al.*, 2007), par la formule :

$$AI = -100 \log_{10}(I^{354}_{obs}/I^{354}_{cal}) \quad (2.i)$$

Avec I^{354}_{obs} l'intensité du rayonnement solaire observé au sommet de l'atmosphère et I^{354}_{cal} l'intensité estimée à partir de I^{388}_{obs} .

L'AI-TOMS est le produit historique pour l'étude des poussières désertiques (Chiapello *et al.*, 1999; Prospero *et al.*, 2002; Washington *et al.*, 2003; Engelstaedter et Washington, 2007b). Il a déjà été utilisé pour l'étude de l'impact des aérosols sur la santé (Prospero *et al.*, 2008), et surtout pour l'étude des épidémies de méningites (Molesworth *et al.*, 2003; Thomson *et al.*, 2006). A partir de l'AI, des études ont montré les tendances décennales du transport de poussières au dessus de l'Atlantique nord (Chiapello *et al.*, 1999, 2005). Malgré la sensibilité de l'AI à l'altitude de la couche d'aérosols (Torres *et al.*, 1998; Ginoux et Torres, 2003), les capacités de l'AI pour détecter les événements de poussières sahariens ont été démontrées par comparaison avec des mesures de PM (Chiapello *et al.*, 1999). De plus, du point de vue de l'épidémiologie, l'AI permet de couvrir l'épidémie de 1997, correspondant au maximum du cycle décennal des vagues épidémiques (cf. chapitre 1, section I-2.2.2).

Mais TOMS et OMI ont connu des problèmes instrumentaux : pour OMI, des anomalies (nommées "row anomalies") sont décrites par la NASA depuis 2009 ; pour TOMS, une dérive de l'instrument a été constatée à partir de 2002 (McPeters *et al.*, 2007). Dès lors, trois périodes peuvent être définies à partir d'années complètes : 1997-2001 (TOMS), 2002-2004 (TOMS) et 2005-2008 (OMI). Il est important de vérifier que ces trois périodes sont comparables, avant de les homogénéiser pour obtenir une série d'AI sur la période 1997-2008. Comme le premier trimestre de l'année est associé aux concentrations de poussières les plus importantes au sol (Marticorena *et al.*, 2010), les valeurs moyennes des pixels sont présentées sur les trois périodes d'acquisition de l'AI durant ce trimestre (Figure II.4), c'est-à-dire :

- TOMS avant la dérive instrumentale de 1997 à 2001 (AI-TOMSAv),
- TOMS après la dérive instrumentale de 2002 à 2004 (AI-TOMSAp),
- OMI de 2005 à 2008 (AI-OMI).

Les structures spatiales des trois périodes d'acquisition de l'AI présentent à la fois des caractéristiques similaires et des différences importantes au premier trimestre. De la frontière entre le Niger et le Tchad au golfe de Guinée, il y a une zone de fort AI. On remarque pour les deux périodes TOMS que cette zone semble s'élargir à mesure qu'elle progresse vers le sud alors que pour la période OMI, l'AI semble être maximal dans une zone plus restreinte. La comparaison de ces cartes suppose bien sûr que les moyennes trimestrielles des pixels forment des structures qui se reproduisent chaque année. Mais il faudrait calculer ces moyennes sur des périodes plus longues d'au moins une décennie pour obtenir une climatologie de l'AI. Avant d'utiliser l'AI, il faut s'assurer que les structures à large

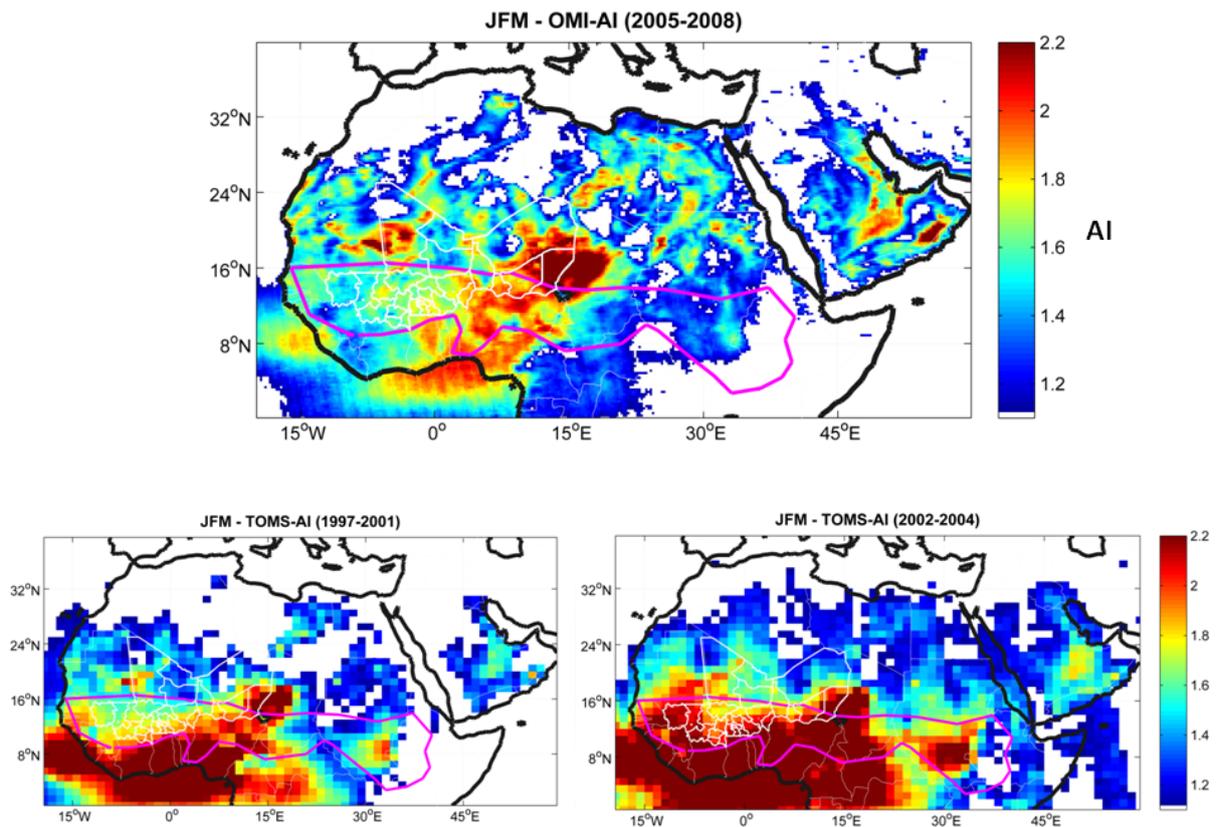


Figure II.4. – Moyenne du premier trimestre de l'AI obtenu par le capteur OMI sur la période 2005 à 2008 (en haut) et TOMS (en bas) sur la période 1997 à 2001 (à gauche) et sur la période 2002 à 2004 (à droite), le minimum de l'échelle de couleur est à 0,5 ; la ceinture des méningites est représentée en violet et les régions des trois pays en blanc.

échelle sont comparables pour les trois périodes (section II-1.2.2) car l'examen de ces cartes suggère qu'il faut homogénéiser ces trois périodes (cf. chapitre 3, section III-2.3.1).

1.2. L'analyse des variables atmosphériques en Afrique dans la ceinture des méningites

Pour résumer l'évolution spatiotemporelle des variables géophysiques sélectionnées, une Analyse en Composantes Principales normées (ACP) est présentée dans cette partie (cf. Annexe outils statistiques). Dans un premier temps, les quatre variables ERA-Interim sont comparées et, dans un deuxième temps, ce sont les trois périodes de l'AI qui sont décrites.

1.2.1. Les caractéristiques du climat

Le but de l'ACP est de transformer un jeu de variables qui covarient en un jeu de nouvelles variables (étant des combinaisons linéaires des variables initiales) indépendantes qui sont les modes de variabilité du jeu de données d'entrée. Chaque point de grille (ou pixel) est considéré comme une variable temporelle, l'ACP réduit alors le nombre de pixels en quelques zones ayant un comportement spatial similaire (Yarnal, 1993; Wilks, 1995). Le but de l'ACP présentée dans cette partie est d'extraire les modes de variation à partir des champs des quatre variables ERA-Interim sélectionnées. Le premier mode est l'évolution principale sur le domaine choisi. Les modes suivants, synthétisant de moins en moins d'informations, sont associés à des structures plus complexes.

L'ACP est réalisée dans une fenêtre plus large que notre domaine (Niger, Mali et Burkina Faso) afin de distinguer les caractéristiques de large échelle communes à toute la ceinture des méningites. Le domaine spatial d'étude est le nord de l'Afrique, de l'équateur à la mer Méditerranée et du Sénégal à la corne de l'Afrique (Equateur - 40° nord; 20° ouest - 40° est). Cette analyse est réalisée sur la période 1989-2008⁵. Les modes de variabilité sont les axes factoriels, nommés F_α .

La première étape de l'ACP est la création de la matrice d'entrée (qui est un tableau de données) composée de $n = 23 \times 40 = 920$ variables (i.e. le nombre de points de grille compris dans la fenêtre) et de $k = 2 \times 19 = 38$ observations (i.e. le nombre de semaines sur la période 1989-2008). La deuxième étape a pour but de centrer et réduire cette matrice, en soustrayant la moyenne et en divisant par l'écart-type de la matrice d'entrée.

Comme les variables de la matrice d'entrée sont des points de grille qui sont géo-référencés, il est possible de calculer le coefficient de corrélation entre chaque point de grille et F_α pour créer une carte de corrélations. L'observation de ces cartes ainsi que des séries temporelles des F_α , permet l'interprétation des axes factoriels. C'est sur cette base que (Sultan *et al.*, 2005) ont défini la notion de maximum de l'hiver à partir du 3^{ème} axe factoriel (F_3) du module du vent, qui a été interprétée comme le déplacement du FIT (cf. chapitre 1, section I-2.1.1).

Tout d'abord, les trois premiers axes factoriels de l'ACP appliquée au module du vent ERA-Interim ont été analysés et comparés avec les résultats obtenus sur module du vent NCEP/NCAR par (Sultan *et al.*, 2005). Ensuite, la même méthode est appliquée aux autres variables (l'angle du vent, l'humidité et la température) afin de voir s'il est possible de retrouver un mode de variabilité correspondant à

5. L'année 2008 a été utilisée dans Deroubaix et al., 2013 mais les données des districts s'arrêtent en 2007

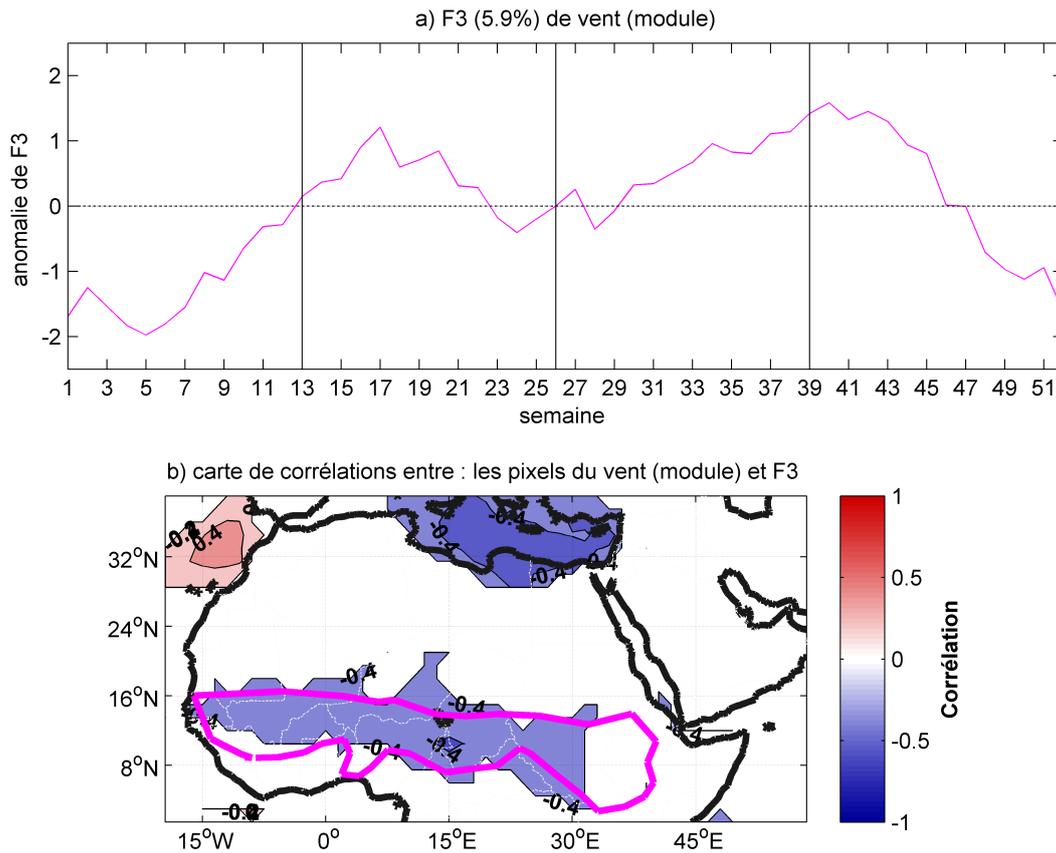


Figure II.5. – a) Anomalies du cycle annuel moyen du 3^{ème} axe factoriel (F_3) du module du vent b) Carte de corrélations entre les séries temporelles de chaque pixel du module du vent et le 3^{ème} axe factoriel sur la période 1989-2008 (les corrélations supérieures à un seuil de significativité de 1% sont représentées) ; la ceinture des méningites est représentée en violet sur la carte (OMS).

la ceinture des méningites. Nous présentons ici dans l'ordre : l'axe factoriel qui décrit le mieux le module du vent dans la ceinture (Figure II.5), puis l'axe factoriel qui décrit le mieux l'angle du vent (Figure II.6), l'humidité (Figure II.7) et la température (Figure II.8).

■ Une composante spécifique pour le module du vent dans la ceinture des méningites

L'axe factoriel qui décrit le mieux le module du vent dans la ceinture des méningites parmi les trois premières axes, est 3^{ème} axe factoriel (Figure II.5). Le cycle annuel moyen du 3^{ème} axe factoriel (F_3) du module du vent résume 5,9% de la variance totale de la matrice d'entrée en comparaison le premier axe résume 20,7%. Sur la carte de corrélations entre les séries temporelles des pixels du module du vent et la série temporelles de F_3 , on peut remarquer qu'une zone correspond visuellement bien à la ceinture des méningites. La semaine du minimum de F_3 est la 5^{ème} semaine de l'année (début février). C'est la période de la position la plus au sud du FIT lorsque le vent de d'Harmattan est le plus intense au Sahel (Moron, 1994). En considérant uniquement les deux premiers trimestres, le maximum de F_3 a lieu à la 17^{ème} semaine lorsque le vent est le plus faible dans la ceinture, cela correspond à la date de "pré-onset" de la mousson (Sultan *et al.*, 2004).

Le jeu de données ERA-Interim permet donc de retrouver le maximum de l'hiver comme cela a été

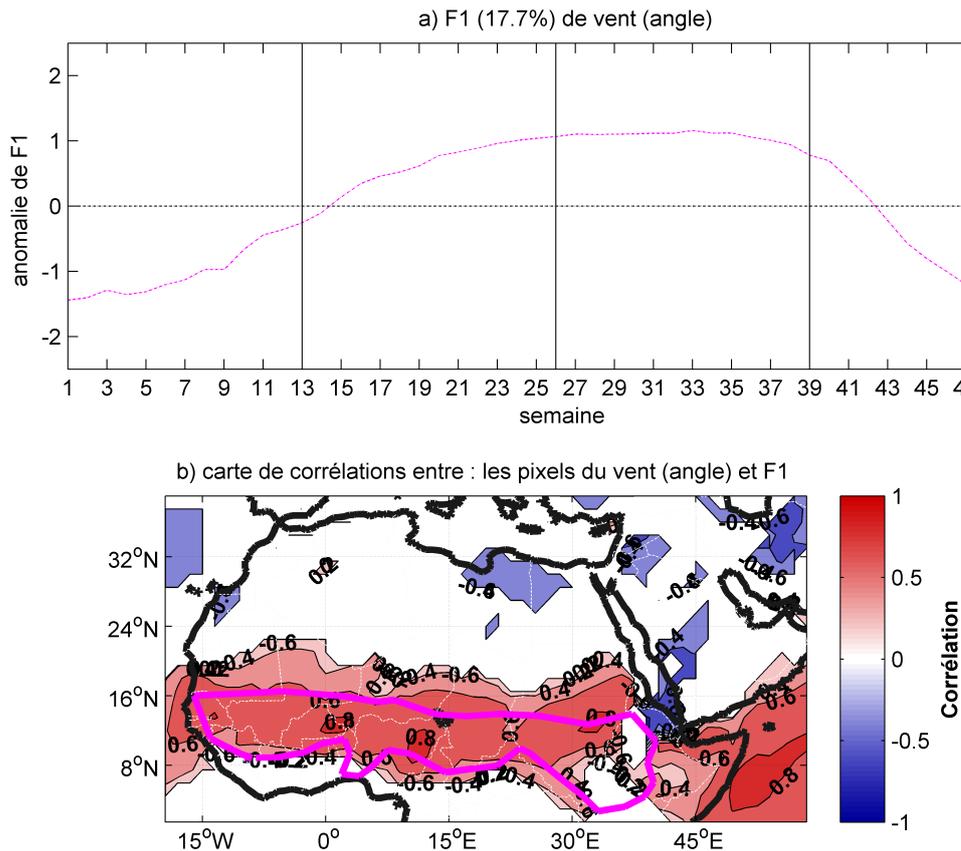


Figure II.6. – a) Anomalies du cycle annuel moyen du 1^{er} axe factoriel (F_1) de l'angle du vent ; b) Carte de corrélations entre les séries temporelles de chaque pixel de l'angle du vent et le 1^{er} axe factoriel sur la période 1989-2008 (les corrélations supérieures à un seuil de significativité de 1% sont représentées) ; la ceinture des méningites est représentée en violet sur la carte.

réalisé à partir des données NCEP/NCAR par Sultan *et al.* (2005). L'axe factoriel F_3 du module du vent montre que la ceinture des méningites est une unité cohérente pour le module du vent.

■ Une composante spécifique pour l'angle du vent dans la ceinture des méningites

Pour l'angle du vent, c'est le premier axe factoriel (F_1) qui a été sélectionné (Figure II.6) et il porte 17,7% de la variance totale de la matrice d'entrée. On peut noter qu'il y a une période d'anomalies négatives au début et à la fin de la saison sèche puis une période d'anomalies positives (de la 14^{ème} semaine à la 42^{ème} semaine). Les anomalies positives sont donc associées à un vent provenant du secteur sud et inversement pour les anomalies négatives. Les corrélations significatives de la carte de corrélations entre cet axe factoriel et l'angle du vent sont en accord avec l'aire délimitée par la ceinture des méningites mais au nord l'aire est plus étendue.

■ Une composante spécifique pour l'humidité relative dans la ceinture des méningites

Comme pour l'angle du vent, c'est le premier axe factoriel (F_1) qui a été sélectionné (Figure II.7). Ce premier mode de l'ACP de l'humidité relative explique presque la moitié (47,6%) de la variance totale de la matrice d'entrée. On peut noter qu'il y a une période d'anomalies positives au début et

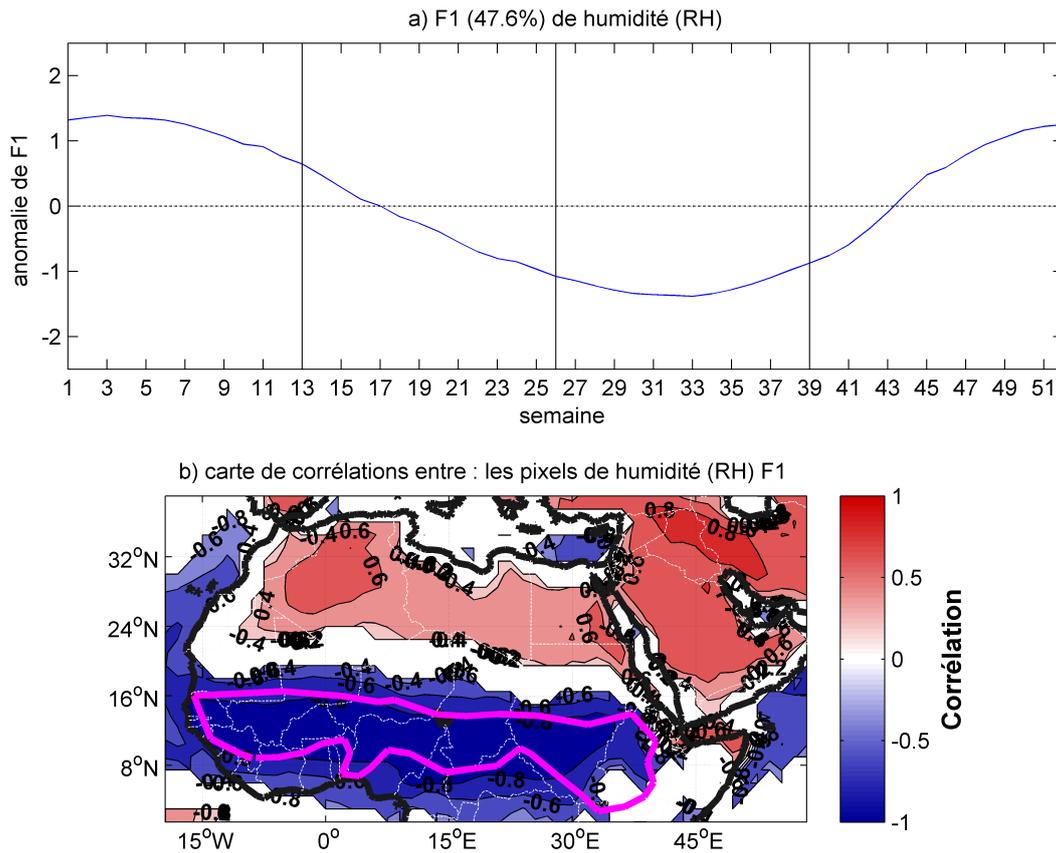


Figure II.7. – a) Anomalies du cycle annuel moyen du 1^{er} axe factoriel (F_1) de l'humidité relative (RH) ; b) Carte de corrélations entre les séries temporelles de chaque pixel de l'humidité relative et le 1^{er} axe factoriel sur la période 1989-2008 (les corrélations supérieures à un seuil de significativité de 1% sont représentées) ; la ceinture des méningites est représentée en violet sur la carte.

à la fin de la saison sèche puis une période d'anomalies négatives (de la 16^{ème} semaine à la 43^{ème} semaine). Les anomalies négatives ont lieu pendant la période sèche dans la ceinture, et inversement les anomalies positives pendant la période humide. Les corrélations significatives de la carte de corrélations montrent une opposition entre la partie nord du domaine positivement corrélée avec F_1 et la partie sud qui est négativement corrélée. Le centre de la partie sud (en bleu foncé) est mieux corrélé à F_1 et cette zone correspond à la ceinture des méningites.

■ Une composante spécifique pour la température dans la ceinture des méningites

Comme pour les autres variables, il y a un axe factoriel de la température qui est associé spatialement à la ceinture (Figure II.8). Il s'agit du 2^{ème} axe factoriel (F_2) résumant 6% de la variance de la matrice d'entrée. On peut noter qu'il y a une période courte d'anomalies positives de la fin de la saison sèche au début de la saison humide (de la 7^{ème} semaine à la 25^{ème} semaine) et le maximum a lieu à la 15^{ème} semaine. Les anomalies négatives ont lieu pendant le reste de l'année dans la ceinture des méningites. Durant les trois derniers mois de l'année, on constate une situation similaire au deuxième trimestre mais les anomalies de la température sont proches de zéro. Les corrélations significatives observées sur la carte de corrélations montrent que la limite sud de la ceinture correspond bien à cet axe factoriel. Le sud du Niger est le plus corrélé avec cet axe factoriel mais on remarque aussi

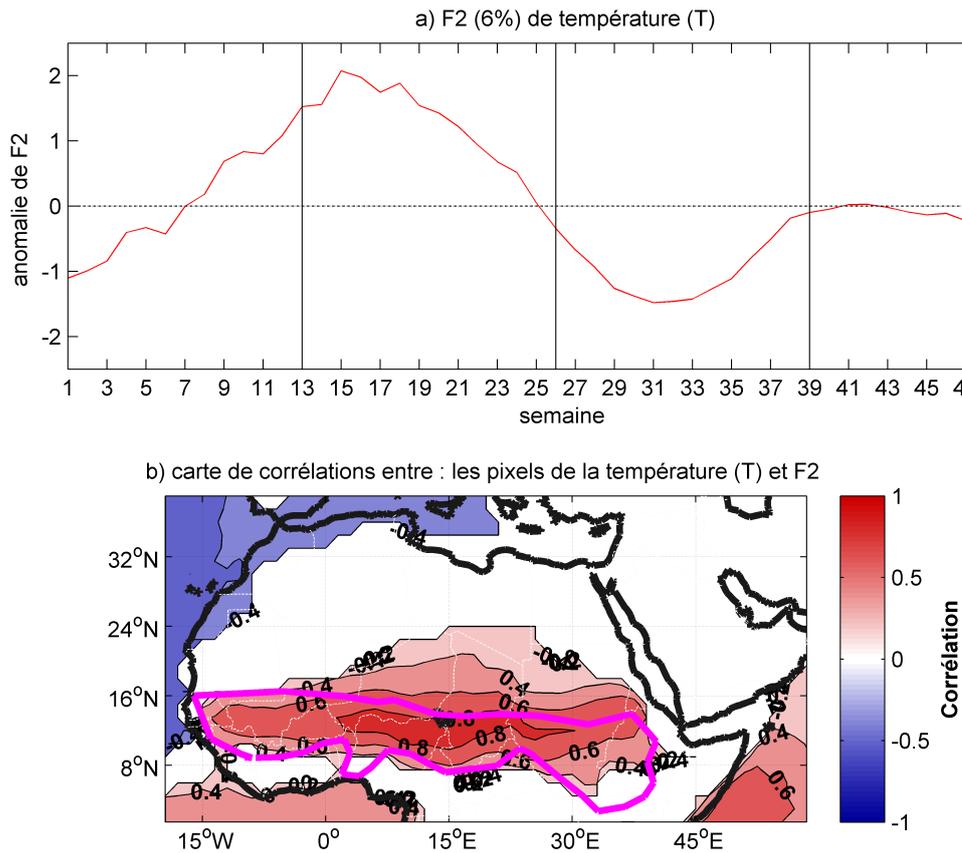


Figure II.8. – Anomalies du cycle annuel moyen du 2^{ème} axe factoriel (F₂) de la température ; b) Carte de corrélations entre les séries temporelles de chaque pixel de la température et le 2^{ème} axe factoriel sur la période 1989-2008 (les corrélations supérieures à un seuil de significativité de 1% sont représentées) ; la ceinture des méningites est représentée en violet sur la carte.

que l'aire associée à F₂ s'étend au nord du Niger et du Tchad, au delà de la limite de la ceinture des méningites.

Enfin, la même analyse a été faite en prenant des moyennes journalières des pixels, c'est-à-dire $365 \times 19 = 6935$ observations. Les résultats au pas de temps hebdomadaire présentés ci-dessus sont similaires aux résultats obtenus au pas de temps journalier, ce qui montre que ce pas de temps ne change pas les structures spatiales et la variance des axes factoriels. En conséquence, le pas de temps hebdomadaire semble suffisant pour décrire l'évolution des variables ERA-Interim choisies par rapport au pas de temps journalier.

■ Conclusions de l'analyse des composantes principales des champs ERA-Interim associés à la ceinture des méningites

L'étude des structures spatiales retrouvées par les axes factoriels des données ERA-Interim, montre que la ceinture des méningites est une unité climatique cohérente car il y a un mode de variabilité propre aux quatre variables correspondant à la ceinture. Cette analyse a permis de décrire le climat dans cette ceinture qui se distingue des régions sahariennes plus au nord, ou des régions tropicales plus au sud. Le premier axe factoriel de l'angle du vent et de l'humidité relative a été sélectionné, pour

la température, c'est le deuxième axe factoriel qui a été sélectionné et pour le module du vent, c'est le troisième ; l'évolution de ces deux variables (température et module du vent) est aussi plus complexe avec deux périodes d'augmentation. Des périodes trimestrielles semblent appropriées pour décrire l'évolution du climat dans la ceinture des méningites et la cohérence climatiques des trimestres peut alors être résumée ainsi, pendant :

- le 1^{er} trimestre, la force du vent est maximale et le vent vient du secteur nord. Il y a un changement d'angle du vent à partir de la 1^{ère} semaine de l'année qui correspond aussi au minimum de température. Le vent diminue à partir de la 5^{ème} semaine (début février) quand le troisième axe factoriel du module vent augmente (interprété comme décrivant la zone de vent faible, le FIT) et la température augmente (les anomalies deviennent positives).
- le 2^{ème} trimestre, semble connaître successivement le maximum du deuxième factoriel de la température durant la 15^{ème} semaine (mi-avril), puis le minimum de vent à la 17^{ème} semaine (fin avril). En effet, la fortes températures coïncide avec une période d'anomalies positives du module du vent. De plus, Les anomalies de l'angle du vent et de l'humidité relative changent de signe au début du 2^{ème} trimestre.
- le 3^{ème} trimestre, le vent du secteur sud augmente apportant l'humidité qui est maximale à la 33^{ème} semaine.
- le 4^{ème} trimestre, la situation est semblable à celle constatée au 2^{ème} trimestre mais avec une température moindre. L'humidité diminue car les anomalies deviennent négatives. Le vent est le plus faible quand le troisième axe factoriel du module vent est maximal.

1.2.2. Les champs de l'Aerosol Index

La même méthode qu'au paragraphe précédent a été appliquée aux données de l'AI sur les trois périodes et nous avons sélectionné le deuxième axe factoriel de l'AI. F_2 définit une zone associée à la ceinture des méningites comme dans la section précédente avec les variables ERA-Interim. L'examen des cartes de corrélations de F_2 avec les pixels de l'AI montre des structures spatiales similaires pour les trois périodes (Figure II.9, Figure II.10 et Figure II.11) et la part de variance est proche (avec : 5,7% pour l'AI-TOMSav ; 5,9% pour l'AI-TOMSap ; 8,2% pour l'AI-OMI). Le détail de l'analyse est présenté ci-dessous.

Les anomalies du cycle annuel moyen du deuxième axe factoriel de l'AI-TOMSav sont positives entre la 49^{ème} semaine et la 28^{ème} semaine (Figure II.9).

Les anomalies du cycle annuel moyen du deuxième axe factoriel de l'AI-TOMSap sont positives entre la 1^{ère} semaine et la 23^{ème} semaine (Figure II.10). Les ressemblances de l'AI-TOMS entre ces deux périodes montrent qu'il est possible d'utiliser l'AI-TOMS après le problème instrumental. En effet, la structure spatiale et le cycle annuel sont proches pour le deuxième axe factoriel. Enfin, les anomalies du cycle annuel moyen du deuxième axe factoriel de l'AI-OMI sont positives entre la 51^{ème} semaine et la 25^{ème} semaine (Figure II.11).

En conclusion, les structures spatiales de l'axe F_2 de l'AI sont semblables pour les deux générations de capteurs et les trois périodes (TOMS 1997-2001 ; TOMS 2002-2004 ; OMI 2005-2008). On peut remarquer sur les trois cartes précédentes que la limite nord de la ceinture correspond à la structure des corrélations de l'AI avec F_2 . De plus, les cycles annuels moyens sont cohérents puisque, sur les trois cycles annuels précédents, la phase d'anomalies positives de l'AI a lieu durant tout le premier trimestre et une grande partie du deuxième trimestre, et ceci même après la dégradation du signal l'AI-TOMS.

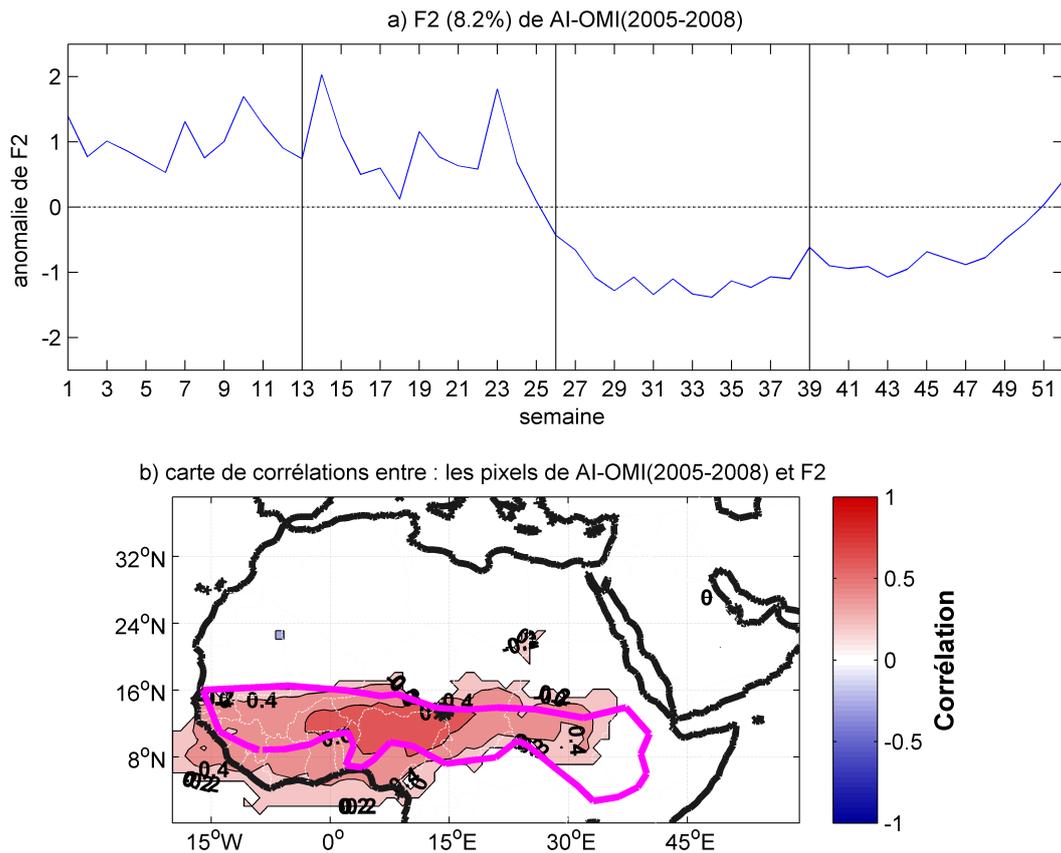


Figure II.9. – Anomalies du cycle annuel moyen du 2^{ème} axe factoriel (F_2) de l'AI-TOMS (période 1997-2001) ; b) Carte de corrélations entre les séries temporelles de chaque pixel de l'AI-TOMS et le 2^{ème} axe factoriel (les corrélations supérieures à un seuil de significativité de 1% sont représentées) ; la ceinture des méningites est représentée en violet sur la carte.

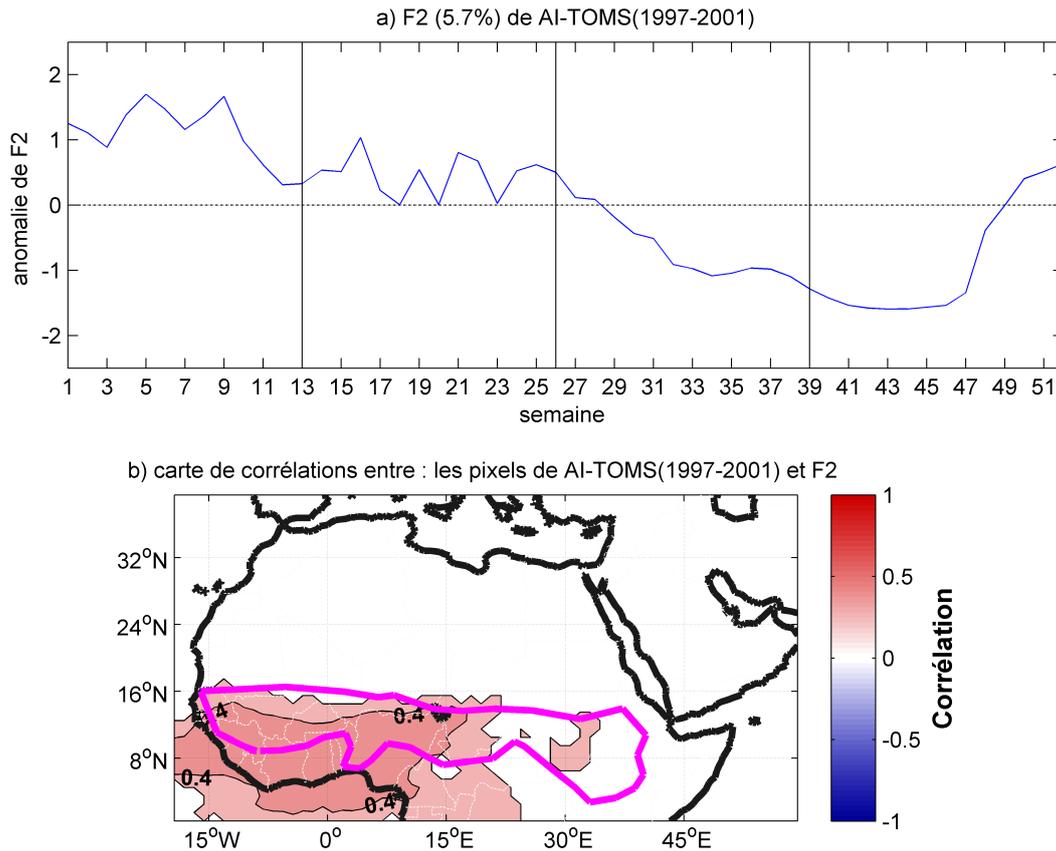


Figure II.10. – Anomalies du cycle annuel moyen du 2^{ème} axe factoriel (F_2) de l'AI-TOMS (période 2002-2004) ; b) Carte de corrélations entre les séries temporelles de chaque pixel de l'AI-TOMS et le 2^{ème} axe factoriel (les corrélations supérieures à un seuil de significativité de 1% sont représentées) ; la ceinture des méningites est représentée en violet sur la carte.

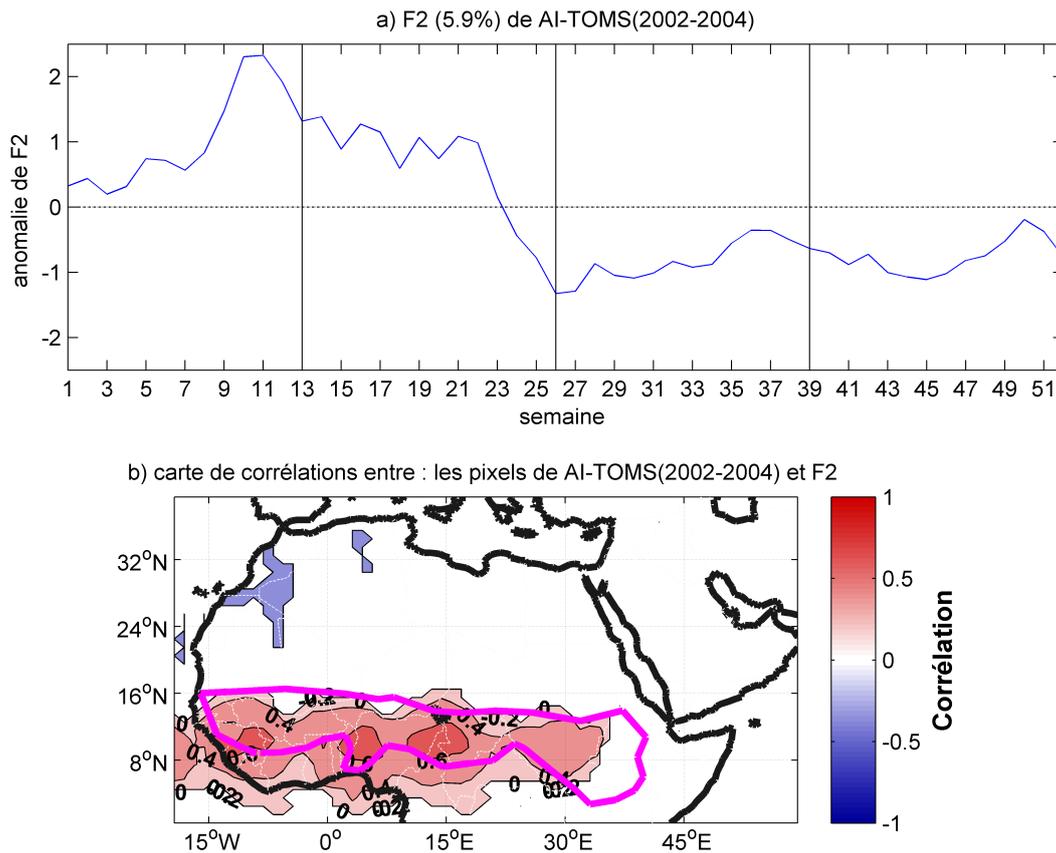


Figure II.11. – Anomalies du cycle annuel moyen du 2^{ème} axe factoriel (F₂) de l'AI-OMI (période 2005-2008) ; b) Carte de corrélations entre les séries temporelles de chaque pixel de l'AI-OMI et le 2^{ème} axe factoriel (les corrélations supérieures à un seuil de significativité de 1% sont représentées) ; la ceinture des méningites est représentée en violet sur la carte.

Cependant la représentativité de la mesure de l'AI pour renseigner la concentration de poussières en surface, et donc respirée par la population, est incertaine puisque seules des mesures faites au niveau du sol constituent la "vérité terrain".

1.3. Les stations de mesures des aérosols désertiques

1.3.1. Les instruments de références

Dans les trois pays de notre étude, nous avons utilisé les données des quatre stations de mesures d'épaisseurs optiques en aérosol (sélectionnées pour leurs profondeurs temporelles et le recouvrement avec la période de l'AI-OMI) : Agoufou au Mali, Banizoumbou au Niger, Cinzana au Mali, et Ouagadougou au Burkina Faso (Figure II.12). La période 2005 à 2008 est couverte par toutes les stations à l'exception de Ouagadougou. De plus, aux stations de Banizoumbou et de Cinzana, les mesures sont complétées de mesures de concentrations de poussières depuis 2006.

Le réseau AERONET comprend plus de 500 stations à travers le monde (Holben *et al.*, 1998), et une équipe française (du Laboratoire d'Optique Atmosphérique) gère les photomètres de la composante AERONET/PHOTON en Afrique de l'Ouest. Les AOT (et les coefficients d'Angström associés) sont mesurées par le photomètre (CIMEL) à différentes longueurs d'onde (440, 675, 870, 940 et 1020 nm) au pas de pas de temps de 15 minutes (Holben *et al.*, 1998).

Le CIMEL est un photomètre permettant de calculer les AOT à différentes longueurs d'onde ainsi que les coefficients d'Angström. L'atténuation du rayonnement solaire du sommet de l'atmosphère à la surface est calculée selon la loi de Langley-Bouguer. On suppose connue la valeur de l'éclairement solaire au sommet de l'atmosphère. Puis, une correction est appliquée pour prendre en compte la variation de la distance parcourue par la lumière dans l'atmosphère en fonction de l'heure de la journée (car le parcours de la lumière dans l'atmosphère est minimal quand le soleil est au zénith).

L'épaisseur optique en aérosols est un indicateur de la concentration de poussières intégrée sur la colonne mais ne reflète pas toujours la concentration de poussières au sol. Les mesures de concentrations de poussières sont plus difficiles à mettre en œuvre car la maintenance des appareils engendre des coûts élevés. Dans le cadre de la programme AMMA (Redelsperger *et al.*, 2006), trois stations ont été implantées dans une zone de transport d'aérosols sahariens à environ 13° de latitude nord. Les trois sites choisis sont d'ouest en est : M'Bour au Sénégal (14,39° nord ; 16,96° ouest), Cinzana au Mali (13,28° nord ; 5,93° ouest), et Banizoumbou au Niger (13,54° nord ; 2,66° est). Ces trois stations font partie du "Sahelian Dust Transect" (SDT). La concentration en aérosols est mesurée par un instrument autonome, le TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance ; de marque Thermo Scientific) qui mesure la matière particulaire en suspension dans l'air ; d'où l'acronyme anglais PM pour : "Particulate Matter". Une tête de prélèvement est connectée au TEOM pour sélectionner les particules inférieures à un diamètre précis. Dans les stations SDT, la tête de prélèvement permet la collecte des particules d'un diamètre inférieur à 10 μm et le pas de temps d'échantillonnage a été fixé à 5 minutes.

La méthode de mesure de la concentration des matières en suspension dans l'air est basée sur la pesée des particules échantillonnées à l'aide d'une microbalance. Celle-ci est constituée d'un élément oscillant à sa fréquence propre. L'air prélevé est filtré et la masse déposée sur le filtre engendre une diminution de la fréquence d'oscillation de la microbalance. Comme la diminution de la fréquence est liée à la masse déposée, il est possible en connaissant le volume d'air prélevé, de déduire la

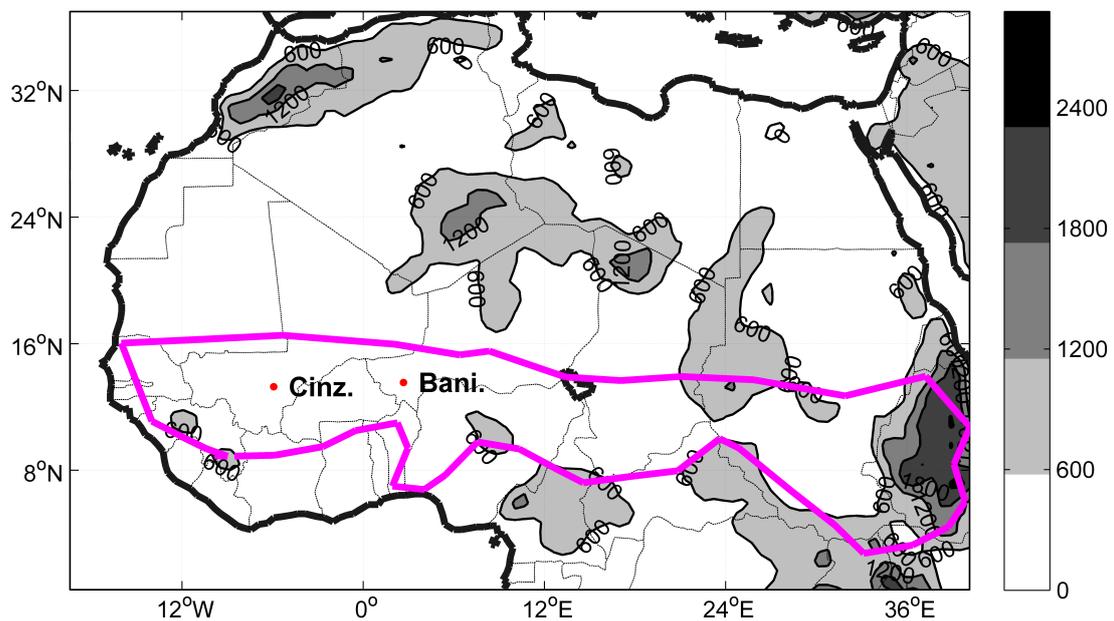


Figure II.12. – Carte topographique de l’Afrique au nord de l’équateur avec les stations AERONET utilisées (Point rouge) et les stations du SDT utilisées (carré rouge); Agou. pour Agoufou; Bani. pour Banizoumbou; Cinz. pour Cinzana; Ouag. pour Ouagadougou; la ceinture des méningites est représentée en violet.

concentration de poussières dans l'air. Pour maintenir un niveau de confiance constant dans la mesure, le filtre est changé et la tête de prélèvement est nettoyée plusieurs fois par mois (car les fortes concentrations saturent rapidement le filtre). De plus, la mesure s'effectue à 50°C, pour éviter que la mesure soit perturbée par des variations d'humidité. Cet instrument est largement utilisé dans le domaine de la surveillance de la qualité de l'air. Il permet de répondre aux objectifs des études d'impact des poussières désertiques sur la santé car une large gamme de concentration est mesurable du $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au g/m^3 (avec une limite de détection à $0,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une heure d'échantillonnage). Ces mesures constituent les seules données de concentration de poussières au niveau du sol, c'est-à-dire respirée par la population, disponibles au Sahel (acquises au pas de temps de 5 minutes).

1.3.2. Le cycle annuel des AOT et des PM aux stations sahéliennes

Tout d'abord, les séries temporelles hebdomadaires des AOT et des PM ont été calculées à Banizoumbou et à Cinzana. Si un cycle se vérifie chaque année, alors le cycle annuel moyen peut être calculé en moyennant sur plusieurs années. Cette partie a pour but de décrire au pas de temps hebdomadaire, les cycles annuels moyens des poussières observés par les instruments de références aux stations. Cependant la période de comparaison (2006-2008) ne permet pas d'obtenir une climatologie des AOT et des PM aux stations. La variabilité interannuelle (Figure II.13) permet d'évaluer la cohérence du cycle annuel moyen (Figure II.14) et les ressemblances entre les deux stations permettent l'interprétation des caractéristiques sahéliennes, c'est-à-dire des caractéristiques à large échelle.

La cohérence entre les séries de PM et d'AOT aux deux stations se remarque sur la Figure II.13. Sur l'ensemble des 3 années de mesures, le coefficient de corrélation de ces deux séries est de 0,64 à Cinzana et de 0,75 à Banizoumbou. De plus, en se focalisant sur le cœur de la saison sèche (janvier à mars), le coefficient de corrélation atteint 0,82 à Cinzana et 0,91 à Banizoumbou. La plupart des événements importants de poussières (les pics de PM sont les augmentations rapides sur la Figure II.13) coïncident avec ceux des AOT et ils semblent être partagés par les deux stations principalement pendant de la saison sèche. Il y a une différence très nette entre la saison sèche et la saison humide pour les PM qui semble moins claire pour les AOT. Ces résultats sont en accord avec les études précédentes (Holben *et al.*, 2001; Ogunjobi *et al.*, 2008).

Les cycles annuels moyens des AOT et des PM sont présentés sur la Figure II.14 au pas de temps hebdomadaire de manière standardisée (centrée-réduite) afin de comparer ces deux variables. Tout d'abord, on remarque que les six premiers mois correspondent à une période d'anomalies globalement positives pour les deux variables, et les six derniers mois de l'année à une période d'anomalies négatives à Banizoumbou comme à Cinzana. Les cycles annuels moyens de ces deux variables sont corrélés de manière similaire aux deux stations ($R = 0,58$ à Cinzana et $R = 0,66$ à Banizoumbou) et inférieurs aux coefficients obtenus sur toutes les semaines des trois ans de mesures. De plus, aux deux stations, le premier trimestre correspond à une période de concentration de poussières maximale en surface (le maximum a lieu à la semaine 10), et le deuxième trimestre correspond à une période d'épaisseurs optiques en aérosols maximales (la semaine de maximum est moins claire, cela semble avoir lieu entre les semaines 15 et 16). Cela suggère un changement du rapport PM/AOT, et donc un changement dans la répartition des poussières en altitude.

■ Conclusions de la première partie du chapitre 2

Afin de constituer la base de données, la température, l'humidité relative, l'angle du vent, le module du vent et l'Aerosol Index ont été sélectionnés (Figure II.15). La première partie du chapitre a permis

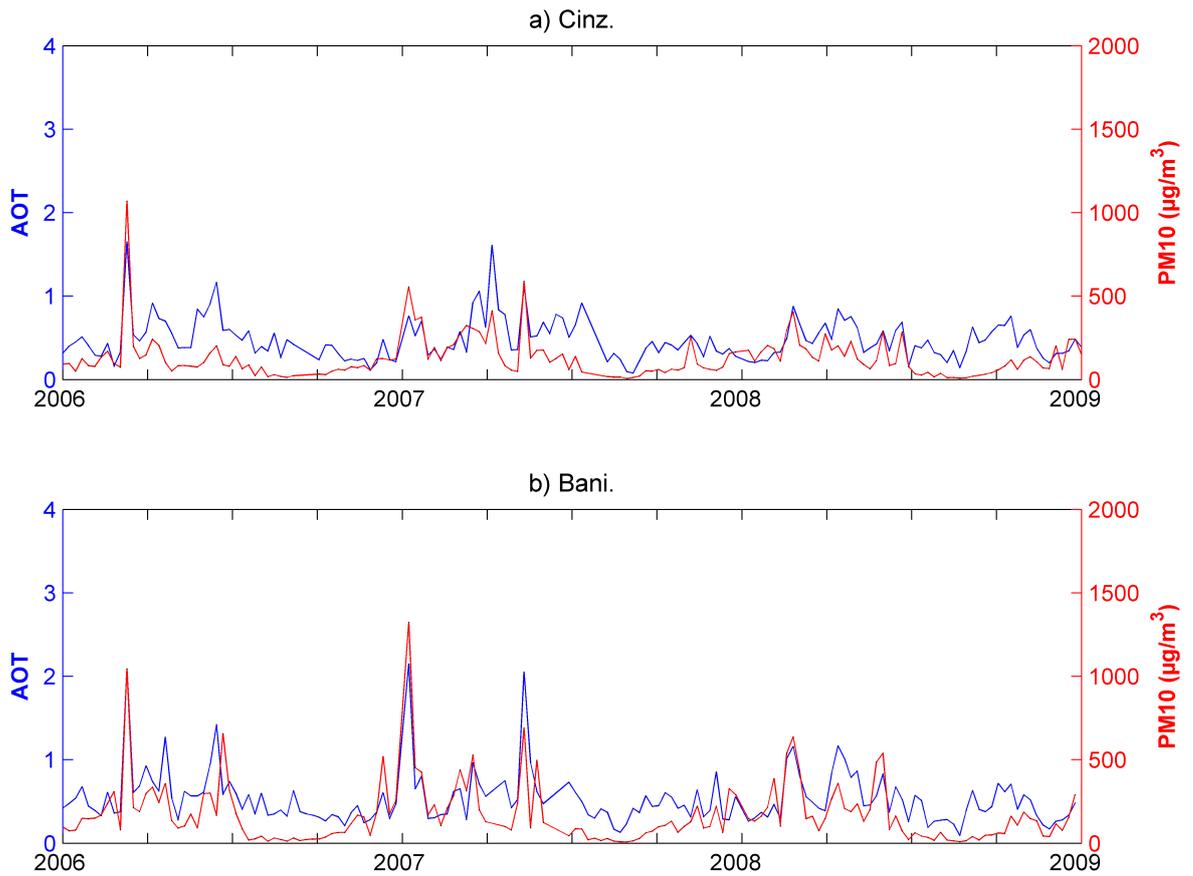


Figure II.13. – Séries temporelles des AOT (en bleu) et des PM (en rouge) sur la période 2006-2008 au pas de temps hebdomadaire à Cinzana (a) et à Banizoumbou (b).

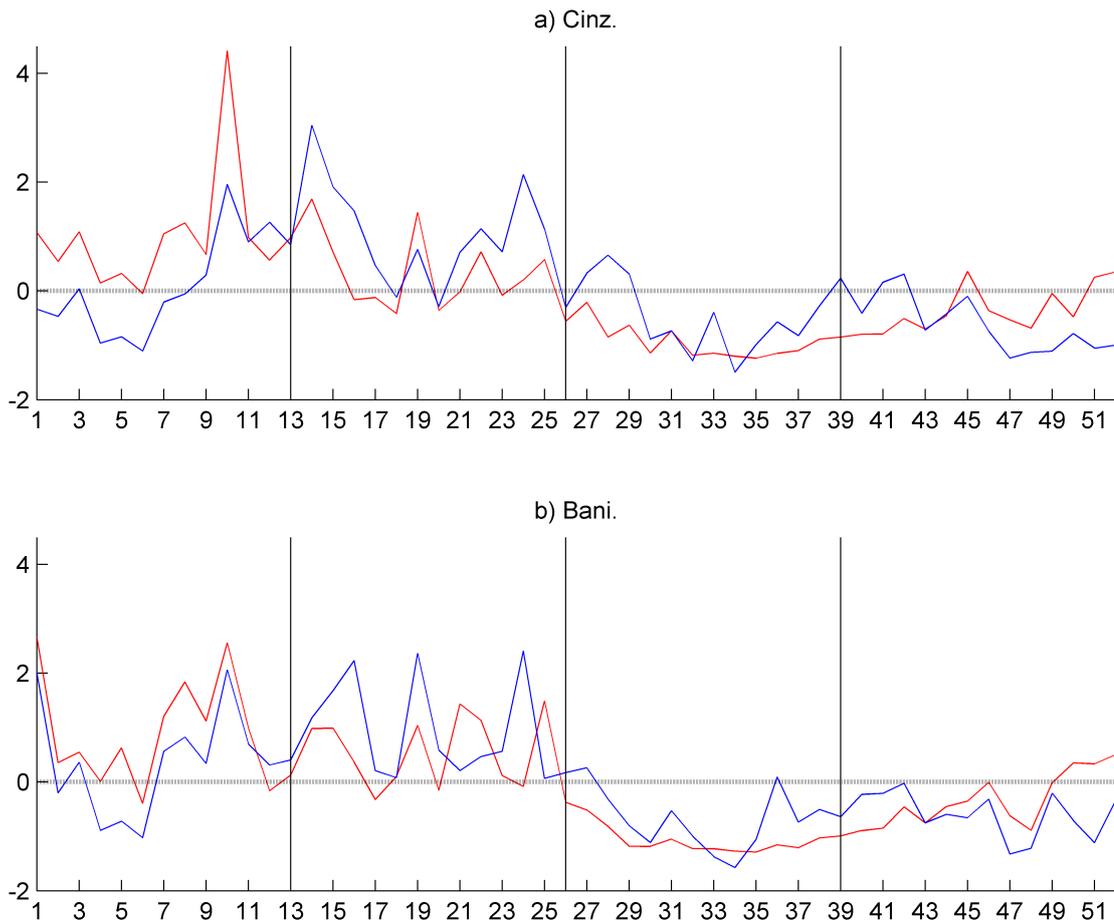


Figure II.14. – Cycles annuels moyens des AOT (en bleu) et des PM (en rouge) au pas de temps hebdomadaire sur la période 2006-2008 aux stations de (a) Cinzana et de (b) Banizoumbou.

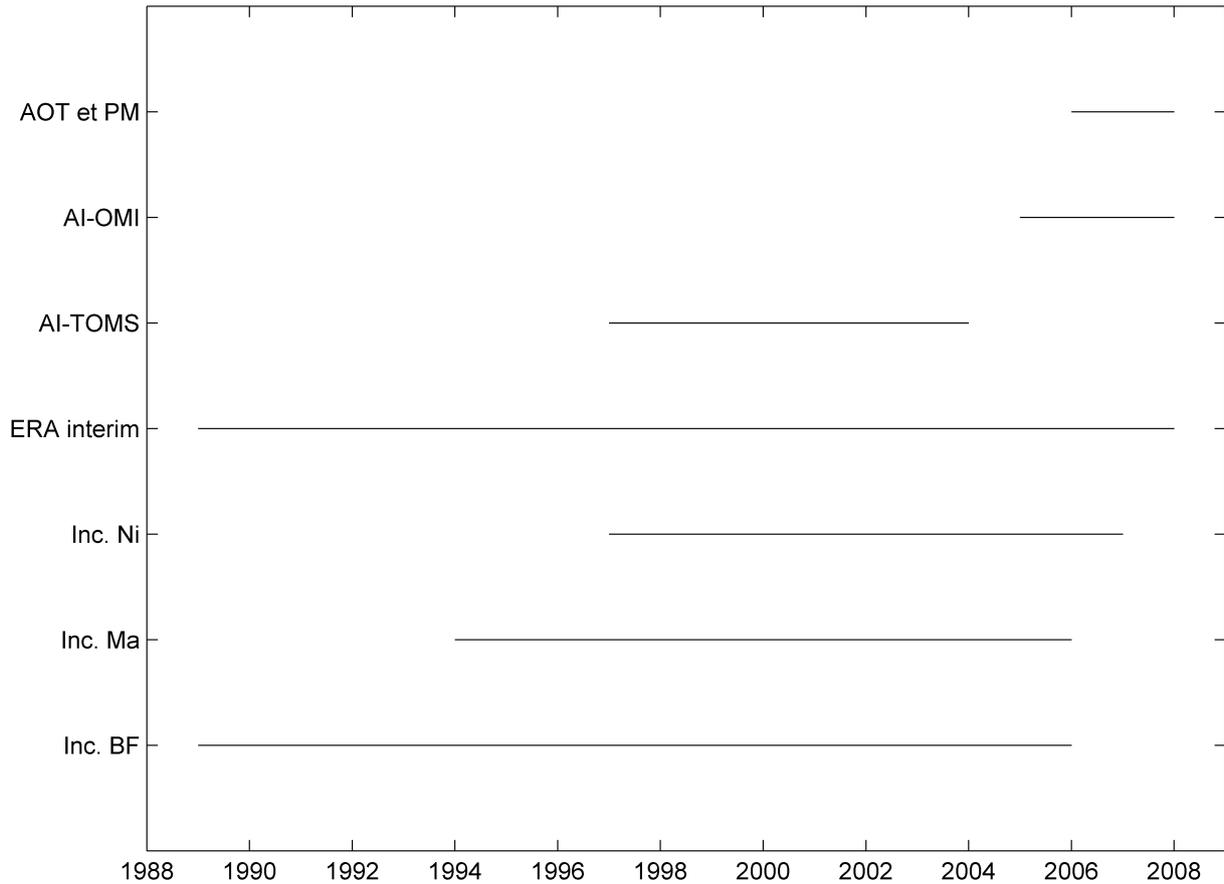


Figure II.15. – Périodes d'utilisation des données d'incidence des méningites au Burkina Faso (Inc. BF) au Mali (Inc. Ma) et au Niger (Inc. Ni) ; des données ERA-interim ; de l'AI (TOMS et OMI) ; d'AOT et de PM des stations de Banizoumbou et de Cinzana.

de démontrer la spécificité des conditions atmosphériques au sein de la ceinture des méningites. Les trois pays (Burkina Faso, Mali et Niger) où les données hebdomadaires d'incidences des méningites des districts sont disponibles, sont au cœur de ce climat particulier. Tout d'abord, le premier trimestre correspond au cœur de la saison sèche lorsque le vent d'Harmattan est le plus intense. Puis, au second trimestre, la transition vers la saison humide s'amorce par une période de fortes températures associée à des vents de surface faibles, suivie d'une période d'augmentation des vents en provenance du sud apportant de l'humidité. Ensuite, le troisième trimestre est le cœur de la saison humide lorsque l'humidité est maximale. Et le dernier trimestre de l'année est la période de transition de la saison humide vers la saison sèche, caractérisée par des vents faibles. La constitution d'une base de données (associant aux incidences des méningites des valeurs atmosphériques) est possible à l'échelle des districts et au pas de temps hebdomadaire. Avant la comparaison avec l'incidence des méningites, il paraît important de décrire la variabilité des paramètres atmosphériques à cette échelle spatio-temporelle ainsi que les spécificités des variables sélectionnées.

2. La constitution d'une base de données conjointe

Le but de cette deuxième partie est de constituer une base de données incluant climat, poussières et méningites à une échelle spatiotemporelle commune. Nous allons descendre vers des échelles spatiales inférieures en se focalisant sur la variabilité du climat d'une part, puis des poussières d'autre part à l'échelle du district au pas de temps hebdomadaire. Puis, les liens statistiques le climat et poussières seront analysés aux deux stations, là où la mesure des concentrations de poussières est disponible.

2.1. Les variables atmosphériques à l'échelle des districts

2.1.1. L'agrégation spatiale et la classification de l'AI-OMI

L'analyse des liens entre les épidémies de méningites et l'atmosphère constitue une problématique scientifique multi-factorielle et multi-scalaire car elle nécessite l'étude de plusieurs variables à plusieurs échelles. Le traitement des données consiste à associer aux valeurs hebdomadaires d'incidence de chaque district une valeur qui correspond aux cinq variables sélectionnées (section II-1.1) à trois échelles spatiales (district, région, pays).

■ Cas d'un événement intense d'aérosols désertiques

Un événement de poussières d'échelle continentale a été particulièrement étudié par la communauté scientifique. L'intensité maximale fut mesurée le 8 mars 2006 à Banizoumbou, et quelques jours plus tard à Cinzana (e.g. *Slingo et al.*, 2006; *Marticorena et al.*, 2010). A partir de l'exemple du 8 mars 2006, la variabilité des districts est illustrée par les moyennes hebdomadaires des pixels de l'AI-OMI en Afrique nord-équatoriale.

La comparaison visuelle des structures spatiales de l'AI des deux cartes de la Figure II.16 semble cohérente. En agrégeant l'AI-OMI à l'échelle des districts, le champ de l'AI-OMI associé à l'événement du 8 mars 2006 reste similaire car on retrouve les structures visibles sur la carte des pixels. De plus, certains districts contigus ont un écart de plus de 1 (en unité d'AI), ce qui montre la variabilité spatiale de l'AI associée aux moyennes hebdomadaires des districts. L'exemple du 8 mars 2006 montre que l'agrégation spatiale des districts permet de retrouver des structures spatiales cohérentes dans le cas d'un événement intense de poussières.

■ La classification spatiale de l'AI-OMI

Afin de décrire les structures spatiales cohérentes, une méthode de regroupement a été employée dans cette partie à partir des cycles annuels moyens de l'AI-OMI à l'échelle des districts. Une méthodologie similaire a été utilisée pour la comparaison avec les données épidémiologiques dans les trois pays étudiés (*Agier et al.*, 2013a).

Dans un espace à k dimensions, la distance euclidienne D de deux variables dont on dispose de k observations telles que X (X_1, X_2, \dots, X_k) et Y (Y_1, Y_2, \dots, Y_k), est définie par :

$$D(X, Y) = \sqrt{((X_1 - Y_1)^2 + \dots + (X_k - Y_k)^2)} \quad (2.ii)$$

Dans notre cas, X et Y sont deux districts (pour lesquels on dispose des observations d'AI) et k est le

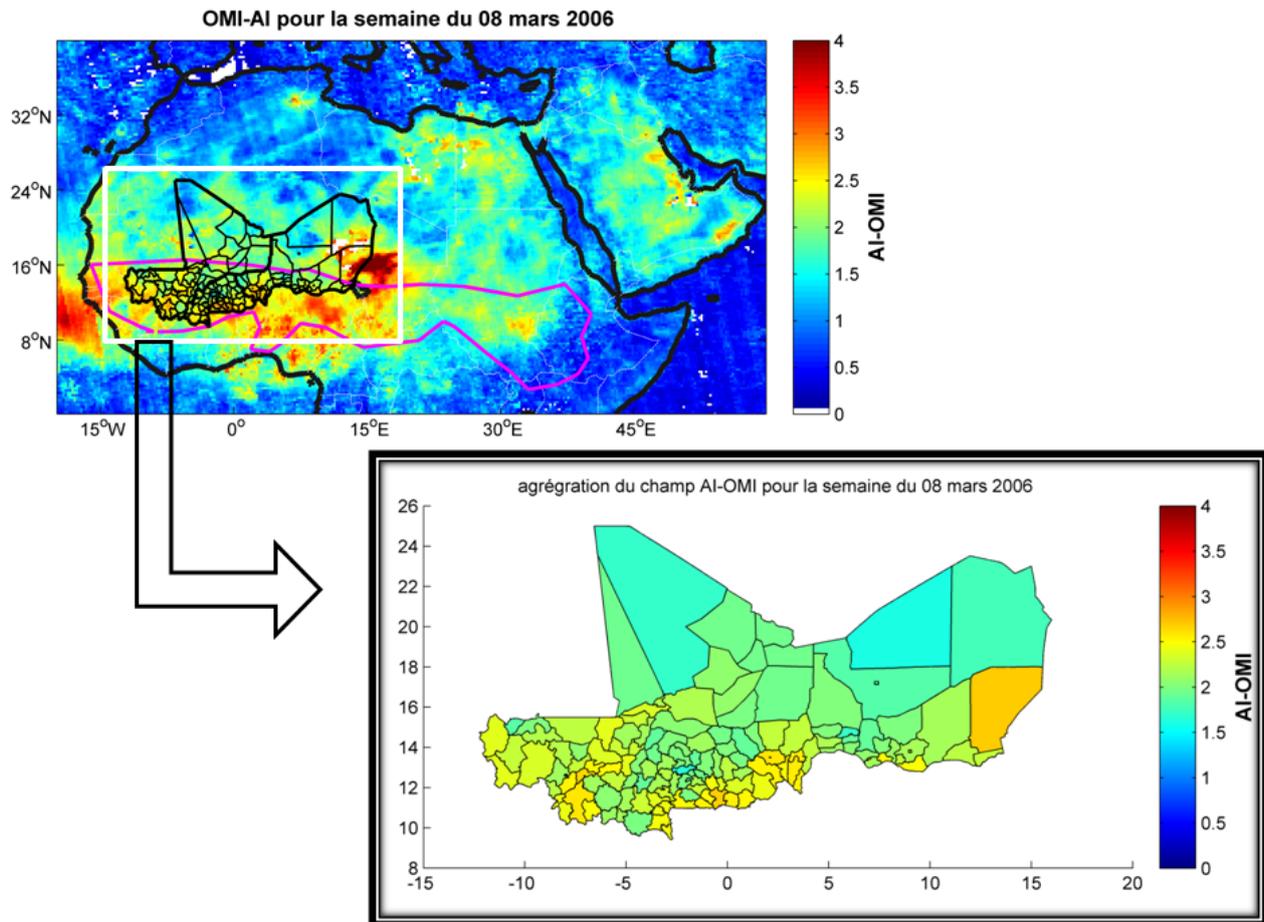


Figure II.16. – (en haut) Structure spatiale de l'AI-OMI en Afrique de l'Ouest pour la semaine de l'événement du 8 mars 2006 ; en blanc les limites des districts du Burkina Faso, Mali et Niger ; (en bas) Champ de l'AI-OMI agrégé sur les districts du Burkina Faso, Mali et du Niger pour la semaine de l'événement du 8 mars 2006.

nombre de pas de temps, soit $k = 52 \times (2008-2005) = 208$ observations.

La distance euclidienne d'un district avec chaque district, a été calculée pour toutes les variables après avoir été standardisées (c'est-à-dire à partir des variables centrées-normées). La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) permet de rassembler les variables proches (i.e. les districts proches) car les observations de ces variables sont proches (i.e. les valeurs X_1 et Y_1 , ..., X_2 et Y_2) selon un critère de ressemblance que l'on doit définir au préalable. Les observations "proches" sont regroupées d'autant plus rapidement que leur ressemblance est importante (i.e. la distance est faible). La classification est ascendante car elle part de chaque district individuellement, et elle est hiérarchique car elle produit des classes de plus en plus grandes.

Il faut définir le critère d'agrégation définissant la "ressemblance" entre les classes. La CAH permet de définir les classes (ou les groupes) de districts cohérents pour un nombre de classe, déterminé au moyen d'un dendrogramme. Le critère d'agrégation choisi (permettant un saut dans le dendrogramme), est le critère de Ward qui permet de minimiser la variance intra-groupe et de maximiser la variance inter-groupe (Lebart *et al.*, 1997).

Il est possible de calculer la distance euclidienne entre les districts sur toute la période de mesure, ou bien sur les 52 valeurs qui forment le cycle annuel moyen. En se basant sur les cycles annuels moyens, le poids des événements extrêmes est diminué par rapport aux caractéristiques reproductibles chaque année. L'analyse du dendrogramme a conduit le choix de la présentation des résultats à être basée sur quatre classes pour toutes les variables.

La structure spatiale des quatre classes de l'AI est principalement méridienne (Figure II.17). Les cycles annuels moyens durant le cœur de la saison sèche (1^{er} trimestre) semblent assez proches du nord au sud. Cependant on s'attend à ce qu'il y ait des différences entre l'est et l'ouest du domaine puisque c'est le cas pour les concentrations de poussières au sol (Marticorena *et al.*, 2010). Des contrastes entre les quatre classes apparaissent surtout au début du mois d'avril (à partir de la semaine 13). On observe des différences importantes entre le sud où l'AI est faible, et le nord où l'AI est fort, ce qui peut être dû non seulement à l'augmentation des poussières au sol mais aussi à la répartition des poussières transportées sur la colonne atmosphérique.

De plus, durant le 2^{ème} trimestre, il y a deux périodes successives d'augmentation puis de baisse. La première se produit avant la "pré-onset" (semaine 19/20) et le deuxième après cette date. Ensuite, durant le 3^{ème} trimestre, l'AI-OMI diminue partout mais il reste important sur la partie saharienne du domaine. Enfin, au 4^{ème} trimestre, l'AI est faible partout sur le domaine.

La maximum de l'AI a lieu en mars pour la classe la plus au sud (semaine 8/9) mais, pour les trois classes les plus au nord, le maximum a lieu en juin (semaine 21/22) et cette valeur diminue en allant vers le sud. Cependant le maximum annuel des concentrations de poussières est attendu durant le 1^{er} trimestre avec un fort gradient est-ouest au Sahel (Marticorena *et al.*, 2010).

2.1.2. Les classifications spatiales des variables ERA-Interim

La même méthode est maintenant appliquée aux variables ERA-Interim (le module puis l'angle du vent, la température et l'humidité relative), soit $k = 52 \times (2008-1989) = 988$. Le but est d'observer les différences spatiales des cycles annuels moyens des quatre variables ERA-Interim sur l'ensemble de notre domaine.

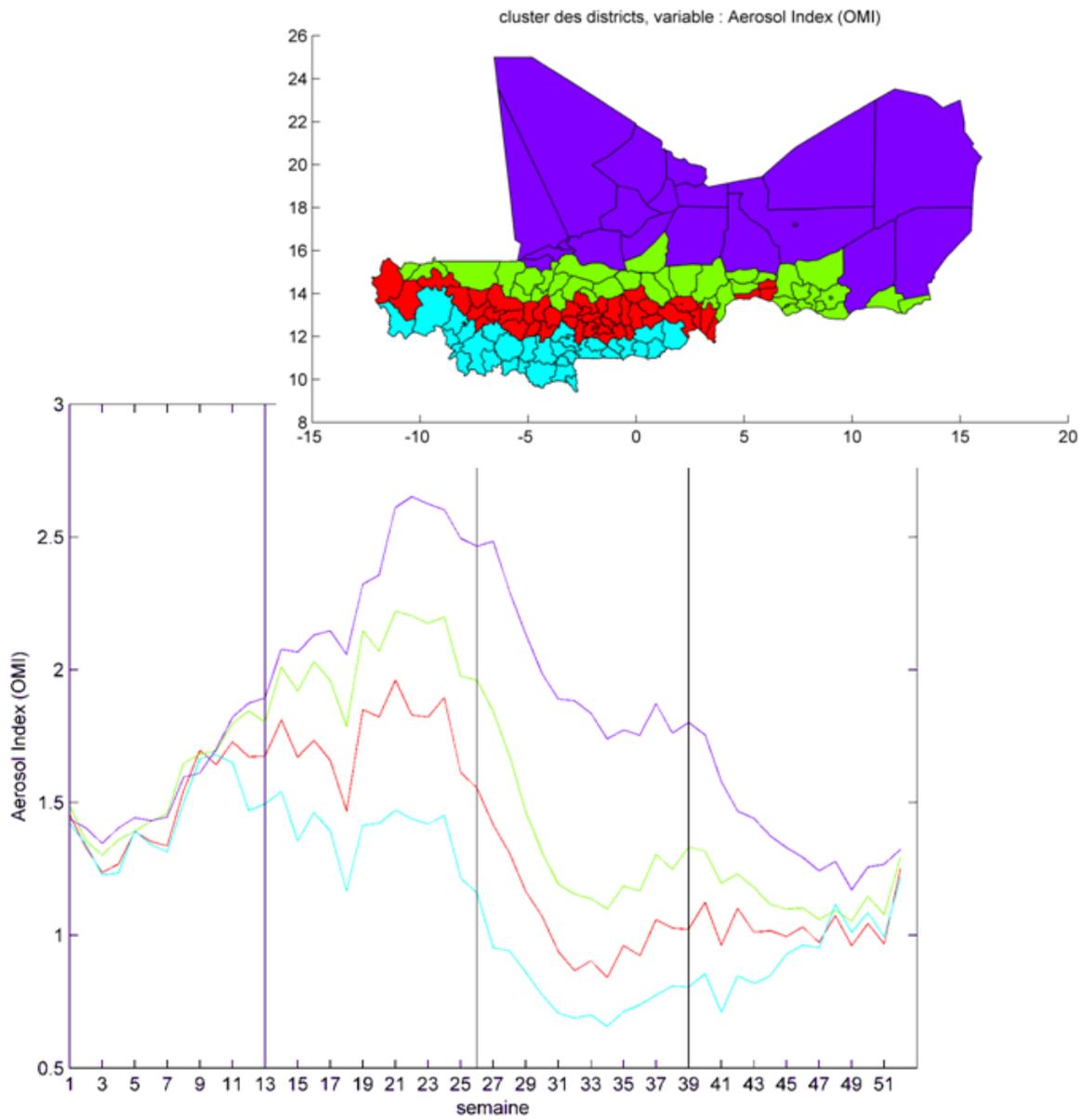


Figure II.17. – Classification spatiale de l'Aérosol Index (AI-OMI) des districts du Burkina-Faso, Mali, Niger pour 4 classes et moyennes hebdomadaires des 4 classes.

Aux stations de Banizoumbou au Niger et de Cinzana au Mali, une méthode de classification a permis de regrouper les périodes météorologiques similaires dans le temps, nommées types de temps, associées aux conditions de poussières (Yahi *et al.*, 2013). Dans cette partie, la classification proposée est faite spatialement en regroupant les cycles annuels moyens des districts.

■ La classification spatiale du cycle annuel moyen du module du vent

Tout d'abord, on remarque sur la Figure II.18 qu'il y a une zone au sud-ouest du domaine, associée à des vents plus faibles que les trois autres classes tout au long de l'année. Les trois autres classes ont un calendrier proche et les intensités sont décroissantes en allant du nord vers le sud et ce, toute l'année. Les cycles annuels moyens de chaque groupe comportent deux périodes de faibles vents (autour de la semaine 17 et de la semaine 40) ainsi que deux périodes de vents forts dont un maximum de vent en saison sèche (semaine 5) et une autre plus faible en saison humide (à peu près à la semaine 26).

■ La classification spatiale du cycle annuel moyen de l'angle du vent

La structure spatiale de l'angle du vent se décompose en trois zones ayant un cycle annuel moyen proche et en une zone au nord-est (au nord du Niger dans les districts de Arlit et Bilma sur la Figure II.19) dans laquelle on n'observe pas climatologiquement le passage du flux de mousson. Il y a une rupture claire à la fin du premier trimestre sur les cycles annuels moyens de l'angle du vent des quatre classes qui se produit de la semaine 13 à la semaine 17 (c'est-à-dire durant le mois d'avril). Puis à l'inverse, il y a une rupture au 3^{ème} trimestre de la semaine 39 à la semaine 43 (c'est-à-dire durant le mois d'octobre).

La structure spatiale du vent (module et angle) est principalement méridienne ce qui correspond à l'opposition attendue entre les vents d'Harmattan pendant le cœur de la saison sèche et les vents de la mousson pendant le cœur de la saison humide.

■ La classification spatiale du cycle annuel moyen de l'humidité relative

Les quatre classes de l'humidité relative ont un cycle similaire annuel avec des différences importantes d'amplitude. On constate que l'humidité est faible partout entre de la 1^{ère} semaine de l'année à la 8^{ème} semaine. Puis le maximum de l'humidité est atteint partout à la semaine 32 mais il y a 30% de différence entre le nord et le sud. Plus les districts sont au sud, plus l'humidité relative est importante et durant un temps long (Figure II.20).

■ La classification spatiale du cycle annuel moyen de la température

Il y a deux périodes de fortes températures sur l'ensemble du domaine qui correspondent aux périodes de faibles vents (Figure II.21). Le cycle annuel de la température des quatre classes se différencie surtout pendant le 2^{ème} trimestre et le 3^{ème} trimestre quand l'humidité est la plus élevée.

Il est important de remarquer que les districts où la température est la plus forte, se trouvent au sud de notre domaine durant le 1^{er} trimestre, puis durant le 2^{ème} trimestre, cela s'inverse. Les maxima de chaque zone sont décalés, ce qui suggère qu'une zone de température maximale traverse le Sahel en s'intensifiant entre la semaine 13 (au début du mois d'avril) et la semaine 19 (mi-mai). De plus, l'étude des cycles annuels moyens des deux districts les plus au nord (Tombouctou au Mali et Arlit au Niger) montrent qu'au nord, c'est à la semaine 26 (fin juin) que le maximum de température est

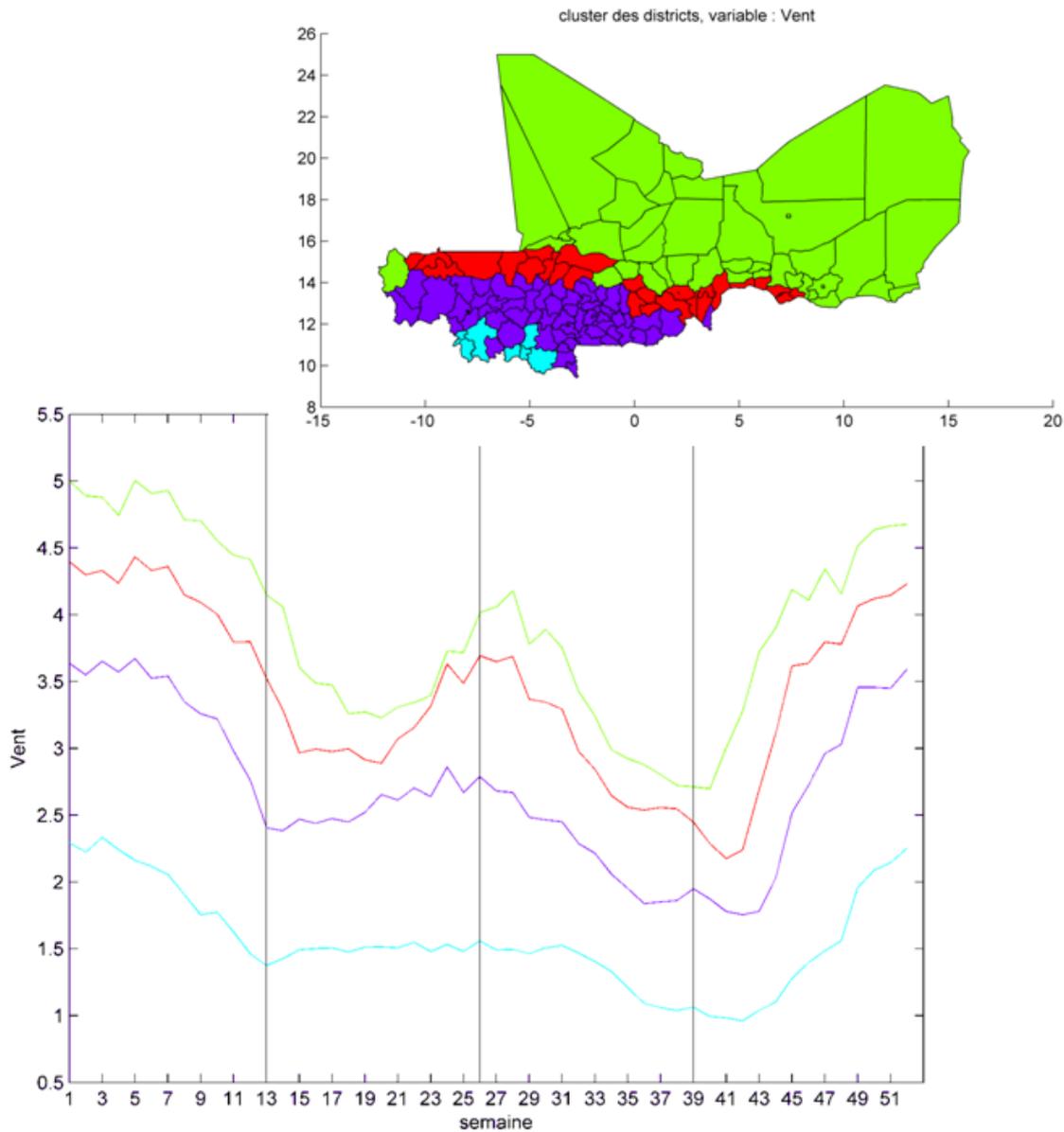


Figure II.18. – Classification spatiale du module du vent des districts du Burkina-Faso, Mali, Niger pour 4 classes et les cycles annuels moyens hebdomadaires des 4 classes.

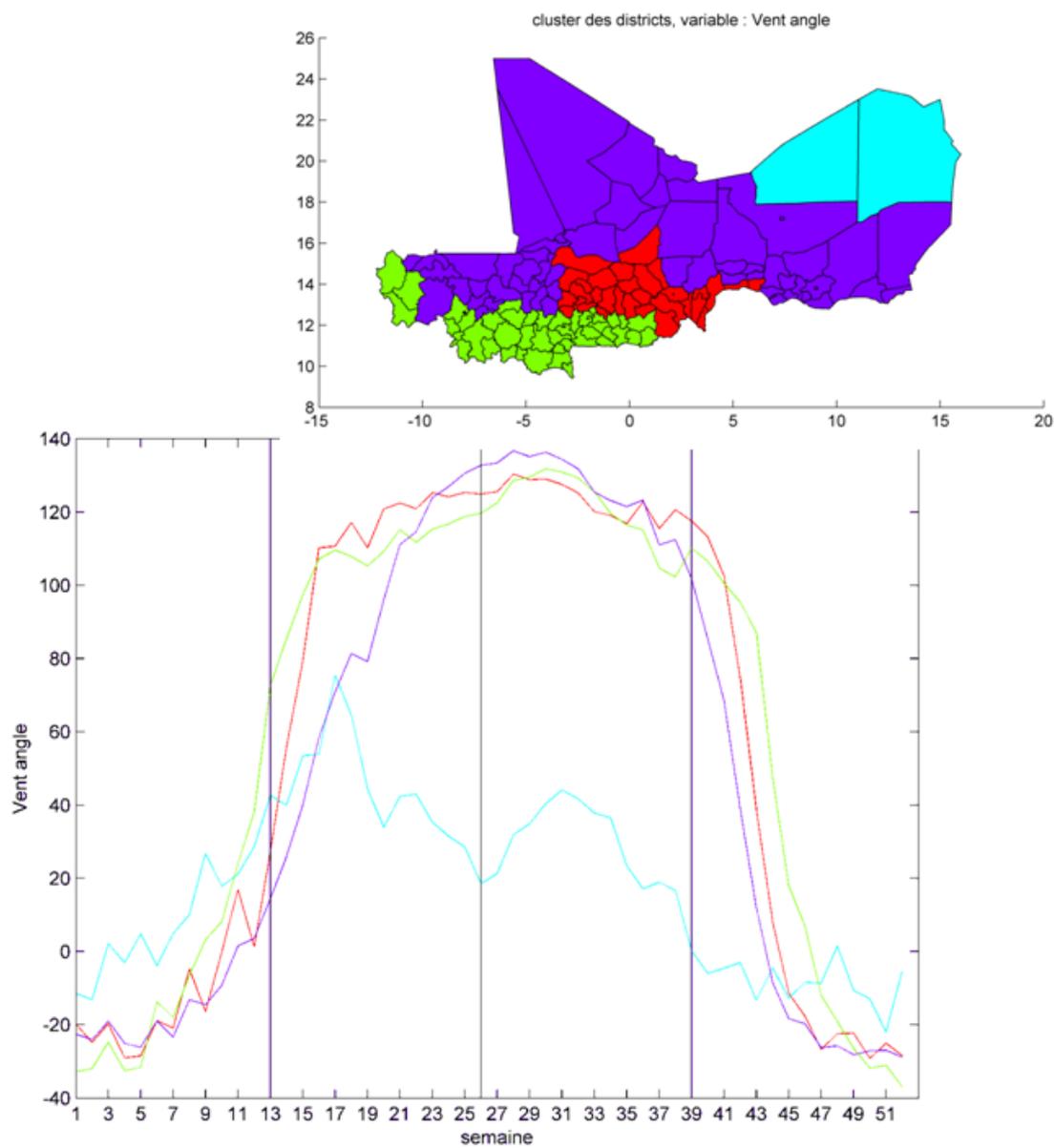


Figure II.19. – Classification spatiale de l'angle du vent des districts du Burkina-Faso, Mali, Niger pour 4 classes et les cycles annuels moyens hebdomadaires des 4 classes.

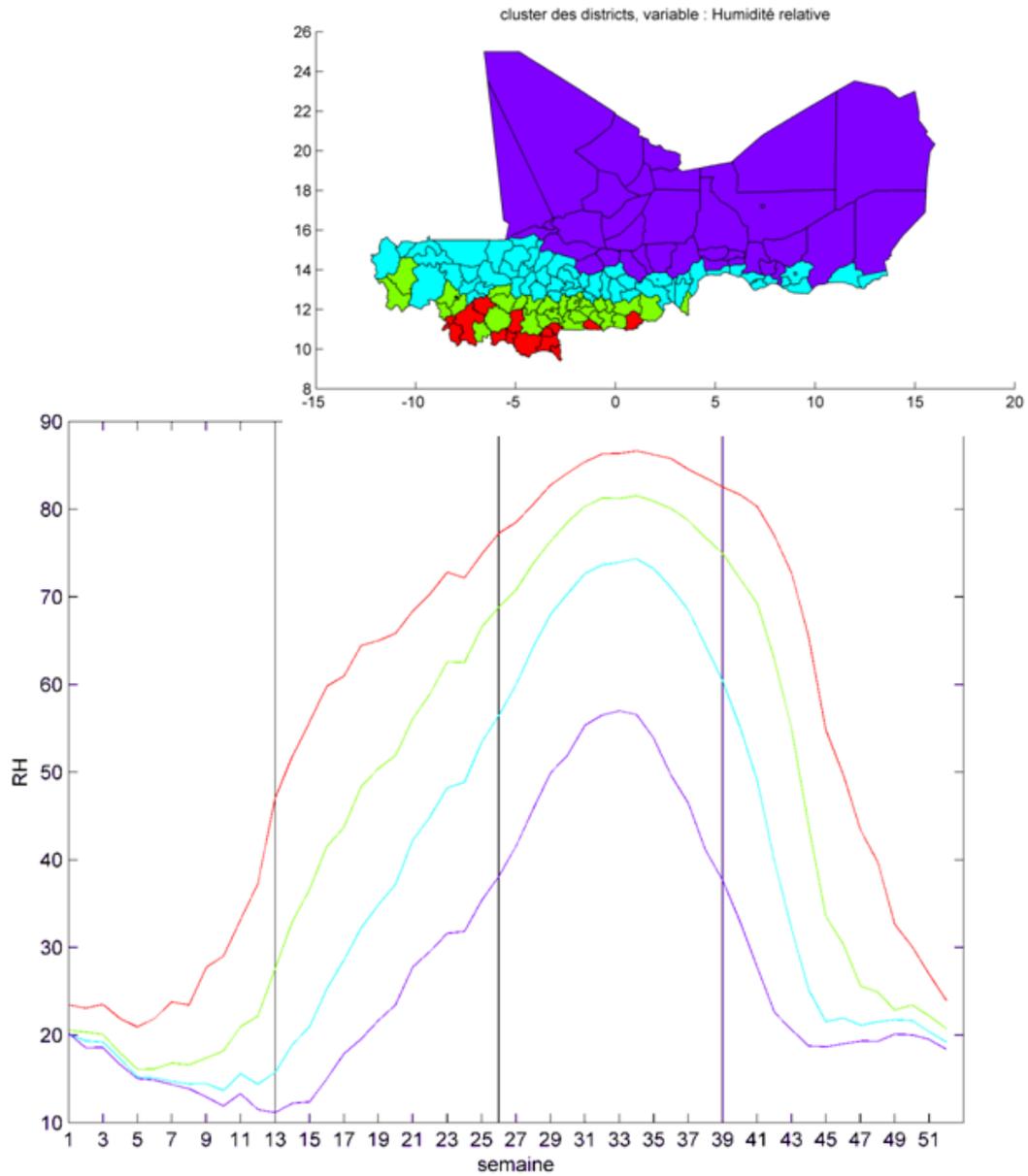


Figure II.20. – Classification spatiale de l'humidité relative des districts du Burkina-Faso, Mali, Niger pour 4 classes et les cycles annuels moyens hebdomadaires des 4 classes.

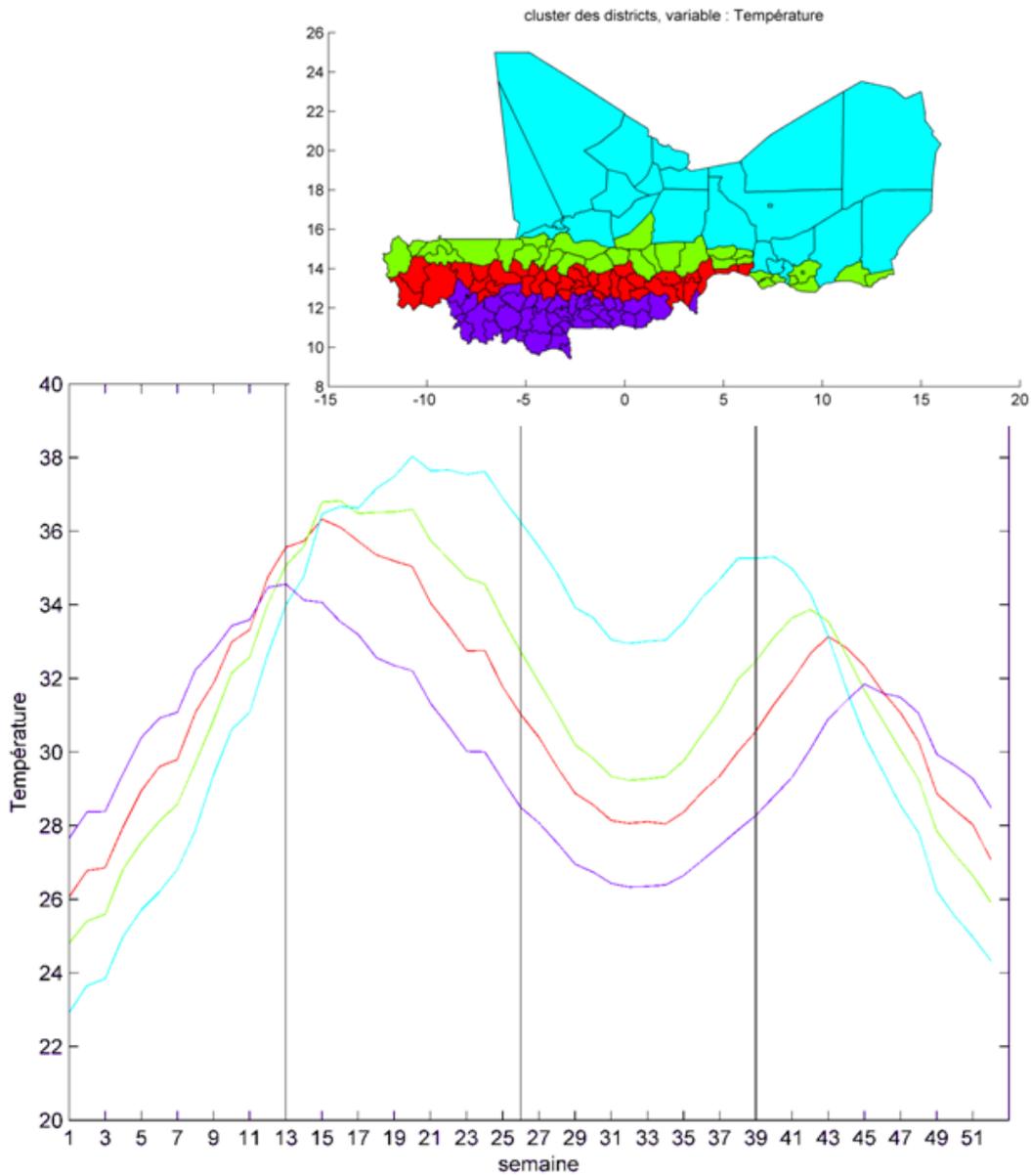


Figure II.21. – Classification spatiale de la température des districts du Burkina-Faso, Mali, Niger pour 4 classes et les cycles annuels moyens hebdomadaires des 4 classes.

atteint (c'est-à-dire lorsque l'ensoleillement est maximal car le flux de mousson atteint plus rarement ces deux districts).

La structure spatiale des quatre classes de la température et de l'humidité relative est composée de bandes zonales. Entre les semaines 13 et 19 (au mois d'avril), le maximum de température a lieu partout sur notre domaine, il est suivi par le minimum de vent associé à un changement d'angle du vent, puis par l'augmentation de l'humidité relative.

■ Résumé des résultats de la classification spatiale des variables atmosphériques

Pour la majorité des variables, un gradient nord-sud est constaté durant toute l'année (module du vent), ou à certaines périodes de l'année (exemple de la température pour les 2^{ème} et 3^{ème} trimestres). Seul l'angle du vent (à l'exception des 2 districts les plus au nord-est) n'indique pas de gradient Nord-Sud. Chronologiquement, au début du 1^{er} trimestre, les vents de l'Harmattan ont une intensité maximale sur tout le Sahel et la variabilité spatiale semble être la plus importante pour le module du vent. Au 2^{ème} trimestre, la transition vers la saison humide semble se décomposer en deux sous-périodes. Durant la première moitié du 2^{ème} trimestre, le maximum de température correspond à l'intensité maximale de la DTS au Sahel (Lavaysse *et al.*, 2009). De plus, le FIT paraît suivre le déplacement de la zone de fortes températures en étant plus au sud (Hall et Peyrillé, 2006; Lavaysse *et al.*, 2009, 2011). Puis pendant la deuxième moitié du 2^{ème} trimestre lorsque le vent augmente à nouveau, c'est la période de la pré-mousson (Sultan et Janicot, 2003; Sultan *et al.*, 2003). C'est la première phase de la mousson ou la pré-mousson et ces résultats sont en accord avec la date de "pré-onset" de la mousson, définie le 14 mai (semaine 19 ou 20) avec un écart-type de 9,5 jours (Sultan et Janicot, 2000, 2003; Sultan *et al.*, 2003). Le 3^{ème} trimestre est le cœur de la saison humide lorsque le vent du sud est clairement établi et lorsque l'humidité atteint un maximum et la température un minimum. Lors de la mousson, la température est d'autant plus faible que l'humidité est élevée, c'est-à-dire du sud vers le nord. Enfin, au 4^{ème} et dernier trimestre de l'année, la transition vers la saison sèche s'effectue tout d'abord par la redescende du FIT puis de la DTS mais avec une intensité inférieure que l'on peut interpréter comme l'effet de l'humidification des sols (Janicot et Fontaine, 1993; Lavaysse *et al.*, 2009). De plus, il y a une première période de fort AI-OMI qui se produit avant que l'angle du vent ne soit clairement en provenance du sud. Mais le maximum de l'AI-OMI a lieu en juin avec l'augmentation du flux de mousson après la saison de la méningite. En conclusion, les résultats de la classification obtenus à partir de notre base de données sont cohérents avec les dates des périodes climatiques sahéliennes connues.

2.2. Les liens entre le climat et les poussières aux deux stations

Pour analyser les liens statistiques entre les variables climat et l'AI, nous disposons aux deux stations des données de références de poussières, les AOT et les PM. Dans l'ACP présentée ici, la réduction de l'information s'opère sur le nombre de variables et elle n'intègre pas la dimension spatiale comme précédemment (cf. annexe outils statistiques). Les variables redondantes (qui sont corrélées ou anti-corrélées) structurent de la même manière les axes factoriels. Le but de cette analyse est double, décrire les liens des quatre variables décrivant le "climat" (vent module et angle, température, humidité relative) et les variables décrivant les "poussières" (PM, AOT et AI), ainsi que de comparer l'AI aux deux jeux de références de "poussières".

L'étude précédente a montré qu'à partir de la date de "pré-onset" définie par (Sultan et Janicot, 2003), les vents en provenance du sud gagnent le Sahel au-delà de la latitude des deux stations (à

13° nord). A partir de cette date, les épaisseurs optiques en aérosols (AOT) peuvent ne plus refléter les conditions de surface de poussières (PM). Par conséquent, la période choisie commence à la 1^{ère} semaine de l'année et se termine à la 18^{ème} pour les trois années de mesures (2006-2008). Dans un premier temps, l'ACP est calculée aux deux stations individuellement puis, dans un deuxième temps, l'analyse est reprise en utilisant les données des deux stations conjointement. Nous présentons et comparons les corrélations des variables avec les deux premières composantes principales (CP₁, CP₂).

2.2.1. Analyse individuelle à Banizoumbou et Cinzana

Au pixel correspondant aux deux stations, les variables ERA-Interim ont été extraites et moyennées chaque jour de la période 2006-2008 et de même pour l'AI-OMI en prenant un pavé de 9 pixels (i.e. un carré de 3 x 3 pixels). La sonde Aura de l'instrument OMI passe au-dessus du Sahel à environ 13h45. Chaque pixel intègre une surface de 25km x 25km. A l'inverse, une station est à un point fixe et l'évolution des mesures sur la journée, due au transport par le vent, correspond à ce que le satellite intègre dans un pixel à l'instant de survol du Sahel. Un choix se pose quant à la durée de moyennage des AOT et des PM. Les épaisseurs optiques sont disponibles sur cette période toutes les 15 minutes durant la journée alors que les PM sont disponibles toutes les 5 minutes, le jour et la nuit. Pour la comparaison avec l'AI, une moyenne des AOT a été calculée sur toute la journée (8h-18h) alors que pour les PM, c'est une moyenne sur 24 heures qui a été choisie puisque c'est la valeur pertinente pour les études d'impacts des poussières sur la santé. Ensuite les données journalières sont moyennées à la semaine pour l'analyse.

La CP₁ résume à Banizoumbou 43% de la variance totale et 32% pour la CP₂ (sur la Figure II.22), et respectivement à Cinzana 36% et 32%. La CP₁ est structurée par les PM (avec une corrélation 0,4) aux deux stations, les AOT (avec un coefficient de corrélation 0,4 à Banizoumbou et 0,5 à Cinzana) et l'AI (avec un coefficient de corrélation 0,3 à Banizoumbou et 0,5 à Cinzana). On trouve donc un axe "poussières" à Cinzana comme à Banizoumbou.

A Cinzana, la CP₂ est clairement identifiée comme un axe "climat" avec une structuration de cet axe par la température ainsi que par le module et l'angle du vent. De plus, la variable humidité est faiblement corrélée à cet axe. A Banizoumbou, la CP₂ est structurée principalement par la température. Le vent semble structurer moins clairement cet axe (avec une corrélation 0,4) et l'humidité est proche du cercle de significativité. On remarque également que le vent (module et angle) structure l'axe "poussières" (CP₁) à Banizoumbou.

En résumé, nous obtenons donc à Cinzana un axe "poussières" (AOT, AI, PM) et un axe "climat" (température et vent) tandis qu'à Banizoumbou, nous avons un axe "poussières et vent" (AOT, AI, PM, vent module et angle) et un axe "climat" structuré principalement par la température. Il semble donc y avoir un mode propre aux variations du climat et un autre caractérisant les niveaux de poussières. Les deux modes sont décorrélés par construction (i.e. les axes factoriels sont indépendants) et, dans notre cas, cela signifie que la quantité de poussières aux stations ne dépend pas du climat local. En effet, pendant notre période, il y a peu d'émission locale de poussières au Sahel car elles sont essentiellement transportées depuis les sources sahariennes (Marticorena *et al.*, 2010).

Cependant, on remarque qu'il y a des différences entre les trois variables décrivant les poussières. La variable PM diffère des mesures intégrées qui sont proches mais pas égales (le coefficient de corrélation est de 0,7 qui se traduit sur les plans principaux par la distance entre ces deux variables). De plus, spécifiquement à Banizoumbou, les variables AI et AOT participent à l'axe "température",

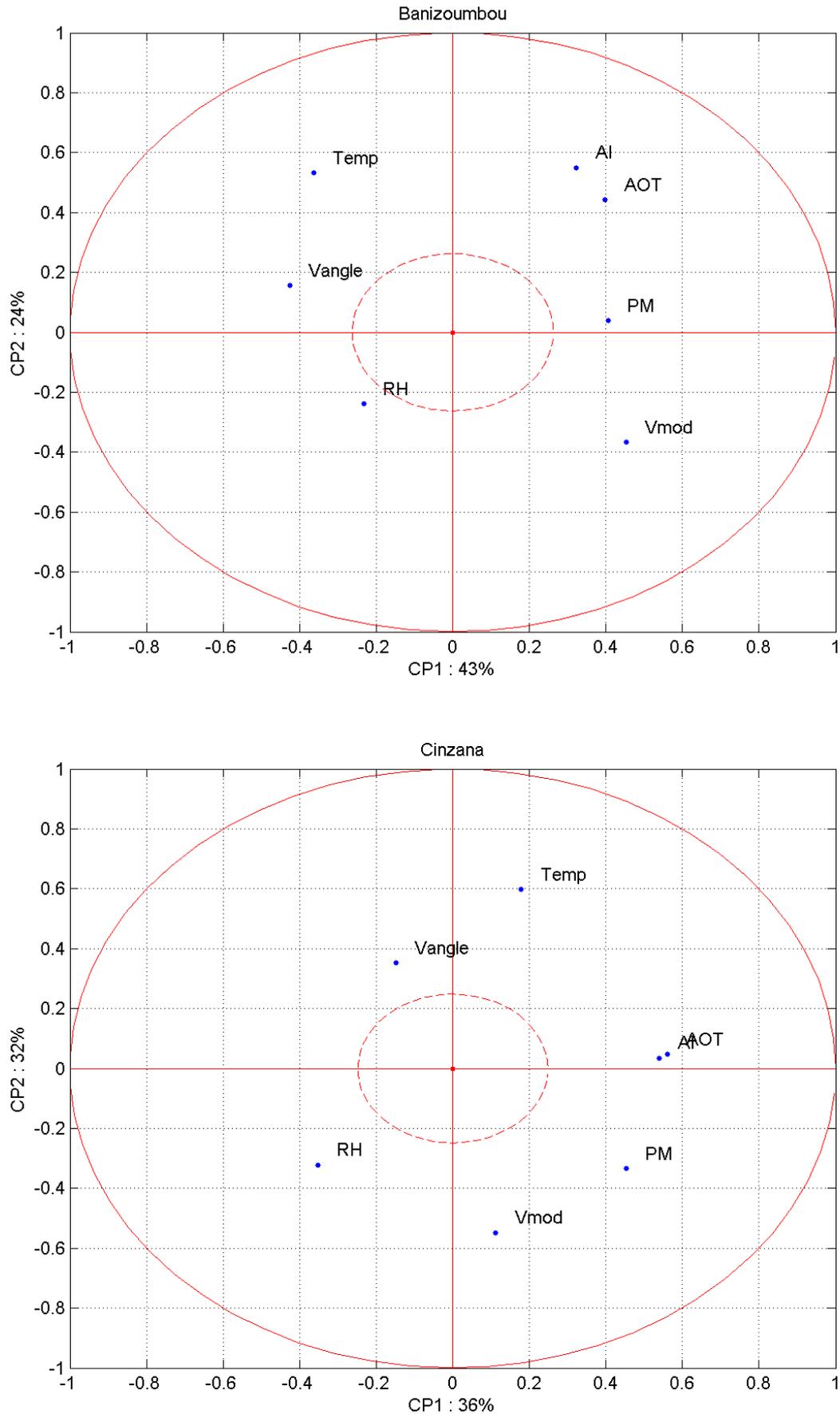


Figure II.22. – Projection des variables dans le plan principal (CP_1 , CP_2) en considérant les semaines 1 à 18 des années 2006-2008 à Cinzana (Mali) et à Banizoumbou (Niger); variables ERA-Interim: Temp pour la température, RH pour l'humidité relative, Vmod pour le module du vent, Vangle pour l'angle du vent; PM pour les concentrations de poussières; AOT pour l'épaisseur optique en aérosols; AI pour l'Aerosol Index.

c'est-à-dire elles sont proportionnelles à la température mais ce n'est pas le cas des PM. On peut interpréter ce résultat comme dû à la proximité des sources de poussières désertiques.

Il y a des ressemblances entre les deux stations qui justifient l'agrégation de nos données au niveau du district. Tout d'abord, les deux premiers modes résument environ 50% de la variabilité à Cinzana comme à Banizoumbou. La comparaison des résultats obtenus montrent que l'information des deux premiers modes semble être similaire aux deux stations : il y a une composante "poussières" (i.e. la CP₁) et une composante "climat" (i.e. la CP₂) dominée par la température. Ceci suggère que la variation de la température aux stations n'est pas liée à la variation du niveau de poussières.

Dans la mesure où les deux stations présentent des relations semblables entre les variables et les deux premières composantes principales, ces deux modes décrivent l'évolution à large échelle des poussières d'une part et de la température d'autre part. Cela traduit l'évolution de situations météorologiques d'Harmattan avec un vent fort durant le début de la période, vers les fortes températures associées aux vents faibles (à la fin de la période), qui correspondent au passage de la DTS et du FIT déjà décrit dans les sections précédentes (cf. section II-1.2.1 et II-2.1.2). Pour confirmer l'interprétation des composantes principales, les données des deux stations sont réunies afin d'extraire les caractéristiques communes aux deux stations.

2.2.2. Analyse conjointe à Banizoumbou et Cinzana

Dans cette partie, l'analyse précédente a été réalisée pour les deux stations conjointement, c'est-à-dire les séries temporelles des deux stations sont mises bout à bout pour chaque variable (concaténées). Le but est de décrire les caractéristiques partagées par les stations car les deux premiers modes de l'ACP semblent s'interpréter de la même manière aux deux stations bien que les deux stations soient distantes de plus de 1000 km.

La Figure II.23 présente le plan principal des données hebdomadaires des deux stations ensemble. La CP₁ explique 36% de la variance de la matrice d'entrée et ce pourcentage est de 26% pour CP₂. Le coefficient de corrélation entre les variables AOT et PM et le premier axe factoriel est de 0,5. Pour l'AI, ce coefficient est inférieur ($R = 0,4$). On peut remarquer que le vent est lié à cette composante ($R = 0,4$ pour le module et $R = -0,4$ pour l'angle du vent). Ce sont les variables décrivant les poussières et le vent. Concernant le deuxième axe factoriel, le coefficient de corrélation avec la température est de 0,6 et avec le module du vent 0,4. L'humidité relative n'est pas interprétable car elle est proche du cercle de significativité.

Il est important de noter que les relations communes aux deux stations énoncées précédemment se vérifient lorsque l'ACP est calculée aux deux stations simultanément. On retrouve l'axe "poussières et vent" et l'axe "climat" essentiellement structuré par la température. De plus, la variance portée par les deux axes est semblable à celle des résultats précédents.

Pour confirmer ce résultat, les contributions de chaque variable à la CP₁ et à la CP₂ (i.e. le pourcentage de la variance de la CP₁ ou de la CP₂ expliquée par chaque variable) ont été calculées pour les trois analyses précédentes (Tableau II.1).

On remarque sur le Tableau II.1 que la principale différence entre les trois ACP présentées, réside dans le rôle des mesures intégrées de poussières (AOT et AI) à Banizoumbou et à Cinzana. Néanmoins, pour les deux stations ensemble, on voit clairement que le premier mode est lié aux trois

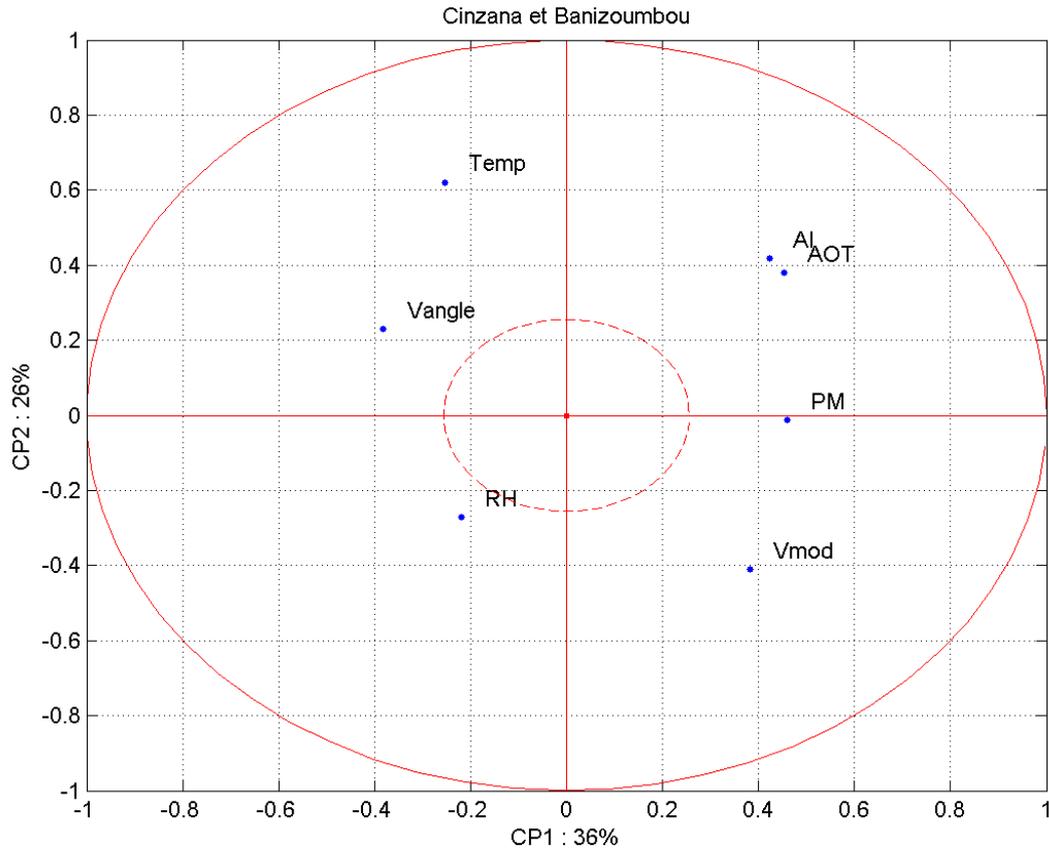


Figure II.23. – (en haut) Projection des variables dans le plan principal (CP_1 , CP_2) en considérant les semaines 1 à 18 des années 2006-2008 pour les deux stations ensemble ; variables ERA-Interim : Temp pour la température, RH pour l'humidité relative, Vmod pour le module du vent, Vangle pour l'angle du vent ; PM pour les concentrations de poussières ; AOT pour l'épaisseur optique en aérosols ; AI pour l'Aerosol Index.

Tableau II.1. – Contribution de chaque variable à la variance des deux premières composantes principales (CP_1 , CP_2) de l'ACP réalisée à Banizoumbou, à Cinzana et aux deux stations ensemble pour les semaines 1 à 18 des années 2006-2008.

Contribution(%) Analyse à :	CP_1			CP_2		
	Banizoumbou	Cinzana	conjoint	Banizoumbou	Cinzana	conjoint
AI	10	29	18	30	0	17
AOT	16	31	21	20	0	14
PM	16	20	21	0	11	0
Température	13	3	6	28	36	39
Humidité	5	12	5	6	10	7
Vitesse Vent	21	1	15	13	30	17
Angle Vent	18	2	15	2	12	5

variables "poussières" et que le deuxième mode est lié à la température.

Les projections des observations dans le plan principal ont aussi été étudiées. Dans le nuage de points des couples de valeurs (CP_1 , CP_2), la dimension temporelle a été rajoutée en associant à chaque semaine, une couleur différente. Comme on s'attend à une évolution de la composante "climat" au cours de la période, toutes les semaines ont été associées à une couleur différente sur une échelle de couleur allant du bleu (pour la 1^{ère} semaine), au orange au début du trimestre de transition (pour la 13^{ème} semaine), enfin le rouge correspond à la dernière semaine de la période étudiée (pour la 18^{ème} semaine).

La Figure II.24 présente le nuage de points associé à la CP_1 et la CP_2 des données hebdomadaires des deux stations ensemble. On remarque que l'évolution du mode "climat" (i.e. la CP_2) est claire car les couleurs sont bien séparées. Et de même, la composante "poussières" (i.e. la CP_1) semble peu variable au début de la saison (de -1 à 1), puis sa variabilité augmente (de -3 à 5). Des valeurs très fortes sont aussi constatées à partir de la semaine 8 (la fin du mois de février) et jusqu'à la fin de la période. Les valeurs de la composante "climat" sont faibles au début de la période et fortes à la fin, et ceci pour les deux stations. Il y a donc un changement clair de la composante "climat" entre le début de la période marquée par les vents forts, et la fin marquée par les fortes températures. De plus, la variabilité du climat est de quelques semaines (que l'on constate par le mélange des couleurs des points). Cependant ces résultats sont obtenus sur une courte période (de 3 ans).

Cette analyse illustre aussi qu'il y a des différences entre les PM et les mesures intégrées (AOT et AI). La représentativité qu'offrent les mesures optiques pour décrire la concentration de poussières au sol, n'est donc pas clairement établie. Dans cette partie, on compare la mesure de l'AI effectuée au passage du satellite à 13h45, avec la moyenne des AOT de la journée et avec celle des concentrations de poussières obtenue sur 24 heures puisque nous cherchons à démontrer que l'AI est représentatif de la valeur des PM intégrée sur toute la semaine. Il semble nécessaire d'analyser spécifiquement les trois variables poussières aux deux stations pendant le cœur de la saison sèche en comparant les valeurs journalières aussi. De plus, le maximum annuel des concentrations de poussières a lieu durant le 1^{er} trimestre, alors que le maximum des AOT se produit durant la première partie du 2^{ème} trimestre (cf. section II-1.3.2). Dès lors, la représentativité des concentrations de poussières au sol qu'offre l'AI, doit être testée afin de valider l'utilisation de l'AI dans le cadre des études d'impact sur la santé.

■ Conclusions de la deuxième partie du chapitre 2

La base de données au pas de temps hebdomadaire et à l'échelle des districts a été créée en associant à chaque valeur d'incidence, une valeur pour les cinq variables atmosphériques sélectionnées pour leurs effets sur la santé ou leur importance pour décrire l'évolution du climat et des poussières au Sahel. Les cycles annuels moyens de ces variables ont été regroupés pour déterminer les structures spatiales de chaque variable dans les trois pays étudiés. La saison de la méningite commence pendant le cœur de la saison sèche (le 1^{er} trimestre) qui est marqué par la variabilité importante de la force du vent entre le nord et le sud du domaine d'étude, et continue jusqu'au début du 2^{ème} trimestre, marquée par une augmentation de température et d'humidité relative. Il y a un changement des conditions atmosphériques qui se produit au Sahel entre le 1^{er} trimestre et le 2^{ème} trimestre lorsque la température est maximale et le vent est faible. De plus, l'ACP des variables atmosphériques a montré que ce changement est partagé par les deux stations avec une variabilité de quelques semaines. Lors de la première moitié du 2^{ème} trimestre, la température est élevée partout au Sahel et les vents sont faibles, ce qui suggère le passage de la DTS et du FIT. Ensuite l'atmosphère change à large échelle avec le déplacement rapide de la ZCIT, c'est la "pré-onset" de la mousson au milieu du 2^{ème} trimestre. La

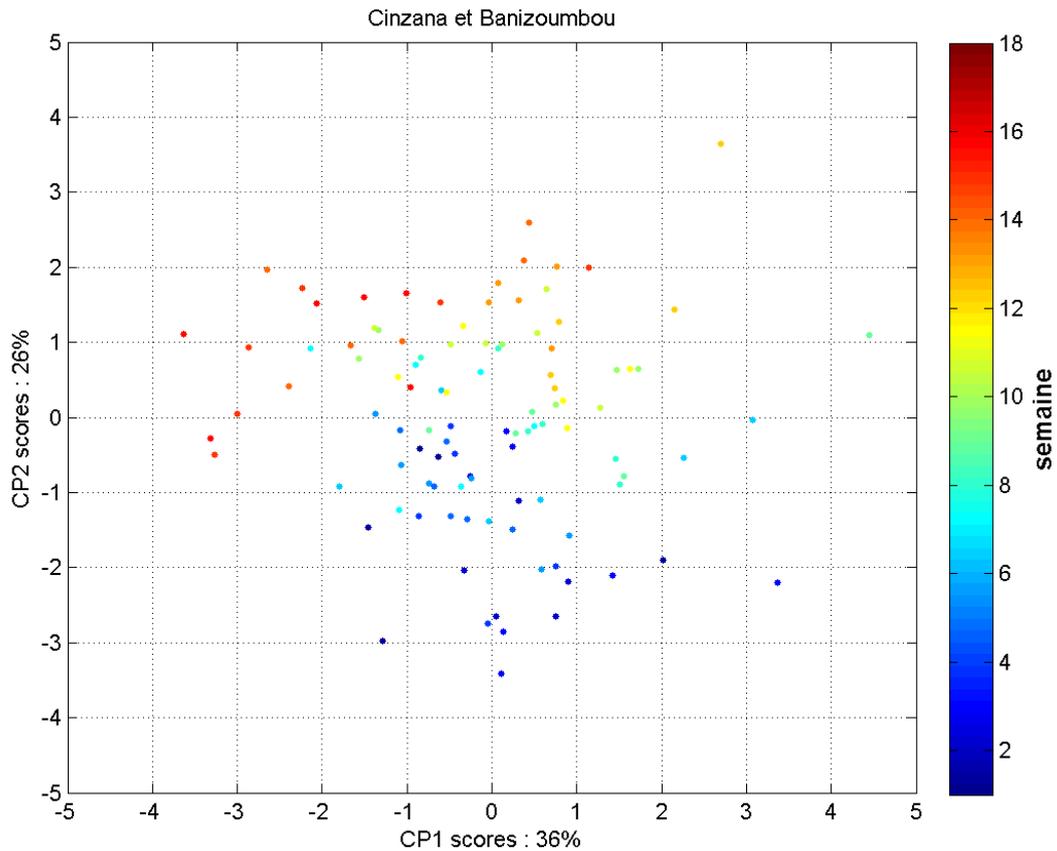


Figure II.24. – Projection des observations dans le plan factoriel formé par la première et la deuxième composante principale (CP_1 , CP_2) en considérant les semaines 1 à 18 pour les deux stations ensemble sur la période 2006-2008 ; (échelle de couleur à droite) chaque semaine est associée à une couleur différente sur une échelle allant du bleu pour la 1^{ère} semaine de l'année, au orange pour la 13^{ème} semaine, enfin le rouge pour la 18^{ème} semaine.

période de fortes températures et de faibles vents suggère qu'il y a une augmentation de la convection dans la couche de surface. Il semble que les maxima annuels des PM, des AOT et de l'AI soient décalés, il est nécessaire confirmer ce résultat par une étude approfondie des trois variables décrivant les poussières aux deux stations.

■ Synthèse du chapitre 2

La base de données a été constituée au pas de temps hebdomadaire au Burkina Faso, au Mali et au Niger à trois échelles spatiales, c'est-à-dire l'échelle des districts, des régions et des pays. Ce chapitre a aussi permis de décrire le climat et des poussières dans la ceinture des méningites ainsi que la variabilité des cinq variables atmosphériques sélectionnées (la température, l'humidité relative, le module et l'angle vent, et l'AI). L'analyse des conditions climatiques et de poussières à large échelle a montré que la ceinture des méningites correspond à une unité climatique claire car il y a des conditions spécifiques pour chacune des variables. Des différences spatiales entre les districts ont aussi été constatées sur notre domaine pour chaque variable à partir de l'étude des cycles annuels moyens. En effet, la classification des districts a permis de les regrouper en régions cohérentes qui montrent un gradient sud-nord pour chaque variable. L'étude des cycles annuels moyens a été complétée d'une analyse hebdomadaire interannuelle, ce qui est particulièrement important pour analyser l'AI-OMI car la période étudiée ne suffit pas pour établir une climatologie fiable. L'AI-OMI a été comparé aux quatre variables ERA-Interim et aux deux jeux de références décrivant les niveaux de poussières : les concentrations de poussières (PM) et les épaisseurs optiques en aérosols (AOT) mesurés aux deux stations. La comparaison des variables climatiques et des trois variables décrivant les niveaux de poussières a permis de décrire les caractéristiques à large échelle, c'est-à-dire les caractéristiques partagées par les deux stations distantes de plus de mille kilomètres. Les premiers modes d'une analyse en composantes principales commune aux deux stations montrent que la variabilité du climat sahélien (et la température plus spécifiquement) est indépendante de la variation des niveaux de poussières due au transport de poussières à large échelle.

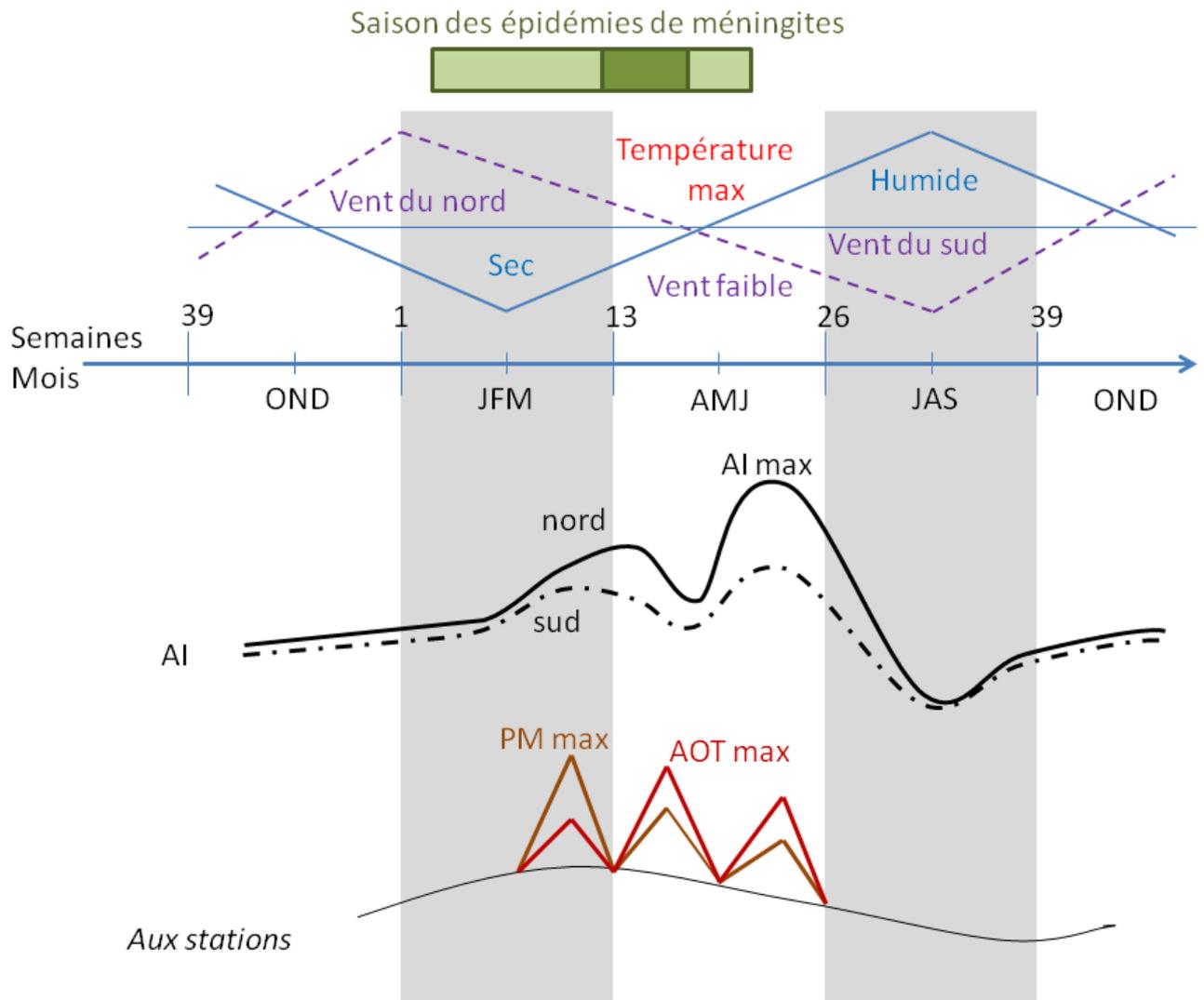


Figure II.25. – Schéma n°1 de synthèse des résultats.

- Chapitre III -

La transformation de l'Aerosol Index pour l'étude des impacts des poussières sur les épidémies de méningites au Sahel

■ Introduction

"The dust falls in such quantities as to dirty everything on board, and to hurt people's eyes; vessels even have run on shore owing to the obscurity of the atmosphere. It has often fallen on ships when several hundred, and even more than a thousand miles from the coast of Africa, and at points sixteen hundred miles distant in a north and south direction." (Darwin, 1839).

Ce constat de Charles Darwin illustre, premièrement, que les aérosols désertiques sont transportés sur de longues distances dans des panaches très étendus et, deuxièmement, l'impact des fortes concentrations de poussières sur la santé à cause de l'irritation des muqueuses qu'elles provoquent. Les épidémies de méningites semblent liées aux poussières désertiques apportées par les alizés continentaux en provenance du Sahara (Yaka *et al.*, 2008). A large échelle, les épidémies démarrent après l'intensité maximale des vent d'Harmattan (Sultan *et al.*, 2005). De plus, à partir des relevés épidémiologiques nationaux hebdomadaires du Niger et du Burkina Faso, un décalage de zéro à deux semaines a été mis en évidence entre l'augmentation des épaisseurs optiques en aérosols et l'augmentation du nombre de cas de méningite (Martiny et Chiapello, 2013). Cet article conclut sur la nécessité d'explorer à des échelles plus fines pour confirmer ce décalage, notamment l'échelle de la vaccination, c'est-à-dire le district.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons spécifiquement à l'AI (Aerosol Index) afin de connaître la représentativité des concentrations de poussières que cet indice est capable de restituer. Il s'apparente à une épaisseur optique en aérosols mais cette mesure est aussi connue comme étant sensible à l'altitude des aérosols (Torres *et al.*, 1998; Ginoux et Torres, 2003). Dans le cadre des études d'impact des poussières désertiques sur la santé, seule la concentration de poussières au niveau du sol est pertinente. L'enjeu de ce chapitre est de constituer une série temporelle, pour chaque district, représentative des conditions de poussières au niveau du sol à partir de l'AI. Une analyse approfondie de l'AI, des AOT et des PM est nécessaire aux stations sahéennes pour répondre à la question suivante : *Comment et dans quelles mesures, peut-on utiliser l'AI pour obtenir une information sur les aérosols désertiques au niveau du sol ?* En avril, l'atmosphère change et la répartition dans la colonne atmosphérique des poussières transportées évolue lorsque les incidences sont les plus élevées. Il faut être prudent quant à l'utilisation d'une quantité intégrée d'aérosols pour la comparaison avec l'incidence des méningites,

ainsi il faut comprendre : *Comment modifier une mesure intégrée d'aérosols comme l'AI pour refléter les concentrations de poussières au niveau du sol, spécifiquement au Sahel et tout au long de l'année ?*

La première partie de ce chapitre est consacrée à la validation de l'utilisation de l'AI dans le cadre des études d'impact des poussières sur la santé au Sahel au pas de temps hebdomadaire. La deuxième partie sera quant à elle, dédiée à l'amélioration de la représentativité de cette mesure pour décrire les conditions de surfaces dans ce cadre spécifique.

1. La validation spécifique de l'AI dans le cadre des études d'impact des poussières désertiques sur les épidémies de méningites

1.1. Introduction de l'article "Suitability of OMI aerosol index to reflect mineral dust surface conditions : Preliminary application for studying the link with meningitis epidemics in the Sahel"

L'AI a déjà été utilisé pour étudier les relations existantes entre les épidémies de méningites, le climat et les poussières. Différents paramètres environnementaux dont l'AI-TOMS ont été analysés pour expliquer la répartition spatiale des épidémies et l'AI a été le paramètre "clé" (Molesworth *et al.*, 2003; Thomson *et al.*, 2006). Cependant, il est apparu comme étant négativement corrélé aux incidences annuelles des méningites. En effet, le maximum des concentrations de poussières au niveau du sol a lieu durant le cœur de la saison sèche (mars), alors que pendant la mousson africaine, les poussières sont généralement transportées en altitude. Ainsi, l'AI observe un maximum en juin car cet indice est sensible à l'altitude des poussières.

Au chapitre 2, l'AI a été comparé aux mesures d'AOT et de PM à Banizoumbou (Niger) et à Cinzana (Mali), et nous avons montré qu'il existe des différences entre ces trois mesures. Durant le cœur de la saison sèche (le 1^{er} trimestre de l'année), les poussières sont transportées au niveau du sol (Léon *et al.*, 2009; Marticorena *et al.*, 2010) alors que, durant le cœur de la saison humide, la couche de poussières passe au dessus du flux de mousson (Cavalieri *et al.*, 2010). Il semble que pendant la transition entre les deux saisons, il y ait un changement de la répartition en altitude des poussières désertiques au Sahel. Dès lors, il y a deux difficultés pour utiliser l'AI dans le cadre des études d'impact des poussières sur la santé. La première réside dans la capacité des AOT à décrire l'évolution des PM au niveau du sol. La deuxième difficulté est due au fait que l'AI n'est pas une épaisseur optique mais un indice semi-quantitatif sensible à l'altitude de la couche de poussières. Il est donc nécessaire d'analyser ces trois variables aux deux stations en séparant les phases du climat au cours de l'année.

Pour analyser ces trois mesures, il faut comparer les champs journaliers de l'AI couvrant tout le domaine obtenu à un instant, avec les mesures ponctuelles des instruments. Aux stations, ces mesures sont disponibles avec un pas de temps de 15 minutes pendant la journée pour les AOT, et de 5 minutes pendant la journée et la nuit pour les PM. Or, il y a un lien entre l'intégration temporelle faite en moyennant les mesures des stations et le nombre de pixels représentatifs de la même masse d'air. Les événements de poussières de la saison sèche persistent pendant plusieurs jours et ils concernent tout le Sahel. Par conséquent, une partie de la variabilité de l'AI, des AOT et des PM est composée par des caractéristiques de large échelle lorsque la moyenne est calculée au pas de temps hebdomadaire, c'est-à-dire le pas de temps des relevés épidémiologiques de l'OMS. La méthodologie proposée par cet article consiste, tout d'abord, à comparer la cohérence des résultats des trois variables au pas de

temps journalier et au pas de temps hebdomadaire. Puis, après avoir détaillé la pertinence de l'AI pour décrire la variabilité des poussières au niveau du sol, les cycles annuels moyens des trois variables sont analysés au pas de temps hebdomadaire, ainsi que la variabilité de ces cycles au cours des trois ans de mesures.



Suitability of OMI aerosol index to reflect mineral dust surface conditions: Preliminary application for studying the link with meningitis epidemics in the Sahel

A. Deroubaix^{a,b,*}, N. Martiny^a, I. Chiapello^c, B. Marticorena^d

^a Biogéosciences/CRC, UMR 6282 CNRS/Université de Bourgogne, France

^b LOCEAN, UMR 7617 CNRS/IRD/UPMC, IPLS, Paris, France

^c LOA, UMR 8518 CNRS/Université Lille 1, France

^d LISA, UMR 7583 CNRS, UPEC-UPD, IPLS, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 March 2012

Received in revised form 6 February 2013

Accepted 7 February 2013

Available online xxxx

Keywords:

Mineral dust

Aerosol index

AOT

Surface concentration

Meningitis

ABSTRACT

The aim of this study is to analyze the suitability of remotely-sensed aerosol retrievals to progress in the understanding of the influence of desert dust on health, and particularly on meningitis epidemics. In the Sahel, meningitis epidemics are a serious public health issue. Social factors are of prime importance in the dynamics of the epidemics, however climate and environmental factors are also suspected to play an important role.

This study focuses on three Sahelian countries (Burkina Faso, Mali and Niger) which are among the most concerned in the “meningitis belt” and affected by strong dust events every year. It investigates the capability of the aerosol index (AI) derived from OMI (ozone monitoring instrument) to represent the aerosol optical thickness (AOT) and the aerosol surface concentration (particulate matter $<10\ \mu\text{m}$; PM_{10}) at different time-steps. The comparison of the OMI-AI with ground-based measurements of AOT shows a good agreement at a daily time-step ($R \approx 0.7$). The correlation between OMI-AI and PM_{10} measurements is lower ($R \approx 0.3$) but it increases at a weekly time-step ($R \approx 0.5$). The difference in the level of correlation between the AOT and the PM_{10} is partly related to changes in the altitude of the dust layers, especially from April to June, the period of transition from the dry to the wet season. A temporal shift is observed in the occurrence of the maximum of PM_{10} concentration (March), of AOT (April) and of OMI-AI (June). Nevertheless, during the core of the dry season (January to March) when dust is transported at low altitude, the OMI-AI is able to correctly detect the dust events and to reproduce the dust variability at the regional scale.

For dust impact studies on health, only the surface level is relevant. Thus, we conclude that the OMI-AI is suitable especially at a weekly time-step from January to March. In particular for meningitis impact studies, it appears as suitable from the onset to the maximum of the epidemics. A preliminary investigation of the link between the OMI-AI and the WHO weekly national epidemiological reports reveals a 1-week time-lag between the occurrence of dust and meningitis during the increasing phase of the disease.

© 2013 Elsevier Inc. All rights reserved.

1. Introduction

The largest sources of mineral aerosols of the world have been proved to be located in the Sahara (Goudie & Middleton, 2001). Both models and observations show that Saharan dust yield over 40% of the global aerosol production from natural sources (Laurent et al., 2008; Ramanathan et al., 2001; Zender & Kwon, 2005). Mineral dust impacts the climate, through direct and indirect radiative forcing (Sokolik et al., 2001). The impact on human health has been demonstrated in several places far away from the Sahara (De Longueville et al., 2009), for instance with the daily mortality in Spain (Perez et al., 2008) or with asthma attacks in the Caribbean islands (Gyan et al., 2005; Prospero et

al., 2008). Although the European or American air quality standards for particulate matter smaller than $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) concentration are currently widely exceeded in the Sahel (Marticorena et al., 2010; De Longueville et al., 2010) deplores the lack of mineral dust impact studies on health in this area due to the lack of air quality monitoring stations.

In West Africa, the meningococcal meningitis (bacteria: *Neisseria meningitidis*, serogroups: A, C, W135 and X) outbreaks are a major public health problem and the serogroup A is responsible for 85% of the cases (Campagne et al., 1999). For instance 200,000 cases have been recorded (Greenwood, 1999) in 1996 throughout the “Meningitis Belt” defined by Lapeyssonnie in 1963. About 300 million people live in this area, which extends from Senegal to Ethiopia on a $10\text{--}15^\circ$ North latitudinal band. According to the World Health Organization (WHO), 10 to 20% of the cases are lethal and 10 to 20% of the survivors present neurological sequels. Social factors like number of people per house, exposure to smoke, immunity and population dynamics are critical to understand the spread of the bacteria. The major dust outbreaks occur

* Corresponding author at: UMR 6282 CNRS/Université de Bourgogne, Biogéosciences/Centre de Recherches de Climatologie, 6 Boulevard Gabriel, Bâtiment Sciences Gabriel, 21000 Dijon, France. Tel.: +33 3 80 39 38 21; fax: +33 3 80 39 57 41.

E-mail address: adrien.deroubaix@u-bourgogne.fr (A. Deroubaix).

during the winter dry season (December to April) dominated by warm and dry dust-laden winds coming from the North (Harmattan winds). Up to recently the influence of mineral dust on meningitis epidemics had been only suggested, with several possible mechanisms of interactions not fully understood (Thomson et al., 2006, 2009), as discussed in Section 3.3.

Recent studies achieved in the frame of the AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analyses) program strengthen the hypothesis of a significant impact of high dust load on meningitis epidemics in the Sahelian countries (Martiny & Chiapello, in press). Given the lack of ground-based dust measurements in this region, important progress would be made by using dust remote sensing products to investigate the role of the dust on meningitis epidemics. The use of long time series of aerosol products is required and quantitative products of aerosol optical thickness (AOT) are retrieved over continental surfaces from now on. AOT derived from MODIS (MODerate Imaging Spectro-radiometer) using the so-called “deep blue” algorithm (Hsu et al., 2004) has been calculated retrospectively for the period (1999–2010) but has not been deeply tested and validated over the North of Africa. AOT retrievals are also available from the multi-angle imaging spectroradiometer (MISR) and have been tested over desert sites (Martonchik et al., 2004). While several authors recognized the quality of the MISR AOT, their use for climatologic studies is limited by a poor spatial sampling (Christopher et al., 2008). The intercomparison of the most recent AOT products over land reveals large differences attributed to differences in the sensors and especially in the retrieval algorithms (Carboni et al., 2012).

Two semi-quantitative aerosol products, used for mineral dust climatology, are available for a longer period over the North of Africa. The infrared difference dust index (IDDI) is derived from the Meteosat radiances at the top of the atmosphere in the thermal infrared (10.5–12.5 μm) by Legrand et al. (1989). The IDDI is available at a 1° spatial resolution over Africa but only for the period 1984–1993 (Legrand et al., 2001). The AI (absorption aerosol index) product (Herman et al., 1997; Torres et al., 1998) is derived from radiances in the UV (at two wavelengths 354 nm and 388 nm). The AI algorithm was first applied to data from the TOMS (total ozone mapping spectrometer) sensors on Nimbus (1978–1993) and Earth-Probe (1996–2005) missions. Since 2004 the successor of TOMS, the OMI (ozone monitoring instrument) provides an AI product at a 0.25° spatial resolution. The perspective to link the TOMS-AI and the OMI-AI offers a chance to create the longest time-series relevant for the dust in desert areas. Indeed, the AI has been proved to be highly performing over continental surfaces like desert or semi-arid environments because the reflectivity of these surfaces in UV is low (Eck et al., 1987; Herman & Celarier, 1997). Like most of the satellite aerosol retrievals, the TOMS and OMI AI products have been validated by comparison to the NASA Aerosol Robotic Network (AERONET) sun photometer aerosol optical thickness (AOT) (Holben et al., 1998) at a global scale (Hsu et al., 1999; Torres et al., 2002, 2007). The AI has been widely used in the geophysical fields, for instance to characterize the dust sources over the Sahara (Engelstaedter et al., 2006; Prospero et al., 2002; Washington et al., 2003). Decadal trend studies of the dust transport over the North Atlantic have been achieved (Chiapello & Moulin, 2002; Chiapello et al., 2005) and the ability of TOMS-AI to detect the Saharan events has been demonstrated in comparison with PM₁₀ measurements at four remote places (Chiapello et al., 1999). Despite the sensitivity of the AI to the aerosol plume height, the AI is able to represent the dust features at the ground level as detecting dust event over continent and ocean (Chiapello et al., 1999; Ginoux & Torres, 2003). Recently, the OMI-AI has been used to improve the AOT retrieval from MODIS (Satheesh et al., 2009) or MISR in the North of Africa (Christopher et al., 2008). The TOMS-AI has already been used for meningitis impact studies in West Africa (Molesworth et al., 2003; Thomson et al., 2006). Among a set of societal, climate and environment variables, these studies conclude that dust is one of the most important risk factors for meningitis. Nonetheless the authors recommend to examine the ability of satellite proxies to represent the dust

concentrations at the ground level. The main motivation of this work is thus to evaluate the suitability of OMI-AI for health impact studies in West Africa and more specifically its capability to represent the surface concentration at the period of the meningitis epidemics in the Sahel.

This analysis focuses on Burkina Faso, Mali and Niger, which are among the most affected countries in the meningitis belt (Molesworth et al., 2002) and markedly affected by strong dust events every year (Morales, 1986; N'Tchayi et al., 1994). During the dry season from October to April, the Harmattan wind blows over the Sahel carrying mineral aerosols in the boundary layer (Léon et al., 2009). High aerosol concentrations at the surface are recorded every year during the core of the dry season (defined as January to March) due to transport at the continental scale (Marticorena et al., 2010). Our strategy is to examine, at different time-steps and periods of the year, coincident measurements of dust concentration recorded at the ground level which can be related to population exposure rates, ground based AOT data, and the OMI-AI retrievals. The OMI-AI, the AOT and the PM₁₀ are three independent measurements that all document the atmospheric aerosol load. The OMI-AI is a semi-quantitative parameter which has been shown to depend on the AOT that quantifies the extinction of visible radiation proportional to the vertically integrated aerosol atmospheric content. The PM₁₀ surface concentration is linked, to some extent, to the column concentration. But its representativity depends on the altitude and homogeneity of the dust layers. Two major questions are addressed in this study: (i) At which time-step are the OMI-AI, AOT and PM₁₀ in the best agreement in typical Sahelian sites? (ii) During which period is the OMI-AI able to reproduce the variability of the dust surface concentration? Section 2 describes the data sets and the methodology. Section 3 presents the OMI-AI compared to the AOT data sets from AERONET (Section 3.1) and to PM₁₀ measurements (Section 3.2), and ends by a preliminary analysis on meningitis epidemics at the national level (Section 3.3). The results are discussed and the conclusions are given in Section 4.

2. Data and methods

2.1. Aerosol index from the OMI satellite sensor

The OMI sensor is onboard the Aura spacecraft of the NASA Earth Observing System in the A-train. The equator crossing time of the “Afternoon train” is 13:45 (Levelt et al., 2006). Global daily level 3 (average covering the whole globe from 14 single orbits acquired each day) AI products are available since October 2004 at a spatial resolution of 13 × 24 km at nadir. The AI product is the spectral contrast of the effective radiance with aerosol effects and calculated radiance in the UV based on the radiative transfer theory and given a pure molecular atmosphere (i.e., Rayleigh particles for which the diameter is largely inferior to the wavelength of the incident signal). The AI has first been defined for TOMS radiances at 340 and 380 nm by Torres et al. (1998) and modified for OMI using the radiances at 354 and 388 nm by Torres et al. (2007) following:

$$AI = -100 \log_{10} \left(I^{354}_{\text{obs}} / I^{354}_{\text{calc}} \right) \quad (1)$$

where I^{354}_{obs} is the effective radiance observed at the top of the atmosphere and I^{354}_{calc} is the radiance estimated from I^{388} . AI positive values are associated with absorbing aerosols in the UV, mainly from mineral and volcanic aerosols as well as biomass burning, and negative values are associated with non-absorbing aerosols like sea salt particles.

Fig. 1 presents the 2005–2008 averaged AI from OMI in Africa North of the equator. In the Sahara, the OMI-AI reaches as high as those values previously obtained with TOMS-AI for the same locations (Engelstaedter & Washington, 2007a; Goudie & Middleton, 2001; Prospero et al., 2002; Washington et al., 2003). The region of the Bodélé depression in Chad recognized as the most active dust source (Engelstaedter et al., 2006; Washington et al., 2006) experiences the highest values (≈ 3.5) whereas

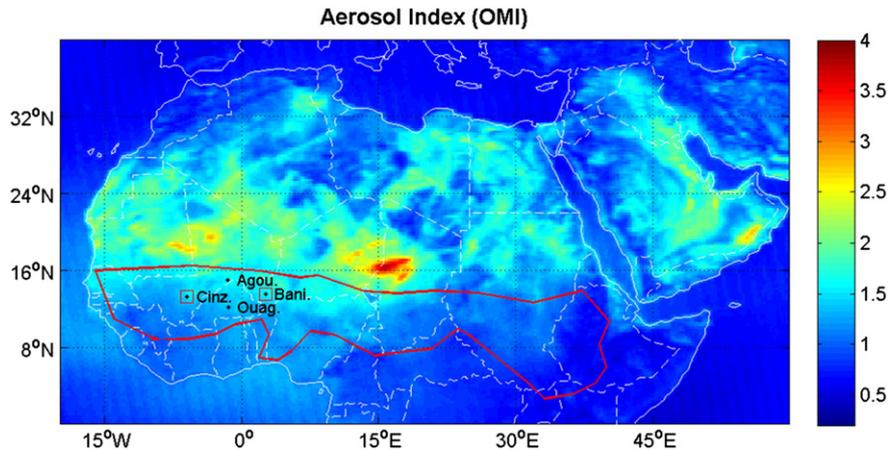


Fig. 1. West Africa long-term mean OMI-AI (at $0.25 \times 0.25^\circ$) averaged over 4 entire years (2005 to 2008). AERONET/PHOTONS Cinzana (Mali), Agoufou (Mali), Ouagadougou (Burkina Faso), Banizoumbou (Niger) used in this study are reported. Square indicates sites providing TEOM PM_{10} used in this study. The meningitis belt is indicated in red. (For interpretation of the references to color in this figure, the reader is referred to the web version of this article.)

more moderate values (≈ 2.5) are recorded for sources along the border between Mali and Mauritania or in South Algeria.

The OMI-AI values were extracted for the pixels corresponding to the four AERONET sites (locations indicated in Fig. 1, black dots) and the 8 surrounding pixels. A square of 3×3 OMI-AI pixels is thus averaged for each site, every day, for the period 2005–2008 (after 2009 the OMI sensor suffers from raw anomalies). Within those 9 pixels, the average AI is computed for AI higher than 0.2 to avoid cloud contamination (Torres et al., 2002).

2.2. Aerosol optical thickness

AERONET is an aerosol network constituted of autonomous sun photometers (Holben et al., 1998) deployed over more than 500 ground-based stations throughout the world. Within the AERONET/PHOTONS component in West Africa, four stations have been selected based on the temporal depth of their data sets and their common time-period with the OMI-AI (Fig. 1). There are two sites in Mali (Cinzana and Agoufou), one site in Burkina Faso (Ouagadougou) and one site in Niger (Banizoumbou). The period covered by the selected data sets is 2005–2009, except in Ouagadougou, for which the period is reduced to 2005–2007 (January). For the sun photometers of these sites, the irradiance (W/m^2) are measured in five spectral bands (440, 675, 870, 940, and 1020 nm) in order to retrieve the aerosol optical thickness (AOT) and the Angstrom exponent (α), at a 15-min time-step during the day. In this study, we consider the AOT at the 440 nm, which is the closest wavelength from UV (referred to as AOT_{440} in the following) and the $\alpha_{440/870}$ representative of an average aerosol spectral dependency according to the Angstrom law between 440 nm and 870 nm. The current study is based on level 2 AOT_{440} and $\alpha_{440/870}$, which are high-quality AERONET products corrected for clouds. Fig. 2 illustrates the daily mean AERONET L2 AOT_{440} and $\alpha_{440/870}$ data sets in Banizoumbou (Niger) in 2006. The AOT_{440} presents a clear seasonal cycle (Fig. 2a), with high daily values (reaching 4) in AOT_{440} from March to June, low values (below 1) from July to November, and intermediate values (1 to 2) from December to February. A dust outbreak is characterized by high AOT values associated with low Angstrom exponents (Pinker et al., 2001). The $\alpha_{440/870}$ ranges from -0.1 to 1.3 (Fig. 2b). On the 8th of March 2006, $\alpha_{440/870}$ reaches 0.2 when the yearly AOT_{440} maximum of 2006 is recorded. From February to June, it is lower than 0.5 (threshold on Fig. 2a and b), which clearly indicates the presence of coarse particles like the Saharan dust. On the contrary, $\alpha_{440/870}$ is generally greater than 0.5 from July to January, indicating the presence of finer particles (Haywood et al., 2008). In particular, in December and January, the AOT is impacted by the presence of carbonaceous aerosols emitted

from biomass burning (Ogunjobi et al., 2008). A threshold of 0.5 on $\alpha_{440/870}$ (Fig. 2a) is efficient to distinguish situations where mineral dust is dominant (Smirnov et al., 2000). For Banizoumbou, Fig. 2b highlights that high AOT_{440} values (> 1) are associated with dust particles, as they present a low spectral dependency (i.e., $\alpha_{440/870} < 0.5$), whereas the AOT_{440} between 0 and 1 may be associated with a mixture of large dust and fine particles. Those behaviors are typical of the Sahelian stations (Holben et al., 2001) and are observed at the three other selected sites (not shown).

In our analysis, we compare the satellite retrievals (i.e., OMI-AI) to the coincident ground-based AOT_{440} measured by the sun photometer. The AOT_{440} is first extracted at the closest satellite overpass time ± 1 h. The average of the AOT_{440} values is computed only if a minimum of two AOT_{440} measurements were available in 1 h (stability criteria). Then, in order to test if the OMI-AI is representative of the AOT_{440} measured during the day, the AOT_{440} was extracted at the satellite overpass time ± 5 h. The average of the AOT_{440} values was computed only if a minimum of ten AOT_{440} measurements were available during these 5 h (stability criteria). For our comparisons, we use the $\alpha_{440/870}$ threshold of 0.5 to distinguish the mineral dust events from the cases influenced by other aerosol species.

2.3. PM_{10} concentration measurements

The atmospheric concentrations of particulate matter lower than $10 \mu m$ in diameter (PM_{10}) have been acquired since January 2006 in the frame of the AMMA program at three Sahelian stations (Marticorena et al., 2010). The stations (Fig. 1, red squares) are located along the main dust transport pathway towards the Atlantic Ocean (near $13^\circ N$), in Banizoumbou (Niger), Cinzana (Mali) and M'Bour (Senegal) composing the Sahelian Dust Transect (SDT). They are all equipped with AERONET/PHOTONS sun photometers. Note that the data from the site of M'Bour are not considered here because the aerosol concentrations are affected by oceanic influences and anthropogenic aerosol sources; furthermore meningitis outbreaks seldom affect Senegal.

The PM_{10} concentration is determined at a 5-min time-step by a tapered element oscillating microbalance (TEOM) instrument equipped with a PM_{10} inlet (Marticorena et al., 2010). Fig. 3 presents the PM_{10} cycle measured in Banizoumbou in 2006 at different time-steps: the monthly scale highlights the annual cycle, while weekly/daily scales are more suitable for the impact analysis. The PM_{10} seasonal cycle presents similarities with that of AOT_{440} (Fig. 2a). Low values (below $100 \mu g/m^3$) are observed from July to November, and intermediate values ($100 \mu g/m^3$ to $1000 \mu g/m^3$) from December to June. Extremely high PM_{10} concentrations are monitored in this region and three main

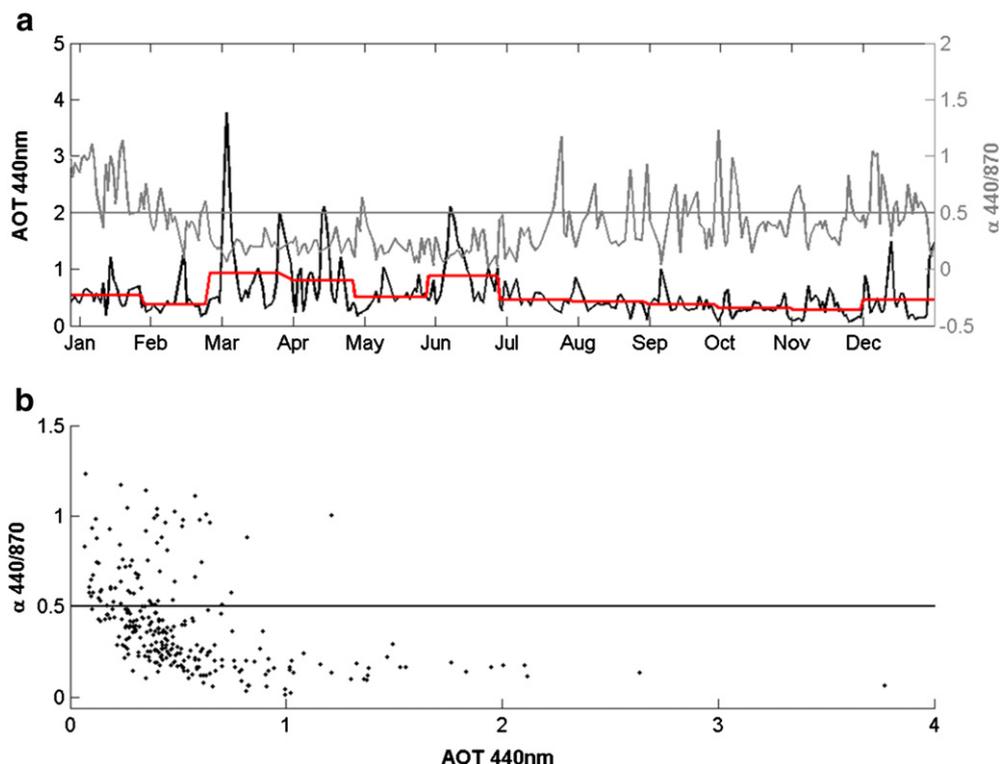


Fig. 2. a) Daily variation of AOT₄₄₀ (black line) and $\alpha_{440/870}$ (gray line) retrieved from AERONET/PHOTONS sun photometers at Banizoumbou (Niger) in 2006. The red line is the monthly average of AOT₄₄₀ and the gray line shows the threshold of the Angstrom exponent at 0.5; b) scatter plot of daily $\alpha_{440/870}$ versus daily AOT₄₄₀ at Banizoumbou (Niger) in 2006. (For interpretation of the references to color in this figure, the reader is referred to the web version of this article.)

peaks are observed in Fig. 3: in December and in March during the core of the dry season due to regional dust transport; and in June at the beginning of the wet season due to local mesoscale convective system (Marticorena et al., 2010). The choice of the time-step is essential to focus on a specific process, for instance concentration reaches

3410 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for the daily average (in June), 1046 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for the weekly average (in March), 407 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for the monthly average (in March); but concentration reaches 4812 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at a 5-min time-step (in June; not shown in Fig. 3). To compare OMI-AI with PM₁₀ data sets, we use the same temporal averages as for ground-based AOT₄₄₀ except that a

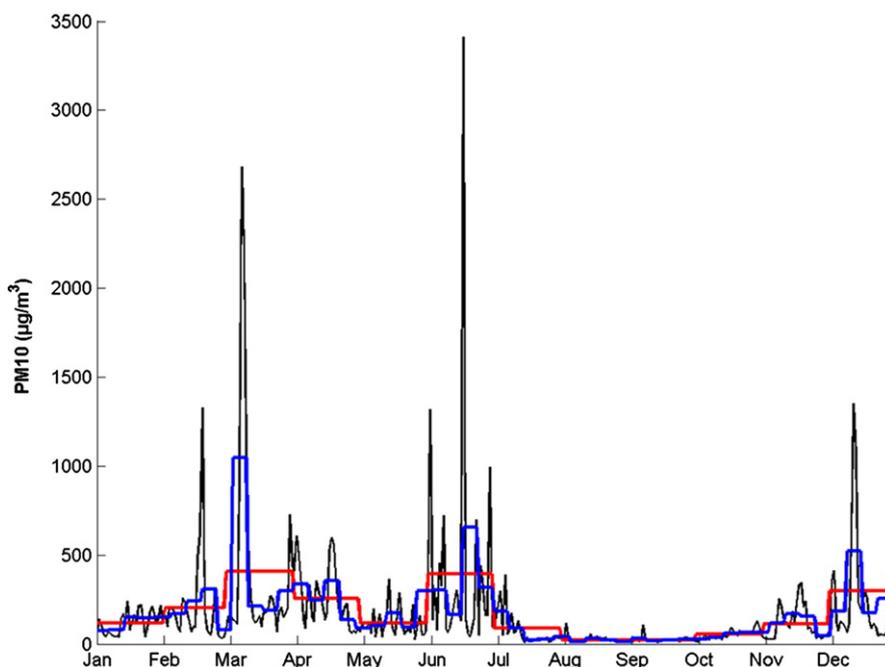


Fig. 3. PM₁₀ concentrations measured by TEOM in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for different average steps (daily: black line/weekly: blue line/monthly: red line) during 2006 in Banizoumbou (Niger). (For interpretation of the references to color in this figure, the reader is referred to the web version of this article.)

supplementary 24-hour average is computed in order to investigate the importance of diurnal variations (no criterion on the number of available measurements per hour is applied).

2.4. Meningitis data set

The weekly surveillance of the meningococcal meningitis is made by the World Health Organization (WHO). A data set of the number of “suspected” cases recorded in the meningitis belt over three years (2005 to 2007) already used in Agier et al. (2013), has been used in this study. The national incidence (referred as “NI” in the following) is this number of cases divided by the population. Recently, this data set has been used to investigate the link between climate factors and meningitis outbreaks in Mali (Sultan et al., 2005), Burkina Faso, and Niger (Yaka et al., 2008).

2.5. Statistical methodology

This analysis only uses descriptive statistics; the scatter plot of the OMI-AI with ground-based data sets (AOT_{440} or PM_{10}) is characterized by a distribution ellipse. After the standardization of the two data sets: $(X - \text{mean}X)/\text{std}X$ and $(Y - \text{mean}Y)/\text{std}Y$ (std stands for standard deviation), the main axis is obtained by minimizing the orthogonal distance to the regression line. The orthogonal regression or major axis regression (i.e., the slope and intercept of this line) is calculated instead of the ordinary least square because it is more suitable for remotely sensed measurements (Cohen et al., 2003). This method involves the uncertainties of both variables, and it allows describing the scatter plot at each station as explained by Ayers (2001) in the context of PM_{10} measurement for air quality. The correlation coefficient reflects the noisiness of the linear relationship, defined as $R = \text{cov}XY / (\text{std}X * \text{std}Y)$, X and Y being respectively the OMI-AI and the AOT_{440} or the PM_{10} time-series. The significance threshold is obtained based on a Monte-Carlo test, it consists in 1000 random permutations

of the data and 1000 random R computed: the significance threshold is the percentile 95 (i.e., the 950th highest value). This is more adequate than the classical Bravais–Pearson significance test regarding the autocorrelation of the time-series used in the current study (Mann et al., 1998).

3. Results

3.1. Analysis of the OMI-AI/ AOT_{440} relationship

3.1.1. Influence of the Angstrom exponent

In the Sahel mineral dust can be mixed with other aerosols, in particular with carbonaceous aerosols from biomass burning in the beginning of the dry season (Haywood et al., 2008). Here a threshold of 0.5 for $\alpha_{440/870}$ (Section 2.2) is used to distinguish mineral dust cases from mixed aerosol situations. Fig. 4 presents the scatter plot between OMI-AI and AOT_{440} considering every common day of the period 2005–2008 in Cinzana, Agoufou and Banizoumbou and the period 2005–2006 in Ouagadougou. The number of “dusty” days is approximately the same for the different sites (between 800 and 900) except in Ouagadougou for which the studied period is restricted to 2005–2006 (about 200 points). The correlation coefficients between OMI-AI and AOT_{440} are always significant. They range from 0.6 in Cinzana to 0.7 in Agoufou, Banizoumbou and Ouagadougou. These results are in agreement with previous studies performed between the TOMS-AI and the AOT from AERONET (Hsu et al., 1999; Torres et al., 2002). It is interesting to note that the slopes of the linear regressions slightly vary from East to West, being greater in Cinzana (1.98) than in Banizoumbou (1.47), while Agoufou and Ouagadougou show intermediate values (1.89 and 1.77 respectively). Considering the cases corresponding to “all aerosols” (gray symbols and lines) with the influence of both dust and biomass burning particles adds about 20% of data at each site. These cases generally correspond to low AOT_{440} and OMI-AI values, so their weight in the linear regression may be weak.

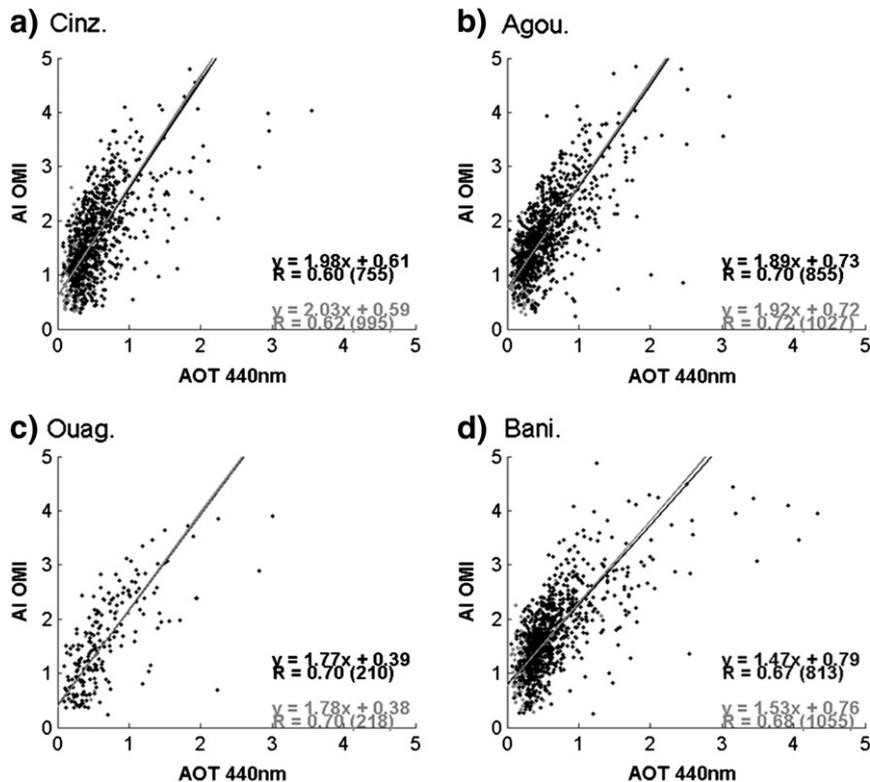


Fig. 4. Scatter plot between OMI-AI and AOT_{440} extracted at the satellite overpass time ± 1 h for every common day of the period 2005–2009 in a) Cinzana (Mali). b) Agoufou (Mali). c) Ouagadougou (Burkina Faso). d) Banizoumbou (Niger). The linear regression standing for dust aerosols (all aerosols) is indicated in black (gray).

The correlation coefficients between OMI-AI and AOT₄₄₀ for “all aerosols” cases are slightly higher than those obtained for the “dust” situations, and all are significant (0.62 in Cinzana, 0.70 in Ouagadougou, 0.68 in Banizoumbou, and 0.72 in Agoufou). For the four sites, the slopes are very close to those previously obtained for the “dust” cases. The influence of the aerosol type, as inferred from the Angstrom exponent, can be considered as limited. This seems to be due to the higher frequency of “dust” cases compared to mixed aerosol cases (the latter representing about 20%), and the highest aerosol loads are related to the “dust” cases. This result evidences that the influence of other aerosol types than dust on OMI-AI can be neglected in the Sahel.

3.1.2. Seasonality

Correlation coefficients between OMI-AI and AOT₄₄₀ are computed considering every common day of the whole year, and every common day during the core of the dry season (Table 1). For the two periods at all four sites, the correlation coefficients are significant and comparable (between 0.62 and 0.73). Table 2 presents the slopes and intercepts of the linear regressions; for the whole year (the core of the dry season) the slopes vary from the East: 1.53 (1.22) in Banizoumbou to the West: 2.03 (1.63) in Cinzana. For a given OMI-AI, the AOT₄₄₀ is higher during the core of the dry season than during the whole year because AI from OMI better captures the dust events moving at high altitude than the dust events moving close to the surface (Mahowald & Dufresne, 2004; De Graaf et al., 2005). During the dry season, the dust events which flow at relatively low altitude (Cavaliere et al., 2010) are retrieved by OMI with a weaker AI signal and the slopes of the major axis regression are all lower. Overall, these results confirm that the OMI-AI is significantly related to the AOT₄₄₀, whatever the period of the year.

3.1.3. OMI-AI representativity of daily integrated AOT₄₄₀

As a spatial integration, we use 8 OMI pixels surrounding the pixel of every sun photometer station (Section 2.1). This average of OMI-AI is then compared to the temporally AOT₄₄₀ averaged: (i) at ± 1 h around the satellite overpass time, (ii) at ± 5 h around the satellite overpass time. The correlation coefficients (Table 3) between the OMI-AI and the AOT₄₄₀ are almost the same (about ≈ 0.7) when considering the daily average (± 5 h) compared to ± 1 h overpass and the slopes remain stable (not shown). The lowest correlation (0.62) is obtained at the overpass time for Cinzana; it increases to 0.65 at the daily average. For each site, the major axis regression parameters (slopes and intercepts) are similar at a 5% error confidence interval from the overpass time to the daily average. Thus, at each site and for each period, the correlation coefficients are high enough to consider that the OMI-AI is representative of the daily mean AOT₄₄₀.

3.1.4. AOT₄₄₀ as a proxy of PM₁₀

AOT have already been used as an estimate of the PM₁₀ at ground level (Pelletier et al., 2007; Péré et al., 2009; Yahi et al., 2011) in several places of the world, but mainly in urban environments. Some of these studies (Pelletier et al., 2007; Yahi et al., 2011) used hierarchical classification and clustering to improve the relationship between the AOT and the surface concentration by distinguishing different meteorological patterns.

Table 1

Annual and seasonal correlation coefficients between OMI-AI and AOT₄₄₀ extracted at the satellite overpass time ± 1 h for the whole year and considering only the core of the dry season (i.e., from January to March).

	Whole year		Core dry season	
	R	N	R	N
Cinzana	0.62	995	0.65	584
Agoufou	0.72	1027	0.69	538
Ouagadougou	0.70	218	0.71	125
Banizoumbou	0.68	1055	0.73	603
All sites	0.66	3295	0.69	1850

Table 2

Annual and dry season slope and intercept of the linear regression between OMI-AI and AOT₄₄₀ extracted at the satellite overpass time ± 1 h for the whole year and considering only the core of the dry season (i.e., from January to March).

	Whole year		Core dry season	
	Slope	Intercept	Slope	Intercept
Cinzana	2.03	0.59	1.63	0.82
Agoufou	1.92	0.72	1.63	0.87
Ouagadougou	1.78	0.38	1.60	0.53
Banizoumbou	1.53	0.76	1.22	0.94
All sites	1.78	0.69	1.44	0.87

Such studies have not yet been achieved in the Sahel, partly due to the lack of surface aerosol concentration measurements. In this region, the relationship is expected to vary with the time of day, and also between the dry and wet seasons because the altitude of the dust layer changes. Table 4 presents the correlation coefficients between the AOT₄₄₀ and PM₁₀ concentrations temporally averaged over the entire year at different time-steps: (i) at ± 1 h around the satellite overpass time (“overpass”), (ii) at ± 5 h around the satellite overpass time (“day”), (iii) at ± 12 h around the satellite overpass time (“24 h”), and (iv) over a week (a weekly average of the daily values). When increasing the integration time from 1 h to 1 week, the correlation coefficients remain stable ($R \approx 0.60$) in Cinzana. In particular, no difference is observed between the ± 5 h (“day”) and the 24 h (day + night) concentration averages. In Banizoumbou, the correlation coefficients decrease from the 5-hour average (i.e., daytime only) to the 24-hour average (i.e., daytime and nighttime) from 0.68 to 0.44. This suggests that the influence of the diurnal dust cycle is stronger in Banizoumbou than in Cinzana. By focusing on the core of the dry season, an improvement of the correlation coefficient is observed for every temporal average, especially for the weekly average in Banizoumbou from 0.64 to 0.82 and in Cinzana from 0.79 to 0.93. Finally, the use of the daily or weekly averages gives comparable correlations to those obtained with the hourly averages at the OMI overpass time in Cinzana and Banizoumbou. These results suggest that in the Sahel, the AOT can be used as an estimate of the PM₁₀ at the ground level, especially at a weekly time-step during the core of the dry season.

3.2. Suitability of the OMI-AI for the investigation of dust impact on meningitis

3.2.1. Analysis of the OMI-AI/PM₁₀ relationship

The aerosol concentrations (PM₁₀) have been temporally averaged and compared with the daily OMI-AI at the stations of Banizoumbou (Niger) and Cinzana (Mali) since 2006 (Table 5) for the whole year. The correlation coefficients between the OMI-AI and PM₁₀ at the time of the satellite overpass (or at a daily time-step) are weaker compared to those obtained with the AOT₄₄₀ (Table 5 versus Table 3): 0.34 versus 0.62 (overpass time) and 0.36 versus 0.65 (daily time-step) in Cinzana; 0.40 versus 0.68 (overpass time) and 0.37 versus 0.69 (daily time-step) in Banizoumbou. It shows that the OMI-AI is a better indicator of the vertically integrated dust amount than of the surface concentrations. This result was somehow expected, as both the OMI-AI and AOT₄₄₀

Table 3

Correlation coefficients between OMI-AI and AOT₄₄₀ extracted at the satellite overpass time ± 1 h (overpass column) and extracted at the satellite overpass time ± 5 h (column “day”) for the whole year.

	Overpass		Day	
	R	N	R	N
Cinzana	0.62	995	0.65	995
Agoufou	0.72	1027	0.73	1027
Ouagadougou	0.70	218	0.70	218
Banizoumbou	0.68	1055	0.69	1055
All sites	0.66	3295	0.68	3295

Table 4

Correlation coefficients between AOT₄₄₀ and PM₁₀ concentrations temporally averaged at ± 1 h around the satellite overpass time (column “overpass”), at ± 5 h around the satellite overpass time (column “day”), at ± 12 h around the satellite overpass time (column “24 h”), at a weekly time-step for the whole year.

	Overpass		Day		24 h		Weekly	
	R	N	R	N	R	N	R	N
Cinzana	0.60	799	0.58	813	0.59	813	0.64	151
Banizoumbou	0.81	771	0.68	776	0.44	776	0.79	144
All sites	0.73	1570	0.64	1589	0.46	1589	0.73	295

parameters are optical parameters integrated over the atmospheric column, contrary to PM₁₀ which results from surface measurements. At a 24-hour time-step, the OMI-AI/PM₁₀ correlation is weaker in Banizoumbou (0.27) than in Cinzana (0.36), which may be explained by a stronger diurnal cycle of the concentrations in Banizoumbou than in Cinzana, as previously shown by the PM₁₀/AOT₄₄₀ relationship (Section 3.1.4). In order to progress in our evaluation of the suitability of the OMI-AI for health impact studies, and specifically meningitis epidemics, we now examine a longer time-step.

3.2.2. OMI-AI at the 1-week epidemiological time-step

As the meningitis epidemiological reports are available at a weekly time-step, we compared the OMI-AI to the AOT₄₄₀ and the PM₁₀ at this time-step. An improvement of these relationships is expected at a weekly time-step because it reduces the range of variation; i.e., the standard deviation of both OMI-AI and AOT₄₄₀ (or PM₁₀) is lower than at a daily time-step. The goal of this section is to quantify this improvement. Fig. 5 presents the scatter plots of the OMI-AI versus the AOT₄₄₀ and versus the PM₁₀ in Cinzana (Fig. 5a and b), and Banizoumbou (Fig. 5c and d). From the daily to the weekly time-step, the correlation coefficients increase by 10% for the OMI-AI/AOT₄₄₀ and 30% for the OMI-AI/PM₁₀ relationship. In Cinzana, the correlation coefficient between the weekly OMI-AI and the AOT₄₄₀ reaches 0.70 compared to 0.62 at a daily time-step and in Banizoumbou, it reaches 0.78 compared to 0.68 at a daily time-step. The slopes of the linear regression show the same East–West gradient with consistent values compared to the daily time-step at both sites. Regarding the correlation coefficients between the weekly OMI-AI and the PM₁₀, they reach 0.49 in Cinzana (compared to 0.36 at a daily time-step), and 0.45 in Banizoumbou (compared to 0.37 at a daily time-step). As a conclusion, the temporal integration of the aerosol parameters over one week significantly increases the agreement between the remotely sensed aerosol index and the ground-based measurements. More specifically, the OMI-AI is more representative of the aerosol concentrations at the surface at the weekly scale than at the daily scale. This may be explained by the reduction of the PM₁₀ concentration range (i.e., std PM₁₀) when increasing the averaging period (Fig. 3). Furthermore, the weekly time-step is in agreement with the typical duration of the dust storms which range from 1 to 6 days with mean of 2.5 days (Marticorena et al., 2010).

The final step of the comparison is to examine the capability of the OMI-AI to reproduce the annual cycle of the mineral dust content derived from the AOT₄₄₀ and PM₁₀. It is particularly important to evaluate

Table 5

Correlation coefficient between OMI-AI and PM₁₀ concentration temporally averaged at ± 1 h around the satellite overpass time (column “overpass”), at ± 5 h around the satellite overpass time (column “day”), at ± 12 h around the satellite overpass time (column “24 h”) for the whole year.

	Overpass		Day		24 h	
	R	N	R	N	R	N
Cinzana	0.34	942	0.36	961	0.36	961
Banizoumbou	0.40	890	0.37	896	0.27	896
All sites	0.36	1832	0.35	1857	0.27	1857

whether the weekly OMI-AI data set provides a consistent calendar compared to ground-based aerosol measurements. Indeed the influence of dust on meningitis is suspected to occur mainly during the increasing phase of the epidemics in the first trimester of the year. The weekly standardized mean annual cycles presented in Fig. 6 are computed from the values of Fig. 5 by subtracting the mean from each weekly value, then dividing by the standard deviation. For each variable, a clear annual cycle is observed at both Cinzana and Banizoumbou, mainly positive at the beginning of the year and crossing zero in July. From August to December the three parameters stay in agreement whereas three periods could be distinguished from January to July: from January to March, the core of the dry season; from April to May, the transition to the wet season; from June to July, the wet season settlement. During the first trimester, the aerosol layer is located close to the surface and a PM₁₀ maximum is obtained before week 10 (early March), which is consistent with dust-laden winds coming from the North-East (Harmattan winds) at this period. From April to early May, the AOT₄₄₀ maximum happens generally between week 13 to week 18. Finally, from late May to June the OMI-AI maximum occurs around week 25 when the PM₁₀ concentrations are already low. Consequently, the dust transport moves in higher altitudes and seems to be disconnected from the surface. All these behaviors are shared by the two stations in average for the period 2006–2008. Counter intuitively for the OMI-AI and PM₁₀ relationship, the correlation coefficient during the core of the dry season (0.35 in Cinzana and 0.41 in Banizoumbou) is lower than during the wet season (0.64 in Cinzana and 0.62 in Banizoumbou). This means that the linear assumption is not verified during the first trimester, which may be due to the high dust variability at this period of the year, better captured by the PM₁₀ surface measurements. Moreover, the slope of the OMI-AI and PM₁₀ relationship is expected to change along the year. Nevertheless, the weekly time-step improves the correlations between the OMI-AI and the PM₁₀ concentration (Table 5 compared to Fig. 5). On average, during the core of the dry season, the OMI-AI and PM₁₀ both experience an increasing phase. This agreement is not retrieved for the other periods of the year, and especially from April to June (Fig. 6): the OMI-AI tends to increase when the PM₁₀ decreases.

Fig. 7 presents the OMI-AI, AOT₄₄₀, and PM₁₀ time-series for the individual years 2006, 2007 and 2008. When looking at the PM₁₀ (“the ground truth”) for each year considered, the same events are retrieved by both stations during the first trimester. Banizoumbou monitored usually stronger dust episodes than Cinzana, which is consistent with the distance to the sources and the wind direction (Nord-East). This difference seems less clear for the AOT₄₄₀ even though the AOT₄₄₀ time-series are phased with those of PM₁₀. The OMI-AI identifies the dust events both in Cinzana and Banizoumbou during the core of the dry season and this is associated with moderate values (≈ 2). The other important result for the OMI-AI is that it systematically experiences high values from April to June (from 2 to 3), and it decreases from July to September (from 2 to 1). Both in Banizoumbou and in Cinzana, an intense dust peak is recorded on the 8th of March 2006 (Fig. 7a and b) due to a continental dust storm (Slingo et al., 2006). This outstanding event leads to the yearly maximum for the sun photometers (AOT₄₄₀) and TEOM measurement (PM₁₀), which also appears in the cycles of the Fig. 6a and b. For the OMI-AI however, this event leads to a local maximum in the first trimester but with only a moderate value considering the entire year. To conclude, focusing on the onset–peak period of the meningitis epidemics (January–March), the weekly dynamics of the OMI-AI, AOT₄₄₀ and PM₁₀ are consistent, whereas during the second trimester of the year (April–June), the OMI-AI increases, losing gradually the surface representativity.

3.3. A case study: OMI-AI and meningitis epidemics

The Harmattan winds have been proved to play on the timing of the meningitis epidemics (Sultan et al., 2005) and, to a lesser extent, their intensities (Yaka et al., 2008). Recently, the desert dust has been

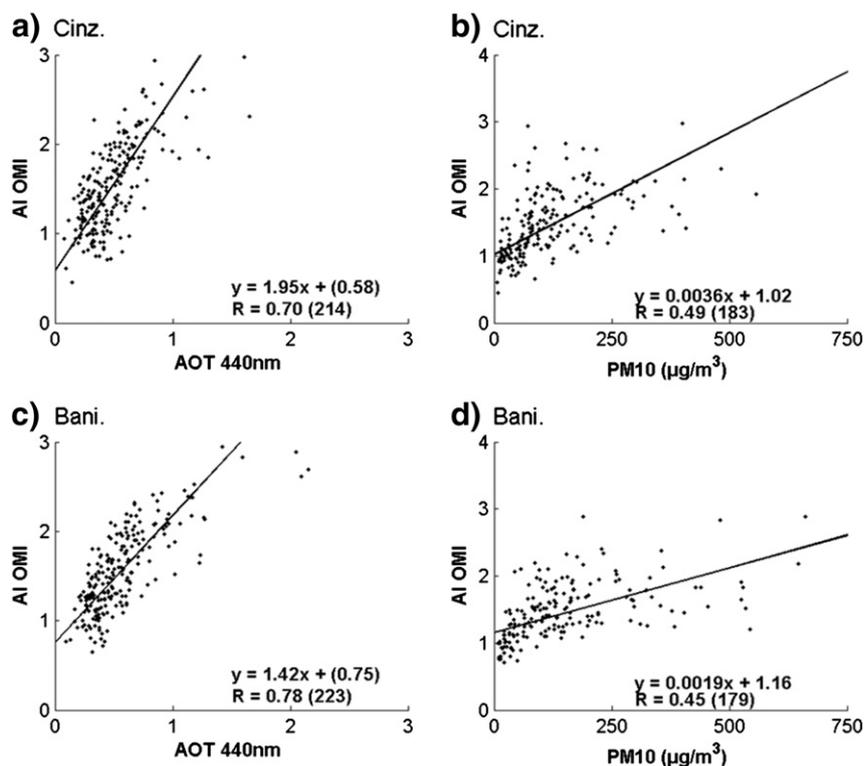


Fig. 5. (Left) scatter plot between weekly OMI-AI and AOT₄₄₀ for the period 2006–2008 (whole year) in: a) Cinzana (Mali); c) Banizoumbou (Niger). (Right) scatter plot between weekly OMI-AI and PM₁₀ concentrations for the period 2006–2009 in: b) Cinzana (Mali); d) Banizoumbou (Niger).

shown to impact on the meningitis incidence in West Africa (Martiny & Chiapello, *in press*). The onset of the meningitis season has been shown to be tightly related to dust flowing close to the surface from February to April because each meningitis peak has been shown to be preceded by a dust peak with a lead-time (ranging from 0 to 2 weeks). The most common explanation is that extreme air dryness combined with high dust

loads that persists until the end of the dry season can damage the pharyngeal mucosa. As a result, the colonizing meningococci are more likely to invade the epithelium (Mueller & Gessner, 2010). High dust loads persisting over weeks or extreme dust events may thus favor the meningococcal to pass into the blood. According to this hypothesis dust could be considered as a trigger of the epidemics. However, other mechanisms are

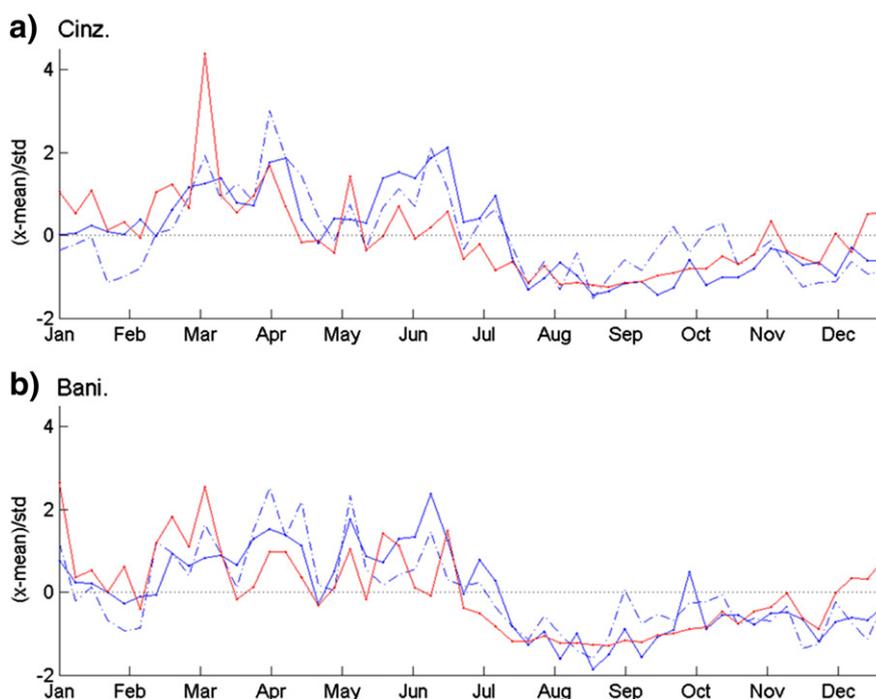


Fig. 6. Comparison between OMI-AI (blue), AOT₄₄₀ (dashed blue) and PM₁₀ concentration (red) standardized mean annual cycles for the period 2006–2008 at a weekly time-step in a) Cinzana (Mali). b) Banizoumbou (Niger) (For interpretation of the references to color in this figure, the reader is referred to the web version of this article.).

also possible which impact the bacteria carriage ratio by affecting the airborne dryness (thus the transmission likelihood), by preceding viral infection, by increasing the cough or people grouping during the night (e.g., Greenwood et al., 1984; Thomson et al., 2006, 2009; Mueller & Gessner, 2010). Another hypothesis is that mineral dust may bring iron into the bacteria, a nutrient required for bacteria growth (Jordan & Saunders, 2009) but there is only a little proportion of soluble iron in mineral dust (Zhu et al., 1997). Due to the difficulty in separating all these effects, dust load could be seen as a proxy of the intensity of all those mechanisms.

Until now, we have demonstrated the ability of the OMI-AI to represent the weekly ground dust concentration during the dry season. Assuming dust plays a role of trigger of the epidemics, a delay is expected between the dust concentration and the meningitis incidence increases. This time-lag should range from one to several weeks, due to the incubation time of the bacteria (Stephens et al., 2007). To test this hypothesis, the mean annual cycles of the national incidence (NI) is compared with the one of the OMI-AI in Burkina Faso, Mali or Niger. OMI-AI values have been extracted and averaged at a national scale. The NI has been correlated with the national AI with several time-lags from 0 to 4 weeks over two periods: (C1) trimester 1 (January–March) roughly corresponding to onset–maximum peak dates; (C2) trimesters 1 and 2 (January–June) roughly corresponding to the whole meningitis season. Our previous results have suggested that during the trimester 1, the OMI-AI is better linked to dust conditions at the surface, whereas the vertical distribution makes the OMI-AI more influenced by higher altitude aerosol layers during the trimester 2.

The important result shown by this analysis is that the determination coefficient (R^2) reaches high values in the three countries for a constant time-lag between the NI and the OMI-AI (Table 6). When considering the C1 period, R^2 is high for time-lags ranging from 0 to 2 weeks and maximum for a 1-week time-lag in the three countries ($R^2 = 0.73$ in Burkina Faso, $R^2 = 0.80$ in Niger and $R^2 = 0.89$ in Mali). The loss of consistence is clear for the period C2 (i.e., R^2 is null). The sensitivity to the number of weeks used to estimate the correlation for

C1 and C2 is very low (i.e., ± 2 weeks), reinforcing our conclusion. There is a clear decrease of the correlation between C1 and C2 which occurs around week 18 (i.e., early May). This suggests that April could be included in the C1 period. However, our previous results suggest that April must be carefully considered because this is the period of the highest AOT_{440} .

The increase of mineral aerosols as represented by the OMI-AI seems to match with the increasing phase of the epidemic season (C1). This preliminary analysis is consistent with the existence of a link between the OMI-AI and NI until March with a 1-week time-lag at the scale of the country. This encourages further investigations at a finer spatial scale such as the district scale. The 1-week time-lag suggests synchronization because dust floating close to the surface (period C1) may play a role in the increase of the meningitis cases, likely in association with specific meteorological conditions. For instance, Martiny and Chiapello (in press) illustrated the particular role of dust during the dry season on the onset and the intra-seasonal variability of the meningitis season. As a next step, the AI as well as other atmospheric parameters (such as humidity, temperature and wind) need to be taken into account to continue previous analyses made at the national scale (Martiny & Chiapello, in press; Sultan et al., 2005; Yaka et al., 2008) in order to better understand and forecast dust impacts on the onset, maximum and ending of the epidemics.

4. Discussion and conclusions

This study is dedicated to the evaluation of the suitability of the aerosol index (AI) from the ozone monitoring instrument (OMI) for dust impact studies on health in West Africa. Satellite data sets are powerful observation tools that can help to better understand the complex relationships between climate, dust and diseases, as they are available every day at a global scale. Over four years of OMI-AI data along with ground-based AERONET sun photometer AOT_{440} , and TEOM PM_{10} have been analyzed over the Sahel. The main question addressed by

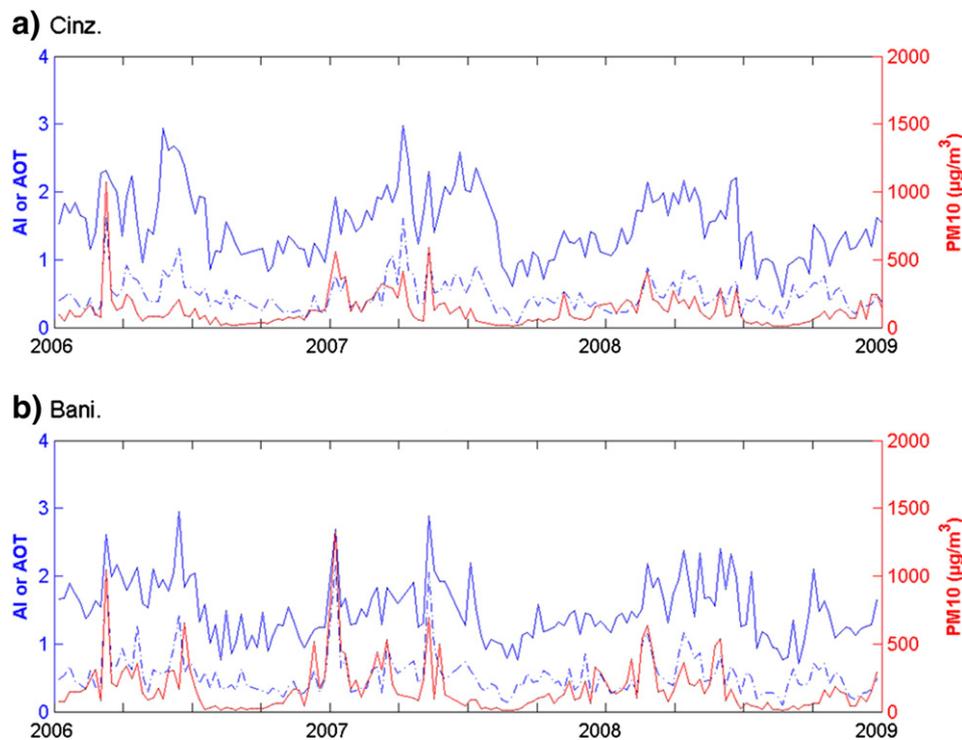


Fig. 7. Comparison between OMI-AI (blue), AOT_{440} (dashed blue) and PM_{10} concentration (red) for the period 2006–2008 at a weekly time-step in a) Cinzana (Mali). b) Banizoumbou (Niger) (For interpretation of the references to color in this figure, the reader is referred to the web version of this article.).

Table 6

Analysis of the OMI-AI/NI relationships: determination coefficients R^2 between the OMI-AI and national incidence (NI) considering different time-lags (from 0 to 4 weeks) and two distinct periods (trimester 1: "C1 column"; trimesters 1 and 2: "C2 column").

	Burkina Faso		Niger		Mali	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Lag 0	0.61	0.14	0.74	0.01	0.82	0.00
Lag 1	0.73	0.15	0.80	0.00	0.89	0.00
Lag 2	0.68	0.12	0.77	0.01	0.87	0.00
Lag 3	0.55	0.07	0.70	0.02	0.71	0.00
Lag 4	0.43	0.03	0.68	0.03	0.56	0.01

this analysis is: How to use the OMI-AI to investigate mineral dust impacts on health, and specifically meningitis epidemics, in the Sahel?

First of all, the OMI-AI is consistent with the AOT₄₄₀ measurements acquired on four Sahelian sites, for the whole year as well as for the core of the dry season (i.e., January–March), at the time of the satellite overpass, at the daily or at the weekly time-step. This means that the OMI-AI is significantly related to the AOT₄₄₀, which represents the vertically integrated dust load. Secondly, the ground-based AOT₄₄₀ has been shown to be related to the PM₁₀ at the time of the OMI overpass, at the daily or at the weekly time-step. The correlations between the OMI-AI and PM₁₀ in Niger (Banizoumbou) and Mali (Cinzana) explain less than 30% of the variance at a daily time-step. An important benefit for the variance is observed for the correlation between the OMI-AI and the PM₁₀ concentrations from the daily to the 3-day average (i.e., up to 30%) and slightly increase from the 3-day to the weekly average, in agreement with an average dust event duration of 2.5 days (Marticorena et al., 2010).

Focusing now on the OMI-AI, AOT₄₄₀ and PM₁₀ annual cycle comparison, for the two PM₁₀ stations, the maximum date happens in late March for the PM₁₀, in April–early May for the AOT₄₄₀ and in June for the OMI-AI. During the core of the dry season, at both locations the PM₁₀ maximum happens during the same week every year due to strong Harmattan winds. The transition to the wet season starts in April when the temperature is the highest and the surface pressure is the lowest associated with convection (Lavaysse et al., 2009). It coincides with the highest AOT₄₄₀ and high OMI-AI values, thus a maximum of the vertically integrated dust transported over the Sahel. The ratio of AOT₄₄₀ divided by PM₁₀ increases, suggesting a change in the aerosol vertical distribution compared to the core of the dry season. Then in May, the pre-onset of the monsoon happens when the inter-tropical front (the discontinuity in the wind direction) moves northward reaching the Sahel (Sultan et al., 2003). This front pushes in altitude the Harmattan flux and creates the Saharan Air Layer, leading to dust events in altitude captured by the OMI-AI time-series and not by the PM₁₀ measurements. Therefore, from April to June, the OMI-AI surface representativity decreases gradually until the monsoon flux arrival from the South. When the monsoon is clearly established, the OMI-AI remains high until July, whereas PM₁₀ concentrations are already low. Thus, there is a temporal shift between the maxima of the annual cycles in OMI-AI, AOT₄₄₀ and PM₁₀. However, during the first trimester of the year, the strong dust events recorded in the PM₁₀ measurements, lead to local maxima in the time-series of the OMI-AI at Banizoumbou and Cinzana (Fig. 7). This means that the OMI-AI in the core of the dry season (the increase phase of the meningitis season) is able to reproduce the weekly variability of the AOT₄₄₀ and the PM₁₀ measurements and to detect the dust events when the dust concentrations at the surface are the highest. This is a very important result in terms of dust impact studies on health. An effect of the high dust concentration is expected after several weeks (e.g., De Longueville et al., 2010; Mueller & Gessner, 2010). Martiny and Chiappello (in press) suggest that dust may play a role on the onset of the meningitis season and its variability, especially from January to March. During this period, our results show that it is possible to use

OMI-AI to investigate the links between dust and meningitis. Indeed, for this period, the OMI-AI can be considered as representative of the weekly surface dust concentrations. This is satisfactory given the weekly time-step of the available epidemiological data sets. Even though the variance of PM₁₀ explained by the OMI-AI is lower than 50%, the timing of the dust concentration increase is well captured by the OMI-AI. For the period January–March, (i.e., from the onset to the maximum peak date), the correlation between the OMI-AI and the meningitis incidence at the national scale suggests a one week delay between the increase of dust load and of the epidemics. This delay may signify that dust acts as a trigger of the epidemics. The elaboration of a dust persistence index based on the OMI-AI at the district scale should be possible. Such an index could be used to investigate the effect of dust integrated over the whole dry season. The numerical model of the emission/transport/deposition of dust such as CHIMERE (Menut et al., 2009; Schmechtig et al., 2011), could also be tested for specific skills needed, as it has been done for ozone and mortality (Valari et al., 2011). The OMI-AI could also be included in meningitis early warning systems, such as those currently operational in Burkina Faso and Niger based on climate variables only, which explain 25% of the variance in meningitis (Yaka et al., 2008).

Finally, our study has been achieved using the PM₁₀ and AOT₄₄₀ measurements acquired at two Sahelian sites more than 1000 km apart. A difference in the slope of the OMI-AI/AOT₄₄₀ (or OMI-AI/PM₁₀) relationships is observed from West to East which can be explained by a lower altitude of the dust layer near the sources (Engelstaedter & Washington, 2007b). The differences noticed in the weekly PM₁₀ time-series between Banizoumbou and Cinzana are also observed by the OMI-AI during the core of the dry season. Our analysis is based on a spatially averaged OMI-AI (3×3 pixels) around the stations, showing the ability of the OMI-AI to provide relevant information on the dust surface concentration at a 0.75° resolution. The dust events are recorded at the two stations, suggesting a regional to continental scale of the dust events with several days of duration (Marticorena et al., 2010). Thus, spatial patterns of dust at the weekly time-step may concern a larger area than 0.75° with weak local differences inside. This suggests that the coarser resolution of the TOMS-AI would not prevent its use to detect dust episodes and monitor the weekly variability during the core of the dry season in the Sahel. The advantage of the TOMS-AI time series is to cover two important epidemics in 1986 and in 1996/1997 as a decadal cycle of the meningitis epidemics has been shown in West Africa (Broutin et al., 2007). Preliminary comparisons between TOMS-AI and AOT₄₄₀ provided similar correlation coefficients than with the OMI-AI. A combination of homogenized TOMS-AI and OMI-AI time-series would allow the investigation of the link between dust and meningitis epidemics over decades (TOMS: 1978–1993 and 1996–2005; OMI: 2004–2009).

To conclude, this study highlights the fact that the satellite aerosol products can improve our knowledge of the complex relationships between dust and diseases during the relevant period of high dust load, in regions such as the Sahel where stations measuring dust surface concentrations are rare.

Acknowledgments

This work was achieved in the framework of the ADCEM project (impacts of Desert Aerosols and Climate on Meningitis Epidemics in the Sahel) of the Paris Climate-Environment-Society consortium (<http://www.gisclimat.fr/en>) and funded by the ANSES (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail). The study was also supported by the French component of the African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA) International program. Based on a French initiative, AMMA was built by an international scientific group and is currently funded by a large number of agencies, especially from France, UK, US and Africa. It has been the beneficiary of a major financial contribution from the European Community's Sixth Framework Research Program. The authors are grateful to the WHO for providing meningitis epidemiological data, and the LOA for providing

the AOT data for the AERONET/PHOTONS stations. We thank the PI investigators and their staff for establishing and maintaining the four sites used in this study. Calculations were performed using HPC resources from DSI-CCUB (Université de Bourgogne).

References

- Agier, L., Broutin, H., Bertherat, E., Djingarey, M. H., Lingani, C., Perea, W., et al. (2013). Timely detection of bacterial meningitis epidemics at district level: A study in three countries of the African meningitis belt (pp. 30–36). Oxford University Press.
- Ayers, G. P. (2001). Comment on regression analysis of air quality data. *Atmospheric Environment*, 35, 2423–2425.
- Broutin, H., Philippon, S., de Magny, G. C., Courel, M. F., Sultan, B., & Guegan, J. F. (2007). Comparative study of meningitis dynamics across nine African countries: A global perspective. *International Journal of Health Geographics*, 6–29, <http://dx.doi.org/10.1186/1476-072X-6-29>.
- Campagne, G., Schuchat, A., Djibo, S., Ousseini, A., Cisse, L., & Chippaux, J. P. (1999). *Epidemiology of bacterial meningitis in Niamey, Niger, 1981–96* (pp. 499–508) World Health Organization.
- Carboni, E., Thomas, G. E., Sayer, A. M., Siddans, R., Poulsen, C. A., Grainger, R. G., et al. (2012). Intercomparison of desert dust optical depth from satellite measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5, 1973–2002.
- Cavaliere, O., Cairo, F., Fierli, F., Di Donfrancesco, G., Snels, M., Viterbini, M., et al. (2010). Variability of aerosol vertical distribution in the Sahel. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 12005–12023.
- Chiappello, I., & Moulin, C. (2002). TOMS and Meteosat satellite records of the variability of African dust transport over the Atlantic during the last two decades (1979–1997). *Geophysical Research Letters*, 29, 17–11–17–14.
- Chiappello, I., Moulin, C., & Prospero, J. M. (2005). Understanding the long-term variability of African dust transport across the Atlantic as recorded in both Barbados surface concentrations and large-scale total ozone mapping spectrometer (TOMS) optical thickness. *Journal of Geophysical Research*, 110, D18S10.
- Chiappello, I., Prospero, J. M., Herman, J. R., & Hsu, N. C. (1999). Detection of mineral dust over the North Atlantic Ocean and Africa with the Nimbus 7 TOMS. *Journal of Geophysical Research*, 104, 9277–9291.
- Christopher, S. A., Gupta, P., Haywood, J., & Greed, G. (2008). Aerosol optical thicknesses over North Africa: 1. Development of a product for model validation using ozone monitoring instrument, multiangle imaging spectroradiometer, and aerosol robotic network. *Journal of Geophysical Research*, 113, D00C04.
- Cohen, W. B., Maier-Sperger, T. K., Gower, S. T., & Turner, D. P. (2003). An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*, 84, 561–571.
- De Graaf, M., Stammes, P., Torres, O., & Koelmeyer, R. B. A. (2005). *Absorbing aerosol index: Sensitivity analysis, application to GOME and comparison with TOMS*. Washington, DC: ETATS-UNIS: American Geophysical Union.
- De Longueville, F., Henry, S., & Ozer, P. (2009). Saharan dust pollution: Implications for the Sahel? *Epidemiology*, <http://dx.doi.org/10.1097/EDE.0b013e3181afef49>.
- De Longueville, F., Hountondji, Y. -C., Henry, S., & Ozer, P. (2010). What do we know about effects of desert dust on air quality and human health in West Africa compared to other regions? *The Science of the Total Environment*, 409, 1–8.
- Eck, T. F., Bhartia, P. K., Hwang, P. H., & Stowe, L. L. (1987). Reflectivity of earth's surface and clouds in ultraviolet from satellite observations. *Journal of Geophysical Research*, 92, 4287–4296.
- Engelstaedter, S., Tegen, I., & Washington, R. (2006). North African dust emissions and transport. *Earth-Science Reviews*, 79, 73–100.
- Engelstaedter, S., & Washington, R. (2007a). Atmospheric controls on the annual cycle of North African dust. *Journal of Geophysical Research*, 112, D03103.
- Engelstaedter, S., & Washington, R. (2007b). Temporal controls on global dust emissions: The role of surface gustiness. *Geophysical Research Letters*, 34, L15805.
- Ginoux, P., & Torres, O. (2003). Empirical TOMS index for dust aerosol: Applications to model validation and source characterization. *Journal of Geophysical Research*, 108, 4534.
- Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2001). Saharan dust storms: Nature and consequences. *Earth-Science Reviews*, 56, 179–204.
- Greenwood, B. (1999). Meningococcal meningitis in Africa. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 93, 341–353.
- Greenwood, B. M., Bradley, A. K., Blakebrough, I. S., Wali, S., & Whittle, H. C. (1984). Meningococcal disease and season in sub-Saharan Africa. *The Lancet*, 323, 1339–1342.
- Gyan, K., Henry, W., Lacaille, S., Laloo, A., Lamsee-Ebanks, C., McKay, S., et al. (2005). African dust clouds are associated with increased paediatric asthma accident and emergency admissions on the Caribbean island of Trinidad. *International Journal of Biometeorology*, 49, 371–376.
- Haywood, J. M., Pelon, J., Formenti, P., Bharmal, N., Brooks, M., Capes, G., et al. (2008). Overview of the dust and biomass-burning experiment and African Monsoon Multidisciplinary Analysis special observing period-0. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 113, 20.
- Herman, J. R., Bhartia, P. K., Torres, O., Hsu, C., Sefter, C., & Celarier, E. (1997). Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data. *Journal of Geophysical Research*, 102, 16911–16922.
- Herman, J. R., & Celarier, E. A. (1997). Earth surface reflectivity climatology at 340–380 nm from TOMS data. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 102, 28003–28011.
- Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J. P., Setzer, A., et al. (1998). AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66, 1–16.
- Holben, B. N., Tanre, D., Smirnov, A., Eck, T. F., Slutsker, I., Abuhassan, N., et al. (2001). An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 106, 12067–12097.
- Hsu, N. C., Herman, J. R., Torres, O., Holben, B. N., Tanre, D., Eck, T. F., et al. (1999). Comparisons of the TOMS aerosol index with sun-photometer aerosol optical thickness: Results and applications. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 104, 6269–6279.
- Hsu, N. C., Tsay, S. C., King, M. D., & Herman, J. R. (2004). Aerosol properties over bright-reflecting source regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42, 557–569.
- Jordan, P. W., & Saunders, N. J. (2009). Host iron binding proteins acting as niche indicators for *Neisseria meningitidis*. *PLoS One*, 4, 13.
- Lapeyssonnie, L. (1963). Cerebrospinal meningitis in Africa. *Bulletin of the World Health Organization*, 28, 1–114 (Suppl.).
- Laurent, B., Marticorena, B., Bergametti, G., Leon, J. F., & Mahowald, N. M. (2008). Modeling mineral dust emissions from the Sahara desert using new surface properties and soil database. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 113, 20, <http://dx.doi.org/10.1029/2007JD009484>.
- Lavaysse, C., Flamant, C., Janicot, S., Parker, D., Lafore, J. P., Sultan, B., et al. (2009). Seasonal evolution of the West African heat low: A climatological perspective. *Climate Dynamics*, 33, 313–330.
- Legrand, M., Bertrand, J. J., Desbois, M., Menenger, L., & Fouquart, Y. (1989). The potential of infrared satellite data for the retrieval of Saharan-dust optical depth over Africa. *Journal of Applied Meteorology*, 28, 309–319.
- Legrand, M., Plana-Fattori, A., & N'Doumé, C. (2001). Satellite detection of dust using the IR imagery of Meteosat 1. Infrared difference dust index. *Journal of Geophysical Research*, 106, 18251–18274.
- Léon, J. F., Derimian, Y., Chiappello, I., Tanré, D., Podvin, T., Chatenet, B., et al. (2009). Aerosol vertical distribution and optical properties over M'Bour (16.96° W; 14.39° N), Senegal from 2006 to 2008. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 9249–9261.
- Levelt, P. F., van den Oord, G. H. J., Dobber, M. R., Malkki, A., Huib, V., Johan de, V., et al. (2006). The ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 1093–1101.
- Mahowald, N. M., & Dufresne, J.-L. (2004). Sensitivity of TOMS aerosol index to boundary layer height: Implications for detection of mineral aerosol sources. *Geophysical Research Letters*, 31, L03103.
- Mann, M. E., Bradley, R. S., & Hughes, M. K. (1998). Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, 392, 779–787.
- Marticorena, B., Chatenet, B., Rajot, J. L., Traore, S., Coulibaly, M., Diallo, A., et al. (2010). Temporal variability of mineral dust concentrations over West Africa: Analyses of a pluriannual monitoring from the AMMA Sahelian dust transect. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 8899–8915.
- Martiny, N., & Chiappello, I. (in press). Assessments for the impact of mineral dust on the meningitis incidence in West Africa. *Atmospheric Environment*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.016>.
- Martonchik, J. V., Diner, D. J., Kahn, R., Gaitley, B., & Holben, B. N. (2004). Comparison of MISR and AERONET aerosol optical depths over desert sites. *Geophysical Research Letters*, 31, L16102.
- Menut, L., Chiappello, I., & Moulin, C. (2009). Predictability of mineral dust concentrations: The African Monsoon Multidisciplinary Analysis first short observation period forecasted with CHIMERE-DUST. *Journal of Geophysical Research*, 114, D07202.
- Molesworth, A. M., Cuevas, L. E., Connor, S. J., Morse, A. P., & Thomson, M. C. (2003). Environmental risk and meningitis epidemics in Africa. *Emerging Infectious Diseases*, 9, 1287–1293.
- Molesworth, A. M., Thomson, M. C., Connor, S. J., Cresswell, M. P., Morse, A. P., Shears, P., et al. (2002). Where is the meningitis belt? Defining an area at risk of epidemic meningitis in Africa. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 96, 242–249.
- Morales, C. (1986). The airborne transport of Saharan dust: A review. *Climatic Change*, 9, 219–241.
- Mueller, J. E., & Gessner, B. D. (2010). A hypothetical explanatory model for meningococcal meningitis in the African meningitis belt. *International Journal of Infectious Diseases*, 14, E553–E559.
- N'Tchay, G. M., Bertrand, J., Legrand, M., & Baudet, J. (1994). Temporal and spatial variations of the atmospheric dust loading throughout West Africa over the last thirty years. *Annales Geophysicae*, 12, 265–273.
- Ogunjobi, K. O., He, Z., & Simmer, C. (2008). Spectral aerosol optical properties from AERONET sun-photometric measurements over West Africa. *Atmospheric Research*, 88, 89–107.
- Pelletier, B., Santer, R., & Vidot, J. (2007). Retrieving of particulate matter from optical measurements: A semiparametric approach. *Journal of Geophysical Research*, 112, D06208.
- Péré, J. C., Pont, V., Mallet, M., & Bessagnet, B. (2009). Mapping of PM10 surface concentrations derived from satellite observations of aerosol optical thickness over South-Eastern France. *Atmospheric Research*, 91, 1–8.
- Perez, L., Tobias, A., Querol, X., Künzli, N., Pey, J., Alastuey, A., et al. (2008). Coarse particles from Saharan dust and daily mortality. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 19, 800–807.
- Pinker, R. T., Pandithurai, G., Holben, B. N., Dubovik, O., & Aro, T. O. (2001). A dust outbreak episode in sub-Sahel West Africa. *Journal of Geophysical Research*, 106, 22923–22930.
- Prospero, J. M., Blades, E., Naidu, R., Mathison, G., Thani, H., & Lavoie, M. C. (2008). Relationship between African dust carried in the Atlantic trade winds and surges in pediatric asthma attendances in the Caribbean. *International Journal of Biometeorology*, 52, 823–832.

- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., & Gill, T. E. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics*, 40, 31.
- Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., & Rosenfeld, D. (2001). Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, 294, 2119–2124.
- Satheesh, S. K., Torres, O., Remer, L. A., Babu, S. S., Vinoj, V., Eck, T. F., et al. (2009). Improved assessment of aerosol absorption using OMI-MODIS joint retrieval. *Journal of Geophysical Research*, 114, D05209.
- Schmechtig, C., Marticorena, B., Chatenet, B., Bergametti, G., Rajot, J. L., & Coman, A. (2011). Simulation of the mineral dust content over Western Africa from the event to the annual scale with the CHIMERE-DUST model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 7185–7207.
- Slingo, A., Ackerman, T. P., Allan, R. P., Kassianov, E. I., McFarlane, S. A., Robinson, G. J., et al. (2006). Observations of the impact of a major Saharan dust storm on the atmospheric radiation balance. *Geophysical Research Letters*, 33, L24817.
- Smirnov, A., Holben, B. N., Savoie, D., Prospero, J. M., Kaufman, Y. J., Tanre, D., et al. (2000). Relationship between column aerosol optical thickness and in situ ground based dust concentrations over Barbados. *Geophysical Research Letters*, 27, 1643–1646.
- Sokolik, I. N., Winker, D. M., Bergametti, G., Gillette, D. A., Carmichael, G., Kaufman, Y. J., et al. (2001). Introduction to special section: Outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 106, 18015–18027.
- Stephens, D. S., Greenwood, B., & Brandtzaeg, P. (2007). Epidemic meningitis, meningococcaemia, and *Neisseria meningitidis*. *The Lancet*, 369, 2196–2210.
- Sultan, B., Janicot, S., & Diedhiou, A. (2003). The West African monsoon dynamics. Part I: Documentation of intraseasonal variability. *Journal of Climate*, 16, 3389–3406.
- Sultan, B., Labadi, K., Guegan, J. F., & Janicot, S. (2005). Climate drives the meningitis epidemics onset in West Africa. *PLoS Medicine*, 2, 43–49.
- Thomson, M. C., Jeanne, I., & Djingarey, M. (2009). Dust and epidemic meningitis in the Sahel: A public health and operational research perspective. *IOP conference series: Earth and environmental science*, 7, (pp. 012017).
- Thomson, M. C., Molesworth, A. M., Djingarey, M. H., Yameogo, K. R., Belanger, F., & Cuevas, L. E. (2006). Potential of environmental models to predict meningitis epidemics in Africa. *Tropical Medicine & International Health*, 11, 781–788.
- Torres, O., Bhartia, P. K., Herman, J. R., Ahmad, Z., & Gleason, J. (1998). Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: Theoretical basis. *Journal of Geophysical Research*, 103, 17099–17110.
- Torres, O., Bhartia, P. K., Herman, J. R., Sinyuk, A., Ginoux, P., & Holben, B. (2002). A long-term record of aerosol optical depth from TOMS observations and comparison to AERONET measurements. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59, 398–413.
- Torres, O., Tanskanen, A., Veihelmann, B., Ahn, C., Braak, R., Bhartia, P. K., et al. (2007). Aerosols and surface UV products from ozone monitoring instrument observations: An overview. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 112, 14.
- Valari, M., Menut, L., & Chatignoux, E. (2011). Using a chemistry transport model to account for the spatial variability of exposure concentrations in epidemiologic air pollution studies. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 61, 164–179.
- Washington, R., Todd, M. C., Lizcano, G., Tegen, I., Flamant, C., Koren, I., et al. (2006). Links between topography, wind, deflation, lakes and dust: The case of the Bodélé Depression, Chad. *Geophysical Research Letters*, 33, L09401.
- Washington, R., Todd, M., Middleton, N. J., & Goudie, A. S. (2003). Dust-storm source areas determined by the total ozone monitoring spectrometer and surface observations. *Annals of the Association of American Geographers*, 93, 297–313.
- Yahi, H., Santer, R., Weill, A., Crepon, M., & Thiria, S. (2011). Exploratory study for estimating atmospheric low level particle pollution based on vertical integrated optical measurements. *Atmospheric Environment*, 45, 3891–3902.
- Yaka, P., Sultan, B., Broutin, H., Janicot, S., Philippon, S., & Fourquet, N. (2008). Relationships between climate and year-to-year variability in meningitis outbreaks: A case study in Burkina Faso and Niger. *International Journal of Health Geographics*, 7, 13.
- Zender, C. S., & Kwon, E. Y. (2005). Regional contrasts in dust emission responses to climate. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 110, 7.
- Zhu, X. R., Prospero, J. M., & Millero, F. J. (1997). Diel variability of soluble Fe(II) and soluble total Fe in North African dust in the trade winds at Barbados. *Journal of Geophysical Research*, 102, 21297–21305.

1.2. Résultats principaux de l'article

Cet article a permis de préciser la pertinence de la mesure de l'AI mais aussi des AOT pour décrire les concentrations de poussières au sol dans le cadre des études sanitaires au Sahel. Les relations entre les stations et les différences entre les cycles annuels moyens des trois variables ont été décrites au pas temps hebdomadaire et analysées par comparaison avec les résultats obtenus aux pas de temps inférieurs. Tout d'abord, les coefficients de corrélation entre l'AI-OMI et les AOT sont légèrement plus élevés en passant du pas de temps horaire au pas de temps journalier. Nous avons constaté qu'environ 50% de la variabilité des AOT mesurées au sol est reproduite par la mesure de l'AI-OMI.

En revanche, les corrélations entre les PM et l'AI-OMI sont faibles ($R = 0,3$), à peine 10% de la variabilité des poussières est reproduite au pas de temps journalier. Ces corrélations augmentent au pas de temps hebdomadaire ($R = 0,5$) de la même manière aux deux stations. En fait, à partir de trois jours, les coefficients de corrélation augmentent. Ce résultat est cohérent avec la durée typique des événements de 2,5 jours (Marticorena *et al.*, 2010), et avec la durée des situations météorologiques associées (Yahi *et al.*, 2013). Par conséquent, au pas de temps hebdomadaire, la variabilité aux stations est composée d'une grande partie identique partout au Sahel. D'ailleurs, lorsqu'il y a un événement de poussières de large échelle, il est retrouvé durant la même semaine aux deux stations dans les deux séries temporelles de PM et l'AI-OMI.

Le cœur de la saison sèche, défini de janvier à mars, a été étudié spécifiquement car les poussières sont alors transportées dans la couche de surface et c'est la phase ascendante des épidémies. Pendant cette période, les AOT sont un bon indicateur de la variation des PM et nous avons vu que l'AI-OMI est capable de bien représenter les AOT, et donc les PM au sol aussi au pas de temps hebdomadaire. Ensuite, il y a un décalage des maxima des cycles annuels moyens des trois variables. Aux deux stations, le maximum des PM au sol a lieu au 1^{er} trimestre alors qu'il y a consécutivement, le maximum d'AOT puis de l'AI pendant le 2^{ème} trimestre. Dès lors, la période de confiance pour étudier les liens avec les épidémies de méningites ne peut pas s'étendre du 1^{er} trimestre au 2^{ème} trimestre entièrement. En s'appuyant sur le décalage de 0 à 2 semaines déjà établi entre les AOT et les incidences (nationales et hebdomadaires) des méningites (Martiny et Chiapello, 2013), la période de confiance a pu être établie jusqu'à la semaine 18, ce qui correspond aussi à la date de "pré-onset" de la mousson (Sultan et Janicot, 2003; Sultan *et al.*, 2003).

L'AI retrouve le signal du transport de poussières de large échelle au pas de temps hebdomadaire. L'étude des cycles annuels moyens des trois variables suggère aussi comment il serait possible de modifier l'AI pour mieux représenter les PM. Comme les poussières sont transportées en surface au 1^{er} trimestre et en altitude au 3^{ème} trimestre, il y a un changement au 2^{ème} trimestre des caractéristiques du transport des poussières. En effet, le signal des mesures intégrées (AI et AOT) est plus fort au 2^{ème} trimestre que celui des PM et cela coïncide avec la période de forte température et de faible vent au Sahel (la DTS et le FIT). Cela laisse supposer que l'épaisseur de la couche de surface dans laquelle les poussières désertiques sont transportées, augmente entre le 1^{er} et le 2^{ème} trimestre. En d'autres termes, si l'on considère une même quantité de poussières transportée au 1^{er} ou au 2^{ème} trimestre (i.e. pour une même valeur d'AOT), les concentrations de PM mesurées au sol durant le 1^{er} trimestre sont supérieures à celles mesurées durant le 2^{ème} trimestre.

2. Développement d'une série temporelle d'AI adaptée aux impacts sur la santé au Sahel

Nous cherchons dans cette partie à obtenir une série temporelle représentative des poussières au niveau du sol à partir de l'AI-OMI. Premièrement, les relations entre les trois variables ainsi que les caractéristiques partagées par les deux stations de mesures des AOT et des PM sont analysées conformément aux conclusions du chapitre 2. Deuxièmement, une méthode permettant de modifier l'AI partout sur notre domaine est proposée puis validée. Troisièmement, cette méthode est étendue aux AI-TOMS afin de créer une série temporelle d'AI transformé sur une période de 12 ans dans le cadre des études sanitaires.

2.1. Mise en évidence du potentiel des mesures de concentrations des poussières en surface pour la correction de l'AI

2.1.1. La variabilité des AI, AOT et PM aux stations

■ Les similitudes sahéliennes trimestrielles de l'AI et des PM

Tout d'abord, les valeurs hebdomadaires de l'AI et des PM sont analysées à partir de paramètres statistiques trimestriels (moyenne, écart-type, maximum et minimum) afin d'observer s'il y a une tendance identique aux deux stations chaque année (Tableau III.1).

A Banizoumbou comme à Cinzana, il y a une diminution de la moyenne trimestrielle des PM entre le 1^{er} trimestre et le 2^{ème} trimestre alors que pour l'AI, il y a une augmentation. En effet, la moyenne des PM est de 223 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Cinzana (300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement à Banizoumbou) au 1^{er} trimestre alors qu'au 2^{ème} trimestre, elle est de 152 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Cinzana (205 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement à Banizoumbou). De plus, on peut remarquer que, durant le 1^{er} trimestre, l'écart-type et le maximum des PM suivent la même diminution. Pour l'AI, le commentaire est opposé car il y a une augmentation de la moyenne trimestrielle entre le 1^{er} trimestre et le 2^{ème} trimestre. Au 1^{er} trimestre, l'AI est de 1,70 à Cinzana (1,67 respectivement à Banizoumbou) puis, au 2^{ème} trimestre, de 1,90 à Cinzana (1,83 respectivement à Banizoumbou). Il en est de même pour le maximum de l'AI. Au 3^{ème} trimestre, on constate que les valeurs de l'AI diminuent moins que les PM. Puis au 4^{ème} trimestre, les niveaux de PM augmentent plus que l'AI. Enfin, les valeurs de PM semblent être supérieures à Banizoumbou, en revanche ce constat n'est pas vrai pour l'AI.

■ La variabilité du décalage entre les PM, les AOT et l'AI

L'analyse conjointe des AOT et des PM vis-à-vis de l'AI peut permettre de comprendre ces différences puisque les AOT mesurent la quantité de poussières intégrée sur toute la colonne atmosphérique comme l'AI (mais de manière semi-quantitative). Dans les deux stations sahéliennes, un décalage des cycles des trois variables (PM, AOT et AI) décrivant les poussières a été constaté au cours des trois ans de données (Deroubaix *et al.*, 2013). La partie précédente a montré qu'il y a deux difficultés à surmonter avant d'utiliser l'AI dans le cadre des études d'impact des poussières désertiques sur la santé. D'une part, il faut s'assurer de la capacité de l'AI à représenter fidèlement une AOT durant les différentes périodes de l'année. D'autre part, il faut évaluer quelle est la capacité des AOT à donner une information sur les PM au cours de l'année, particulièrement pendant le 2^{ème} trimestre de l'année.

Tableau III.1. – Moyenne (Moy), écart-type (Ect), maximum (Max) et minimum (Min) trimestriels à partir des valeurs de PM hebdomadaire et de l'AI hebdomadaire à Cinzana et à Banizoumbou (2006-2008).

Banizoumbou				
Trimestre	1	2	3	4
PM				
Moy	223	152	36	100
Ect	183	108	36	58
Max	1108	574	171	271
Min	57	30	7	32
AI				
Moy	1,7	1,9	1,16	1,14
Ect	0,3	0,61	0,5	0,34
Max	2,47	3,25	2,97	2,61
Min	1,06	0,78	0,42	0,63
Cinzana				
Trimestre	1	2	3	4
PM				
Moy	300	205	30	144
Ect	295	171	18	104
Max	1488	691	86	441
Min	76	26	8	28
AI				
Moy	1,67	1,83	1,11	1,27
Ect	0,39	0,5	0,37	0,18
Max	2,94	2,89	2,29	1,73
Min	1,19	0,92	0,56	0,84

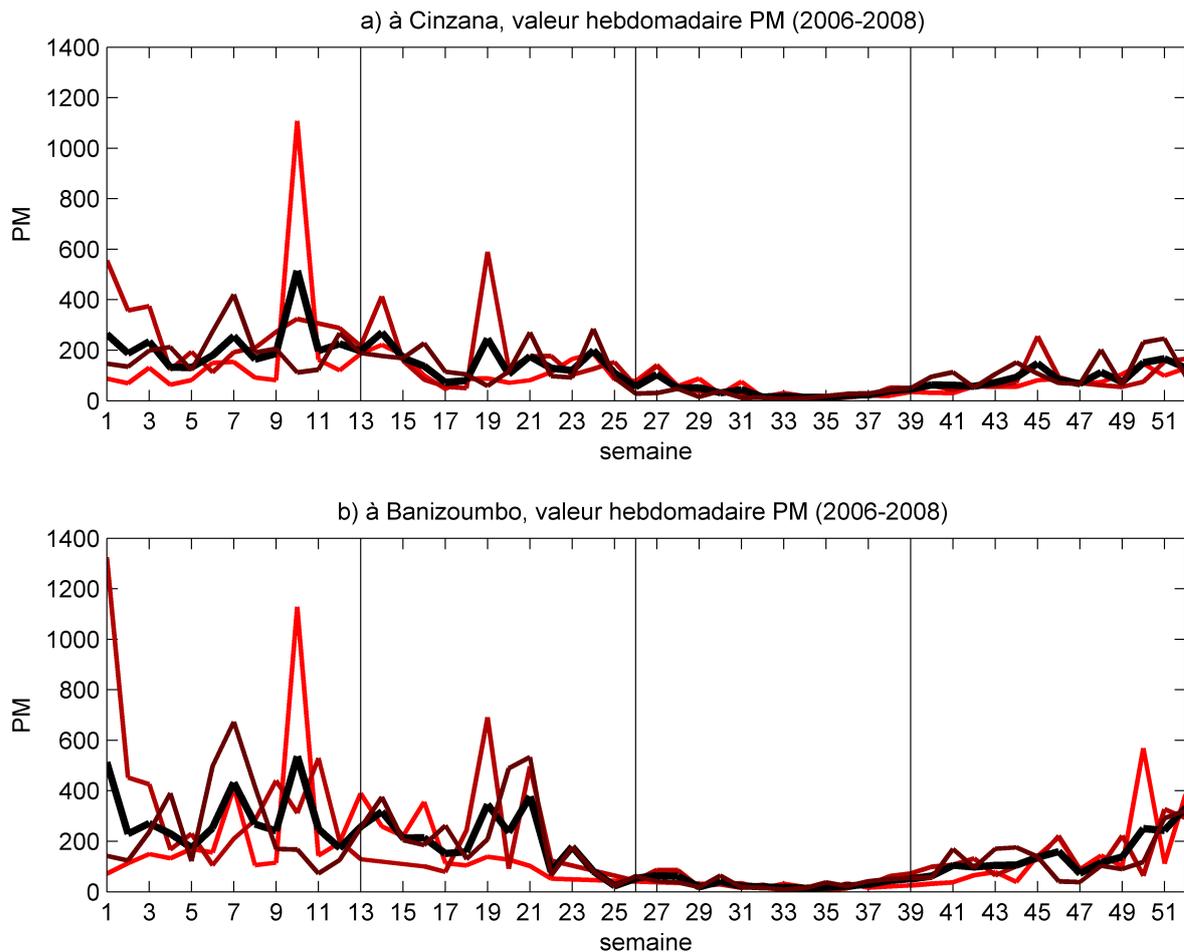


Figure III.1. – Comparaison des séries temporelles des PM (en dégradé de rouge : la plus claire est l'année 2006 et la plus foncée 2008) avec la moyenne des trois années (en noir) à Cinzana (a) et à Banizoumbou (b) de 2006 à 2008 au pas de temps hebdomadaire.

Nous cherchons des changements qui se reproduisent tous les ans au Sahel. La variabilité des trois variables est présentée au cours des trois ans de mesures sur les figures suivantes à Banizoumbou et à Cinzana (Figure III.1, Figure III.2 et Figure III.3) en superposant le cycle annuel moyen afin d'observer la variabilité interannuelle par trimestre.

On constate sur la Figure III.1 que la période de fortes concentrations de poussières a lieu pour les 3 années pendant le 1^{er} trimestre, c'est aussi la période correspondant aux événements intenses de poussières. Puis, les concentrations diminuent au 2^{ème} trimestre, en revanche il y a toujours des événements (des augmentations ponctuelles) dont l'intensité semble inférieure à celle des événements du 1^{er} trimestre. Durant la deuxième partie de l'année, on constate que la variabilité des PM est plus faible aux deux stations. Le maximum des cycles annuels moyens des PM des deux stations a lieu à la semaine 10. Cependant ce résultat est fortement contraint par un événement de poussières intenses d'échelle continentale déjà décrit précédemment (cf. chapitre 2, section II-2.1.1), ayant eu lieu la semaine du 8 mars 2006 (Slingo *et al.*, 2006; Marticorena *et al.*, 2010). Si l'on disposait d'une période plus longue, il est possible que ce résultat ne se retrouve pas. En dépit de cette possibilité, la semaine du maximum resterait au 1^{er} trimestre car, tous les ans, il y a au moins un événement intense de poussières durant ce trimestre. Le même examen doit maintenant être fait pour les mesures

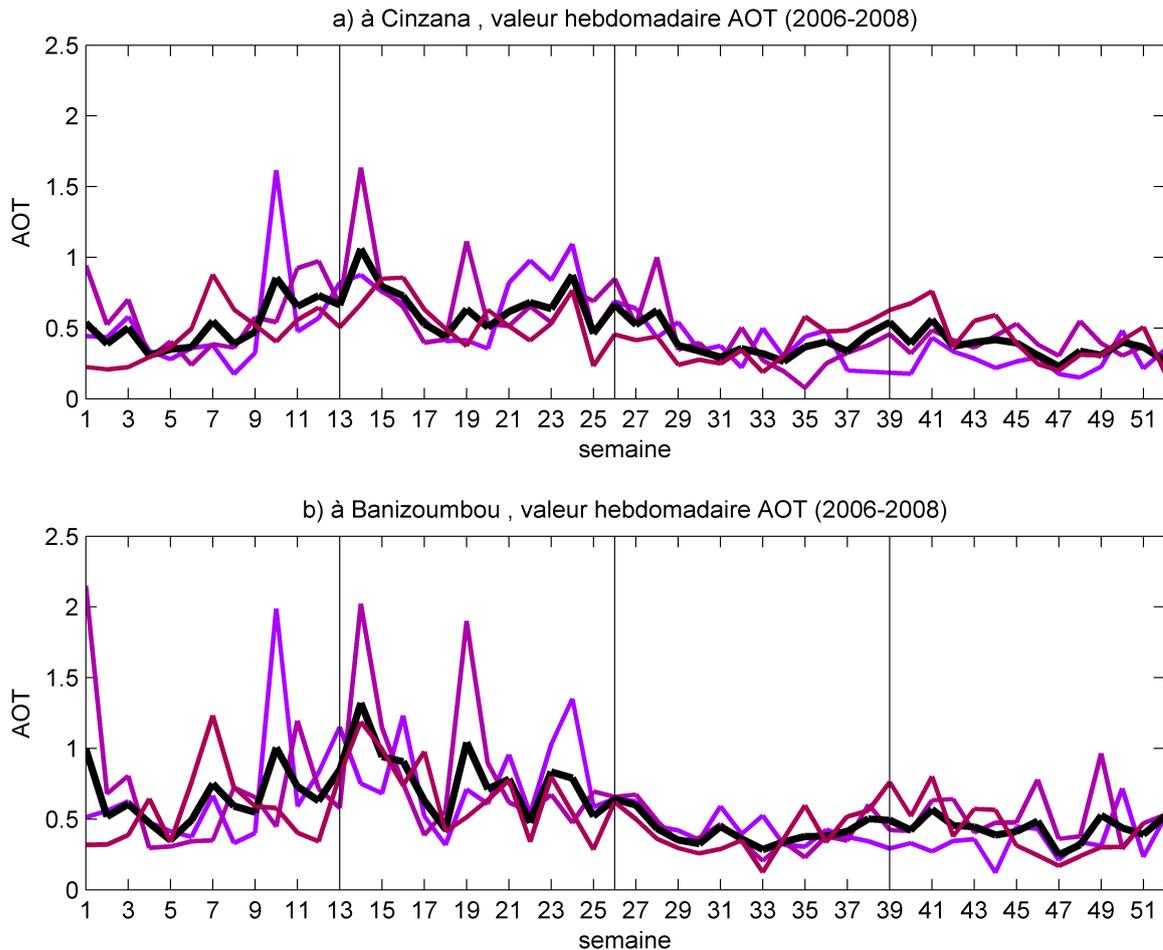


Figure III.2. – Comparaison des séries temporelles des AOT (en dégradé de violet : la plus claire est l'année 2006 et la plus foncée 2008) avec la moyenne des trois années (en noir) à Cinzana (a) et à Banizoumbou (b) de 2006 à 2008 au pas de temps hebdomadaire.

intégrées, c'est à dire les AOT puis l'AI.

En moyenne, le maximum des AOT hebdomadaires a lieu au début du 2^{ème} trimestre (semaine 14) mais ce maximum est très variable d'une année à l'autre (Figure III.2). Au cours des trois ans de mesures, les maxima d'AOT sont constatés au 1^{er} trimestre et au 2^{ème} trimestre. De plus, aux deux stations, le début du 2^{ème} trimestre semble être lié à des AOT supérieures à celles mesurées au 1^{er} trimestre.

En examinant la variabilité de l'AI par rapport à la moyenne hebdomadaire des trois années, on remarque que la période de fort AI et les événements d'AI intenses ont lieu pendant le 2^{ème} trimestre. A l'inverse des PM, les événements d'AI du 2^{ème} trimestre semblent supérieurs à ceux du 1^{er} trimestre. L'importance d'un ou deux événements de poussières se remarque dans les cycles annuels moyens des trois variables. Le maximum de l'AI a généralement lieu au mois de juin pendant la "pré-onset" de la mousson. Aux deux stations et chaque année, on peut remarquer qu'entre la fin du mois de juin et le début du mois de juillet, il y a une augmentation de l'AI alors que cette période est concomitante avec une diminution des PM. Il semble donc qu'il y ait la présence d'une couche de poussières majoritairement en altitude, et cela suggère que cette couche est passée au dessus de la couche d'air

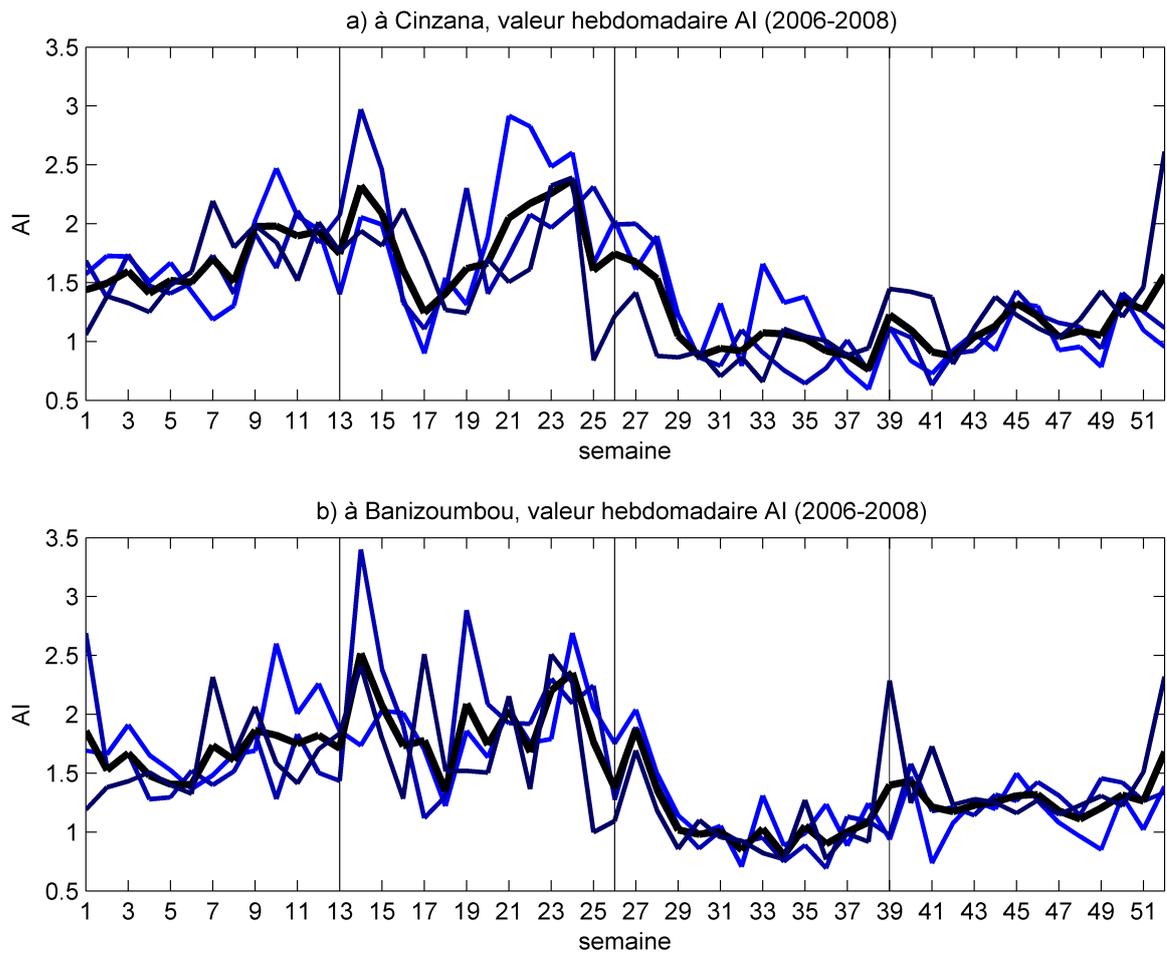


Figure III.3. – Comparaison des séries temporelles des AI (en dégradé de bleu : la plus claire est l'année 2006 et la plus foncée 2008) avec la moyenne des trois années (en noir) à Cinzana (a) et à Banizoumbou (b) de 2006 à 2008 au pas de temps hebdomadaire.

Tableau III.2. – Coefficients de corrélation (R) entre les valeurs hebdomadaires observées à Cinzana et à Banizoumbou des PM, des AOT et de l'AI sur la période 2006-2008.

	Cinzana/Banizoumbou		
	PM	AOT	AI
R	0,83	0,75	0,66

de la mousson.

En conclusion, la période de maximum des concentrations de poussières correspond au 1^{er} trimestre au Sahel alors que la période de maximum a lieu au 2^{ème} trimestre pour les AOT et l'AI. Malgré la variabilité des maxima des séries annuelles, il semble qu'il y ait un décalage entre la période de fortes concentrations de poussières au sol (PM), la période de fortes AOT et la période de fort AI (Deroubaix *et al.*, 2013) presque chaque année. Ces résultats suggèrent qu'aux deux stations, les relations de proportionnalité entre les trois variables changent. A la période de la DTS, les AOT semblent supérieures aux PM (à partir des cycles annuels moyens standardisés), et à la période de la pré-mousson, les AI semblent supérieurs aux AOT. En d'autres termes, il semble qu'il y ait un changement du rapport AOT/AI en juin et du rapport PM/AOT pendant le mois d'avril, identique à Banizoumbou et Cinzana.

2.1.2. Analyse du rapport des mesures intégrées avec la concentration de poussières en surface aux deux stations

Les caractéristiques du transport de poussières au Sahel changent durant le 2^{ème} trimestre puisqu'au 1^{er} trimestre, les poussières sont transportées au niveau du sol alors qu'au 3^{ème} trimestre, leur transport s'effectue en altitude. Une unique correction de l'AI (ou des AOT) peut être envisagée si ces changements concernent tout le Sahel. Il faut donc établir la part de la variabilité des niveaux de poussières qui est commune aux deux stations et donc à tout le Sahel. Il paraît important d'établir le lien qu'il y a entre les deux stations pour montrer qu'au pas de temps hebdomadaire, l'évolution des niveaux de poussières est liée partout au Sahel.

■ Les liens des trois variables décrivant les poussières aux deux stations

A partir de toutes les valeurs hebdomadaires des trois variables décrivant les poussières, les coefficients de corrélation entre les deux stations ont été calculés sur 138 observations (Tableau III.2). Il y a 69% de la variabilité des PM qui est partagée par les deux stations, 56% pour les AOT et 44% pour les AI. Cela signifie que l'évolution hebdomadaire des concentrations de poussières et des quantités intégrées concerne tout le Sahel car ces deux stations sont éloignées de plus de 1000 km. Par conséquent, il est possible de modifier l'AI de la même manière au Sahel car près de 50% de la variabilité est partagée aux deux stations.

Le décalage entre la période de maximum de l'AI (ou d'AOT) et la période de maximum des PM semble aussi être partagé par les deux stations, et donc à l'échelle de tout notre domaine. Dans notre cas, c'est l'AI que nous voulons modifier mais le raisonnement serait identique pour d'autres d'AOT.

■ Les hypothèses du raffinement de l'AI au Sahel

Nous basons ce travail sur les similitudes sahéliennes montrées précédemment, et notamment sur le rapport "sol/intégré" qui correspond au rapport de la quantité de poussières mesurée au sol comparée à la quantité intégrée sur la colonne atmosphérique (i.e. AOT ou AI). Ce rapport définit la concentration de poussières pour une certaine quantité de poussières intégrée sur la verticale. Si l'épaisseur de la couche de poussières et la répartition des poussières à l'intérieur de cette couche était constante au cours de l'année, alors le rapport "sol/intégré" serait lui aussi constant. Cependant nous avons vu qu'il y a un changement entre le 1^{er} et le 2^{ème} trimestre. On peut donc supposer qu'il y a un changement du rapport de la quantité de poussières au sol comparée aux deux quantités intégrées (i.e. le rapport "sol/intégré"), lié aux changements des conditions climatiques au Sahel.

A large échelle, l'épaisseur de la couche de transport des poussières devrait changer de la période de l'Harmattan à celle de la DTS et du FIT. Le rapport des valeurs "sol/intégré" qui est un indicateur de l'épaisseur de cette couche, devrait lui aussi changer de la même manière dans tout le Sahel. Ces hypothèses vont être testées en analysant les différences des rapports "sol/intégré" (i.e. PM/AI ou PM/AOT) à partir des valeurs hebdomadaires décrites précédemment, et particulièrement entre le 1^{er} trimestre et le 2^{ème} trimestre. Nous cherchons à déterminer s'il y a une tendance claire aux deux stations au cours de l'année des deux rapports "sol/intégré".

Pour utiliser l'AI dans le cadre des études sanitaires, il a été vu que deux problèmes principaux se posent. Premièrement, il faut déterminer la capacité de l'AI pour restituer une AOT fidèlement au cours de l'année, c'est-à-dire il faut analyser si le rapport (AOT/AI) change en fonction des périodes climatiques. Deuxièmement, il est nécessaire que les épaisseurs optiques en aérosols (AOT) soient une mesure fidèle des concentrations de poussières au sol (PM). Des éléments de réponses ont déjà été fournis puisqu'un décalage entre les maxima des cycles annuels moyens des trois variables a été mis en évidence (Deroubaix *et al.*, 2013). De plus, l'analyse des AOT et des PM en fonction des types de temps a permis de montrer que la relation liant ces deux quantités change à la fin de la saison sèche (Yahi *et al.*, 2013). Puisque le rapport PM/AI peut être décomposé tel que :

$$PM/AI = PM/AOT \times AOT/AI; \quad (3.i)$$

deux effets différents sont attendus car les causes de leurs évolutions sont différentes.

Pour une même quantité de poussières transportées (i.e. à AOT constante), si le rapport AOT/AI diminue, on peut supposer que les aérosols se répartissent plus en altitude puisque Torres *et al.* (1998) ont montré que l'AI est sensible à l'altitude de la couche d'aérosols. Tandis que, si le rapport PM/AOT diminue, cela laisse supposer une augmentation de l'épaisseur de la couche de poussière.

■ Les liens des trois rapports aux deux stations

Le but de cette partie est de justifier l'utilisation d'un même rapport "sol/intégré" partout au Sahel. Les liens de ces deux rapports (PM/AI, PM/AOT) sont étudiés aux deux stations pour montrer qu'il y a une même évolution annuelle de ces rapports chaque année et que le rapport AOT/AI est constant. Le coefficient de corrélation entre la station de Banizoumbou et de Cinzana est de 0,6 pour les deux rapports "sol/intégré" (Tableau III.3) préparé à partir de toutes les valeurs hebdomadaires des rapports au cours des trois ans de mesures). Ce résultat montre qu'environ 40% de la variabilité de ces deux rapports est partagée par les deux stations, ce qui suggère que les changements de l'épaisseur de la couche de transport de poussières au cours de l'année concernent tout le Sahel. En revanche, ce pourcentage est inférieur pour le rapport AOT/AI à environ 25%.

Tableau III.3. – Coefficients de corrélation (R) des rapports (PM/AOT ; AOT/AI ; PM/AI) entre les valeurs hebdomadaires observées à Cinzana et à Banizoumbou sur la période 2006-2008.

	Cinzana/Banizoumbou		
	PM/AOT	AOT/AI	PM/AI
R	0,60	0,52	0,62

2.2. La méthodologie du raffinement de l'AI

2.2.1. La définition d'un facteur correctif valable aux stations sahéliennes

Comme les rapports sont bien corrélés entre Banizoumbou et Cinzana, il est possible d'étudier les cycles annuels de ces rapports moyennés aux deux stations. Dans un premier temps, les cycles annuels moyens des rapports sont comparés aux deux stations, puis dans un deuxième temps, la variabilité intra-saisonnière est étudiée au cours des trois ans de mesures. Comme les trois variables décrivant les poussières ont un cycle annuel moyen similaire aux deux stations, il devrait y avoir un même cycle annuel moyen pour chacun des trois rapports aux deux stations (Figure III.4).

■ Une unique correction de l'AI au Sahel

Tout d'abord, les cycles annuels moyens des trois rapports sont très similaires aux deux stations et leurs moyennes permettent de décrire le même cycle annuel moyen sur la Figure III.4. Au 1^{er} trimestre, les deux rapports "sol/intégré" sont maximaux, puis ils diminuent au 2^{ème} trimestre (Figure III.4 a et c). On peut remarquer que les cycles annuels moyens des rapports PM/AOT et PM/AI sont très proches. Ils paraissent fortement contraints par l'amplitude des valeurs de PM entre le 1^{er} trimestre et le 3^{ème} trimestre (de plus de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à moins de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, donc la moyenne est divisée par plus de 5). Les mesures intégrées varient quant à elles peu, de moins de 10% (car l'AI augmente de environ 1,7 à 1.9 et les AOT de 0,6 à 0,7).

L'étude du cycle annuel moyen du rapport AOT/AI met en évidence un comportement différent des deux autres rapports (Figure III.4 b) car il augmente à la fin du 1^{er} trimestre puis diminue au 2^{ème} trimestre alors que les rapports "sol/intégré" diminuent au cours de ces deux trimestres.

La saisonnalité du rapport PM/AI semble s'expliquer par l'effet du rapport PM/AOT plus important que l'effet du rapport AOT/AI. En effet, les concentrations de poussières diminuent plus que n'augmentent relativement les AI ou les AOT. Il paraît y avoir une diminution continue des rapports "sol/intégré" entre le mois de janvier et le mois de juillet partagée par les deux stations. Il convient donc de confirmer ce résultat par l'analyse de la variabilité interannuelle des rapports "sol/intégré".

Pour illustrer le lien entre les changements de périodes climatiques et la diminution des deux rapports "sol/intégré", le cycle annuel de la température est ajouté sur la Figure III.4 car un lien entre les quantités intégrées et la température a été mis en évidence au chapitre précédent (cf. chapitre 2, section II-2.2). Du 1^{er} trimestre au 2^{ème} trimestre, on peut constater que le cycle moyen de la température est négativement corrélé avec les rapports PM/AOT ($R = -0,77$) et PM/AI ($R = -0,68$). On peut interpréter cette liaison comme un changement de l'épaisseur de la couche de transport des poussières au Sahel car au 1^{er} trimestre, le vent d'Harmattan est intense puis au 2^{ème} trimestre, la DTS puis le FIT traverse le Sahel. La période de la DTS du FIT est une période de forte température et de faible vent, cela

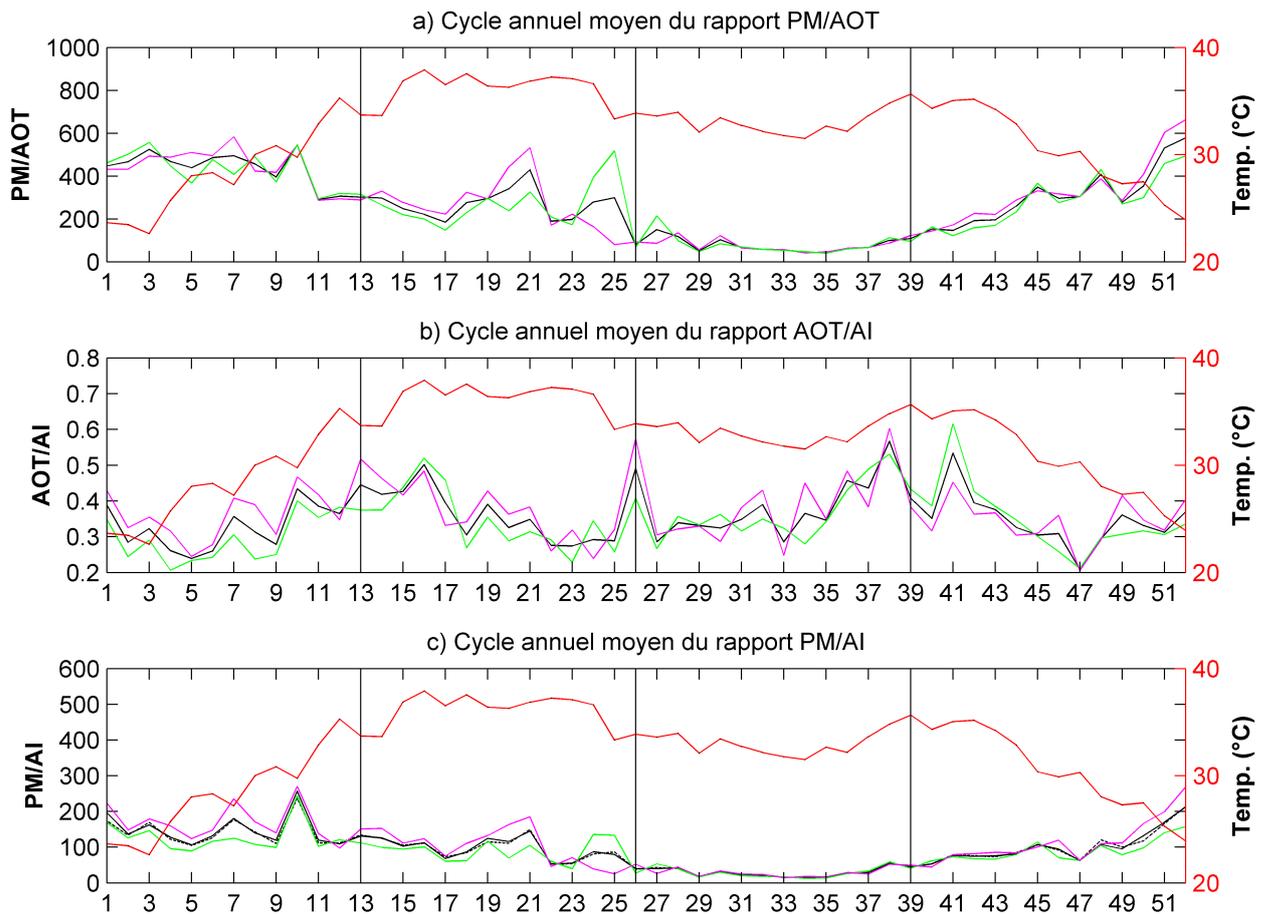


Figure III.4. – Cycles annuels moyens des rapports PM/AOT (a), AOT/AI (b) et PM/AI (c) à partir des valeurs hebdomadaires de la période 2006-2008 à Banizoumbou (en violet), à Cinzana (en vert) et la moyenne des deux stations (en noir) ; (sur l'axe des ordonnées à droite) Cycle annuel moyen de la température sur la même période.

suggère qu'il y a une augmentation de la convection dans la couche de surface. L'augmentation de la température (et les vents faibles) entre le 1^{er} trimestre et le 2^{ème} trimestre semble influencer l'épaisseur de la couche dans laquelle les poussières sont transportées partout au Sahel car elle semble être la conséquence d'un phénomène d'échelle continentale (i.e. la DTS).

La correction de l'AI est donc basée sur le changement à large échelle du rapport PM/AI que l'on suppose lié à l'évolution des conditions climatiques sahéliennes. Ensuite, les valeurs hebdomadaires des quantités intégrées (AI ou AOT) peuvent être modifiées en multipliant par la tendance commune du rapport "sol/intégré" de la période considérée que l'on suppose valable partout au Sahel. Pour modifier l'AI, il faut cependant lisser le cycle annuel moyen du rapport PM/AI pour extraire la "tendance sahélienne" car nous ne disposons que d'une période courte de trois années de mesures communes (cela serait inutile avec une période de mesures de plus de 10 ans). L'extraction de la tendance commune aux deux stations du rapport (PM/AI) est nommée "tr" (c'est le rapport PM/AI temporellement transformé pour le Sahel). Le produit de l'AI par "tr" est l'**AI.tr** et ce produit crée une nouvelle série de données hebdomadaires d'AI transformés permettant de retrouver dimensionnellement des concentrations de poussières :

$$\mathbf{AI.tr} = AI \times (PM/AI) \quad (3.ii)$$

■ La variabilité des rapports "sol/intégré"

Il y a une saisonnalité des rapports "sol/intégré" mais il y a aussi la marque d'événements intenses de poussières sur les cycles annuels car nous ne disposons que de trois ans de mesures communes. Néanmoins, sous certaines hypothèses, il semble possible d'extraire une tendance sahélienne de ces rapports par un lissage approprié. La qualité de l'estimation des poussières faite par l'AI.tr dépend de la variabilité hebdomadaire du rapport PM/AI et on peut se demander comment évolue ce rapport lorsque l'on s'intéresse aux semaines des événements intenses de poussières. En effet, plus le rapport "sol/intégré" est similaire d'une année à l'autre pour une période donnée, plus la valeur de PM associée à un AI de cette période est précise. Sur la Figure III.5, la variabilité interannuelle du rapport PM/AI est comparée à celle du rapport PM/AOT et la tendance sahélienne "tr" est calculée.

La Figure III.5 présente la variabilité interannuelle au pas de temps hebdomadaire. Les trois années et les deux stations forment un ensemble de six années-stations, c'est-à-dire à chacune des 52 valeurs hebdomadaires, il correspond 6 valeurs, 3 valeurs à Banizoumbou et 3 valeurs à Cinzana sur la Figure III.5. Une figure similaire est présentée en annexe avec les séries temporelles de trois ans du rapport PM/AI (Agier *et al.*, 2013a). Les moyennes du rapport sont représentées à Banizoumbou (en violet) et à Cinzana (en vert), la moyenne des deux stations (en trait fin noir). Il semble y avoir la même saisonnalité des deux rapports "sol/intégré" pour les deux stations, ce qui confirme la validité des cycles annuels moyens. On peut remarquer qu'à partir de la "pré-onset" de la mousson (semaine 19/20), il y a une très grande variabilité des deux rapports. Cela suggère qu'il y a aussi une grande hétérogénéité dans la répartition des poussières en altitude à cette période, ce qui confirme la période de confiance d'utilisation de l'AI établie dans l'article de la première partie (Deroubaix *et al.*, 2013).

Néanmoins, il semble que les trimestres forment des périodes cohérentes pour décrire ces deux rapports. La variabilité du rapport PM/AOT comme du rapport PM/AI, est supérieure au 1^{er} trimestre comparée au 2^{ème} trimestre. On voit sur la Figure III.5 que le rapport PM/AI est variable au sein de chaque trimestre comme le rapport PM/AOT. Hormis au 3^{ème} trimestre, il n'est pas possible d'associer une valeur du rapport PM/AI strictement différente au 1^{er}, 2^{ème} ou 4^{ème} trimestre de l'année. Par exemple, la valeur 200 du rapport PM/AI peut aussi bien être atteinte au 1^{er} trimestre qu'aux deux

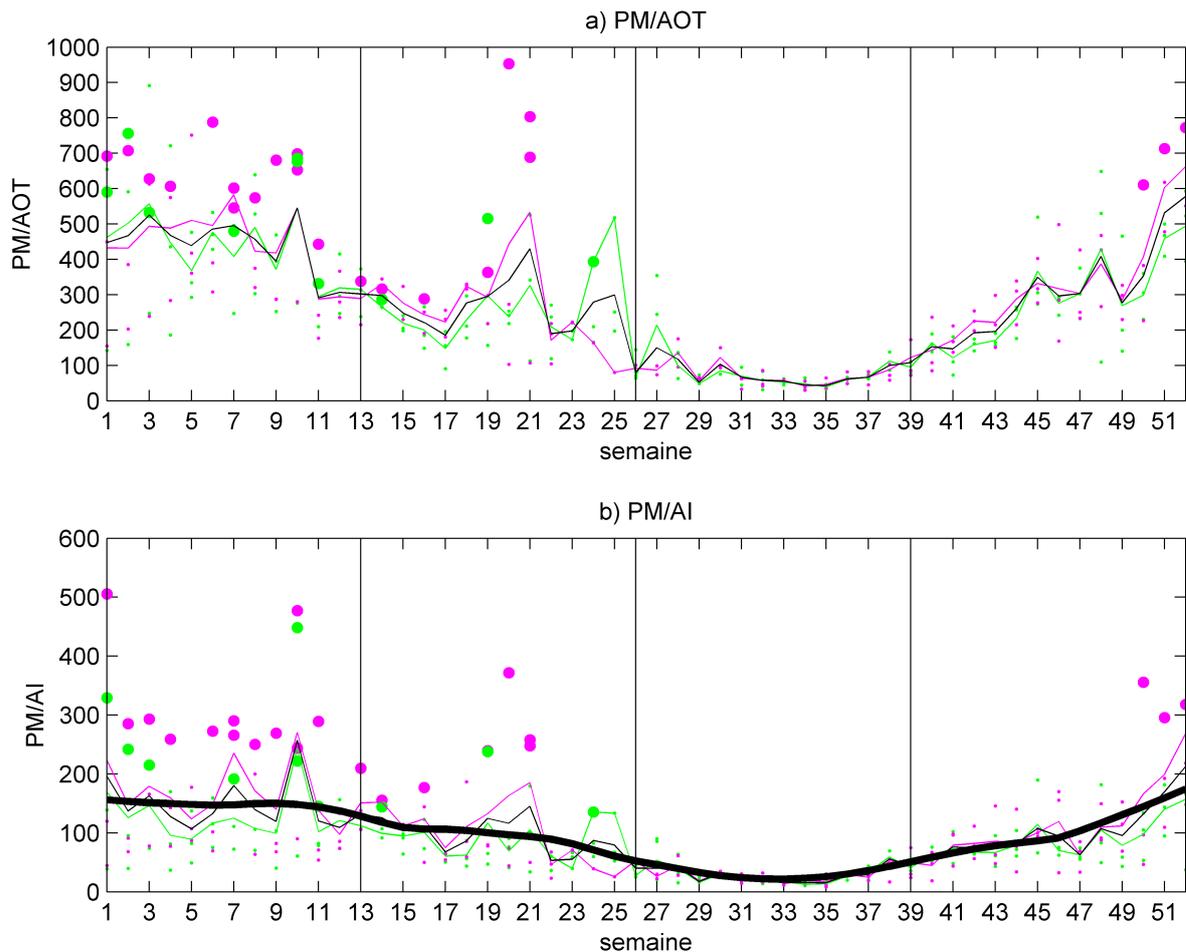


Figure III.5. – Valeurs hebdomadaires (a) du ratio PM/AOT et (b) du ratio PM/AI, à Banizoumbou (points violets) et à Cinzana (points verts); moyenne des stations (ligne violette à Banizoumbou et verte à Cinzana); moyenne commune aux deux stations (ligne noire); Tendence sahélienne du rapport PM/AI (ligne noire épaisse); valeurs hebdomadaires des rapports associées à $PM > 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (gros points).

trimestres de transition.

Lors des semaines des événements intenses de poussières, les PM peuvent augmenter d'un facteur dix, et donc conduire à des valeurs du rapport très supérieures à la valeur moyenne. Par conséquent, sur la Figure III.5, les valeurs fortes de PM (i.e. $PM > 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ont été représentées par des points plus gros. On voit que pour les deux rapports, les valeurs fortes de PM sont systématiquement associées à des valeurs du rapport "sol/intégré" très élevées.

■ Le lissage du rapport PM/AI

Puisque nous ne disposons que de trois ans de mesures, il faut lisser la moyenne commune aux deux stations pour extraire la tendance sahélienne "tr" du rapport PM/AI. La méthode pour extraire "tr" consiste à lisser le cycle annuel moyen du rapport PM/AI aux deux stations. Le lissage est réalisé par une régression locale sur les valeurs au pas de temps hebdomadaire pour faire ressortir les différences à un pas de temps supérieur. Le lissage de cette moyenne est obtenu par une fonction de régression

locale en supposant un polynôme d'ordre 1, on suppose donc la continuité d'ordre 1 de "**tr**". La fenêtre de régression est fixée à un trimestre car cela permet de reproduire les changements rapides du rapport PM/AI observés aux deux stations en avril, puis en juin.

La valeur de "**tr**" est plus grande au 1^{er} trimestre qu'au 2^{ème} trimestre (Figure III.5). La tendance sahélienne "**tr**" présentée sur la Figure III.5, est associée à une valeur moyenne au 1^{er} trimestre de 147, puis de 92 au 2^{ème} trimestre (au 3^{ème} trimestre de 32 et au 4^{ème} trimestre de 105). On observe le passage d'une période stable au 1^{er} trimestre vers une nouvelle période stable au 2^{ème} trimestre. Ce résultat semble être en accord avec le changement de la période de l'Harmattan vers la période de la DTS et du FIT.

2.2.2. L'évaluation de l'AI transformé

Après avoir calculé "**tr**", l'amélioration de la représentativité obtenue par l'**AI.tr** peut être évaluée. L'**AI.tr** est un indicateur de la concentration de poussières au sol au Sahel. La tendance sahélienne "**tr**" est maintenant utilisée aux deux stations pour évaluer comment est retrouvé le cycle des poussières au sol par l'**AI.tr** ainsi que les semaines de maximum de la concentration de poussières.

A partir des séries temporelles de l'AI aux deux stations, les séries temporelles de l'**AI.tr** ont été créées (Figure III.6). On remarque que les cycles annuels des PM sont reproduits de manière satisfaisante par l'**AI.tr** car la période d'**AI.tr** fort a lieu au 1^{er} trimestre à la différence de l'AI. Les intensités des pics ne sont pas retrouvées mais les dates semblent concorder. Lorsque l'on s'intéresse aux maxima annuels, on voit que l'AI retrouve les dates de cinq des six maxima présentés sur la Figure III.6. En 2006 et en 2008, la semaine du maximum de PM est retrouvée alors qu'en 2007, le maximum exceptionnel de PM de janvier est presque absent de la série de l'**AI.tr** à Cinzana (néanmoins il y a un léger pic et on retrouve son signal à Banizoumbou). Cette figure démontre que les caractéristiques temporelles des PM sont retrouvées par la multiplication de l'AI avec la tendance sahélienne du rapport PM/AI car la période de fortes concentrations de poussières et la semaine du maximum annuel correspondant aux événements intenses, sont bien reproduites. Comme cette méthode se base sur seulement trois années de mesures, il est nécessaire d'estimer la sensibilité de "**tr**" pour confirmer sa pertinence vis-à-vis de chaque année-station (Tableau III.4).

Le Tableau III.4 présente la corrélation entre l'AI et les PM sur les trois années et aussi sur chaque année spécifiquement. On constate que le coefficient de corrélation varie de 0,34 à 0,64 à Cinzana et de 0,43 à 0,51 à Banizoumbou. Ensuite, ce tableau a été refait avec les séries de l'**AI.tr** afin de quantifier l'amélioration de la représentativité des concentrations de poussières au sol que l'on a obtenue.

Comme il n'y a pas d'autres données disponibles pour tester cette méthode, une validation croisée des données a été employée en ôtant une année-station puis en reproduisant la méthode uniquement avec cinq années-stations (Tableau III.5). Une nouvelle tendance sahélienne du rapport PM/AI (i.e. "**tr***") a été créée à partir des 5 années-stations. L'année-station écartée permet de comparer les coefficients de corrélation entre les PM et l'AI, ou bien entre les PM et l'**AI.tr*** (la multiplication avec le nouveau lissage obtenu indépendamment de cette année-station).

Pour chaque année-station, le coefficient de corrélation augmente significativement après multiplication par **tr***, passant d'environ 0,5 à 0,75, soit une augmentation de 50%. En examinant chaque année-station, on remarque qu'il n'y a pas d'année-station particulière, ce qui montre la pertinence

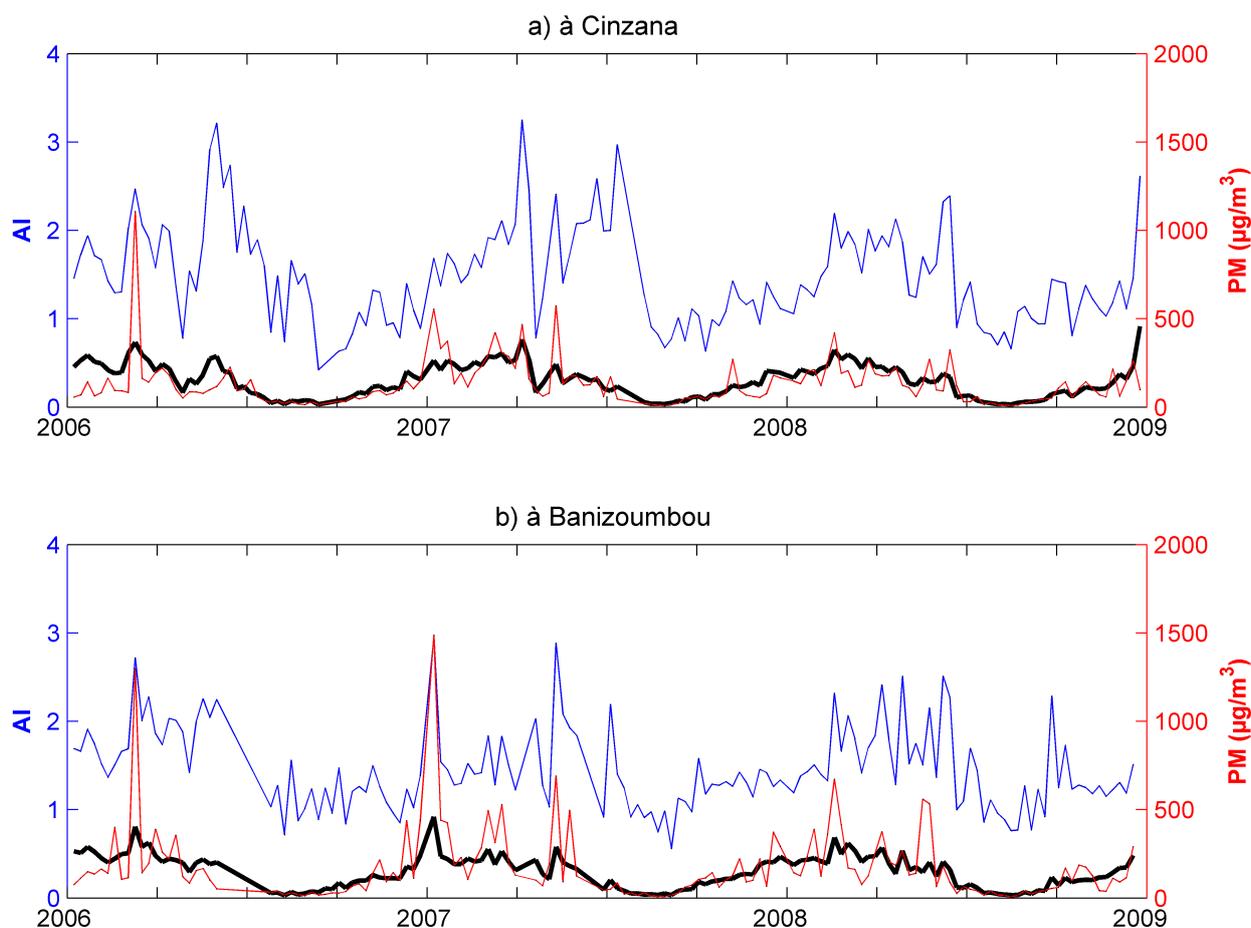


Figure III.6. – Séries temporelles de l'AI hebdomadaire (en bleu sur l'axe des ordonnées à gauche), de l'AI.tr (en noir) et de PM hebdomadaire de 2006 à 2008 (en rouge sur l'axe des ordonnées à droite), à Cinzana (a) et à Banizoumbou (b).

Tableau III.4. – Coefficients de corrélation entre l'AI et les PM à Cinzana et à Banizoumbou pour les 3 ans de mesures (soit $52 \times 3 = 156$ valeurs) et pour chaque année de la période 2006-2008.

		R AI/PM		
	3 ans	2006	2007	2008
Cinzana	0,5	0,34	0,63	0,64
Banizoumbou	0,45	0,53	0,43	0,51

Tableau III.5. – Validation croisée de la tendance sahélienne "tr" du rapport PM/AI à partir des coefficients de corrélation entre les PM et l'AI.tr à Cinzana et à Banizoumbou pour la période 2006-2008.

	R (AI.tr)/PM	R (AI.tr*)/PM		
	3 ans	2006	2007	2008
Cinzana	0,77	0,5	0,76	0,77
Banizoumbou	0,75	0,59	0,56	0,72

de cette méthode quant à son utilisation pour d'autres années. Avec un coefficient de corrélation de 0,75, c'est plus de 55% de la variabilité des concentrations de poussières au sol qui est reproduite par l'AI.tr alors que pour l'AI, ce pourcentage n'était que de 25%.

2.3. L'application de l'AI transformé

Cette partie présente le prolongement de la méthode de raffinement de l'AI aux données de l'AI-TOMS puis aux districts des trois pays de notre étude.

2.3.1. L'extension temporelle à la période de l'AI-TOMS

Les capteurs TOMS et OMI diffèrent surtout par leurs résolutions spatiales. Les données d'AI du premier capteur (TOMS) nécessitent d'être homogénéisées pour être comparables avec les données de l'AI-OMI (aussi noté AI_{OMI} dans cette partie) utilisées pour créer l'AI transformé. De plus, la période des données de l'AI-TOMS (aussi noté AI_{TOMS} dans cette partie) souffre d'une dérive instrumentale à partir de 2002 (McPeters *et al.*, 2007). Cela a conduit à amplifier la variabilité de l'AI-TOMS mais il a été vu que l'AI-TOMS reste cohérent après la dérive (cf. chapitre 2, section II-1.2.2). Il semble donc possible d'utiliser cette période à condition de la traiter spécifiquement.

Pour chaque district, il faut faire correspondre la distribution annuelle des données de l' AI_{TOMS} et de l' AI_{OMI} en utilisant la moyenne annuelle et l'écart-type associé afin d'obtenir une série d'AI homogène. Au chapitre 2, trois périodes distinctes de l'AI ont été mises en évidence de 1997 à 2001 (TOMS), puis 2002 à 2004 (TOMS après la dérive instrumentale), et 2005 à 2008 (OMI). Le but est de recréer une série homogène de l'AI sur la période 1997 à 2008 en utilisant l' AI_{OMI} comme une référence pour ajuster l' AI_{TOMS} car l'étude du rapport PM/AI a été faite sur cette période. Le Tableau III.6 présente les moyennes annuelles de l'AI de 1997 à 2008 pour les pixels associés aux deux stations (le pavé de 3 x 3 pixels entourant le pixel de la station).

Il est important de noter que la moyenne annuelle de l' AI_{TOMS} est inférieure à 2 avant la dérive puis elle augmente après la dérive à environ 2 (Tableau III.6). On peut remarquer aussi que les moyennes annuelles de l' AI_{OMI} sont inférieures à celle de l' AI_{TOMS} même avant la dérive de l'instrument. L'évolution des moyennes annuelles est la même pour les deux stations. Aux deux stations comme pour la moyenne, on constate que l'écart-type annuel de l' AI_{TOMS} augmente sur la période 2002 à 2004. De plus, la moyenne et l'écart-type semblent changer entre 2001 et 2002, puis entre 2004 et 2005 et de la même manière pour les deux stations. En conséquence, nous faisons l'hypothèse qu'il est possible de centrer-réduire (standardiser) l'AI sur chacune des trois périodes pour rendre les séries

Tableau III.6. – Moyenne et l'écart-type annuels de l'AI-OMI et AI-TOMS à Banizoumbou et Cinzana pour la période 1997-2008.

	Banizoumbou		Cinzana	
	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type
AI-TOMS				
1997	1,75	0,66	1,72	0,48
1998	1,94	0,72	1,99	0,63
1999	1,72	0,65	1,66	0,53
2000	1,62	0,50	1,73	0,48
2001	1,48	0,40	1,55	0,48
2002	2,02	0,83	2,00	0,76
2003	2,06	0,88	2,09	0,80
2004	1,99	0,91	2,10	0,96
AI-OMI				
2005	1,58	0,47	1,59	0,50
2006	1,55	0,54	1,55	0,46
2007	1,52	0,53	1,55	0,54
2008	1,41	0,43	1,49	0,43

homogènes. Les deux périodes de l' AI_{TOMS} peuvent donc être recalées sur la distribution annuelle de l' AI_{OMI} (i.e. la même moyenne et le même écart-type). On considère que les séries de l' AI_{TOMS} et de l' AI_{OMI} sont équivalentes après avoir été standardisées, c'est-à-dire :

$$(AI_{TOMS} - moy_{TOMS}) / ect_{TOMS} = (AI_{OMI} - moy_{OMI}) / ect_{OMI}; \quad (3.iii)$$

avec moy_{TOMS} (ect_{TOMS}), la moyenne (l'écart-type) de la période TOMS 1997-2001 ou 2002-2004 ; de même, avec moy_{OMI} (ect_{OMI}) la moyenne (l'écart-type) de la période OMI 2005-2008.

Ensuite, la série des AI_{TOMS} est recalée par rapport à la valeur de référence AI_{OMI} .

Ainsi, nous avons considéré :

$$AI_{TOMS \rightarrow OMI} = (AI_{TOMS} - moy_{TOMS}) \times (ect_{OMI} / ect_{TOMS}) + moy_{OMI} \quad (3.iv)$$

Nous avons obtenu une série d'AI (TOMS et OMI) recalée sur les valeurs de l' AI_{OMI} . Maintenant, la correction "**tr**" est appliquée à cette série. L'AI (brut) a été comparé à l'AI recalé pour illustrer le changement au cours des trois périodes (Figure III.7). De plus, les séries de 12 ans de l'**AI.tr** ont été calculées aux deux stations et les PM ont été ajoutées ; une figure identique est proposée en annexe de l'article d'Agier *et al.* (2013b). Par construction, l'AI recalé sur la période 1997 à 2004 est cohérent avec la période 2005 à 2008 de l'AI. Lorsque l'on s'intéresse à l'AI.tr, le cycle annuel paraît cohérent tout au long de la période en termes de maxima et de minima.

Enfin, on peut définir à nouveau ces quatre valeurs (moy_{TOMS} , moy_{OMI} , ect_{TOMS} , ect_{OMI}) afin de créer une série homogène d'AI de 1997 à 2008 pour chaque zone à étudier comme un district, une région ou un pays du Sahel. Le changement de la tendance sahélienne du rapport "sol/intégré" est liée au changement de la période de l'Harmattan vers la période de la DTS et du FIT, et conséquent, "**tr**" est valable là où ces deux périodes climatiques sont clairement observées.

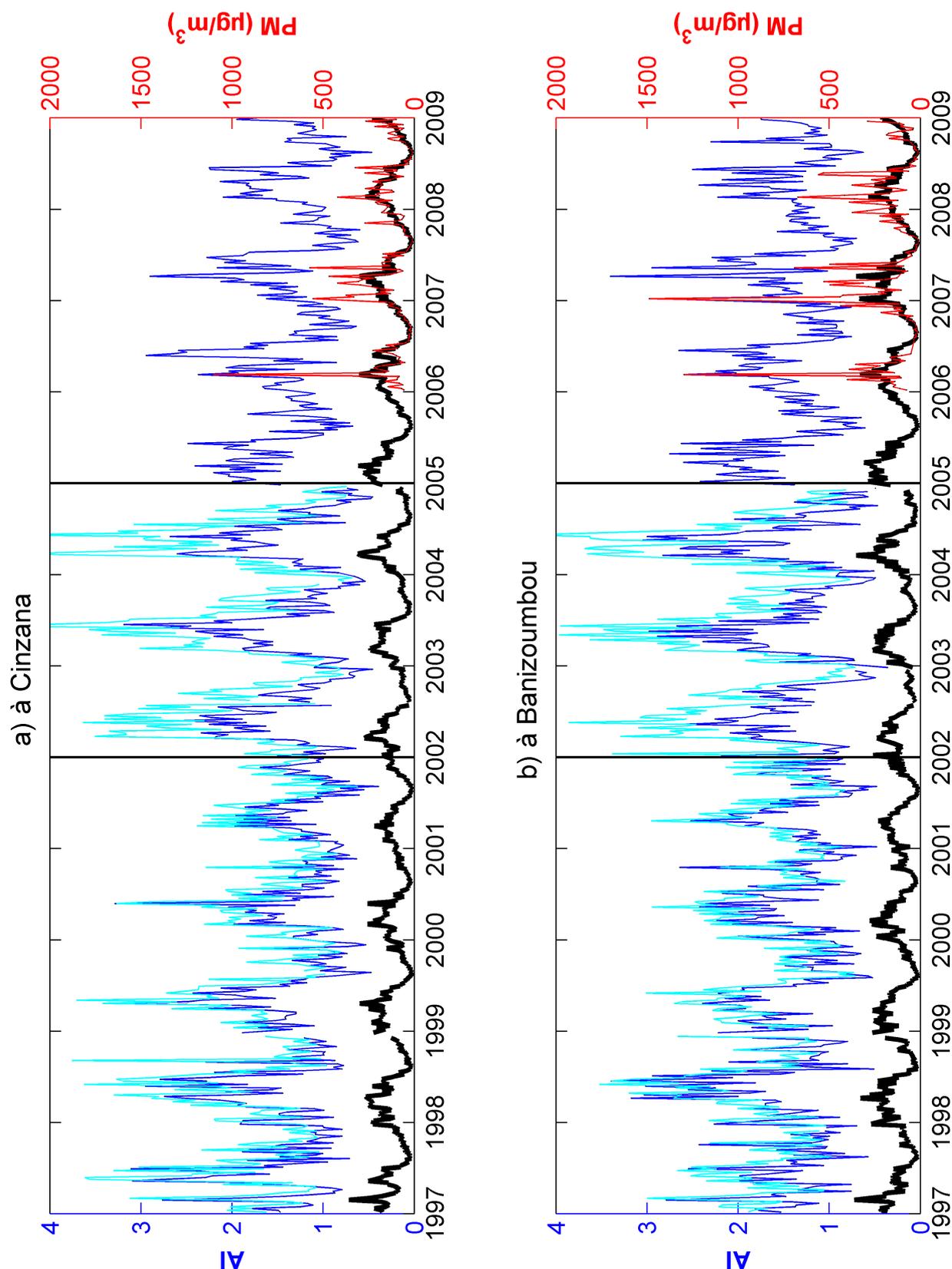


Figure III.7. – (sur l'axe des ordonnées à gauche) Séries temporelles brutes de l' AI_{TOMS} de 1997 à 2005 (en bleu clair) puis la série homogénéisée de 12 ans de l' AI_{TOMS}/OMI (en bleu foncé) pour la période 1997-2008 ; (sur l'axe des ordonnées à droite) Mesures de PM (en rouge) et de l' AI_{tr} (en noir) à Cinzana (a) et à Banizoumbou (b).

2.3.2. L'AI transformé dans les districts du Burkina Faso, du Mali et du Niger

L'extension spatiale de l'AI transformé a été discutée à l'échelle spatiale de l'Afrique de l'Ouest, et prise en compte pour la création des séries temporelles de l'**AI.tr** des districts des trois pays étudiés (Deroubaix *et al.*, 2012). Dans cette partie, l'utilisation de l'AI transformé est présentée dans tous les districts de notre domaine. La méthode de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) utilisée précédemment avec l'AI (cf. chapitre 2, section II-2.1) est reprise afin de rassembler les districts dont le cycle annuel de l'**AI.tr** est similaire selon le critère de ressemblance de Ward.

Sur tout notre domaine, le maximum du cycle annuel de l'**AI.tr** a lieu en mars pour les quatre classes entre la semaine 8 et la semaine 11 conformément aux mesures de PM (Figure III.8). On remarque l'effet de la correction "**tr**" car la période de fort **AI.tr** a lieu durant le 1^{er} trimestre alors que, pour l'AI, il a été vu que les différences ont lieu principalement au 2^{ème} trimestre entre le nord et le sud. La structure spatiale des 4 classes de l'**AI.tr** est principalement zonale, contrairement aux résultats de l'AI basés sur la même méthode. Durant le cœur de la saison sèche (1^{er} trimestre), il y a des différences entre les cycles annuels moyens de l'**AI.tr** des quatre classes. D'après les cycles annuels moyens de l'AI.tr, les niveaux de poussières sont plus élevés à l'est du Niger qu'au sud du Burkina-Faso.

Ces résultats sont en accord avec le gradient de concentration de poussières connu au Sahel (Marticorena *et al.*, 2010). Par conséquent, la tendance sahélienne "**tr**" (du rapport PM/AI) appliquée à l'AI permet de retrouver les caractéristiques attendues de la concentration de poussières, c'est-à-dire le gradient existant entre l'est et l'ouest du Sahel. Enfin, pour illustrer l'évolution de l'AI.tr, les séries temporelles des quatre classes sont présentées sur la période de 12 ans.

Finalement, les séries de l'**AI.tr** des quatre classes présentées sur la Figure III.9, montrent bien sûr une saisonnalité marquée mais il y a un maximum clair chaque année qui ne correspond pas à la même la classe. Ceci laisse envisager la possibilité d'utiliser l'AI transformé pour l'étude des épidémies de méningites.

■ Conclusions de la deuxième partie du chapitre 3

Cette deuxième partie a montré qu'il est possible d'améliorer la représentativité de la valeur de l'AI pour décrire l'évolution des concentrations de poussières au sol en se basant sur le décalage des cycles annuels de l'AI et des PM qui semble être vrai partout au Sahel. La représentativité de la valeur de l'AI pour décrire l'évolution des concentrations de poussières au sol change au cours de l'année et il faut prendre des précautions avant de l'utiliser dans le cadre des études d'impact des poussières désertiques sur la santé.

Un AI transformé pour le Sahel a été élaboré afin de rester fidèle aux caractéristiques du cycle des poussières au sol vraies partout au Sahel, c'est-à-dire les caractéristiques partagées par les deux stations de Banizoumbou et Cinzana. Entre le 1^{er} trimestre et le 2^{ème} trimestre, pour une même quantité intégrée de poussières transportées (i.e. à AI ou AOT constante), la concentration au sol associée diminue. Cela a été mis en évidence par l'étude des rapports entre la concentration de poussières et les mesures intégrées. Ces résultats ont permis de conclure qu'il existe une tendance sahélienne "**tr**" définissant la quantité de poussières associée à un AI (ou une AOT) qui varie selon le trimestre de l'année. A partir de ce constat, l'**AI.tr** a été créé pour reproduire la saisonnalité de la concentration de poussières au sol. Le résultat important est que le gradient de PM entre l'est et l'ouest de notre domaine est retrouvé par l'**AI.tr** au premier trimestre. Enfin, la méthode de l'AI transformé

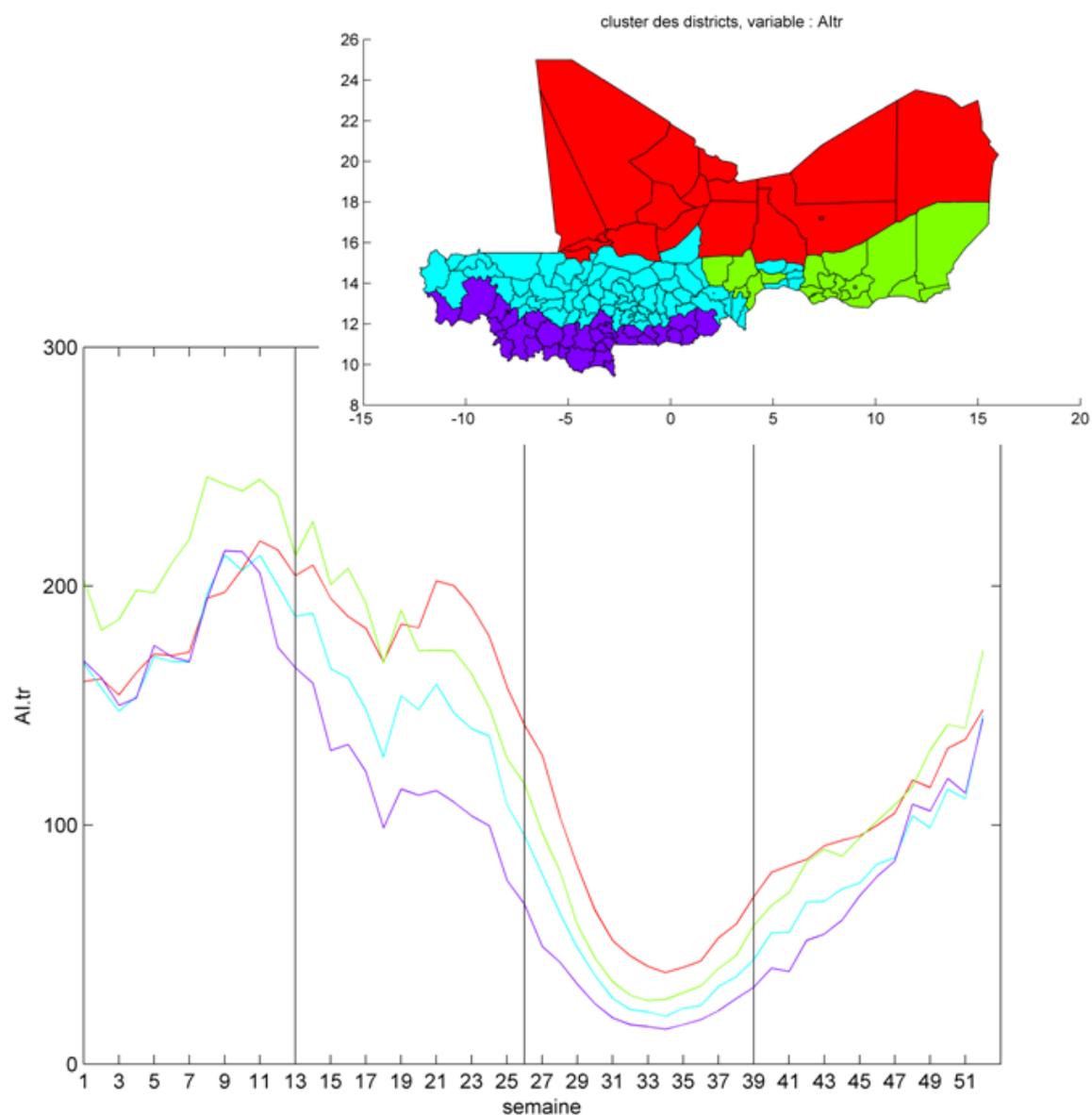


Figure III.8. – Classification spatiale de l'AI.tr des districts du Burkina-Faso, Mali, Niger pour 4 classes et les cycles annuels moyens hebdomadaires des 4 classes.

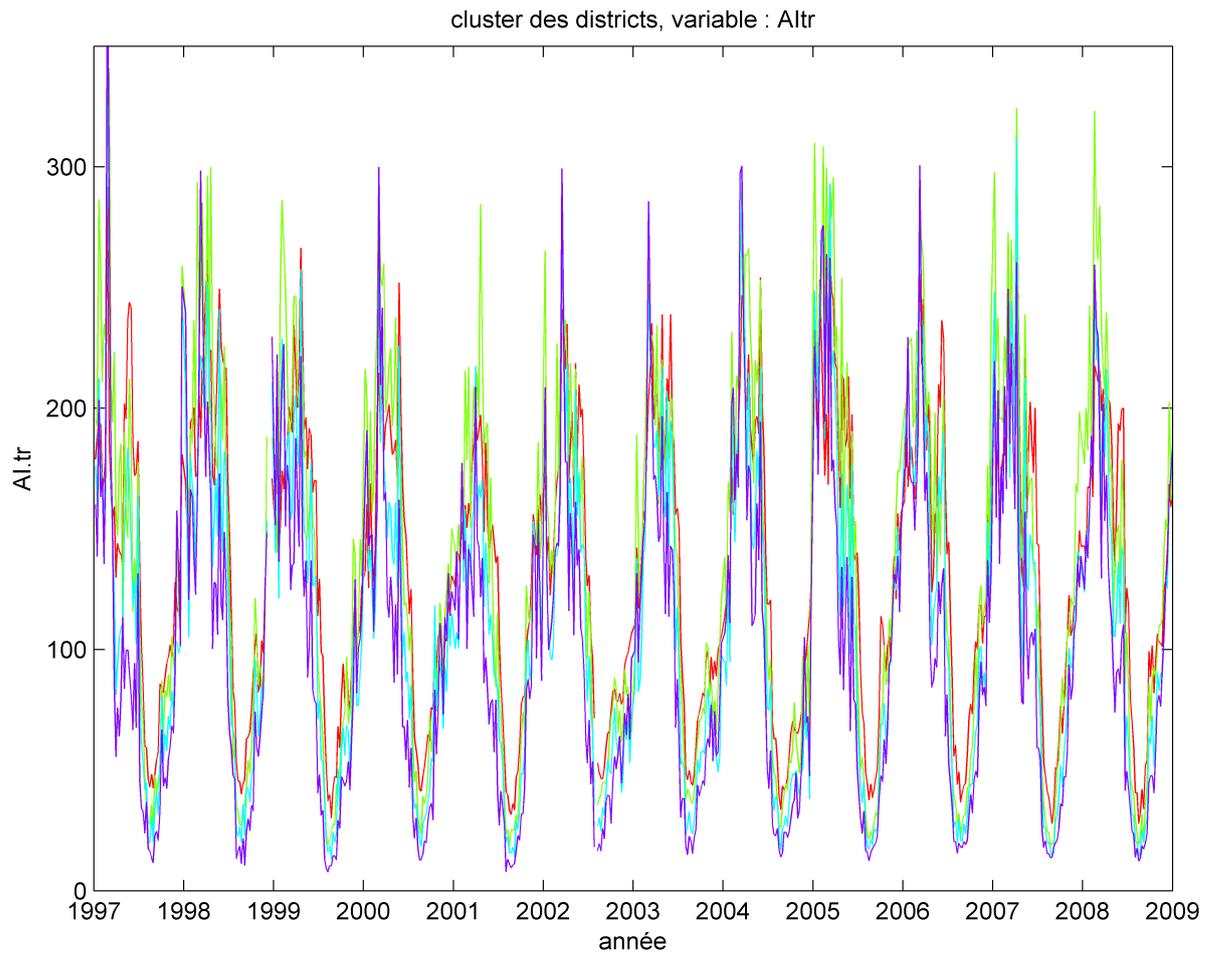


Figure III.9. – Séries temporelles des 4 classes de l'**Al.tr** associées aux districts du Burkina-Faso, Mali, Niger.

a été prolongée sur les données de l'AI-TOMS après les avoir homogénéisées pour correspondre à l'AI-OMI, permettant la création d'une série temporelle de 12 ans représentative de l'évolution des concentrations de poussières au niveau du sol, valable partout au Sahel.

En outre, nous avons vu qu'il est nécessaire de corriger par une méthode similaire, tous les jeux de données de poussières intégrés sur toute la colonne atmosphérique comme les AOT "deep-blue" MODIS ou encore les réanalyses d'épaisseur optique en poussières (MACC¹). En perspective, d'autres de mesures de PM peuvent être utilisées pour confirmer la tendance sahélienne "tr", comme par exemple, la station implantée en mars 2012 à Dédougou au Burkina Faso par l'Université de Bourgogne dans le cadre d'AMMA.

■ Synthèse du chapitre 3

Dans ce chapitre, l'Aerosol Index (AI) a été analysé dans le but de développer une série temporelle représentative de l'évolution des concentrations de poussières au niveau du sol. Nous avons mis en évidence que les deux difficultés principales pour utiliser l'AI dans le cadre des études sanitaires tiennent, premièrement dans sa capacité à fournir une valeur d'épaisseur optique en aérosols (AOT) fidèle tout au long de l'année, et deuxièmement, dans la capacité des AOT à restituer une valeur cohérente de concentration de poussières au niveau du sol (PM).

La validation de l'utilisation de l'AI dans le cadre des études sanitaires a été réalisée par comparaison avec les données des stations sahéliennes de mesures d'AOT et de PM. Lorsque l'on compare l'AI journalier avec la valeur d'AOT moyennée sur les pas de temps les plus proches de l'heure de passage du satellite, on observe que l'AI reproduit 50% de la variabilité des AOT. De plus, en moyennant sur une durée plus longue, ce pourcentage ne change pas, et par conséquent la valeur journalière de l'AI est capable de restituer une valeur d'AOT correspondante à toute la journée. Cependant à peine 10% de la variabilité des PM au sol est reproduite par les valeurs journalières de l'AI mais ce pourcentage augmente à 25% quand on utilise des moyennes hebdomadaires.

Il y a un décalage entre le maximum des trois variables que nous avons utilisées pour étudier les poussières. La plus forte valeur des PM au sol est atteinte au premier trimestre de chaque année alors que, pour les AOT ou l'AI, c'est majoritairement au deuxième trimestre. Ce résultat est vrai aux deux stations. En conséquence, les AOT ne sont pas une mesure fidèle de PM si l'on considère le premier et le deuxième trimestre de la même manière. Au chapitre précédent, un lien a été montré entre les quantités intégrées (les AOT et les AI) et la température, ce chapitre suggère que ce lien est dû une augmentation de l'épaisseur de la couche dans laquelle les poussières sont transportées entre le premier trimestre et le deuxième trimestre.

Le début de l'année est marqué par les vents d'Harmattan alors qu'au deuxième trimestre, il y a une période de fortes températures et de faibles vents qui est suivie par la "pré-mousson" à partir de la mi-mai. Ces changements de situations climatiques concernent tout le Sahel. Il y a une évolution du rapport entre la concentration de poussières au sol avec les quantités intégrées qui semble identique partout au Sahel. La tendance sahélienne du rapport PM/AI est la base de la modification de l'AI présentée dans ce chapitre. Néanmoins, la variabilité du rapport PM/AI suggère aussi que la variabilité de cette épaisseur est importante, ce qui limite la mesure du satellite. Malgré cette limitation, les séries de l'AI transformé pour le niveau du sol ont montré une amélioration claire de la variabilité

1. Monitoring Atmospheric Composition and Climate, disponible sur le site internet : <http://www.gmes-atmosphere.eu/>

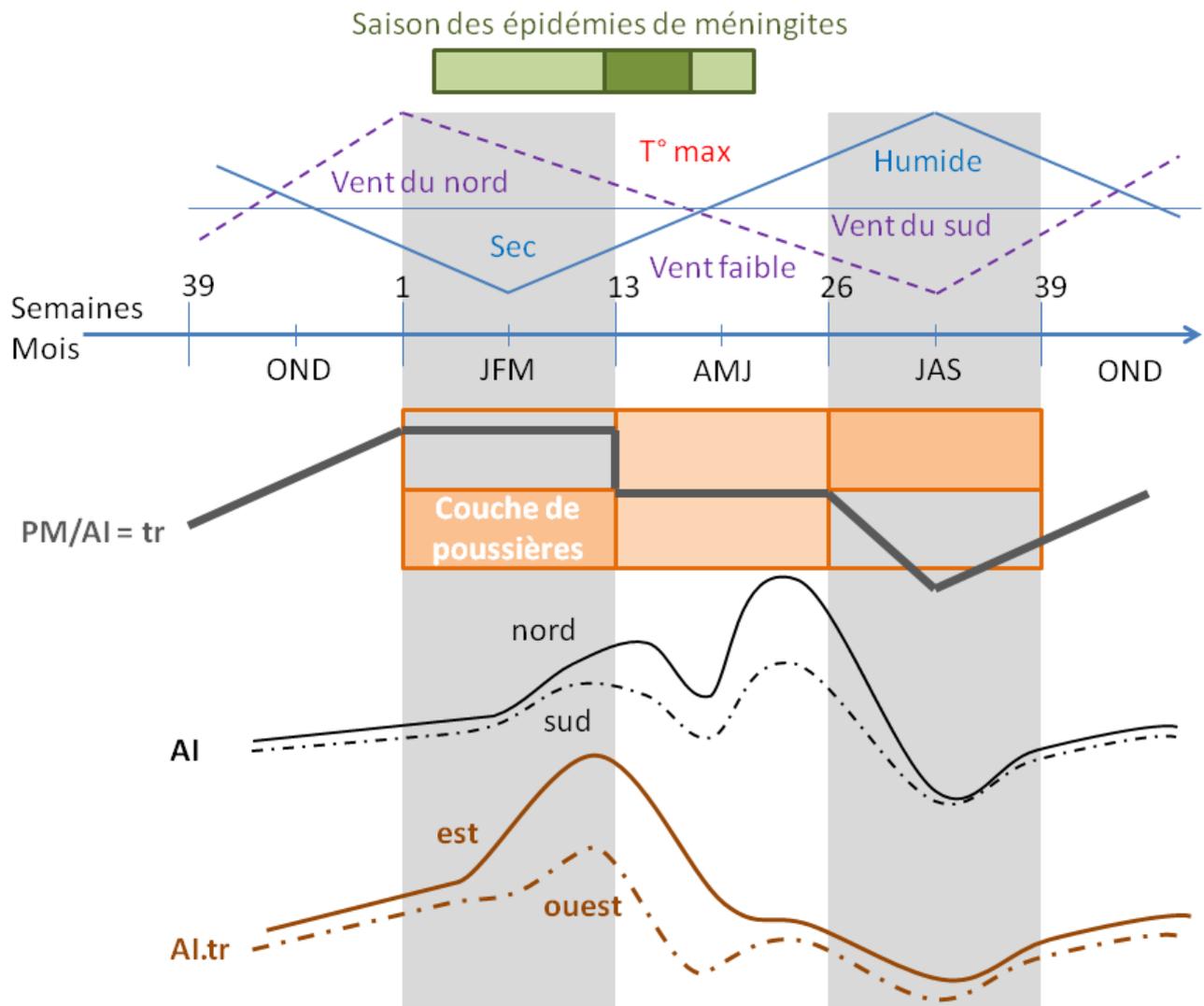


Figure III.10. – Schéma n°2 de synthèse des résultats.

des PM captée par le satellite, passant de 25% à plus de 50%.

Pour schématiser les deux grands résultats de ce chapitre en reprenant la base du schéma précédent (Figure III.10), l'AI transformé est obtenu par multiplication avec la tendance sahélienne du rapport de l'AI avec la concentration de poussières au sol, nommé "tr". On peut distinguer une période stable au 1^{er} trimestre de ce rapport, puis un changement lié à l'augmentation de la température, amenant à une autre période stable au 2^{ème} trimestre lorsque la température est maximale. L'autre résultat concerne la multiplication de tendance "tr" à l'AI, c'est-à-dire l'AI transformé ou l'AI.tr. Nous avons vu que la période de maximum de l'AI.tr au 1^{er} trimestre comporte un gradient entre l'est et l'ouest de notre domaine.

- Chapitre IV -

Modélisation statistique de l'incidence hebdomadaire de la méningite à partir de descripteurs atmosphériques de la saison sèche au Sahel

■ Introduction du chapitre 4

Un dicton populaire sahélien dit que : *"La méningite arrive quand les nuages changent de direction"*. Dans ce chapitre, nous allons voir si cette affirmation se vérifie en sondant les liens statistiques entre les épidémies de méningites et le climat du Sahel à différentes échelles spatiales. Pour cela, les données climatiques vont être étudiées par rapport à l'incidence des méningites de l'échelle du district à l'échelle nationale dans les trois pays pour lesquels nous disposons de jeux de données, le Burkina Faso, le Mali et le Niger. En revanche, nous utiliserons uniquement le pas de temps hebdomadaire, c'est-à-dire le pas de temps des relevés épidémiologiques de l'OMS. Nous allons chercher à démontrer que la saisonnalité des épidémies s'explique par l'intensification de conditions atmosphériques particulières. En effet, les poussières et les conditions climatiques sont suspectées d'être liées aux épidémies de méningites au Sahel depuis les années cinquante (cf. chapitre 1, section I-3).

Cependant il y a encore peu d'études intégratives de tous ces paramètres, la disponibilité des données épidémiologiques conditionne bien sûr les études entre le climat et la santé. A l'échelle nationale, l'incidence annuelle a été étudiée et ces recherches ont conduit à l'élaboration d'un indice de prévision des épidémies dès l'automne, en vue de la prochaine période épidémique par les services météorologiques du Burkina Faso (Yaka *et al.*, 2008). Les données à l'échelle du district ont récemment permis de montrer l'importance de vacciner les habitants des districts voisins d'un district déjà en situation épidémique (Agier *et al.*, 2013a). Par le biais de la communauté MERIT et des ponts établis entre MERIT et AMMA, ce sont ces données que nous allons utiliser pour étudier la phase ascendante des épidémies. En effet, nous allons sonder les données hebdomadaires de l'incidence des méningites en les confrontant aux valeurs des variables atmosphériques sélectionnées. Le mécanisme de causalité serait lié à l'irritation des voies respiratoires provoqué par les poussières et le climat qui engendre une augmentation de l'incidence une fois le délai d'incubation de la bactérie passé.

Deux questions principales seront étudiées à travers ce chapitre : *Le facteur atmosphérique (climat et poussières) est-il nécessaire pour expliquer la dynamique (saisonnalité et intensité) des épidémies ?*

Et si c'est en effet le cas, dans quelle mesure peut-il participer à la prévision de l'incidence des méningites ? La première partie de ce chapitre est consacrée à l'étude des liens temporels à travers la saisonnalité des épidémies vis-à-vis des autres phénomènes atmosphériques. Dans la deuxième partie de ce chapitre, une analyse factorielle décrit les liens entre les variables atmosphériques et l'incidence des méningites, puis l'incidence est modélisée à partir des variables atmosphériques-clés précédemment identifiées pendant la saison des épidémies de méningites.

1. La recherche des périodicités communes entre les chroniques de poussières, du climat et de la méningite : le cas des districts du Niger

1.1. Introduction de l'article "Seasonality of meningitis in Africa and climate forcing : aerosols stand out"

Récemment, les données hebdomadaires de l'incidence des méningites à l'échelle nationale ont permis de mettre en évidence un décalage d'une semaine entre l'augmentation des niveaux de poussières et l'augmentation de l'incidence des méningites (Deroubaix *et al.*, 2013). Dès 1979, Greenwood avait déjà montré ce lien mais à l'échelle d'une ville du Nigeria (Greenwood *et al.*, 1979, 1984). Nous avons cherché dans cet article à démontrer que ce décalage se vérifie à l'échelle du district : nous analysons donc le lien entre la saisonnalité des méningites et celle de l'atmosphère.

La période des plus fortes incidences des méningites coïncide avec la période de la DTS mais aussi avec une période de fortes concentrations de poussières au niveau du sol, ceci est résumé par les cycles annuels moyens de toutes les variables atmosphériques à l'échelle du Niger (Figure IV.1). La base de données est constituée de quatre variables issues des réanalyses ERA-interim (Berrisford *et al.*, 2009; Dee *et al.*, 2011) dont les données sont fiables pour les études sanitaires (e.g. Sherwood et Huber, 2010; Giuseppe et Tompkins, 2012). De plus, la base de données intègre aussi une variable "poussières" basée sur l'Aerosol Index dont les capacités à l'échelle du district et au pas de temps hebdomadaire ont été décrites (Deroubaix *et al.*, 2013). Pour cette analyse, il faut disposer de séries temporelles continues tout au long de l'année et il est capital que les maxima de ces séries soient fidèles de l'évolution des concentrations de poussières au sol. Un travail important a donc été nécessaire pour mettre au point ces séries temporelles (cf. chapitre 3).

Cet article est basé sur les analyses des spectres d'ondelettes et de phases qui se concentrent sur la saisonnalité de la dynamique et le décalage entre la dynamique de l'incidence des méningites et celle de l'atmosphère à l'échelle du district. A l'inverse d'une étude des transformées de Fourier qui donnerait un décalage moyen sur toute la période, l'analyse en ondelettes permet de suivre l'évolution de la périodicité des séries temporelles entre elles, et donc du décalage. Pour appuyer ce décalage et s'en servir pour prévenir les épidémies, il est primordial qu'il se vérifie chaque année et dans chaque district. La méthode de l'analyse en ondelettes consiste à faire passer une courbe sinusoïdale dans les séries temporelles de chaque variable des districts du Niger afin d'identifier la périodicité de la série et son évolution au cours du temps. La particularité de cette sinusoïde réside dans sa fréquence qui évolue dans le temps pour coller au mieux aux données. L'analyse de la différence de phase entre les données de deux variables permet ensuite de quantifier le décalage entre les séries épidémiologiques et climatiques pour chaque district, et leur évolution au cours de la période.

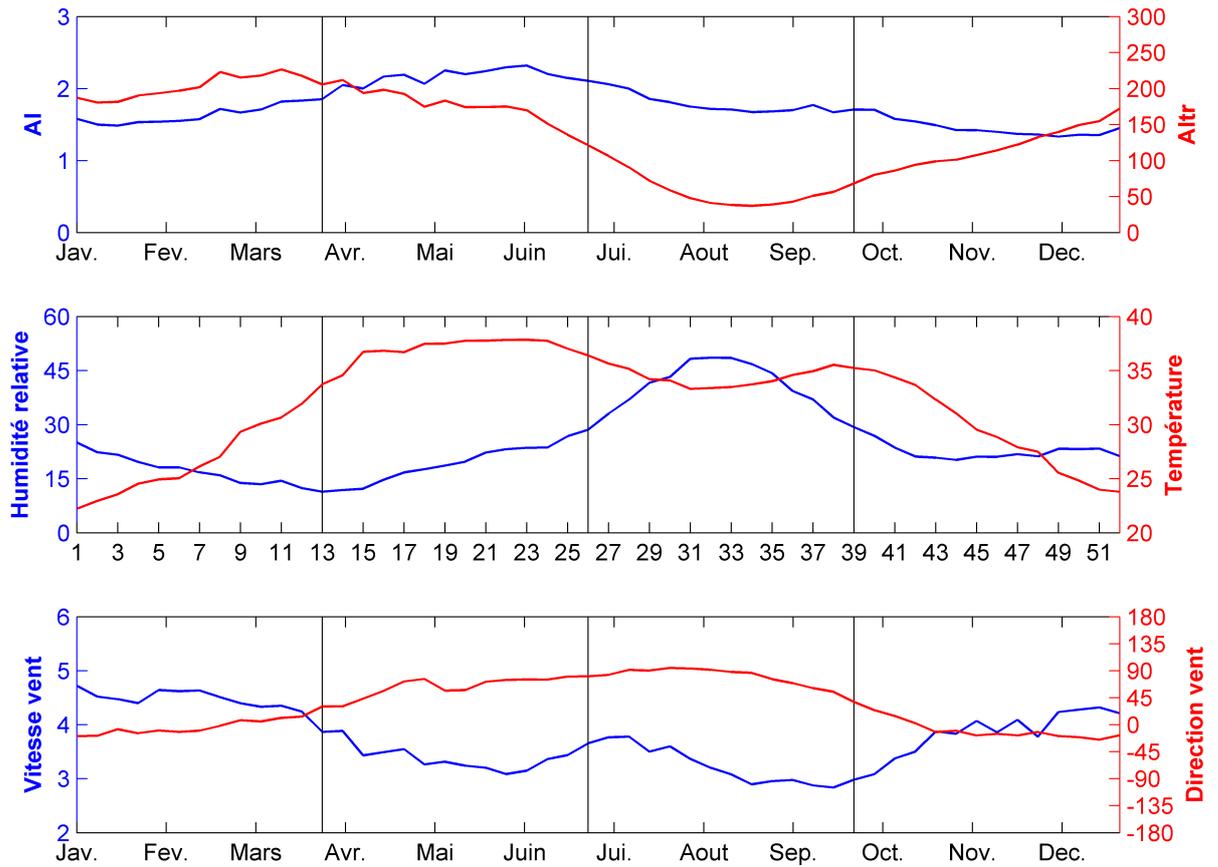


Figure IV.1. – Cycles annuels moyens des variables atmosphériques de la base de données sur la période 1997-2008 moyennés à l'échelle de tout le Niger; d'après la figure supplémentaire 6 de l'article Agier *et al.* (2013b).



Cite this article: Agier L, Deroubaix A, Martiny N, Yaka P, Djibo A, Broutin H. 2012 Seasonality of meningitis in Africa and climate forcing: aerosols stand out. *J R Soc Interface* 10: 20120814.
<http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2012.0814>

Received: 5 October 2012

Accepted: 12 November 2012

Subject Areas:

biomathematics

Keywords:

meningitis, climate and dust, seasonality, Africa, wavelet methods, phase analysis

Author for correspondence:

L. Agier

e-mail: l.agier@lancaster.ac.uk

Electronic supplementary material is available at <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2012.0814> or via <http://rsif.royalsocietypublishing.org>.

Seasonality of meningitis in Africa and climate forcing: aerosols stand out

L. Agier^{1,2}, A. Deroubaix^{3,4}, N. Martiny³, P. Yaka⁵, A. Djibo⁶ and H. Broutin⁷

¹Combining Health Information, Computation and Statistics, School of Health and Medicine, Lancaster University, Lancaster, UK

²Unité d'Epidémiologie des Maladies Emergentes, Institut Pasteur, Paris, France

³Centre de Recherche de Climatologie, Université de Bourgogne, Dijon, France

⁴Laboratoire d'Océanographie et du Climat, Institut Pierre Simon Laplace, Paris, France

⁵Direction Générale de la Météorologie, Ouagadougou, Burkina Faso

⁶Ministry of Health, Niamey, Niger

⁷Maladies Infectieuses et Vecteurs: Écologie, Génétique, Évolution et Contrôle, UMR CNRS 5290-IRD224-UM1-UM2, Montpellier, France

Bacterial meningitis is an ongoing threat for the population of the African Meningitis Belt, a region characterized by the highest incidence rates worldwide. The determinants of the disease dynamics are still poorly understood; nevertheless, it is often advocated that climate and mineral dust have a large impact. Over the last decade, several studies have investigated this relationship at a large scale. In this analysis, we scaled down to the district-level weekly scale (which is used for in-year response to emerging epidemics), and used wavelet and phase analysis methods to define and compare the time-varying periodicities of meningitis, climate and dust in Niger. We mostly focused on detecting time-lags between the signals that were consistent across districts. Results highlighted the special case of dust in comparison to wind, humidity or temperature: a strong similarity between districts is noticed in the evolution of the time-lags between the seasonal component of dust and meningitis. This result, together with the assumption of dust damaging the pharyngeal mucosa and easing bacterial invasion, reinforces our confidence in dust forcing on meningitis seasonality. Dust data should now be integrated in epidemiological and forecasting models to make them more realistic and usable in a public health perspective.

1. Introduction

Bacterial meningitis (which we will refer to as meningitis) is a contagious disease transmitted from individual to individual by airborne droplets of respiratory or throat secretions. The highest burden of the disease occurs in the 'African Meningitis Belt', a region stretching from Senegal to Ethiopia with an estimated population of 300 000 million people [1,2]. While *Neisseria meningitidis* A is the main cause for large epidemics, serogroups W135, C and X are also responsible for localized outbreaks [3,4] as well as *Streptococcus pneumoniae* or *Haemophilus influenzae* type B. Increase in incidence is typically observed every dry season, with weekly incidence rates reaching up to 100 per 100 000 population in individual communities [5,6]. Even with appropriate treatment, the mortality rate fluctuates around 10 per cent, and 10–15% of survivors suffer long-term neurological sequelae [7]. Asymptomatic carriage is common, which most often does not lead to the consecutive development of the illness [8,9]. Despite a strong seasonality, the determinants of meningitis dynamics are still poorly understood. Various factors are likely involved in the underlying mechanism of the disease dynamic, including (re)introduction of consecutive strains [6,10], vaccination impact, population dynamics and immunity [11–13]; climate and dust are often advocated as having a large impact. The epidemic season for meningitis coincides with the dry season and ends with the arrival of the African monsoon [1,2,14]; early epidemic onset often correlates with high annual incidence [15].

A bimodal tropical climate is predominant in Western Africa, with a dry season running from mid-October to mid-April followed by a wet season over the remaining six months of the year [16,17]. In the core of the dry season, from January to March, the dry and hot winds called Harmattan blow from the northeast and carry high dust loads [18]. These dusts mostly originate from Bodélé (Chad) [19] and are carried by wind over continental distances. Their specificity is to be mainly localized in the low layers of the atmosphere [20]. During the wet season, the southern monsoon winds blow from the Gulf of Guinea, and bring precipitations (mostly July–September) and high levels of humidity. Temperature, humidity levels, pressure, wind and dust thus display seasonal variations. This seasonality is less obvious in the arid Sahara region where it is mostly dry the whole year, as the monsoon winds do not go beyond 13.5° of latitude at their maximal northward expansion. In the meantime, rainfalls occur in areas up to 16° of latitude, with a gradient in their frequency and intensity.

The influence of climate on meningitis dynamics was first suspected in 1940 by Sicé *et al.* [21]. Since then, several studies have investigated the relationship between climate and meningitis using different approaches: qualitative [1,2,5,6,22,23] and recently quantitative [24–28]. The main conclusions of these studies were that (i) the intensity of the epidemics is related to the Harmattan wind [23,24,27,28] and its strength [29]; (ii) the onset of the epidemics is in phase with the winter maximum as defined by Sultan *et al.* [24] and with the arrival of the dust in the low layers of the atmosphere [25,26]; and (iii) the end of the epidemic season coincides with the arrival of the African monsoon [25,26]. The main hypothesis to explain climate impact on meningitis epidemics is an increase in the invasion rate (i.e. shift from carrier to infected status) [10]: persistent low air humidity and high dust loads are believed to damage the pharyngeal mucosa and ease the colonization of the epithelium by the meningococci [5,6,8,14]. Additionally, increased incidence could be attributed to higher transmission levels, due for instance to changes in living habits, such as proximity of individuals as they take refuge from the dusty winds [6,29]. Finally, co-occurrence of viral respiratory infections is expected to weaken the immune system and further ease the transmission and invasion by the bacteria [22].

To our knowledge, all studies of climate impact on meningitis were conducted at the national level and the annual or monthly time scale. Here, we focused on a finer level: the weekly temporal scale and district spatial scale, which are currently used for operational decisions and in-year response to emerging epidemics in most countries of the Belt, following WHO recommendations [30]. Two factors characterize an epidemic: its timing and its amplitude. In this study, we focused on the timing aspect and explored the relationship between the seasonality of meningitis, dust and climate. Based on wavelet and phase analysis [31], we investigated and compared time-varying periodic components, and mostly searched for temporal and spatial consistency in the time-lags between the signals, in order to detect persistent links. On top of dust, the climatic variables we have considered are: temperature (TEMP), wind force (Wf), wind direction (Wd) and relative humidity (RH). Niger was selected to conduct this analysis as it is one of the most affected countries of the Belt and has the longest history of meningitis cases reporting. As the district-level weekly scale is currently used for operational decisions, detailed understanding of the

relationship between meningitis and climate as well as dust could help in improving the public health response strategy.

2. Data and methods

2.1. Data

The epidemiological data consist of reported number of suspected meningitis cases per week from 1986 to 2007, for Niger's 38 health districts (figure 1). Data were collected through the national enhanced surveillance system, which is supported by WHO. Suspected cases were identified by use of a standard case definition based on clinical criteria [32].

The aerosol index (AI) is a semi-quantitative index of the aerosol loads integrated over the whole atmospheric column. It is based on ultraviolet radiance measures captured by satellite probes [33,34]. Specificities of the AI product are to be (i) particularly efficient over bright surfaces such as desert [35,36], being thus adapted to our semi-arid area of interest that is Niger and (ii) sensitive to dust altitude, with higher AI values obtained for the same amount of dust at high altitude compared with low altitude [37,38]. The AI product is available from the Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) at a $1^\circ \times 1.25^\circ$ spatial resolution (1° corresponds to approx. 100 km) from mid-1996 to 2005 [33], and from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) at a $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ spatial resolution from 2005 to 2009 [34]. An instrumental drift was detected for TOMS over the years 2002–2004 (R McPeters, S Taylor, G Jaross, D Haffner, G Labow, M Kowalewski 2007, personal communication; electronic supplementary material, figure S1). Three periods were accordingly defined, 1996–2001 (TOMS), 2002–2004 (TOMS) and 2005–2009 (OMI), over which data were corrected through standardization of the values, using as a reference the annual mean and standard deviation values averaged over the third period. The continuous time series that were obtained are further referred to as DUST.

Only dust at ground level has the potential to be inhaled by humans and to impact their health. We aimed at correcting the AI measurements from an altitude effect in order to better approach levels of dust concentrations at the surface. This is made possible by assuming that the altitude of dust in the Meningitis Belt results from cyclic climate conditions: in the dry season, the dusty Harmattan winds blow at low altitude [20]. It is followed by a transition period between the Harmattan and the monsoon regimes, during which vertical mixing is important, with dusts located both at low and high altitudes. At the beginning of the wet season, the monsoon wind replaces the air at the surface and pushes the dusty air higher up in the atmosphere. Finally, the concentration of dust in the higher layers of the atmosphere further decreases until the arrival of the next dry season. We used measurements of the surface aerosol concentrations extracted from two of the three ground-based stations of the Sahelian Dust Transect. These were set in the frame of the African monsoon multidisciplinary analyses (AMMA) programme, and rely on the tapered element oscillating microbalance technology [18]. The two stations we considered are located in the semi-arid part of Niger and Mali; whereas the third is located in Senegal on the coast, where climate is different. For the two given stations, we compared the related *in situ* measurements (named particulate matters, PM) to DUST values. We showed that, despite a large intra-seasonal variability, the PM/DUST rates could be considered seasonal and were overall

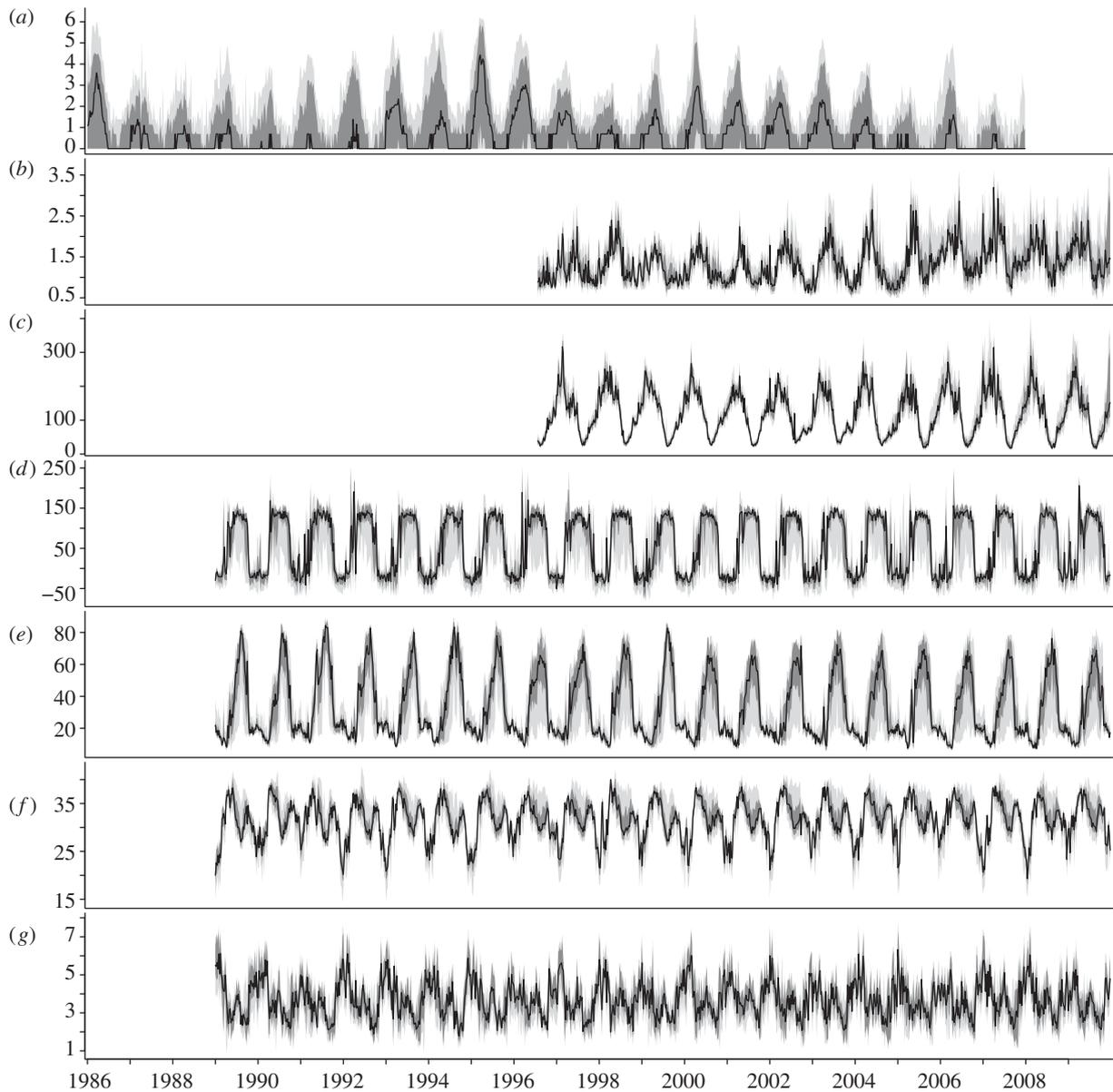


Figure 2. Time series of meningitis (a), DUST (b), DUST_C (c), Wd (d), RH (e), TEMP (f) and Wf (g) over the respective study periods. Meningitis time series were log-transformed. The black line depicts the week-specific median value across districts; the dark grey region depicts the area between the week-specific 10% and 90% percentiles; the light grey region depicts the area between the week-specific minimal and maximal values across districts.

slope of the wavelet power spectrum of the original time series, and thus display similar variance and autocorrelation structure [46]. For each test, 1000 surrogates were simulated; significance is given at a 5% confidence level.

2.3. Coherency and phase difference

Wavelet coherency provides information about two non-stationary time series being linearly correlated or not at a particular frequency and temporal location in the time–frequency plane [47]. Coherency coefficients are equal to one when there is perfect linear relationship, i.e. when in a given time period, the two time series oscillate with the same periodicity [31]. Similarly to univariate wavelet spectra, the importance of the coherency coefficients is represented on a time–frequency two-dimensional plot called the coherency graph. Significance is tested by simulating 1000 beta-surrogates for both time series, computing their related coherency graphs and comparing them to the coherency graph of the original data.

When coherency is significant, the phase difference can be interpreted. It represents the instantaneous time lag between the time series' oscillations at a given periodicity. Two time series are phase-locked for a given periodicity when they are coherent and their phase difference is constant throughout the study period. They are synchronous in phase if they are phase-locked with null phase difference, in which case values rise and fall simultaneously [48,49]. For each pair of variables, the phase difference curve was computed for each district and plotted. To estimate the consistency across districts in the evolution of these phase difference time series, we compared the differentiated time series two-by-two (observed within the cone of influence) by defining their correlation coefficients, and retained the mean value. We will refer to this distance as the distance D . Similarly to correlation coefficients, the closer to 1 the D value, the more consistent the evolution of phase difference across districts.

In our study, we used a Morlet mother wavelet because it is specially suited for sinusoidal signals, which most epidemiological and climate series are [31]. Phase difference values are, however, not expected to differ whichever

Table 1. Characteristics of the phase difference curves between DUST, DUST_C and climate variables. Phase differences for Aguié and Bilma are not accounted for, as they are considered as extreme values (see electronic supplementary material, figures S7 and S8, for details).

	mean	range	s.d.	mean weekly s.d.	distance <i>D</i>
DUST versus Wd	−10.01	(−17.60, −2.25)	3.08	2.47	0.85
DUST versus RH	−13.81	(−21.50, −6.43)	2.92	2.21	0.88
DUST versus TEMP	−3.61	(−12.40, 4.79)	3.25	2.47	0.89
DUST versus Wf	12.38	(−1.28, 22.29)	4.22	3.69	0.65
DUST _C versus Wd	−17.14	(−19.65, −11.42)	1.42	0.94	0.92
DUST _C versus RH	−20.95	(−25.23, −15.22)	1.43	0.89	0.97
DUST _C versus TEMP	−10.74	(−17.73, 0.20)	2.93	2.65	0.91
DUST _C versus Wf	5.26	(−3.19, 11.87)	2.76	2.52	0.58
Wd versus RH	−3.93	(−8.25, −2.87)	0.76	0.71	0.72
Wd versus TEMP ^a	5.99	(−0.57, 11.92)	2.45	2.38	0.76
Wd versus Wf	22.25	(14.24, 26.55)	2.40	2.21	0.71
RH versus TEMP ^a	9.93	(5.38, 15.03)	2.07	1.99	0.73
RH versus Wf	26.18	(17.82, 31.98)	2.52	2.34	0.77
TEMP versus Wf ^a	16.34	(4.36, 24.69)	3.93	3.84	0.66

^aPhase difference for Gaya is not accounted for.

mother wavelet is considered. Wavelet methods were directly applied on climate variables, whereas log-transformation was first performed on the meningitis time series to bring out their periodicity by compressing extreme values.

Wavelet spectra and coherency graphs could not all be presented. Instead, we selected a district that displays average characteristics, for which graphs are given as an example in the electronic supplementary material, figures S3 and S4. Districts' locations are given in figure 1.

3. Results

3.1. Univariate wavelet spectra

Among the 38 districts of Niger, five recorded very low meningitis incidence with numerous zero values: Arlit, Bilma, Diffa, Maine-Soroa and N'Guigmi. This leads to unclear seasonality and makes the time series inappropriate for wavelet analyses. These five districts are located in the arid northwest part of the country. Their low incidence is likely partly due to their small population size (see the electronic supplementary material, figure S5). For all other districts, meningitis time series are dominated by an annual periodic component, which is significant—except when incidence is too low (example of wavelet spectrum given in the electronic supplementary material, figure S3a). Transient pluri-annual periodicities were identified, with a dominant 6–8 years cycle displayed in half of the districts' spectra. Broutin *et al.* previously highlighted an 8–12 years transient periodic component for meningitis epidemics at a national level, in nine countries of the Meningitis Belt including Niger [50]. The time series used in our study were of too short a length to test the persistence of these low-frequency components at a district level.

For all the districts, spectra for DUST, DUST_C, RH and Wd exhibited a dominant annual periodicity, significant over the whole study period—except for Arlit, Bilma and

Aguié for Wd, and to a lower extent for RH (example given in the electronic supplementary material, figure S3b–f). This annual periodicity is also displayed in Wf and TEMP spectra; it is, however, not significant over the whole study period, and is counterbalanced by a strong six-month periodicity, mostly for TEMP. This periodicity is due to the occurrence of two consecutive climate regimes in the area of study: the Harmattan regime in the dry season, with a maximum in Wf and in TEMP being reached in March; and the monsoon regime, with local maxima in Wf and TEMP reached in July (figure 2e,f; averaged patterns in electronic supplementary material, figure S6). A six-month periodicity also appears in several districts' RH spectrum, yet in a weak and non-consistent way. No pluri-annual periodicities were observed in any of the dust or climate spectra.

We further observed the temporal evolution of the significance of the annual periodic component. High significance for a given parameter corresponds to large amplitude between values of the dry and the wet season. Interestingly, we noted a decrease in the significance of the RH annual periodicity in northern districts: the rainy season's average RH decreased in these districts after the year 2000. In the following, we focus on the dynamics of the predominant 1-year periodic component as we aim at better understanding the impact of dust and climate factors on the seasonality of the disease.

3.2. Coherency and phase difference

First, we observed the district-level coherency and phase difference for each pair of dust and climate variables (results summarized in table 1). On the annual periodicity, coherency was significant over the whole study period for all districts and all pairs of variables. Results highlighted a synchronicity in phase for Wd versus RH in all districts but Arlit and Bilma (table 1, mean and s.d.). The temporal evolution of the phase difference was similar across the same districts for DUST versus TEMP, RH and Wd (distance *D* values greater than 0.85), and to a greater extent for DUST_C versus TEMP, RH

Table 2. Characteristics of the phase difference curves for meningitis (men) versus dust and climate variables. Phase difference was considered for all districts but the low incidence ones.

	mean	range	s.e.	mean weekly s.e.	distance D
men versus DUST	-5.87	(-11.96, 1.94)	2.22	1.79	0.62
men versus DUST _C	1.55	(-4.49, 7.30)	1.95	1.68	0.55
men versus Wd	-15.38	(-33.50, -8.13)	2.21	2.17	0.15
men versus RH	-19.66	(-36.98, -11.40)	2.77	2.76	0.12
men versus TEMP	-9.07	(-31.02, 1.18)	3.05	2.95	0.31
men versus Wf	6.54	(-12.12, 15.88)	3.26	3.11	0.31
men versus Wd ^a	-15.16	(-19.66, -8.13)	2.10	2.11	0.11
men versus RH ^a	-19.33	(-32.50, -11.40)	2.82	2.84	0.11
men versus TEMP ^a	-8.54	(-16.29, 1.18)	2.96	2.91	0.45
men versus Wf ^a	6.98	(-2.44, 15.88)	3.49	3.35	0.45

^aComputed over the period all data were available (i.e. 1996–2007).

and Wd (D values greater than 0.90); yet it could not be considered phase-locked (too large s.d., table 1).

Second, coherency and phase difference were computed for meningitis compared to dust and climate variables for all but the five low incidence districts previously defined (results summarized in table 2). Coherencies are all dominated by a 1-year periodic component, significant over the whole study period for meningitis versus DUST, DUST_C, RH and Wd, and in a more inconsistent way for meningitis versus TEMP and Wf (example of coherency graph given in the electronic supplementary material, figure S4). Over the respective study periods, we observed no district-level phenomenon of phase lock, but a noticeable consistency in the evolution of the phase difference curves across districts for meningitis versus DUST and DUST_C: unlike other variables, the phase difference evolves similarly across districts (figure 3). The value for the distance D is 0.62 for meningitis versus DUST and 0.55 for meningitis versus DUST_C; it does not exceed 0.31 for meningitis versus other climate variables. We further computed the distance D over a common restricted time period over which DUST and DUST_C are defined. Over this 11 year period, the D value for meningitis versus climate variables does not exceed 0.45, hence remains smaller than the 0.62 and 0.53 values for DUST and DUST_C, respectively. On average, the time lag between seasonal components of meningitis and DUST is -5.87 weeks, and 1.55 weeks for DUST_C. The averaged phase difference was observed by district and displayed spatial variations (figure 4). We further observed the phase difference between districts for a given variable: the closer to 0, the more similar the timing of the cycles between districts. The global standard deviation of these two-by-two phase difference curves is 2.91 for meningitis (table 3); it is 2.22 and 1.95 for meningitis versus DUST and meningitis versus DUST_C, respectively (table 2). This indicates there is a stronger similarity when relating a district's meningitis curve to its DUST or DUST_C curves than when relating it to other districts' meningitis curves. Moreover, the standard deviations of the two-by-two phase difference curves for DUST and DUST_C are 3.74 and 1.28, respectively (table 3). Despite the small variability between districts for DUST_C, comparing DUST_C to meningitis curves led to a smaller variability than comparing meningitis curves together.

4. Discussion

Relationship between climate and dust and meningitis has often been advocated in the last decade. First quantitative studies were recently conducted, especially in the frame of the AMMA programme [24–27], leading to new hypotheses on the relationships between climate, dust and epidemic cycles. In this study, we strengthen these first results and go further into details by considering data at the weekly district level. To our knowledge, despite being the base for in-year response to emerging epidemics in most countries of the Belt, this scale has not been used yet for investigating meningitis epidemics' link with climate and dust. Wavelet methods were recently largely used in both epidemiology [50–54] and climate [55,56], and were first applied to meningitis data by Broutin *et al.* [50] at a national scale to compare periodicities and detect synchrony between nine countries of the Meningitis Belt. In our study, we used this method to investigate climate forcing on meningitis seasonality, and mostly focused on detecting spatially consistent time-lags between the seasonal component of the signals. Results highlighted the special case of dust in comparison to Wd, humidity or TEMP: the time-lags between seasonal components of meningitis and DUST and between meningitis and DUST_C evolve similarly for all districts (figure 3). This favours the assumption of a strong link between dust and meningitis annual seasonality and prompts considering dust as a major predictor of the timing of meningitis epidemics.

Despite this consistency across districts, the time lag between the seasonal component of dust and meningitis evolves across the study period: this is likely due to another time-varying factor, which is that interaction with dust would trigger an increase in meningitis cases. Introduction and re-introduction of consecutive meningitis strains [14,57] in the area of study could be this other predictor: with an increased global susceptibility of the population to these new strains, dust could have a more instantaneous effect by helping the invasion of the given bacteria, with it being hardly slowed down by the immune system. Another candidate predictor could be the intensity of dust events; but they do not appear to covary with the average difference of phase (figure 2*b* versus figure 3*a* and figure 2*c* versus figure 3*b*). However, the effect of dust and climate variables on the amplitude of the

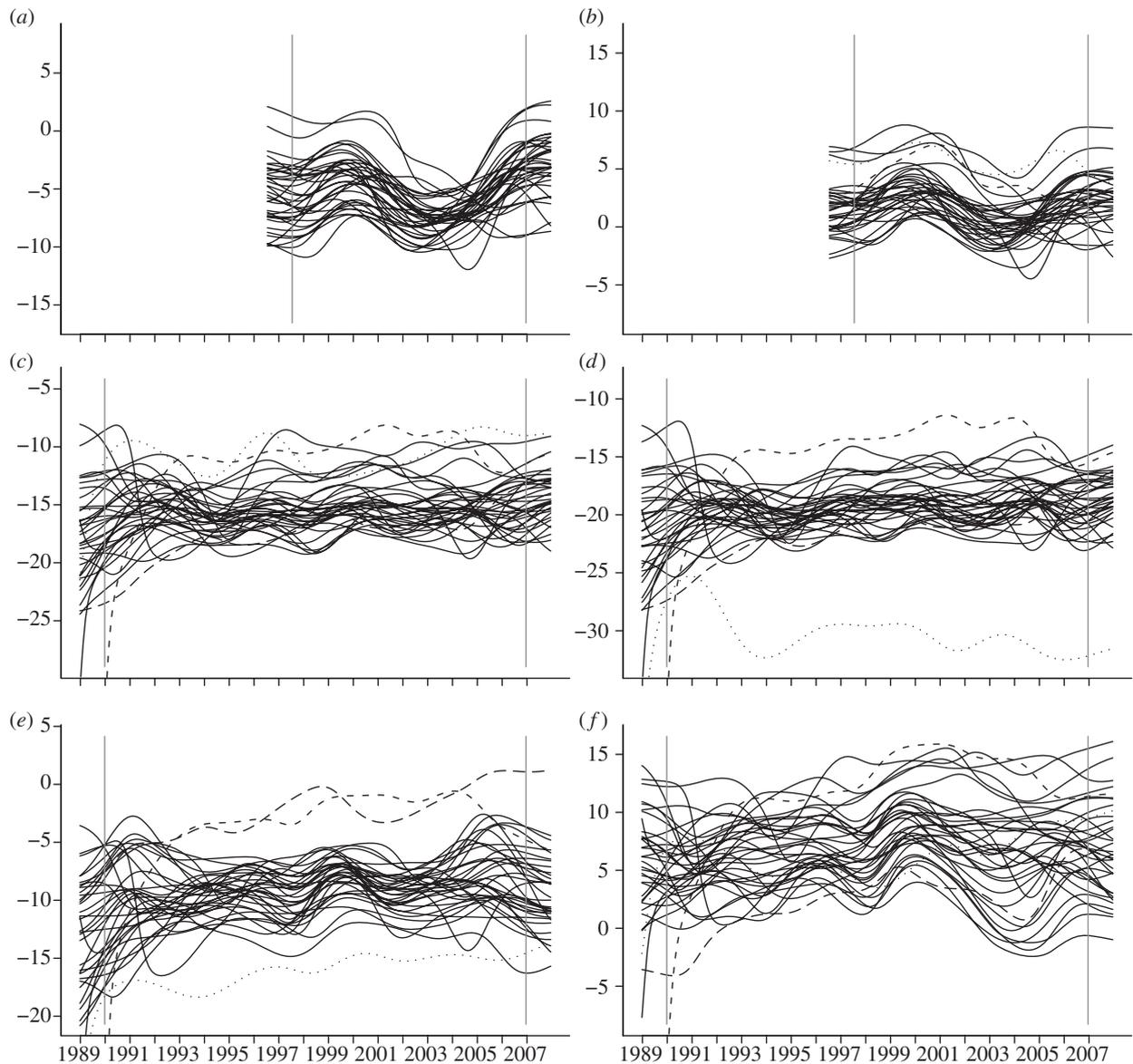


Figure 3. District-level curves of phase difference for the annual periodicity as a function of time (1989–2007) for meningitis log-transformed time series compared with DUST (*a*), DUST_C (*b*), Wd (*c*), RH (*d*), TEMP (*e*) and Wf (*f*). The y-axis gives the phase difference in weeks. Same scales are used for all graphs. Grey vertical lines mark the boundaries of the cone of influence. The five low incidence districts (Arlit, Bilma, Diffa, N’Guigmi and Maine-Soroa) are not represented here. In graph (*b*), the dashed line depicts Agadez, the dotted line Gouré. In graphs (*c*), (*d*), (*e*) and (*f*), the dashed line depicts Agadez, the dotted line Aguié and the long-dashed line Gaya.

epidemics was not investigated here (as we focused on the seasonality), and should be studied in more depth.

Only dusts at ground level are of interest for the public health community for being potentially inhaled by local population and impacting human health. However, remote sensed AI corresponds to absorbing aerosols cumulated over the whole atmospheric column: we aimed at correcting the AI estimates (so-called DUST) from an altitude effect in order to be more representative of the dust at the surface (so-called DUST_C). Same spatial consistency in the evolution of the phase difference with meningitis was observed for DUST_C and DUST, with a negative average lead time for DUST (−5.81 weeks), while it is positive for DUST_C (1.53 weeks, table 3). This difference reflects the increase of aerosol altitude at the end of the meningitis season [37,38]. These results reinforce our confidence in using our correction of the AI estimates of dust: the pattern of similarity among districts in the evolution of the phase difference observed for DUST versus meningitis is reproduced for DUST_C versus meningitis; the

average phase difference becomes positive, but its variability is maintained (table 3). This indicates that the applied correction was not too strong and did not constrain all district-level annual curves to peak simultaneously. The average phase difference between DUST_C and meningitis is 11 days, which is consistent with the time for dust to damage the respiratory tract along with the incubation period of the disease (1–14 days) [58]. This study hence suggests that, when the levels of dust in the low layers of the atmosphere start increasing/decreasing, we can infer that the meningitis incidence will start increasing/decreasing approximately 10 days later. As specified previously, another time-varying factor (possibly (re)introduction of consecutive strains) is believed to interact with dust, and define the exact time lag between dust and meningitis oscillations.

The remaining variability among districts in the average phase difference between dust and meningitis (figure 4) could be due (i) to the local intensity and persistence of dust events; (ii) to reporting delays with longer delays expected in

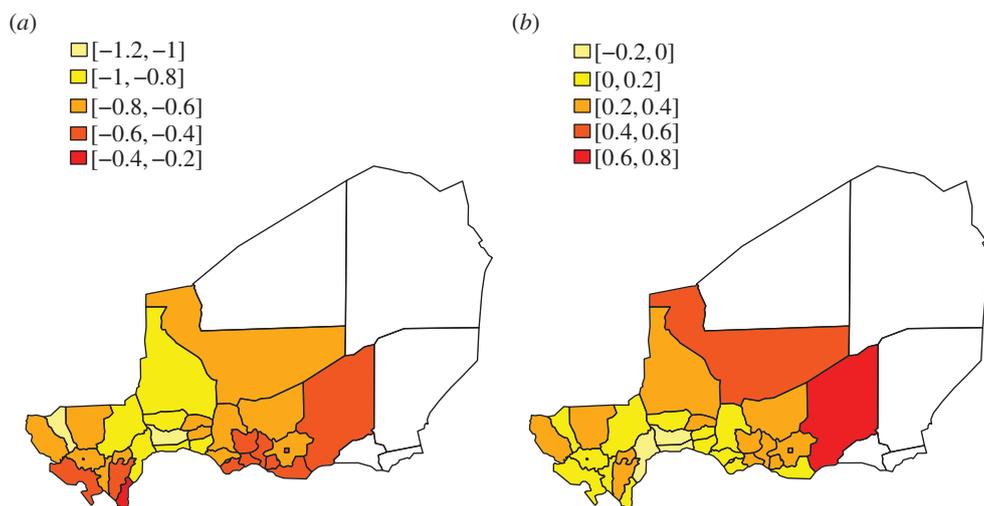


Figure 4. Map of district-level average phase difference for meningitis versus DUST (*a*) and meningitis versus DUST_C (*b*) over the period 1996–2007. All districts are considered except the five low incidence districts. (Online version in colour.)

Table 3. Characteristics of the phase difference curves between districts for a given variable among meningitis (men), dust and climate.

	mean	range	s.e.	mean weekly s.e.
men ^a	-0.26	(-11.78, 11.32)	2.91	2.88
DUST	0.32	(-11.59, 14.43)	3.74	3.70
DUST _C	0.18	(-4.16, 5.03)	1.28	1.27
Wd	-0.58	(-8.88, 8.26)	1.85	1.82
RH	1.00	(-15.61, 15.92)	3.51	3.41
TEMP	-0.24	(-15.79, 16.94)	4.38	4.36
Wf	-0.11	(-10.10, 10.10)	3.00	2.89
men ^{a,b}	-0.28	(-9.93, 10.83)	2.91	2.90
DUST ^b	0.26	(-10.74, 12.84)	3.56	3.53
DUST _C ^b	0.19	(-4.16, 5.03)	1.31	1.29
Wd ^b	-0.58	(-8.88, 8.26)	1.81	1.77
RH ^b	1.17	(-15.47, 15.92)	3.95	3.93
TEMP ^b	-0.22	(-15.79, 16.75)	4.47	4.46
Wf ^b	-0.13	(-9.96, 9.58)	3.16	3.06

^aPhase difference for all districts but the low incidence ones (i.e. Arlit Bilma, Diffa, N'Guigmi and Main-Soroa).

^bComputed over the period all data were available (i.e. 1996–2007).

remote districts; (iii) to spatial variations in the susceptibility, resulting from contrasted socio-cultural and environmental factors; and/or (iv) to increased natural immunity owing to higher contact rate in densely populated areas.

It is challenging to define an ideal spatial window to focus on for investigating climate impact on meningitis dynamics: climate is a large-scale phenomenon; while it was proved in earlier studies that meningitis epidemics occur at a sub-district level [2,12,59,60]. However, the district scale is in our opinion the most appropriate to investigate periodic components: it is a large enough scale to detect periodic patterns for meningitis epidemics, while being small enough to capture spatial variability in dust and climate variables. Moreover, using this unusual scale to observe climate helped in highlighting a few phenomena. First, it was observed that RH variability between seasons decreases at the middle of the study period in the northern semi-desert part of Niger, which could be attributed to changes in climate with a possible expansion of the desert.

Second, a six-month periodicity appeared in Wf and TEMP spectra. This is coherent with what we know of the climate in the area: (i) TEMP is driven by the solar intensity, with a negative impact of RH: it reaches its maximum in March in the core of the dry season, but another local maximum is reached at the end of the rainy season, in September; and (ii) Wf is the highest in the dry season when continental trade winds blow. However, the southern flux intensifies in July as the monsoon winds blow, with a consecutive increase in Wf (see the electronic supplementary material, figure S6). It is important to highlight these results, as up to now the climate and teleconnection researches in the Sahelian area mostly focused on the wet season. The dry season should equally be studied, for it is of major importance when relating climate to human health.

One limitation of this study concerns measurement errors and representativeness. First, owing to the high level of public awareness and concern, the degree of involvement of health professionals and the country-wide use of the WHO

case definition [30], the reporting rate for meningitis cases is believed to be both high and consistent. Reporting error or delays are relatively unlikely, and should, however, affect data in a spatially and temporally consistent way. Second, climate estimates are obtained from reanalysis, which are the most representative estimates we can currently obtain, and are widely used by the climate research community [19,61–63]. Third, the AI representativeness has been tested: although it is perfectible, especially in terms of capturing the intensity of dust events in the dry season, it was proved to perform well in capturing the timing of those events [64–66]. As we focus in this study on variables' timing, results should not be affected. No other aerosol datasets covering such a long time period are available. Here, we provide an alternative to the issue of the appropriateness of measurements of dust captured over the whole atmospheric column when investigating dust impact on health: we aimed to correct DUST data from an altitude effect (which was assumed to be cyclic and consistent in the studied region) and approximate dust levels at the surface. The coherency in the results obtained using raw DUST data and corrected DUST_C data, along with the length of the study period we are considering, strengthens our confidence in using these sets of data. Ideally, ground-level measurements of dust would be needed, but the existing ones are too sparse to be used in fine spatial scale studies such as this one (to our knowledge, in the region, we can locate no other station but the three of Sahelian Dust Transect). We hope for more stations to be setup in the future. Spatial dust data could also be obtained from simulation of dust emission and transport models such as CHIMERE [67,68]. Although current dust models were proved a good match with ground-level data at a large scale (monthly temporal scale), they still need to be tested at a smaller scale before being used in further studies [67–69].

To conclude, to our knowledge, this exploratory study is the first one (i) at a district level and weekly scale and (ii) to investigate and compare the link between the seasonality of meningitis versus dust and climate variables. We

provide an important insight by defining dust loads as the prime parameter explaining the seasonality of meningitis. Up to now, few studies have investigated the impact of dust on health [70,71], and deplored a weak focus on West Africa. We provide here new evidence of this impact on meningitis in the given region. However, more quantitative studies are now needed to confirm and deepen our findings, to investigate the factors impacting the amplitude of the epidemics (including dust and climate), and to look for possible interaction effects. Finally, we would recommend the estimates of ground-level dust to be further improved. Ultimately, this refined knowledge of the dust impact on meningitis dynamic could help in improving the public health decision process.

A new conjugate vaccine against *Neisseria meningitidis* A is currently being introduced in the African Belt [72], and in the future will be used in preventive routine vaccination campaigns of infants. In the short- and long-term perspective, it is crucial to identify the determinants of the meningitis dynamics in order to be able to make epidemiological models more realistic and to test different scenarios of vaccination strategy. Wavelet analyses were used here to explore the complexity of environmental and epidemiological signals before the modelling stage [31]. The current epidemiological [73] and forecasting [74] models for meningitis considered so far a theoretical seasonality of the meningitis transmission dynamics. We now suggest integrating dust data in these models to make them more realistic and usable in a public health perspective.

This work was supported by Lancaster University through a PhD studentship award to L.A., and by the ADCEM project through the PhD fellowships of A.D. The authors acknowledge the AMMA programme for its financial support in the frame of the climate-health group, and for providing the Sahelian Dust Transect particulate matters databases collected in Banizoumbou (Niger) and Cinzana (Mali) ground-based weather stations. Thanks to Bernard Cazelles for his useful comments and suggestions; and to Tristan Rouyer for kindly sharing his codes for the beta-surrogate significance tests. Thanks to the MERIT community and in particular to the MAMEMA group for useful discussions and advice on the project.

References

- Lapeyssonnie L. 1963 La meningite cerebro-spinale en Afrique. *Bull. World Health Organ.* **28**(Suppl. 1), 3–114.
- Molesworth AM, Thomson MC, Connor SJ, Cresswell MP, Morse AP, Shears P, Hart CA, Cuevas LE. 2002 Where is the meningitis belt? Defining an area at risk of epidemic meningitis in Africa. *Trans. Roy. Soc. Trop. Med. Hyg.* **96**, 242–249. (doi:10.1016/S0035-9203(02)90089-1)
- Teyssou R, Muros-le-Rouzic E. 2007 Meningitis epidemics in Africa: a brief overview. *Vaccine* **25**, 7–11. (doi:10.1016/j.vaccine.2007.04.032)
- Mueller JE, Borrow R, Gessner BD. 2006 Meningococcal serogroup W135 in the African meningitis belt: epidemiology, immunity and vaccines. *Expert Rev. Vaccines* **5**, 319–336. (doi:10.1586/14760584.5.3.319)
- Mueller JE, Gessner BD. 2010 A hypothetical explanatory model for meningococcal meningitis in the African meningitis belt. *Int. J. Infect. Dis.* **14**, 553–559. (doi:10.1016/j.ijid.2009.08.013)
- Greenwood BM. 1999 Manson lecture. Meningococcal meningitis in Africa. *Trans. Roy. Soc. Trop. Med. Hyg.* **93**, 341–353. (doi:10.1016/S0035-9203(99)90106-2)
- Smith AW, Bradley AK, Wall RA, McPherson B, Secka A, Dunn DT, Greenwood BM. 1988 Sequelae of epidemic meningococcal meningitis in Africa. *Trans. Roy. Soc. Trop. Med. Hyg.* **82**, 312–320. (doi:10.1016/0035-9203(88)90459-2)
- Trotter CL, Greenwood BM. 2007 Meningococcal carriage in the African meningitis belt. *Lancet Infect. Dis.* **7**, 797–803. (doi:10.1016/S1473-3099(07)70288-8)
- Kristiansen PA *et al.* 2011 Baseline meningococcal carriage in Burkina Faso before the introduction of a meningococcal serogroup A conjugate vaccine. *Clin. Vaccine Immunol.* **18**, 435–443. (doi:10.1128/CVI.00479-10)
- Leimkugel J, Hodgson A, Forgor AA, Pflüger V, Dangy J-P, Smith T, Achtman S, Gagneux S, Pluschke G. 2007 Clonal waves of *Neisseria* colonisation and disease in the African meningitis belt: eight-year longitudinal study in northern Ghana. *PLoS Med.* **4**, 10. (doi:10.1371/journal.pmed.0040101)
- Mueller JE, Yaro S, Traore Y, Sangare L, Tarnagda Z, Njanpop-Lafourcade B-M, Borrow R, Gessner BD. 2006 *Neisseria meningitidis* serogroups A and W-135: carriage and immunity in Burkina Faso, 2003. *J. Infect. Dis.* **193**, 812–820. (doi:10.1086/500511)
- Mueller JE *et al.* 2011 Study of a localized meningococcal meningitis epidemic in Burkina Faso: incidence, carriage, and immunity. *J. Infect. Dis.* **204**, 1787–1795. (doi:10.1093/infdis/jir623)
- Girard MP, Preziosi M-P, Aguado M-T, Kiény MP. 2006 A review of vaccine research and development: meningococcal disease. *Vaccine* **24**, 4692–4700. (doi:10.1016/j.vaccine.2006.03.034)

14. Moore PS. 1992 Meningococcal meningitis in sub-Saharan Africa: a model for the epidemic process. *Clin. Infect. Dis.* **14**, 515–525. (doi:10.1093/clinids/14.2.515)
15. Agier L, Broutin H, Bertherat E, Djingarey MH, Lingani C, Perea W, Hugonnet S. 2012 Timely detection of bacterial meningitis epidemics at district-level: a study in three countries of the African Meningitis Belt. *Trans. Roy. Soc. Trop. Med. Hyg.* (doi:10.1093/trstmh/trs010)
16. Nicholson SE, Kim J, Hoopingarner J. 1988 *Atlas of African rainfall and its interannual variability*. Tallahassee, FL: Florida State University.
17. Fontaine B, Janicot S. 1993 L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'ouest. *Météorologie* **1**, 28–53.
18. Marticorena B *et al.* 2010 Temporal variability of mineral dust concentrations over West Africa: analyses of a pluriannual monitoring from the AMMA Sahelian Dust Transect. *Atmos. Chem. Phys.* **10**, 8899–8915. (doi:10.5194/acpd-10-8051-2010)
19. Prospero JM, Ginoux P, Torres O, Nicholson SE, Gill TE. 2002 Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Rev. Geophys.* **40**, 1–31. (doi:10.1029/2000RG000095)
20. Leon J-F, Derimian Y, Chiapello I, Podvin T, Chatenet B, Diallo A, Deroo C. 2009 Aerosol vertical distribution and optical properties over M'Bour (16.96° W; 14.39° N), Senegal from 2006 to 2008. *Atmos. Chem. Phys.* **9**, 9249–9261. (doi:10.5194/acp-9-9249-2009)
21. Sice A, Robin E, Brochil L. 1940 Considération épidémiologiques sur la méningite cérébro-spinale au soudan français. *Bulletin de la Société de pathologie exotique*, 35–59.
22. Mueller JE *et al.* 2008 Association of respiratory tract infection symptoms and air humidity with meningococcal carriage in Burkina Faso. *Trop. Med. Int. Health* **13**, 1543–1552. (doi:10.1111/j.1365-3156.2008.02165.x)
23. Remy G. 1988 La méningite cérébro-spinale: dans le sillage de l'harmattan. Paysages et milieu épidémiologiques dans l'espace Ivoir-Burkinabé. *Editions CNRS*, 149–253.
24. Sultan B, Labadi K, Guégan J-F, Janicot S. 2005 Climate drives the meningitis epidemics onset in West Africa. *PLoS Med.* **2**, e6. (doi:10.1371/journal.pmed.0020006)
25. Martiny N *et al.* 2012 Le climat, un facteur de risque pour la santé en Afrique de l'Ouest. *La Météorologie* **79**, 72–78.
26. Martiny N, Chiapello I. Submitted. Assessments for the impact of mineral dust on the meningitis regime in West Africa.
27. Yaka P, Sultan B, Broutin H, Janicot S, Philippon S, Fourquet N. 2008 Relationships between climate and year-to-year variability in meningitis outbreaks: a case study in Burkina Faso and Niger. *Int. J. Health Geogr.* **7**, 34. (doi:10.1186/1476-072X-7-34)
28. Besancenot JP, Boko M, Oke PC. 1997 Weather conditions and cerebrospinal meningitis in Benin (Gulf of Guinea, West Africa). *Eur. J. Epidemiol.* **13**, 807–815. (doi:10.1023/A:1007365919013)
29. Remy G. 1990 Les fondements écologiques de la «ceinture» de la méningite cérébro-spinale en Afrique Sud-saharienne. *Climat et santé* **3**, 7–21.
30. WHO. 2000 Detecting meningococcal meningitis epidemics in highly-endemic African countries. *Wkly Epidemiol. Rec.* **75**, 306–309.
31. Cazelles B, Chavez M, Constantin De Magny G, Guegan JF, Hales S. 2007 Time-dependent spectral analysis of epidemiological time-series with wavelets. *J. R. Soc. Interface* **4**, 625–636. (doi:10.1098/rsif.2007.0212)
32. WHO. 2005 Enhanced surveillance of epidemic meningococcal meningitis in Africa: a three-year experience. *Wkly Epidemiol. Rec.* **80**, 313–320.
33. Torres O, Bhartia PK, Herman JR, Ahmad Z, Gleason J. 1998 Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: theoretical basis. *J. Geophys. Res.* **103**, 17 099–17 110. (doi:10.1029/98JD00900)
34. Torres O, Tanskanen A, Veihelmann B, Ahn C, Braak R, Bhartia PK, Veeffkind P, Levelt P. 2007 Aerosols and surface UV products from ozone monitoring instrument observations: an overview. *J. Geophys. Res.* **112**, 1–14. (doi:10.1029/2007JD008809)
35. Herman JR, Celarier EA. 1997 Earth surface reflectivity climatology at 340–380 nm from TOMS data. *J. Geophys. Res.* **102**, 28 003–28 011. (doi:10.1029/97JD02074)
36. Hsu NC, Herman JR, Torres O, Holben BN, Tanre D, Eck TF, Smirnov A, Chatenet B, Lavenu F. 1999 Comparisons of the TOMS aerosol index with sun-photometer aerosol optical thickness: results and applications. *J. Geophys. Res.* **104**, 6269–6279. (doi:10.1029/1998JD200086)
37. De Graaf M, Stammes P, Torres O, Koelemeijer RBA. 2005 Absorbing aerosol index: sensitivity analysis, application to GOME and comparison with TOMS. *J. Geophys. Res.* **110**, 1–19. (doi:10.1029/2004JD005178)
38. Mahowald NM, Dufresne JL. 2004 Sensitivity of TOMS aerosol index to boundary layer height: implications for detection of mineral aerosol sources. *Geophys. Res. Lett.* **31**, 2–5. (doi:10.1029/2003GL018865)
39. Dee DP *et al.* 2011 The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* **137**, 553–597. (doi:10.1002/qj.828)
40. Cazelles B, Chavez M, Berteaux D, Ménard F, Vik JO, Jenouvrier S, Stenseth NC. 2008 Wavelet analysis of ecological time series. *Oecologia* **156**, 287–304. (doi:10.1007/s00442-008-0993-2)
41. Lau KM, Weng H. 1995 Climate signal detection using wavelet transform: how to make a time series sing. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **76**, 2391–2402. (doi:10.1175/1520-0477(1995)076<2391:CSDU WT>2.0.CO;2)
42. Mallat S. 1998 *A wavelet tour of signal processing*. San Diego, CA: Academic Press.
43. Torrence C, Compo GP. 1998 A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **79**, 61–78. (doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2)
44. Efron B, Tibshirani RJ. 1993 *An introduction to the bootstrap*. London, UK: Chapman & Hall.
45. Theiler J, Eubank S, Longtin A, Galdrikian B, Doynefarmer J. 1992 Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data. *Physica D* **58**, 77–94. (doi:10.1016/0167-2789(92)90102-5)
46. Rouyer T, Fromentin JM, Stenseth NC, Cazelles B. 2008 Analysing multiple time series and extending significance testing in wavelet analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **359**, 11–23. (doi:10.3354/meps07330)
47. Chatfield C. 2003 *The analysis of time series: an introduction*. London, UK: Chapman & Hall.
48. Pikovsky A, Rosenblum M, Kurths J. 2003 *Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
49. Cazelles B, Stone L. 2003 Detection of imperfect population synchrony in an uncertain world. *J. Anim. Ecol.* **72**, 953–968. (doi:10.1046/j.1365-2656.2003.00763.x)
50. Broutin H, Philippon S, Constantin De Magny G, Courel MF, Sultan B, Guégan JF. 2007 Comparative study of meningitis dynamics across nine African countries: a global perspective. *Int. J. Health Geogr.* **6**, 29. (doi:10.1186/1476-072X-6-29)
51. Cummings DAT, Irizarry RA, Huang NE, Endy TP, Nisalak A, Ungchusak K, Burke DS. 2004 Travelling waves in the occurrence of dengue haemorrhagic fever in Thailand. *Nature* **427**, 344–347. (doi:10.1038/nature02225)
52. Constantin De Magny G, Guégan JF, Petit M, Cazelles B. 2007 Regional-scale climate-variability synchrony of cholera epidemics in West Africa. *BMC Infect. Dis.* **9**, 5–8. (doi:10.1186/1471-2334-7-20)
53. Cazelles B, Chavez M, McMichael AJ, Hales S. 2005 Nonstationary influence of El Niño on the synchronous dengue epidemics in Thailand. *PLoS Med.* **2**, e106. (doi:10.1371/journal.pmed.0020106)
54. Ben Ari T *et al.* 2012 Identification of Chinese plague foci from long-term epidemiological data. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **109**, 8196–8201. (doi:10.1073/pnas.1110585109)
55. Janicot S, Sultan B. 2001 Intra-seasonal modulation of convection in the West African monsoon. *Geophys. Res. Lett.* **28**, 523–526. (doi:10.1029/2000GL012424)
56. Sultan B, Baron C, Dingkuhn M, Sarr B, Janicot S. 2005 Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agric. Forest Meteorol.* **128**, 93–110. (doi:10.1016/j.agrformet.2004.08.005)
57. Goldschneider I, Gotschlich EC, Artenstein MS. 1969 Human immunity to the meningococcus. *J. Exp. Med.* **129**, 1327–1348. (doi:10.1084/jem.129.6.1327)
58. Stephens DS, Greenwood B, Brandtzaeg P. 2007 Epidemic meningitis, meningococcaemia, and *Neisseria meningitidis*. *Lancet* **369**, 2196–2210. (doi:10.1016/S0140-6736(07)61016-2)
59. Cuevas LE, Savory EC, Hart CA, Thomson MC, Yassin MA. 2007 Effect of reactive vaccination on

- meningitis epidemics in Southern Ethiopia. *J. Infect.* **55**, 425–430. (doi:10.1016/j.jinf.2007.07.015)
60. Paireau J, Girond F, Collard JM, Mainassara HB, Jusot JF. 2012 Analysing spatio-temporal clustering of meningococcal meningitis outbreaks in Niger reveals opportunities for improved disease control. *PLoS Negl. Trop. Dis.* **6**, 1577. (doi:10.1371/journal.pntd.0001577)
61. Engelstaedter S, Tegen I, Washington R. 2006 North African dust emissions and transport. *Earth Sci. Rev.* **79**, 73–100. (doi:10.1016/j.earscirev.2006.06.004)
62. Washington R, Todd M, Goudie A, Middleton N. 2003 Dust storm source areas determined by the total ozone monitoring spectrometer and ground observations. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* **93**, 297–313. (doi:10.1111/1467-8306.9302003)
63. Thomson MC, Molesworth AM, Djingarey MH, Yameogo KR, Belanger F, Cuevas LE. 2006 Potential of environmental models to predict meningitis epidemics in Africa. *Trop. Med. Int. Health* **11**, 781–788. (doi:10.1111/j.1365-3156.2006.01630.x)
64. Ginoux P. 2003 Empirical TOMS index for dust aerosol: applications to model validation and source characterization. *J. Geophys. Res.* **108**, 4534–4553. (doi:10.1029/2003JD003470)
65. Chiapello I, Prospero JM, Herman JR, Hsu NC. 1999 Detection of mineral dust over the North Atlantic Ocean and Africa with the Nimbus 7 TOMS. *J. Geophys. Res.* **104**, 9277–9291. (doi:10.1029/1998JD200083)
66. Deroubaix A, Martiny N, Chiapello I, Marticorena B. Submitted. Suitability of OMI aerosol index for studying the impact of mineral dust on health in the Sahel: application to the meningitis epidemics.
67. Menut L, Chiapello I, Moulin C. 2009 Predictability of mineral dust concentrations: the African monsoon multidisciplinary analysis first short observation period forecasted with CHIMERE-DUST. *J. Geophys. Res.* **114**, D07202. (doi:10.1029/2008JD010523)
68. Schmechtig C, Marticorena B, Chatenet B, Bergametti G, Rajot JL, Coman A. 2011 Simulation of the mineral dust content over Western Africa from the event to the annual scale with the CHIMERE-DUST model. *Atmos. Chem. Phys.* **11**, 7185–7207. (doi:10.5194/acp-11-7185-2011)
69. Pérez C *et al.* 2011 Atmospheric dust modeling from meso to global scales with the online NMMB/BSC-Dust model. I. Model description, annual simulations and evaluation. *Atmos. Chem. Phys.* **11**, 17 551–17 620. (doi:10.5194/acp-11-13001-2011)
70. Prospero JM, Blades E, Naidu R, Mathison G, Thani H, Lavoie MC. 2008 Relationship between African dust carried in the Atlantic trade winds and surges in pediatric asthma attendances in the Caribbean. *Int. J. Biometeorol.* **52**, 823–832. (doi:10.1007/s00484-008-0176-1)
71. De Longueville F, Hountondji YC, Henry S, Ozer P. 2010 What do we know about effects of desert dust on air quality and human health in West Africa compared to other regions? *Sci. Total Environ.* **409**, 1–8. (doi:10.1016/j.scitotenv.2010.09.025)
72. Frascch CE, Preziosi M-P, Laforce FM. 2012 Development of group A meningococcal conjugate vaccine, MenAfriVac™. *Hum Vaccin. Immunother.* **8**, 715–724. (doi:10.4161/hv.19619)
73. Irving T, Blyuss K, Colijn C, Trotter C. 2011 Modelling meningococcal meningitis in the African meningitis belt. *Epidemiol. Infect.* **140**, 897–905. (doi:10.1017/S0950268811001385)
74. Agier L, Stanton M, Soga G, Diggle P. 2012 A multi-state spatio-temporal Markov model for categorized incidence of meningitis in sub-Saharan Africa. *Epidemiol. Infect.* **114**, 1–8. (doi:10.1017/S0950268812001926)

1.2. Résultats principaux de l'article

Cette étude a montré sur la base d'une méthodologie statistique robuste, qu'il y a un décalage systématique entre la saisonnalité des niveaux de poussières et la saisonnalité de l'incidence hebdomadaire de la méningite au Niger. En effet, un décalage de 11 jours (soit 1,55 semaine, avec un écart-type de 1,95 jours) a été mis en évidence entre l'augmentation de l'AI.tr (noté "DUSTc" dans l'article) et l'augmentation de l'incidence des méningites (noté "men" dans l'article). Notre confiance dans ce résultat est d'autant plus grande qu'il y a une plus grande similarité en reliant l'ondelette de l'incidence à celle de l'AI.tr dans un district, qu'en reliant l'ondelette de l'incidence aux autres ondelettes de l'incidence observée dans les autres districts. On peut noter que la différence de phase entre les ondelettes de l'incidence et de l'AI.tr, c'est-à-dire le décalage, évolue de manière similaire entre tous les districts au cours de la période. En revanche, les variables décrivant le climat ont une différence de phase avec l'incidence moins cohérente entre tous les districts.

Ces résultats confirment les résultats précédents qui suggéraient déjà que l'augmentation des niveaux de poussières déclenche l'augmentation de l'incidence des méningites (Greenwood *et al.*, 1984; Deroubaix *et al.*, 2013; Martiny et Chiapello, 2013). L'évolution du décalage de phase de ces deux variables est similaire dans tous les districts, renforçant ainsi l'intérêt de cette variable atmosphérique dans le suivi du risque de démarrage épidémique. La variabilité du décalage entre les districts est à noter; ceci peut s'expliquer par de nombreuses différences spatiales d'immunité, de densité de la population ou par les retards dans l'acquisition du nombre de cas de régions éloignées. Néanmoins l'analyse en ondelettes ne tient pas compte de l'intensité des augmentations de l'AI.tr ou de l'incidence. Or, les différences d'intensité de l'AI.tr pourraient permettre d'expliquer la variabilité du décalage entre les districts.

Bien que le décalage entre l'incidence et les variables décrivant le climat soit moins cohérent, il est possible que certaines de ces variables entrent dans un modèle de l'incidence des méningites. Dans l'optique de créer un indice atmosphérique de prévision de l'incidence hebdomadaire des méningites, cet article montre avant tout l'importance d'intégrer une variable décrivant la poussière au sol. Le résultat principal dans ce but est que le décalage de 11 jours entre l'augmentation des niveaux de poussières au sol et l'augmentation de l'incidence des méningites peut être considéré constant pour tous les districts du Niger et durant toute la période (1997-2008). Il semble logique que ce décalage se vérifie aussi au Mali et au Burkina Faso, toutefois il faudrait confirmer cette hypothèse par la même méthode.

2. L'incidence des méningites modélisée à partir de l'atmosphère

La deuxième partie de ce chapitre est destinée à étudier à quelles conditions l'incidence des méningites peut être modélisée sur des variables atmosphériques dans les trois pays de notre étude. Dans un premier temps, les relations entre les variables atmosphériques et l'incidence des méningites sont analysées. Dans un deuxième temps, l'incidence des méningites sera modélisée à partir des variables potentiellement prédictives de l'évolution de la maladie. Enfin, dans un troisième temps, les capacités d'anticipation des épidémies seront évaluées.

2.1. La description du complexe formé par les épidémies, le climat et les poussières

2.1.1. Les liens entre les variables atmosphériques à l'échelle du district durant la saison de la méningite

L'ACP proposée dans cette section a pour but de retrouver les résultats déjà présentés aux deux stations, mais cette fois pour tous les districts. Nous nous bornons à étudier la période allant de la 1^{ère} semaine de l'année à la 18^{ème} semaine car c'est la période de confiance pour l'utilisation de l'AI.tr. Cela correspond à la phase ascendante des épidémies jusqu'au début de la phase descendante car le maximum des épidémies a lieu généralement entre le mois de mars et d'avril (semaine 12 à 16).

Nous reprenons la méthode déjà utilisée précédemment (cf. chapitre 2, section II-2.1) avec les mêmes variables "climat" cependant nous n'utilisons plus qu'une variable "poussières", l'AI.tr (cf. chapitre 3). Tout d'abord, les caractéristiques des deux premiers modes de l'ACP obtenus aux stations ensemble sont comparés aux deux modes partagés par tous les districts de notre domaine. Ensuite, l'évolution temporelle des deux premières composantes principales sera analysée.

L'ACP permet de synthétiser les variables "climat" (température, humidité relative, le module et l'angle du vent) et la variable "poussières" (AI.tr) à partir de relations linéaires. Les deux premiers modes de l'ACP (CP₁, CP₂) devraient permettre de retrouver un mode propre aux variations du climat, et un autre caractérisant les niveaux de poussières comme au chapitre 2. Ces deux modes étant tous les deux indépendants. Nous avons aussi vu à ce chapitre que la composante "climat" décrivait une évolution claire au cours de la période et similaire aux deux stations (Cinzana et Banizoumbou). Cela a été interprété comme l'évolution à large échelle d'une situation d'Harmattan (i.e. des vents forts venant du nord-est) vers la période de la DTF et du FIT (i.e. de forte chaleur et de vent faible).

A Banizoumbou et à Cinzana, le fait d'associer les données des deux stations pour conduire l'ACP sur les données des deux stations conjointement a permis de faire ressortir plus clairement les deux premiers modes de l'ACP. Dans l'ACP présentée ici, il est fait de même avec les données de tous les districts de notre domaine qui sont mises bout à bout (c'est-à-dire les données sont concaténées pour former la matrice d'entrée). Toutes les années de tous les districts sont étudiées sur la période 1997-2007. Nous disposons de 11 années d'observation, soit 11 ans × 18 semaines = 198 observations par district dans chacun des 141 districts de notre domaine incluant le Burkina Faso, le Mali et le Niger. Les 11 périodes (de 18 semaines) dans les 141 districts forment un ensemble de 1551 années-districts et d'environ 27 000 observations (simultanées des cinq variables atmosphériques).

A partir des données de toutes les années-districts, les coefficients de corrélation entre chaque variable et la CP₁ ou la CP₂ sont présentés sur la Figure IV.2. Le plan principal est constitué de la CP₁ expliquant 49% de la variance totale et de la CP₂ expliquant 23%. Toutes les variables peuvent être interprétées car elles ne sont pas à l'intérieur du cercle de significativité (cf. annexe outils statistiques). Les variables corrélées à la 1^{ère} composante principale (CP₁) sont le module du vent opposé à l'angle du vent (avec une corrélation de -0,55 et de 0,55 respectivement), la température (avec une corrélation 0,5) et l'humidité relative (avec une corrélation 0,5). Ce sont les variables décrivant le climat. Les variables corrélées à la 2^{ème} composante principale (CP₂) sont l'AI.tr (avec une corrélation 0,7), la température (avec une corrélation 0,6) et l'humidité relative (avec une corrélation 0,35). Le Tableau IV.1 qui résume les contributions de chaque variable à chaque axe, démontre que l'axe CP₁ est structuré par le vent (18% et 18%) et par l'humidité (23%) alors que l'axe CP₂ est structuré par

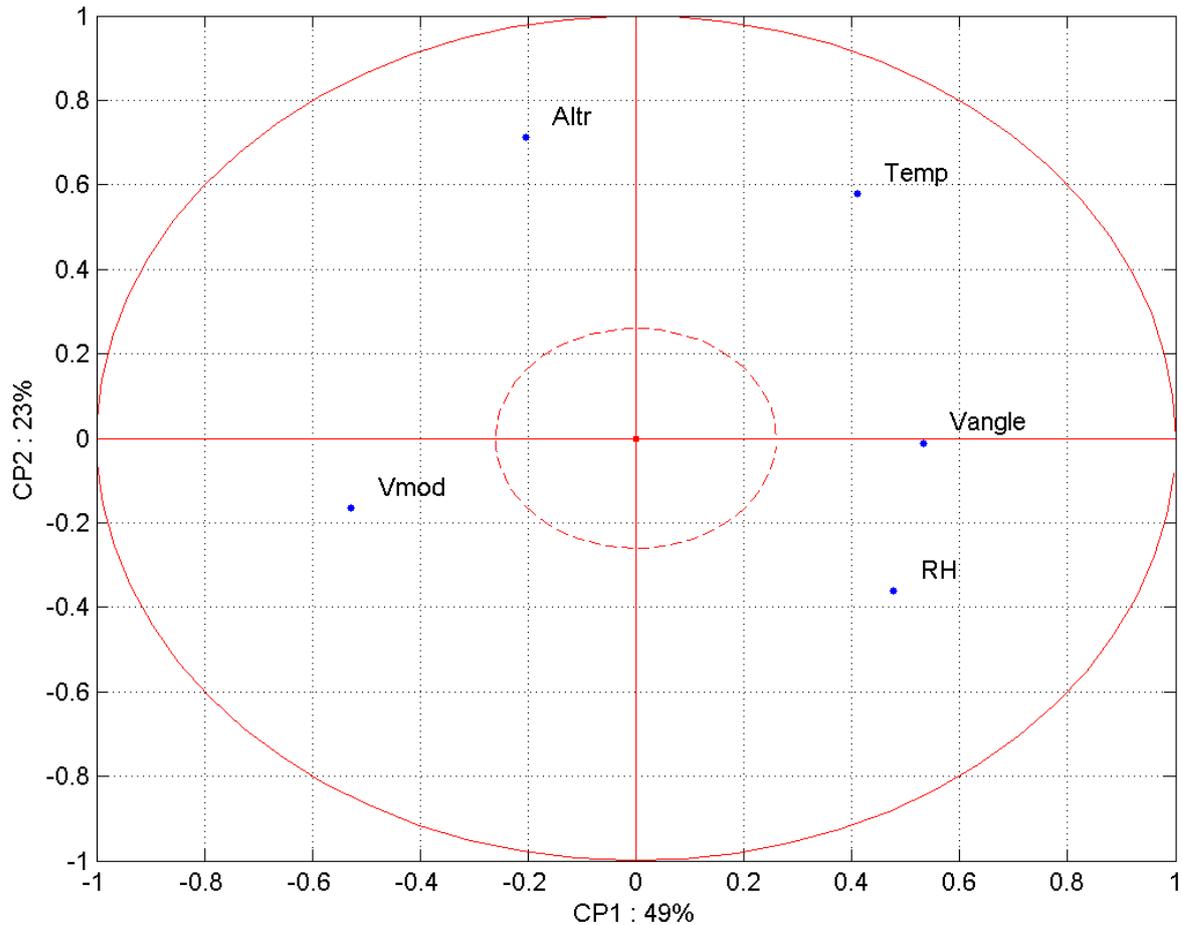


Figure IV.2. – Projection des variables dans le plan principal (CP_1 , CP_2) en considérant les semaines 1 à 18 des années 1997-2007 dans les 141 districts du domaine (sans critère de sélection).

l'AI.tr (51%) et la température (33%).

Au chapitre 2, la CP_1 était le mode de variabilité lié à la "poussières" car il y avait trois variables décrivant les poussières. Ici, il n'y a qu'une variable représentative de l'évolution des poussières (l'AI.tr). La CP_2 porte donc le signal du transport de poussières à large échelle et la CP_1 traduit l'opposition entre des situations d'Harmattan avec vent fort du secteur nord et les situations de vent faible associées à une température et une humidité plus élevées. En revanche, la CP_2 est lié à l'augmentation de l'AI.tr et aussi à la température, ce qui est cohérent avec les résultats précédents obtenus aux stations (cf. chapitre 2, section II-2.2 et chapitre 3, section III-2.2.1).

Les deux premiers modes des variables atmosphériques expliquent plus de 70% de la variance totale. De plus, nous avons vu qu'au début du 1^{er} trimestre, le vent du nord est maximal alors qu'au 2^{ème} trimestre, la température est maximale et le vent est faible. Par conséquent, il doit y avoir une évolution claire de la composante "climat" au cours de la période étudiée. Les projections des observations dans le plan principal ont aussi été étudiées (ce sont les valeurs hebdomadaires des deux premières composantes dans chaque districts). Dans le nuage de points des couples de valeurs projetés dans le plan (CP_1 , CP_2), la dimension temporelle est rajoutée en associant à chaque semaine de l'année une couleur différente afin de distinguer l'évolution des CP_1 et CP_2 au cours de notre période.

Tableau IV.1. – Contribution des variables aux deux premières des composantes principales (CP₁, CP₂) avec : la température, l'humidité relative, l'angle du vent, le module du vent et l'AI.tr (en moyennes hebdomadaires) pour tous les districts entre la 1^{ère} semaine et la 18^{ème} semaine, sans critères de sélection puis en sélectionnant les années ayant dépassé le seuil épidémique.

Contribution(%)	CP ₁	CP ₂
Température	17	33
Humidité	23	13
Vitesse Vent	28	3
Angle Vent	28	0
AI.tr	4	51

L'évolution temporelle des deux premières composantes principales au cours de la période se vérifie sur la Figure IV.3. On remarque que l'évolution du climat (CP₁) est claire pour l'ensemble du domaine car les couleurs progressent de la gauche (points bleus) vers la droite (points rouges) de la figure en respectant l'ordre de l'échelle de couleurs. La transition entre la période de l'Harmattan (i.e. la CP₁ est négative) à la période de la DTS et du FIT (i.e. la CP₁ est positive) a lieu rapidement entre la 10^{ème} et la 14^{ème} semaine (entre mars et avril), lorsque les couleurs semblent être dispersées (du vert au orange). De plus, les valeurs du mode "poussières" (CP₂) semblent augmenter de la 1^{ère} semaine à la 12^{ème} semaine (au 1^{er} trimestre), puis diminuer jusqu'à la 18^{ème} semaine. Il y a une période pendant laquelle le mode "poussières" est élevé chaque année dans tous les districts de notre domaine de la 10^{ème} à la 12^{ème} semaine (en mars).

Les moyennes ont été calculées pour chacune des 18 semaines (points noirs) sur la Figure IV.3. On remarque que les moyennes hebdomadaires des deux premiers modes se distinguent clairement et progressent de la gauche vers la droite, à l'exception des trois premières semaines qui se confondent. Ce parcours moyen est positionné au centre du parcours des valeurs des deux premières composantes principales. Il permet de définir un parcours moyen et donc de comparer une année particulière au parcours classique.

2.1.2. L'effet de la sélection des années épidémiques

Avant d'intégrer l'incidence des méningites, nous allons décrire la particularité des conditions atmosphériques particulières lors des années épidémiques, en comparant aux valeurs moyennes des deux premiers modes. Une année moyenne commence par la période de vents forts en provenance du nord, puis ce sont les niveaux de poussières qui augmentent pour enfin se terminer par une période de fortes chaleurs à la fin de la période étudiée. La Figure IV.4 reprend la Figure IV.3 en surimposant les points colorés qui correspondent aux années épidémiques, et les autres points sont en gris. Sur cette figure, nous avons représenté les conditions atmosphériques, décrites par la CP₁ et par la CP₂, pour les années épidémiques des 141 districts (i.e. une année ayant connu une incidence supérieure au seuil de 15 cas pour 100 000 habitants par semaine) afin de les comparer à une année moyenne (Figure IV.4). Nous disposons de 1551 années-districts sans critère de sélection dont 217 ont connu une épidémie, soit 14 % des observations correspondent aux années des épidémies.

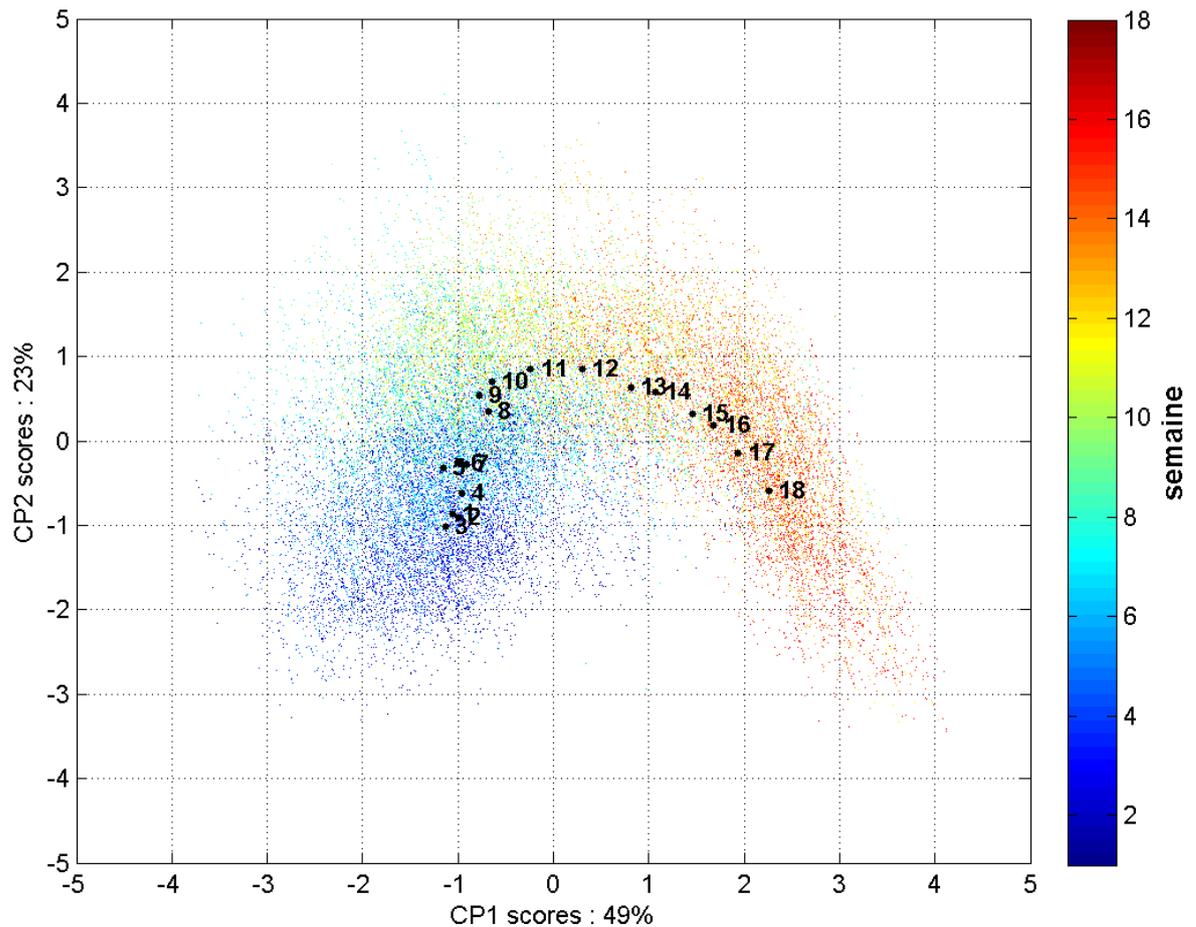


Figure IV.3. – Projection des observations dans le plan principal (CP_1 , CP_2) en considérant les semaines 1 à 18 des années 1997-2007 des 141 districts du domaine (sans critère de sélection); Chaque semaine est associée à une couleur différente sur une échelle allant du bleu pour la 1^{ère} semaine de l'année, au orange pour la 13^{ème} semaine, enfin le rouge pour la 18^{ème} semaine.

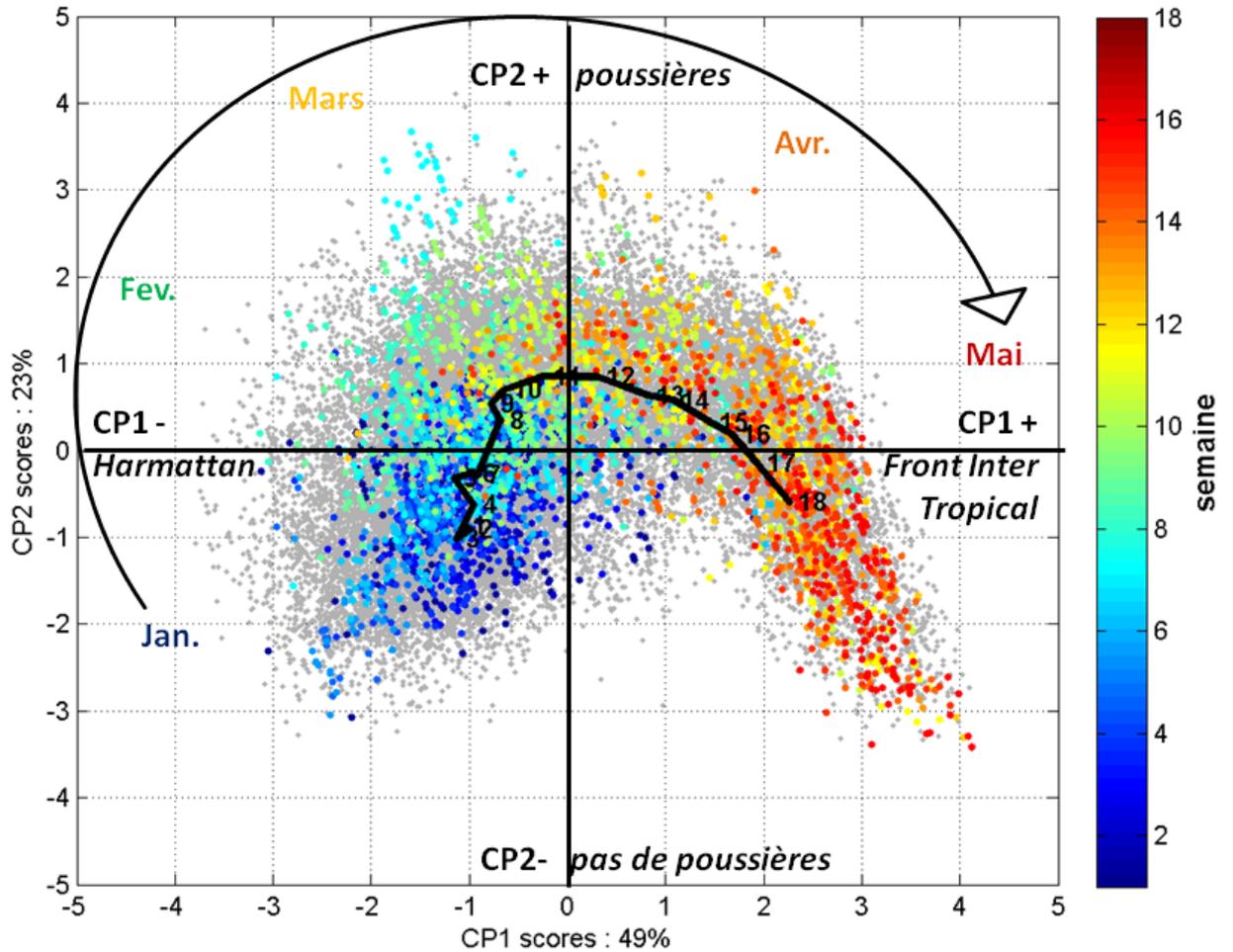


Figure IV.4. – Projection des observations dans le plan factoriel (CP₁, CP₂) en considérant les semaines 1 à 18 des années 1997-2007 des 141 districts du domaine (point gris sans critère de sélection); les points colorés correspondent aux semaines des années épidémiques (sur une échelle allant du bleu pour la 1^{ère} semaine de l'année au rouge pour la 18^{ème} semaine); La courbe (en noir) est la moyenne hebdomadaire de la CP₁ et de la CP₂ (à partir des points de la IV.3).

On peut constater sur la Figure IV.4 que les années ayant connu une épidémie semblent réparties au centre de la courbe des moyennes des deux composantes principales au début de l'année (de la semaine 1 à 10) puis elles semblent s'écarter de cette courbe. Pendant les épidémies, les semaines 10 à 14 (mars et avril) atteignent des fortes valeurs de la composante "poussières" (les fortes valeurs de la CP₂) et les semaines 14 à 18 (avril et mai) atteignent des fortes valeurs de la composante "climat" (les fortes valeurs de la CP₂). A l'inverse, on remarque que les premières semaines de l'année ne sont pas associées à des valeurs faibles (fortement négatives) de la composante "climat", c'est-à-dire les vents d'Harmattan les plus intenses. Cependant, cette figure ne permet pas de repérer si les fortes valeurs de la composante "poussières" ou "climat" sont associées aux incidences les plus fortes.

Pour préciser ce résultat, l'incidence des méningites est ajoutée aux variables atmosphériques dans la matrice d'entrée de l'ACP. Toujours sur la même période (semaine 1 à 18), nous analysons les trois premiers modes. Si l'incidence structure bien la troisième composante, alors on peut conclure que l'incidence n'est pas liée aux deux premiers modes traduisant la variabilité du climat et des poussières à large échelle.

■ Etude exploratoire des liens linéaires entre l'incidence hebdomadaire de la méningite et les variables atmosphériques

Etant donné la grande variabilité des pics épidémiques, c'est le logarithme de l'incidence des méningites qui est utilisé dans la suite du chapitre car cette transformation a été employé dans d'autres études portant sur l'incidence (Yaka *et al.*, 2008; Agier *et al.*, 2013a,b). De plus, la première partie de ce chapitre a montré qu'il faut utiliser l'AI.tr avec un décalage de une à deux semaines, nous avons donc décidé de comparer l'incidence d'une semaine avec toutes les variables atmosphériques de la semaine précédente (i.e. le décalage est fixé à une semaine) car la corrélation est maximale pour ce décalage entre l'AI et l'incidence (Deroubaix *et al.*, 2013).

Le Tableau IV.2 ci-après présente les coefficients de corrélation selon la même méthode que précédemment, mais cette fois avec l'incidence des méningites (les coefficients de corrélation de chaque variable avec les trois premières composantes principales). Cette analyse est répétée deux fois, la première fois sur toutes les années-districts disponibles, la deuxième fois sur les années-districts ayant connu une épidémie. La troisième composante est présentée pour examiner si l'incidence structure cet axe factoriel et quel est le changement engendré par la sélection des années ayant connu une épidémie. Dans les deux analyses, la CP₁ environ 40% de la variabilité de la base de données, la CP₂ représente 20%, et 10% pour la CP₃. En prenant en compte toutes les années (sans critère de sélection), le vent (angle et module), l'humidité et la température sont les quatre variables corrélées à la CP₁. La CP₂ est structurée principalement par l'AI.tr. La température contribue autant à la CP₁ qu'à la CP₂. L'incidence des méningites apparaît très peu corrélée à la CP₁, un peu plus avec la CP₂. Cette analyse sans critère de sélection des années-districts semble indiquer que l'incidence structure principalement le troisième mode (CP₃) car le coefficient de corrélation de -0,8.

Dans le cas des années épidémiques (seuil épidémique dépassé), le vent (angle et module), l'humidité et la température sont encore les quatre variables le mieux corrélées à la CP₁. L'AI.tr est toujours corrélé à la CP₂ et aussi à la CP₃. Par contre, la corrélation avec l'incidence des méningites change avec les deux premiers modes. Le troisième mode n'est plus structuré par l'incidence (avec un coefficient de corrélation de -0,4 entre la CP₃ et l'incidence), mais par l'AI.tr (R = 0,64).

Dans les deux analyses, l'interprétation des deux premières composantes principales reste la même. La CP₁ traduit l'évolution du climat de la période de vents forts vers la période de fortes tempé-

Tableau IV.2. – Coefficients de corrélation des composantes principales (CP₁, CP₂ et CP₃) avec l'incidence (le logarithme), la température, l'humidité relative, l'angle du vent, le module du vent et l'AI.tr (en moyennes hebdomadaires) pour tous les districts entre la 1^{ère} semaine et la 18^{ème} semaine, sans critères de sélection puis en sélectionnant les années ayant dépassé le seuil épidémique.

Corrélation(R)	CP ₁	CP ₂	CP ₃
sans critère de sélection			
Incidence	0,24	0,51	-0,79
Température	0,7	0,5	0,16
Humidité	0,74	-0,42	0,04
Vitesse Vent	-0,83	-0,09	-0,02
Angle Vent	0,84	-0,13	0,14
AI.tr	-0,17	0,74	0,49
seuil épidémique dépassé			
Incidence	0,38	0,69	-0,44
Température	0,71	0,52	-0,06
Humidité	0,75	-0,47	0,21
Vitesse Vent	-0,84	-0,12	-0,12
Angle Vent	0,86	-0,22	0,13
AI.tr	-0,26	0,7	0,64

ratures, et la CP₂ est liée au niveau de poussières. De plus, la sélection des années épidémiques semble expliquer une plus grande part de la variabilité de l'incidence des méningites à partir des deux premiers modes. Pour vérifier cette interprétation, les contributions des variables aux trois premières composantes principales ont été calculées dans le Tableau IV.3.

En considérant toutes les années, la CP₁ est structurée par l'humidité et le vent (module et angle). La CP₂, elle, est clairement structurée par l'AI.tr (43%). La température contribue autant à la CP₁ qu'à la CP₂. Quant à la CP₃, elle est structurée par l'incidence des méningites (69%) on peut remarquer aussi que l'AI.tr contribue pour 26% à cette composante, ce qui confirme les résultats de la première partie. Après avoir sélectionné les années épidémiques, l'interprétation de la CP₁ ne change pas, et la contribution de la température aux deux premiers axes non plus (à peu près équivalente, aux alentours de 20%). Quant à l'AI.tr, il structure toujours la CP₂ mais aussi la CP₃ (avec une contribution à hauteur de 60%). Par contre, la contribution de l'incidence des méningites change : elle augmente de 21% à 31% sur la CP₂ et de 2% à 5% sur la CP₁ alors qu'elle diminue de 69% à 28% sur la CP₃. Autrement dit, il semble que lors de la sélection des années épidémiques, l'incidence contribue plus à la CP₁ et surtout à la CP₃.

Ces résultats démontrent que la CP₁ est bien un axe "climat" rendant compte des conditions de vent, d'humidité et de température, la CP₂ est un axe "poussières et température". Par contre, il y a un axe "méningites" sans sélection alors que cet axe devient un axe "poussières" après la sélection. Ceci montre que l'incidence des méningites est liée aux conditions climatiques et surtout aux poussières. Il est donc justifié d'analyser la prévisibilité de l'incidence des méningites à partir de relations linéaires avec ces variables atmosphériques.

Tableau IV.3. – Contribution des variables aux trois premières composantes principales (CP₁, CP₂ et CP₃) avec l'incidence (le logarithme), la température, l'humidité relative, l'angle du vent, le module du vent et l'AI.tr (en moyennes hebdomadaires) pour tous les districts entre la 1^{ère} semaine et la 18^{ème} semaine, sans critères de sélection puis en sélectionnant les années ayant dépassé le seuil épidémique.

Contribution(%)	CP ₁	CP ₂	CP ₃
sans critère de sélection			
Incidence	2	21	69
Température	19	20	3
Humidité	22	14	0
Vitesse Vent	27	1	0
Angle Vent	28	1	2
AI.tr	1	43	26
seuil épidémique dépassé			
Incidence	5	31	28
Température	19	18	1
Humidité	21	15	7
Vitesse Vent	26	1	2
Angle Vent	27	3	3
AI.tr	2	32	60

Pour conclure, il est ainsi cohérent de s'intéresser exclusivement aux années épidémiques pour modéliser l'incidence des méningites à partir de l'évolution du climat et des niveaux de poussières. Ce choix est justifié par le fait qu'il y a de nombreux autres facteurs permettant d'expliquer le passage en épidémie que nos données n'intègrent pas comme la vaccination, l'immunité de groupe ou les co-infections.

2.2. La prévisibilité de l'incidence des méningites par le climat et les poussières

2.2.1. Les variables atmosphériques explicatives de l'incidence

■ La méthodologie

Les résultats précédents ont montré que, pour modéliser l'incidence hebdomadaire à partir de la variabilité de données atmosphériques, il semble possible de modéliser le logarithme de l'incidence quand on se focalise sur les années épidémiques. On cherche à modéliser le logarithme de l'incidence, noté : $Y = \text{Log}(\text{Incidence} + 1)$, à partir des cinq variables atmosphériques (X_1 à X_5) de la base de données au moyen d'une Régression Linéaire Multiple (RLM) car la section précédente a montré qu'il est possible de faire l'hypothèse d'un lien linéaire lorsque l'on s'intéresse exclusivement aux années épidémiques.

Le modèle du logarithme de l'incidence ainsi créé est noté Y^* . C'est une équation linéaire, telle que :

$$Y^* = b_0 + b_1.X_1 + b_2.X_2 + b_3.X_3 + b_4.X_4 + b_5.X_5 \quad (4.i)$$

Avec " b_0 " qui est l'ordonnée à l'origine, et les " $b_{i=1,\dots,5}$ " qui sont les coefficients de régression, c'est-à-dire les "pentes" des hyperplans (ce qui revient à étendre le cas de deux variables). Les " b_i " s'obtiennent en minimisant l'écart entre Y et Y^* par la méthode des moindres carrés. Au préalable, il faut travailler sur les variables centrées-réduites (ou standardisées) pour s'affranchir de " b_0 ". Dans une première opération, on détermine ainsi les coefficients de régression centrés-réduits associés aux variables centrées-réduites. La deuxième opération consiste à multiplier ces coefficients par le rapport des écarts-types de la variable à prédire (ici, Y est le logarithme de l'incidence) et de la variable explicative. La troisième opération est la détermination de " b_0 " à partir des autres paramètres (les " b_i ", les moyennes et les écart-types des trois variables).

Le problème de cette méthode est que la covariance entre les variables n'est pas prise en compte, il est donc nécessaire d'introduire des variables en entrée qui apportent une information différente. Lorsque l'on étudie l'atmosphère la plupart des variables ont des évolutions liées, ce que l'ACP de la section précédente a démontré. Des méthodes plus élaborées permettent d'éviter les redondances entre deux variables explicatives et de sélectionner la ou les variables permettant de modéliser au mieux la variable à prédire. C'est essentiel car le fait de multiplier la même information dans les variables explicatives peut conduire à diminuer la qualité du modèle créé.

Les Régressions Linéaires Séquentielles (RLS) permettent de sélectionner "pas à pas" les variables à entrer dans le modèle. La première étape consiste à sélectionner la meilleure variable avec la RLM, c'est-à-dire la variable ayant le " b_i " le plus grand (en valeur absolue). Dans une seconde étape, la variance expliquée par cette variable est soustraite à Y afin de créer une nouvelle variable à modéliser ($Y_{pas\ n\ ^\circ\ 1}$). La troisième étape consiste alors à reproduire la première étape mais en appliquant la RLM sur ($Y_{pas\ n\ ^\circ\ 1}$) et avec une variable explicative en moins. Ces trois étapes sont répétées pour trouver le nombre de variables explicatives. Un test statistique¹ (test de la valeur-p) permet de choisir si la variable explicative doit être incluse dans le modèle.

La méthodologie de cette section consiste tout d'abord à utiliser les RLS dans les districts et les régions pour voir s'il y a des variables qui se démarquent par la valeur des coefficients de régression. Ensuite, en fonction des résultats des RLS, un modèle de l'incidence de RLM sera proposé.

■ Le choix des variables atmosphériques explicatives de l'incidence des méningites

Nous allons nous intéresser aux années des épidémies uniquement comme la section précédente l'a montré. Ceci s'explique car ce modèle n'est basé que sur les variables atmosphériques et n'inclut pas les autres facteurs nécessaires pour modéliser l'incidence. Nous allons comparer l'échelle des districts et des régions. Pour cela, nous disposons de 99 (20) districts (régions respectivement) des 141 (28) districts (régions) au total qui ont connu une épidémie dans lesquels il y a eu en moyenne 2,2 (2,6) années épidémiques. Nous disposons donc de 217 années-districts (99 années-régions) soit 3468 observations (899) pour lesquels il y a 11% d'observations manquantes (3%).

Il a été vu que le décalage entre l'augmentation du niveau de poussières et l'incidence des méningites se vérifie à l'échelle d'une ville (Zaria), des districts (du Niger), et à échelle nationale (Greenwood

1. La valeur-p est la probabilité d'obtenir la même valeur si l'hypothèse nulle était vraie. Si cette valeur-p est inférieure à la valeur du seuil préalablement défini à 1% d'erreur ($p < 0,01$), on rejette l'hypothèse nulle (i.e. la variable considérée doit être incluse dans le modèle).

Tableau IV.4. – Coefficients de régression (b), valeur-p et ordre d'entrée de la variable dans le modèle de l'incidence des méningites (parmi les variables suivantes : la température, l'humidité relative, l'angle du vent, le module du vent et l'AI.tr) pour les valeurs des districts ou des régions si le seuil d'incidence épidémique (de 15) est dépassé entre la 1^{ère} semaine et la 18^{ème} semaine sur la période (1997-2007).

	b	valeur-p	ordre
Districts			
Température	0,48	0,00	1
Humidité	0,00	0,94	
Vitesse Vent	0,01	0,48	
Angle Vent	-0,04	0,02	3
AI.tr	0,13	0,00	2
Régions			
Température	0,56	0,00	1
Humidité	0,08	0,05	
Vitesse Vent	0,16	0,00	3
Angle Vent	-0,02	0,75	
AI.tr	0,15	0,00	2

et al., 1984; Agier *et al.*, 2013b; Martiny et Chiapello, 2013). De plus, l'incidence (avec un décalage d'une semaine) participe aux deux composantes principales décrivant le climat sahélien et le transport de poussières à large échelle lorsque les années épidémiques sont sélectionnées. Ces deux modes sont partagés par tous les districts, ils décrivent donc l'évolution sur tout notre domaine. Nous cherchons dans cette partie à déterminer quelles sont les variables à prendre en compte dans un modèle de l'incidence. Toutes les années épidémiques de tous les districts ont été assemblées dans une même matrice d'entrée, et de même pour les régions. Les RLS ont été appliquées à ces deux matrices d'entrée afin de calculer les coefficients de régression du modèle ainsi créé par l'ajout successif d'une variable. Le Tableau IV.4 récapitule les coefficients de régression (centré-normé), la valeur-p et l'ordre des variables ajoutées dans le modèle. Dans les 217 (52) années-districts (années-régions respectivement), on remarque dans le Tableau IV.4 que deux variables se distinguent pour expliquer l'incidence des méningites. Le coefficient de régression des variables sélectionnées permet de connaître l'importance d'une variable dans le modèle de l'incidence.

La température est associée à un coefficient de régression centré-réduit de 0,48 à l'échelle des districts et de 0,56 à l'échelle des régions ; c'est la première variable à entrer dans le modèle de l'incidence aux deux échelles considérées. L'AI.tr est la deuxième variable à incorporer dans le modèle de l'incidence des districts et des régions avec un coefficient de régression centré-réduit d'environ 0,13 à l'échelle des districts et d'environ 0,15 à l'échelle des régions. Les résultats sont similaires pour les deux échelles malgré que moins de régions aient dépassé le seuil épidémique.

Quel que soit l'échelle, la température est la première variable explicative et l'AI.tr est la deuxième variable explicative, ces deux variables étant corrélées positivement à l'incidence. L'AI.tr représente le niveau de poussières au niveau du sol et le mécanisme de causalité est l'irritation des muqueuses

des voies respiratoires. Les températures très élevées ont des impacts sur le corps et surtout les muqueuses des voies respiratoires (Sherwood et Huber, 2010) et cette variable a déjà été suspectée d'être importante pour l'étude des épidémies de méningites (Greenwood *et al.*, 1984). Les autres variables ne sont pas cohérentes entre l'échelle des districts et l'échelle des régions pour définir le modèle de l'incidence. Par exemple, l'humidité relative n'est pas prise en compte dans le modèle à l'échelle des districts et sa valeur-p est à la limite de significativité à 95% pour les régions. On peut expliquer ce résultat par la faible variabilité de l'humidité relative au pas de temps hebdomadaire (cf. chapitre 2, section II-1.2.1).

L'information portée par ces deux variables est différente mais pas indépendante. En effet, l'ACP de la section précédente a montré que la température est liée au mode "climat" et au mode "poussières". Néanmoins, l'ACP a montré que l'incidence participe aux deux premières composantes. La RLS démontre que la température et l'AI.tr sont nécessaires pour modéliser l'incidence des méningites dans les districts et les régions.

2.2.2. La modélisation statistique de l'incidence hebdomadaire de la méningite à partir de la température et des poussières

Dans la mesure où, pour caractériser l'irritation des voies respiratoires, des moyennes de plusieurs semaines pourraient mieux représenter le degré d'irritation, il faut aussi déterminer si des moyennes des deux variables atmosphériques ne doivent pas intégrer une période plus longue que la semaine. Les deux variables explicatives (température et AI.tr) sont décalées d'une semaine en avance par rapport à l'incidence des méningites. Le Tableau IV.5 présente les coefficients du modèle de l'incidence obtenu pour différentes moyennes glissantes des variables atmosphériques allant de 1 à 4 semaines précédentes. La matrice d'entrée utilisée pour les RLS a été séparée en deux jeux : le jeu d'apprentissage (2/3 des années-districts ou des années régions) et le jeu d'évaluation (1/3 des années-districts ou des années-régions). Le but est de voir si les résultats du modèle sont cohérents entre les deux échelles et si une durée de moyennage se distingue. La RLM est effectuée sur le jeu d'apprentissage afin d'obtenir les coefficients de régression des deux variables, c'est l'étape d'apprentissage. Puis, ce modèle est appliqué aux données atmosphériques du jeu d'évaluation et corrélé à l'incidence de ce jeu, c'est l'étape d'évaluation. Pour évaluer le modèle, trois indicateurs statistiques ont été choisis : le biais qui est l'écart entre l'incidence observée et modélisée, la racine carrée des écarts quadratiques moyens (REQM) et le coefficient de corrélation (Tableau IV.5) ; ces indicateurs ont été calculés à partir du logarithme de l'incidence modélisée et observée.

Les coefficients de régression obtenus à l'étape d'apprentissage (Tableau IV.5) changent peu lorsque les deux variables prédictives intègrent une durée plus longue. Le coefficient de régression de la température est toujours supérieur à celui de l'AI.tr. De plus, l'analyse des districts et des régions conduit aux mêmes remarques. Le coefficient de régression de l'AI.tr augmente de 1 à 4 semaines à l'échelle des districts (régions respectivement) de 0,13 (0,15) à 0,30 (0,30) alors que celui de la température diminue de 0,49 (0,48) à 0,41 (0,37), ce qui peut suggérer que ces deux variables covarient. En fait, à partir des mêmes observations, le coefficient de corrélation entre la température et l'AI.tr est faible pour la moyenne d'une semaine 0,08 (0,06) mais il augmente pour les moyennes glissantes supérieures jusqu'à 0,38 (0,32) pour la moyenne sur 4 semaines.

L'évaluation est ensuite réalisée par le calcul des trois indicateurs statistiques choisis. Les coefficients de corrélation entre l'incidence modélisée et observée sont du même ordre de grandeur que cela soit pour les districts et pour les régions ($R = 0,58$), soit 1/3 de la variance de l'incidence des méningites.

Tableau IV.5. – A) étape d'apprentissage : Coefficients de régression (b) expliqués par différentes moyennes glissantes de 1 à 4 semaines de la température et de l'AI.tr (décalés d'une semaine) pour les valeurs des districts ou des régions si le seuil d'incidence épidémique (de 15) est dépassé entre la 1^{ère} semaine et la 18^{ème} semaine sur la période (1997-2007); B) étape d'évaluation : biais, la racine carrée des écarts quadratiques moyens (REQM) et le coefficient de corrélation.

moyenne glissante sur : (nombre de semaines)	1	2	3	4
Districts				
A) Etape d'apprentissage				
b (T°)	0,49	0,48	0,45	0,41
b (AI.tr)	0,13	0,19	0,25	0,30
B) Etape d'évaluation				
biais (obs-mod)	0,01	0,02	0,02	0,03
REQM	0,79	0,78	0,78	0,78
R	0,56	0,58	0,58	0,58
Régions				
A) Etape d'apprentissage				
b (T°)	0,48	0,45	0,42	0,37
b (AI.tr)	0,15	0,21	0,26	0,30
B) Etape d'évaluation				
biais (obs-mod)	-0,07	-0,07	-0,07	-0,06
REQM	0,72	0,72	0,72	0,73
R	0,57	0,58	0,57	0,56

On peut remarquer que le biais n'est pas du même signe pour les deux échelles spatiales. Il est inférieur à l'échelle du district alors que la REQM est inférieure à l'échelle régionale. Les trois indicateurs statistiques restent stables pour les quatre moyennes glissantes et pour les deux échelles, ce qui montre la pertinence de ce modèle de l'incidence.

Le coefficient de corrélation est maximal pour la moyenne sur deux semaines à l'échelle régionale. Par conséquent, dans la suite de ce chapitre, la température et l'AI.tr (toujours avec un décalage d'une semaine) ont été moyennés sur les 2 semaines précédentes pour correspondre à l'incidence des méningites d'une semaine donnée. Ce choix permet de lisser les moyennes hebdomadaires en gardant une variabilité élevée. En conclusion, la variance de l'incidence hebdomadaire expliquée par le modèle est supérieure à 30%. Il semble que plus il fait chaud et plus il y a de poussières pendant la période ascendante des épidémies, plus l'incidence (si l'épidémie se déclare) sera importante.

2.3. L'évaluation du modèle de l'incidence des méningites

2.3.1. L'analyse de la phase ascendante des épidémies à l'échelle nationale

Le modèle de l'incidence peut aussi être réalisé à l'échelle nationale et comparé aux deux échelles précédentes. Néanmoins, il y a peu d'années ayant connu une épidémie à l'échelle nationale. Le seuil épidémique de 15 cas pour 100 000 habitants par semaine est défini à l'échelle du district. Puisque la population considérée à l'échelle nationale est beaucoup plus importante qu'à l'échelle des districts, il faut définir un seuil inférieur à l'échelle nationale. Un seuil de 5 cas pour 100 000 habitants par semaine a été défini arbitrairement ; cette valeur correspond au seuil d'alerte utilisé à l'échelle des districts. Nous disposons de 9 années épidémiques (i.e. ayant dépassé le seuil de 5 cas pour 100 000 habitants par semaine) au Niger et au Burkina Faso (Le Mali n'a pas été intégré car il n'y a qu'une année dépassant ce seuil). Ensuite, les dates modélisées de dépassement de ce nouveau seuil sont comparées aux dates observées afin d'évaluer le modèle à l'échelle nationale.

■ L'incidence hebdomadaire modélisée et observée en nombre de cas pour 100 000 habitants par semaine

Le modèle du logarithme de l'incidence à l'échelle nationale a été obtenu avec la température et de l'AI.tr comme précédemment : pendant la phase ascendante des épidémies (semaine 1 à 18), avec un décalage d'une semaine et avec une moyenne glissante calculée sur les deux semaines précédentes.

Ensuite, pour reconstruire l'incidence modélisée sans le logarithme, il a fallu tout d'abord calculer la série modélisée du logarithme de l'incidence standardisée grâce aux valeurs obtenues par la RLM, à partir de l'équation :

$$(\text{Log}(\text{Incidence}))_{std} = b_1 \cdot (T^\circ)_{std} + b_2 \cdot (\text{AI.tr})_{std} \quad (4.ii)$$

Où $b_1 = 0,48$ et $b_2 = 0,40$ sont les coefficients de régression centrés-réduits à l'échelle nationale. On peut remarquer que le coefficient de régression obtenu à l'échelle nationale pour la température est similaire à celui des districts et des régions décrits à la section précédente. En revanche, le coefficient de régression de l'AI.tr est supérieur aux résultats des deux autres échelles, mais ceci peut être dû au faible nombre d'observations à cette échelle (lorsque le seuil de 5 est dépassé, c'est-à-dire sur 9 années-pays de 18 semaines, soit 162 points).

De plus, les moyennes (et les écart-types) utilisés pour la standardisation des trois variables sont de 30 (et 4) pour la température, de 176 (et 37) pour l'AI.tr et de 1,68 (et 0,77) pour le logarithme de l'incidence. A partir de ces valeurs et de l'équation précédente, on peut revenir à l'incidence en nombre de cas pour 100 000 habitants par semaine, après quelques étapes triviales de calculs finissant par le passage à l'exponentielle. Les séries temporelles d'incidences observées au Burkina Faso et au Niger sont présentées sur la Figure IV.5 ainsi que les séries temporelles d'incidences modélisées quand le seuil de 5 a été dépassé. Le coefficient de corrélation entre l'incidence modélisée et observée à l'échelle nationale est de 0,69 (162 observations).

A l'échelle des pays, les séries temporelles de l'incidence observée et modélisée semblent coïncider pendant la phase ascendante des épidémies (Figure IV.5). Les dates modélisées de dépassement du

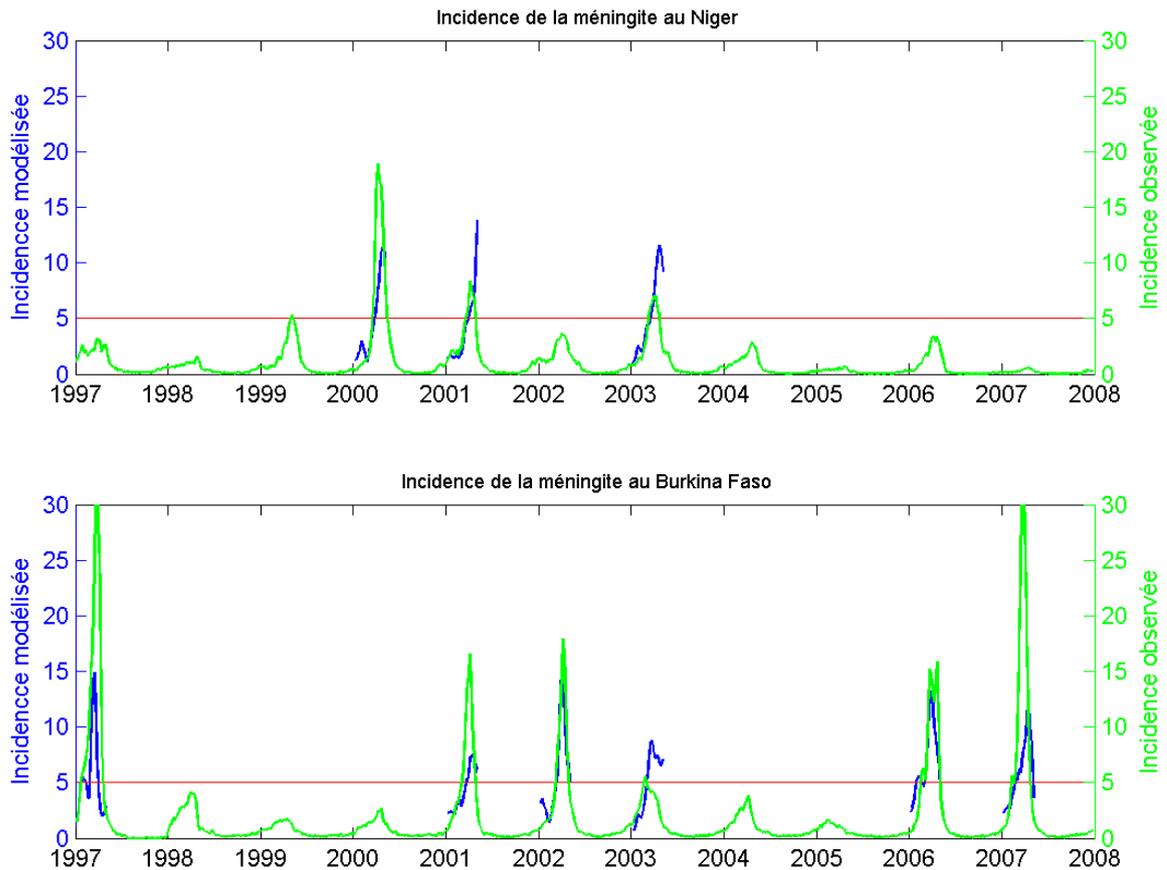


Figure IV.5. – Séries temporelles de l'incidence observée (en vert) et modélisée (en bleu) à l'échelle nationale pour le Niger, le Mali et le Burkina Faso ; la ligne horizontale (en rouge) est le seuil épidémique sur la période 1997-2007.

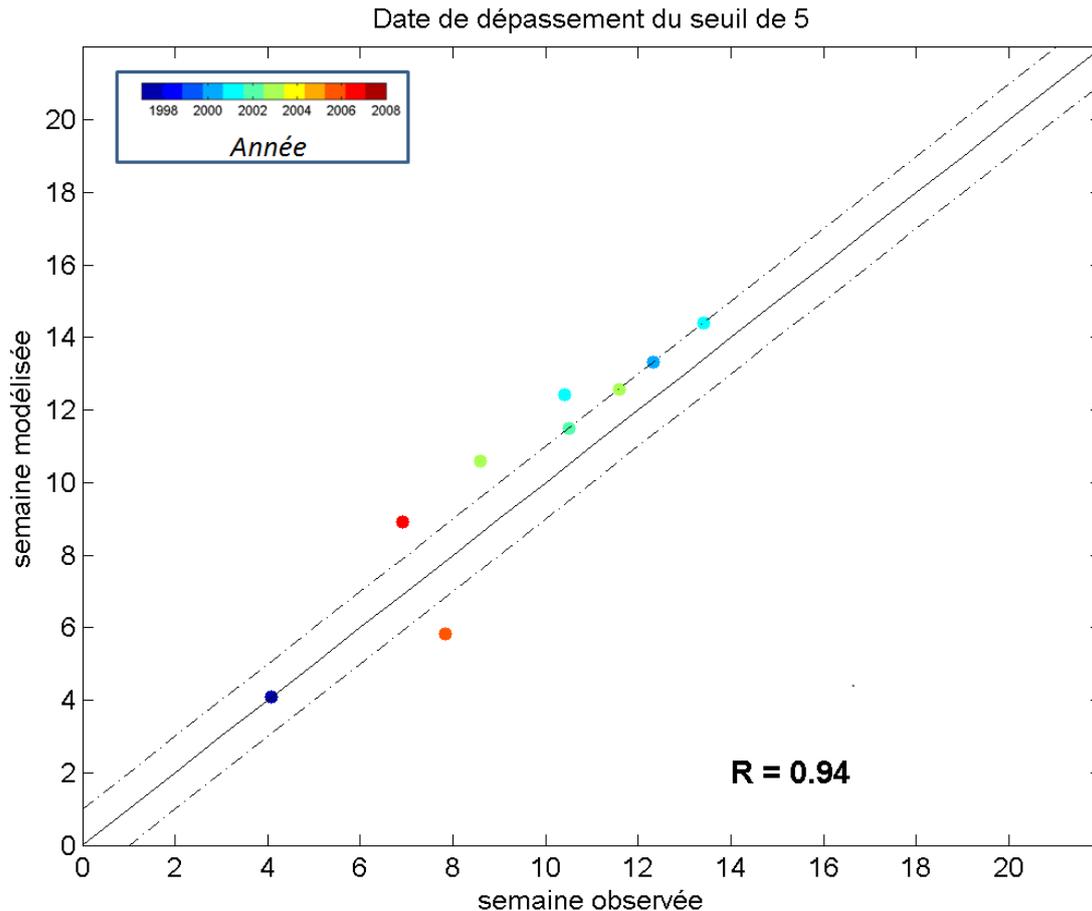


Figure IV.6. – Dates de dépassement de seuil (fixé à 5 cas pour 100 000 habitants par semaine) l'incidence modélisée en fonction de l'incidence observée au Burkina-Faso et au Niger où chaque année est associée à une couleur différente.

seuil de 5 cas pour 100 000 habitants par semaine paraissent être en accord avec l'observation mais la valeur de l'incidence maximale n'est pas reproduite par le modèle.

■ Les dates modélisées et observées des trois pays pour le seuil de 5 cas pour 100 000 habitants

A partir de la figure précédente, quand le nouveau seuil a été dépassé, les dates modélisées ont été relevées et comparées aux dates observées (Figure IV.6).

Le coefficient de corrélation entre les dates observées et modélisées est très satisfaisant avec une valeur de 0,94. La date de dépassement de ce seuil a lieu entre les semaines 4 et 13. Cependant le modèle prévoit la date de dépassement de seuil environ une semaine trop tard. En conclusion, il semble que le modèle de l'incidence soit capable de définir les semaines durant laquelle un seuil d'incidence épidémique est dépassé (en l'occurrence un seuil de 5 cas pour 100 000 habitants par semaine). Dans le cas où la température et les poussières pourraient être prévues suffisamment à l'avance, il serait envisageable de prévoir la date de démarrage de l'épidémie dans un cadre opérationnel. Mais, il faut d'abord confirmer que le modèle retrouve des dates de démarrage cohérentes à l'échelle des districts.

2.3.2. Les structures spatiales de l'incidence des méningites modélisée

Dans cette partie, on analyse la classification des incidences des méningites modélisées des districts dans les trois pays au cours de toute la période 1997-2007. La méthode de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) utilisée précédemment (cf. section II-2.1.1) est reprise afin d'observer les différences spatiales de notre modèle, en rassemblant les districts dont le cycle moyen de l'incidence modélisée est le même.

Nous voulons montrer par cette dernière analyse que l'incidence modélisée permet de retrouver des différences entre l'est et l'ouest de notre domaine qui sont cohérentes avec le calendrier des épidémies. En effet, nous avons vu que les épidémies ont lieu plus tôt au Burkina Faso qu'au Niger. De plus, le Mali semble moins sévèrement et fréquemment touché par les épidémies. Nous cherchons à décrire comment les cycles moyens de l'incidence modélisée des districts se regroupent pour former des régions cohérentes pour comparer les différences de saisonnalité existantes au sein des trois pays de notre domaine.

Le modèle de l'incidence à l'échelle des districts (cf. Tableau IV.5) est extrapolé sur toute l'année afin de créer une série sur la période 1997-2007 pour tous les districts. La méthode de la CAH est identique à celle exposée précédemment à l'exception de la période que l'on restreint à la phase ascendante de la méningite car la période d'étude reste la même qu'aux sections précédentes (semaine 1 à 18). Le cycle moyen sur la période d'étude est calculé dans chaque district et la distance euclidienne d'un district avec tous les autres districts est calculée. Puis, ces distances sont classées selon le critère de ressemblance de Ward et le dendrogramme permet de choisir le nombre de classes que l'on souhaite étudier en fonction des écarts de distance sur le dendrogramme. L'arbre a été coupé à 5 classes dans cette partie afin de retrouver des différences zonales (avec 4 classes, ces différences n'apparaissent pas). Une méthode de classification des districts a été utilisée récemment se basant sur six paramètres statistiques pour modéliser le logarithme de l'incidence (Agier *et al.*, 2013a). Mais cette méthode ne permet pas de prendre en compte le calendrier des épidémies car elle compare l'intensité des épidémies (à partir de la moyenne, l'écart-type, le maximum, le minimum, le coefficient de dissymétrie et le kurtosis).

Sur la Figure IV.7, on observe que les maxima de l'incidence modélisée des deux classes correspondantes au sud Burkina Faso (en vert et en bleu) ont lieu en mars (à la semaine 12) et diminuent ensuite au mois de avril. Les plus fortes valeurs de l'incidence modélisée sont obtenues au sud-est du Niger (en brun) au mois d'avril (semaine 15), cela correspond à la conjonction de températures élevées et de niveaux élevés de poussières. C'est aussi une partie du Niger où les épidémies atteignent des incidences très élevées (Agier *et al.*, 2013a).

Les zones au centre (en rouge) et au sud-est (en brun) de notre domaine ont un cycle proche car la séparation entre ces deux classes intervient au passage de 4 classes à 5 classes. Néanmoins, elles permettent de montrer des différences zonales de l'incidence modélisée sur le domaine. A l'extrême sud du Burkina Faso, l'incidence modélisée prévoit un "risque plus faible d'épidémie de méningites". De même, il y a une large part du Mali qui est associée à des valeurs plus faibles de l'indice qu'au Niger à la même latitude (en violet). Le fait que le maximum de l'incidence modélisée soit 3 semaines plus précoce à l'ouest (au Burkina Faso) qu'à l'est (au Niger), s'explique par les différences zonales de l'AI.tr au 1^{er} trimestre de l'année (cf. chapitre 3, section III-2.2.2). Enfin, ces différences sont cohérentes avec les différences de saisonnalité des épidémies constatées entre le Burkina Faso et le Niger (cf. chapitre 2, section II-1.1.1).

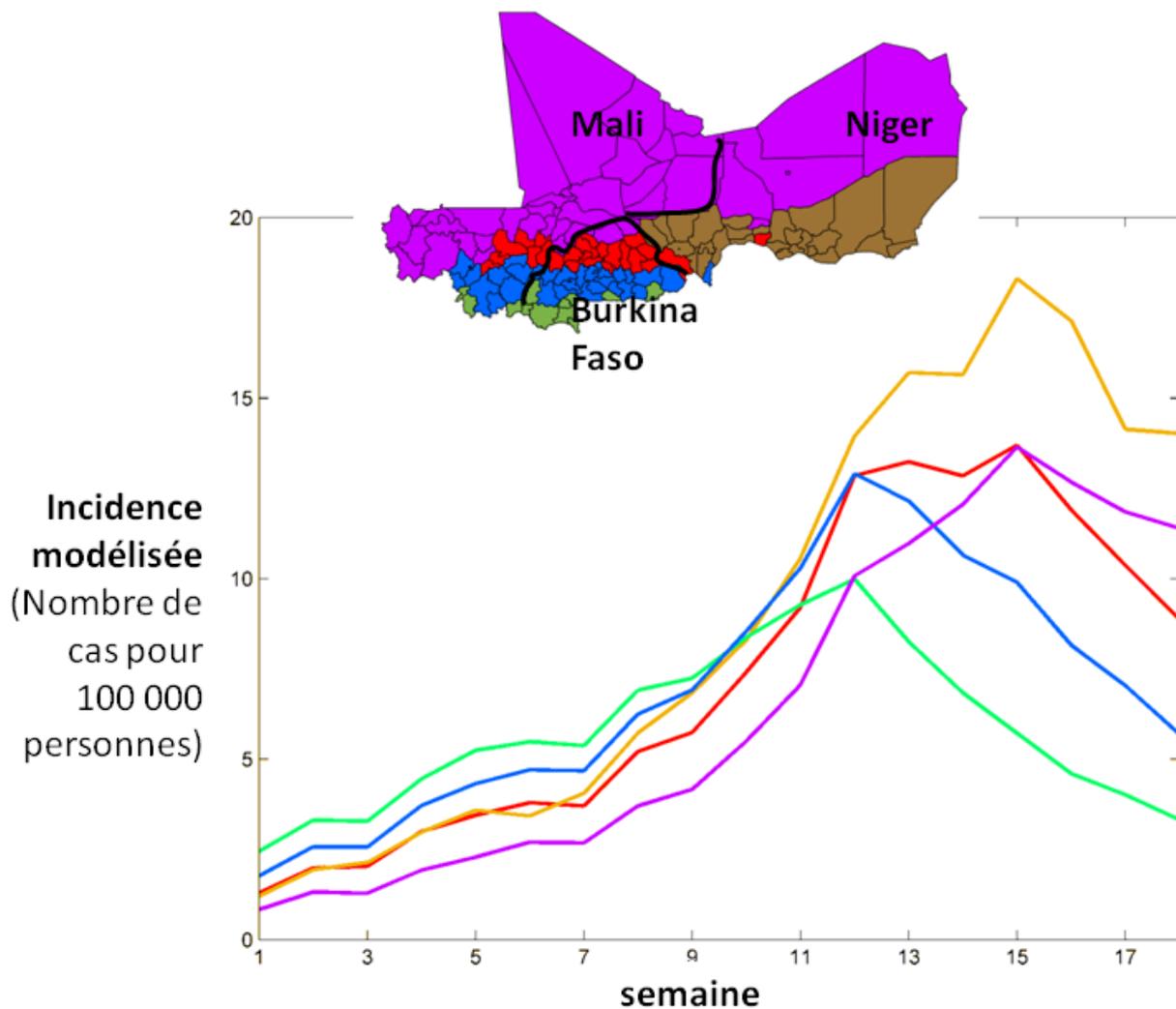


Figure IV.7. – Classification spatiale de l'incidence des méningites modélisée dans les districts du Burkina-Faso, Mali, Niger pour 5 classes et les cycles moyens hebdomadaires des 5 classes entre la 1^{ère} semaine et la 18^{ème} semaine en nombre de cas pour 100 000 habitants par semaine.

■ Conclusions de la deuxième partie du chapitre 4

Cette partie a permis de montrer tout d'abord que les cinq variables atmosphériques de la base de données sont associées à deux modes résumant plus de 70% de la variance totale. Le premier mode caractérise l'évolution du climat entre le 1^{er} trimestre de l'année et le 2^{ème} trimestre car il y a la transition d'une période marquée par le vent d'Harmattan à une autre marquée par les fortes températures. Le deuxième mode correspond aux niveaux de poussières et atteint un maximum à la fin du 1^{er} trimestre. De plus, nous avons montré que la variabilité de l'incidence des méningites s'explique en partie par ces deux modes seulement lorsque les années épidémiques sont sélectionnées. A partir de ce résultat, nous avons fait le choix de considérer les deux variables les plus importantes pour modéliser l'incidence du point de vue statistique aux deux échelles considérées : district et région. La température est la première variable et l'AI.tr est la deuxième variable à intégrer dans le modèle de l'incidence. Le modèle ainsi élaboré explique plus de 30% de la variance de l'incidence hebdomadaire et cette relation se vérifie aux trois échelles spatiales étudiées. L'importance de la température et des poussières dans le modèle de l'incidence permet de définir une zone à l'est du Niger où l'incidence modélisée est maximale. Cette zone doit aussi comporter une partie du nord du Nigeria qu'il conviendrait d'étudier aussi. En adaptant ce modèle de l'incidence de manière opérationnelle, la première prévision de l'incidence hebdomadaire pourrait être proposée à l'échelle régionale. En effet, aujourd'hui au Sahel, il n'y a qu'une prévision pour la saison des méningites à venir au Burkina Faso et au Niger, annoncée en automne par les services météorologiques burkinabais (Yaka *et al.*, 2008).

■ Synthèse du chapitre 4

A l'échelle d'une ville et à l'échelle nationale, un décalage d'une à deux semaines a été mis en évidence entre l'augmentation du niveau de poussières et l'augmentation de l'incidence hebdomadaire (Greenwood *et al.*, 1984; Deroubaix *et al.*, 2013; Martiny et Chiapello, 2013). Dans un premier temps, une analyse en ondelettes a été utilisée et a permis de démontrer que ce décalage est vrai chaque année et dans chaque district du Niger (Agier *et al.*, 2013b). Après avoir confirmé le phasage temporel entre l'incidence et l'AI transformé, l'incidence hebdomadaire des méningites a été modélisée à partir de liens linéaires entre la température et l'AI transformé à plusieurs échelles spatiales. Une seule relation peut être considérée à différentes échelles spatiales. De plus, à l'échelle des districts, il y a des différences régionales de saisonnalité de l'incidence modélisée cohérentes avec les observations.

Ce chapitre a permis d'étudier les différences de saisonnalité des épidémies de méningites au sein de notre zone d'étude afin d'expliquer pourquoi les épidémies semblent plus précoces au Burkina Faso qu'au Niger. Les incidences hebdomadaires constatées dans les districts ont été comparées aux variables atmosphériques et un modèle de l'incidence a été proposé pour reproduire la variabilité de l'incidence pendant les années épidémiques. Nous avons montré que deux variables sont nécessaires pour modéliser 1/3 de la variabilité de l'incidence : la température est la première variable explicative et l'AI.tr la deuxième. Ces résultats suggèrent que ces deux variables contribuent à l'irritation des voies respiratoires permettant l'invasion de la bactérie et causant une augmentation des infections une fois le délai d'incubation passé.

Comme les régions définies par l'incidence modélisée paraissent cohérentes avec la réalité des épidémies, cela semble attester de l'importance de la température et des poussières dans la compréhension de la dynamique des épidémies. Au Sahel, la période de fortes températures et des concentrations de

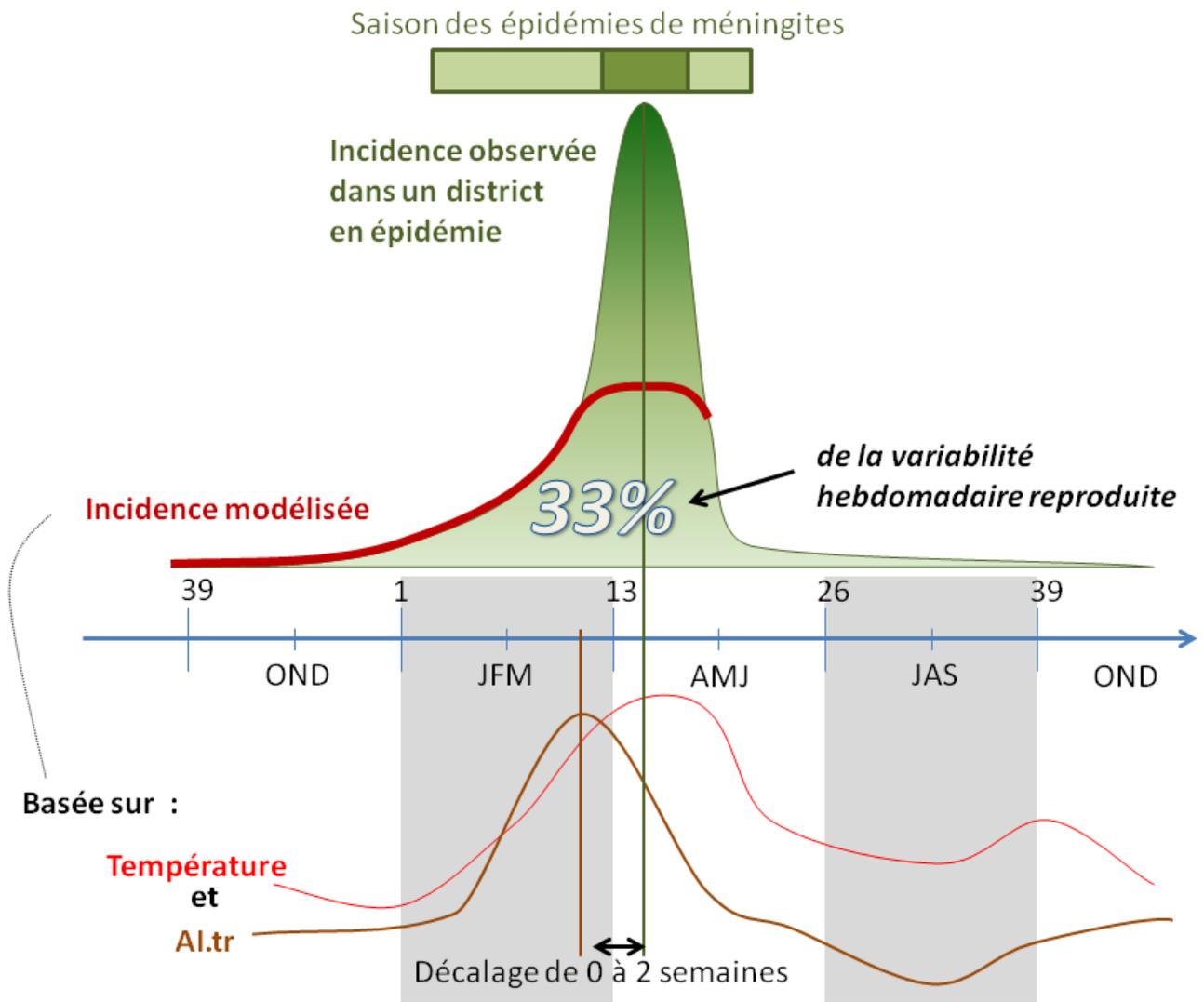


Figure IV.8. – Schéma n°3 de synthèse des résultats.

poussières maximales au niveau du sol correspond à la période des incidences des méningites les plus fortes. Cette période particulière pourrait être la cause de la saisonnalité marquée des épidémies dans cette région de l'Afrique.

Conclusion générale

■ Synthèse

Au premier chapitre de cette thèse, nous avons décrit les caractéristiques des épidémies de méningites dans la ceinture des méningites causées par la bactérie *Neisseria meningitidis*. La saisonnalité des épidémies de méningites a été décrite ainsi que les différences de saisonnalité existantes entre les trois pays étudiés. Il semble que les épidémies soient en général plus précoces au Burkina Faso qu'au Niger. De plus, le Mali paraît être moins sévèrement touché par les épidémies. Au Sahel, le premier trimestre de l'année correspond à la période dominée par le vent de l'Harmattan en provenance du Sahara apportant de grandes quantités de poussières, c'est le cœur de la saison sèche. Au début du deuxième trimestre, la transition vers la saison humide s'amorce par une période de fortes températures associées à des vents faibles, puis par la pré-mousson quand les masses d'air humide atteignent le Sahel. Le troisième trimestre est le cœur de la mousson et le quatrième trimestre l'humidité baisse et le vent d'Harmattan s'établit à nouveau au Sahel. Les différentes interactions entre les épidémies et l'atmosphère ont été explicitées en séparant les impacts de l'environnement en deux. D'une part, il y a les aspects liés à la société et la génétique, et d'une autre part, il y a l'aspect atmosphérique. L'hypothèse de ce travail est fondée sur le mécanisme d'irritation des voies respiratoires permettant l'invasion de la bactérie vers les méninges. On suppose que cette irritation est causée par certaines conditions atmosphériques spécifiques et notamment par les forts niveaux de poussières. A l'échelle nationale, la méthode développée par Martiny et Chiapello (2013) a permis de montrer un décalage de quelques semaines (i.e. $0 < \text{décalage} < 2$ semaines) entre l'augmentation de l'épaisseur optique en aérosols et l'augmentation du nombre de cas de méningites. Dans ce travail de thèse, cette relation statistique a été testée à différentes échelles spatiales afin de la confirmer. En effet, le décalage s'il est dû au délai d'incubation ne doit pas dépendre de l'échelle spatiale. Cependant le choix des variables atmosphériques utilisées à l'échelle du district est déterminant pour analyser la synchronisation avec l'incidence des méningites.

Au deuxième chapitre, nous avons tout d'abord sélectionné les variables atmosphériques adéquates au vu de l'état de l'art dressé au premier chapitre, afin d'associer ces variables à l'incidence des méningites dans les districts, et constituer une base de données conjointes. Quatre variables climatiques ont été choisies, il s'agit de la température, de l'humidité et du vent (module et angle). De plus, une variable décrivant l'évolution des concentrations de poussières de surface est nécessaire pour constituer la base de données. L'Aerosol Index (AI), un produit télédétekté d'aérosols qui fournit une valeur intégrée sur toute la colonne atmosphérique, a été sélectionné pour constituer la base de données car il a déjà été utilisé pour l'étude des épidémies de méningites et il permet de couvrir 12 ans de données d'incidence. Pour chaque variable décrivant l'atmosphère, nous avons montré que la ceinture des méningites se distingue des autres régions au nord ou au sud car son climat est particulier. Ensuite, la variabilité intra-saisonnière a été analysée grâce au classement des cycles annuels moyens

des districts de ces variables sur notre domaine. Les plus fortes incidences des méningites ont lieu entre mars et avril lorsque la saison sèche se termine. Nous avons vu qu'il y a un fort gradient entre le nord et le sud de notre domaine se traduisant au premier trimestre par des vents plus forts au nord, puis au deuxième trimestre par des différences de températures d'humidités relatives importantes. L'AI est lui aussi très variable du nord au sud et particulièrement pendant le deuxième trimestre. Enfin, nous avons étudié les liens entre les variables atmosphériques pendant la phase ascendante des épidémies de méningites. Deux modes de variabilité ont été mis en évidence, le premier mode décrit la variabilité des poussières (due au transport de poussières à l'échelle continentale) et le deuxième mode est associé à l'évolution du climat sahélien, et plus spécifiquement il marque la transition d'une période de vents forts d'Harmattan à une période de fortes températures et de vents faibles (période de la dépression thermique saharienne et du front de convergence intertropicale).

Au troisième chapitre, l'AI a été comparé aux mesures d'épaisseurs optiques (AOT) et aux mesures de concentrations de poussières (PM) à Banizoumbou (Niger) et à Cinzana (Mali). Nous avons montré que l'AI est capable de retrouver la variabilité hebdomadaire des PM au niveau du sol durant la phase ascendante des épidémies de méningites de janvier à mars (Deroubaix *et al.*, 2013). Ensuite, à partir de la pré-mousson, la valeur de l'AI peut ne pas refléter la variation des poussières au niveau du sol. Nous avons constaté que les maxima des cycles annuels moyens de l'AI, des AOT et des PM sont décalés. Aux deux stations, il y a tout d'abord le maximum des concentrations de poussières en surface en mars, puis des AOT en avril et enfin de l'AI en juin. Nous avons interprété ce résultat comme étant la conséquence des conditions climatiques à large échelle. En effet, durant le premier trimestre, le vent d'Harmattan transporte les poussières dans la couche de surface alors qu'au deuxième trimestre les caractéristiques du transport changent car les poussières se répartissent sur une épaisseur plus importante. Nous avons vu qu'il y a un changement identique aux deux stations du rapport des mesures intégrées sur la colonne atmosphérique (AOT et AI) avec la mesure des concentrations de poussières en surface. Une méthode a été élaborée pour recalibrer l'AI sur le cycle des poussières en surface, basée sur ces considérations valables à large échelle. L'AI a donc été transformé puis l'amélioration obtenue aux deux stations a été évaluée. Nous avons montré que le cycle annuel moyen de l'AI transformé permet de reproduire la période de maximum de la concentration de poussières au niveau du sol (en mars). De plus, le gradient de l'AI transformé entre le Niger et le Mali en mars est cohérent avec les mesures au sol. Enfin, la représentativité de l'AI transformé des PM a aussi été augmentée passant de 25% à plus de 50% sur la période 2006-2008.

Au quatrième chapitre, le décalage suspecté entre l'augmentation des poussières en surface et l'augmentation de l'incidence des méningites a été étudié par une analyse en ondelettes permettant de prendre en compte tous les districts du Niger pendant toute la période (Agier *et al.*, 2013b). Nous avons trouvé que le décalage moyen est d'une dizaine de jours, ce qui est cohérent avec le délai d'incubation de la bactérie. Après avoir établi ce déphasage, nous avons investigué l'évolution de l'incidence des méningites par rapport à l'évolution des variables atmosphériques. L'incidence hebdomadaire semble être liée à la fois à la variabilité du climat sahélien et à la variabilité des contenus en poussières mais ce résultat a été établi uniquement en se focalisant sur les années épidémiques. Ensuite, un modèle statistique de l'incidence hebdomadaire a été créé en se basant sur la température et l'AI transformé à l'échelle des districts, des régions et des pays. Ce modèle permet de reproduire la phase ascendante des épidémies et il explique plus de 30% de la variabilité de l'incidence des méningites pendant les épidémies. Les différences de saisonnalité de l'incidence sont bien reproduites car le maximum de l'incidence est en moyenne plus tardif au Niger (en avril) qu'au Burkina Faso (en mars), ce qui est en accord avec les observations. Ces résultats montrent que la température et les niveaux de poussières sont des facteurs à prendre en compte pour expliquer la variabilité intra-saisonnière

des épidémies. Par conséquent, ce modèle de l'incidence pourrait contribuer à un système d'alerte précoce de la survenue d'une épidémie de méningites dans la ceinture des méningites.

■ Conclusions et discussion

Les épidémies de méningites sont un problème de santé publique au Sahel et l'une des principales préoccupations de l'OMS dans cette région. Le programme AMMA a permis d'améliorer la connaissance du climat sahélien et de ces impacts sur les épidémies de méningites.

La question principale que nous avons cherchée à résoudre dans cette thèse, concerne la saisonnalité des épidémies que l'on suppose conditionnée par la saisonnalité des conditions atmosphériques. Avant de répondre à cette question, nous allons discuter le postulat de base qui suppose un mécanisme de causalité entre certaines conditions atmosphériques et les épidémies de méningites. En fait, il y a deux mécanismes proposés dans la littérature pour expliquer l'influence des conditions atmosphériques sur les épidémies de méningites.

D'un côté, les conditions atmosphériques extrêmes et notamment les fortes concentrations de poussières pourraient agir sur l'irritation de la gorge et donc l'invasion de la bactérie. D'un autre côté, dès le début la saison sèche, la sécheresse et les poussières associées amplifient la proportion de personnes qui toussent et les regroupements dans des lieux clos. La transmission de la bactérie est alors favorisée et donc le portage augmente. Pour ces deux mécanismes, il est possible de s'intéresser aux liens temporels et aux liens de proportionnalité (ou quantitatifs). De plus, la réponse temporelle ou quantitative de l'incidence attendue pour les deux mécanismes est différente.

Si l'on considère le mécanisme d'action du climat et des poussières sur l'irritation des voies respiratoires, c'est-à-dire sur l'invasion du méningocoque, les augmentations de l'incidence devraient survenir après les événements de poussières, décalées de quelques semaines à cause du délai d'incubation de la bactérie. Mais, si l'on s'intéresse au mécanisme d'action du climat et des poussières sur la transmission, il faut intégrer la réponse de l'incidence sur toute l'année. Les études précédentes ont le plus souvent concerné ce mécanisme car les données disponibles concernaient toute la saison des épidémies (données annuelles). Ces études ont montré que les anomalies climatiques (mensuelles) avant la saison des épidémies (en automne) étaient corrélées avec l'incidence annuelle des méningites (Thomson *et al.*, 2006; Yaka *et al.*, 2008). Dans ce travail de doctorat, c'est l'hypothèse de l'irritation des voies respiratoires qui a été étudiée car nous disposons de données hebdomadaires. Nous n'étudions pas directement ce mécanisme de causalité mais nous avons étudié des conséquences de ce mécanisme que nous avons formulé sous la forme de quatre questions.

Au cours de cette thèse, quatre questions ont été abordées et la question principale est :

La saisonnalité des épidémies est-elle liée à la saisonnalité des conditions atmosphériques ?

Les relevés épidémiologiques de l'OMS montrent que la variabilité du calendrier des épidémies est assez faible au Sahel. En effet, la date de démarrage (fin février), ou la date du maximum (entre mars et avril) ou la date de la fin des épidémies (fin mai) sont proches tous les ans : au Burkina Faso (Rapport OMS, 1998; Mueller *et al.*, 2008) ; au Mali (Sultan *et al.*, 2005; Philippon *et al.*, 2009) ; au Niger (Campagne *et al.*, 1999). De plus, le maximum de l'incidence semble être légèrement plus précoce au Burkina Faso (en mars) qu'au Niger (en avril), comme nous l'avons vu (cf. chapitre 2, section 2.1.1.1).

Nous avons montré que la saisonnalité marquée de l'incidence (c'est-à-dire la période d'hyperen-

démicité) correspond à des conditions atmosphériques spécifiques. Les plus fortes incidences se produisent toujours à la fin de la saison sèche lorsque la température et les concentrations de poussières sont maximales. Nous avons montré que l'incidence modélisée à partir de ces deux variables permet de reproduire fidèlement la période d'augmentation de l'incidence à l'échelle nationale. De plus, les différences de mois de maximum entre les pays sont aussi reproduites. Par conséquent, nos résultats suggèrent que la saisonnalité marquée de l'incidence serait due aux conditions atmosphériques, marquées par la transition de la période de l'Harmattan vers la période de mousson, c'est-à-dire la période de la dépression thermique saharienne ayant lieu en mars au Burkina Faso et en avril au Niger et qui est associée à des niveaux de poussières élevés. Ces résultats montrent que le climat et les poussières du Sahara sont des facteurs à prendre en compte pour expliquer la saisonnalité des épidémies. Par conséquent, ces résultats pourraient participer à un système d'alerte précoce d'épidémies de méningites dans la ceinture des méningites.

Le climat de la ceinture des méningites correspond t'il à un climat particulier ?

La définition de la ceinture des méningites est basée sur les cumuls annuels de pluie (Lapeyssonnie, 1963) mais les cumuls de pluie ne sont pas un facteur explicatif des épidémies. A partir des variables sélectionnées pour leurs effets potentiels sur l'irritation des voies respiratoires, nous avons montré que la ceinture des méningites se distingue des autres régions de l'Afrique au nord de l'équateur. Il y a pour chaque variable une zone d'évolution commune qui correspond à la ceinture des méningites. Il semble donc que la ceinture des méningites corresponde à une unité climatologique claire. Ces résultats corroborent les études précédentes qui avaient caractérisé la ceinture des méningites à partir de divers paramètres environnementaux (Molesworth *et al.*, 2003). Il semble aussi possible de définir une zone géographique de plus fort risque d'épidémie en se basant uniquement sur la température et les poussières.

Y a-t-il un décalage systématique entre certaines conditions atmosphériques spécifiques et les départs d'épidémies ?

Pour étudier s'il y a un décalage systématique, il est nécessaire de disposer de données à un pas de temps inférieur au temps d'incubation de la bactérie qui est de dix jours. La base de données au pas de temps hebdomadaire que nous avons créée, permet donc de tester cette hypothèse. Parmi les conditions atmosphériques, ce sont principalement les concentrations de poussières qui sont suspectées d'être à l'origine des déclenchements d'épidémies. Un décalage entre l'augmentation de la teneur en poussières de l'atmosphère et l'augmentation de l'incidence des méningites a été mis en évidence tout d'abord au niveau d'une ville (Greenwood *et al.*, 1984), puis au niveau national au Niger et au Burkina Faso (Martiny et Chiapello, 2013; Deroubaix *et al.*, 2013).

Dans le but de démontrer que ces deux augmentations sont bien successives et non pas juste concomitantes, nous avons cherché à démontrer que le décalage se vérifie chaque année et quel que soit le district considéré. L'analyse en ondelettes proposée dans le quatrième chapitre a permis de confirmer ce résultat et de conclure que les poussières sont un facteur à prendre en compte pour déterminer le démarrage des épidémies. Le décalage d'une semaine environ (1,55 semaines exactement) qui se vérifie à plusieurs échelles spatiales, est du même ordre de grandeur que le délai d'incubation (Agier *et al.*, 2013b). Cela corrobore donc le mécanisme supposé d'irritation des voies respiratoires favorisant l'invasion de la bactérie.

Dans quelle mesure est-il possible de prévoir l'augmentation de l'incidence hebdomadaire des

méningites à partir de la variabilité atmosphérique ?

Le décalage entre l'augmentation du niveau de poussières et l'augmentation de l'incidence montre qu'un fort niveau de poussières est en soi un signal d'alerte de la survenue possible d'une épidémie. Il faut donc prendre des mesures de précautions. A l'échelle des districts et pendant les épidémies, le modèle statistique de l'incidence des méningites développé à partir de la température et de la concentration de poussières des semaines précédentes, permet d'expliquer plus de 30% de la variance. Ce modèle de l'incidence permet aussi de retrouver la phase d'augmentation de l'incidence et il utilise une moyenne de deux semaines avec un décalage d'une semaine.

Par conséquent, il est possible d'analyser l'évolution de la température et des concentrations de poussières pour anticiper le départ de l'épidémie. L'évolution hebdomadaire de la température est bien représentée par les modèles numériques météorologiques mais elle est plus linéaire que les concentrations de poussières. Cependant anticiper l'arrivée d'un événement de poussières au moyen d'un modèle numérique d'émission-transport-dépôt des poussières est plus délicat. Mais nous avons vu que ce sont les concentrations de poussières moyennées sur trois semaines qui permettent d'obtenir la meilleure corrélation entre les incidences modélisées et observées. Par exemple dans le modèle CHIMERE (Menut *et al.*, 2009), les concentrations de poussières ne sont pas bien modélisées au pas de temps journalier alors que les concentrations mensuelles le sont (Schmechtig *et al.*, 2011). Il semble nécessaire de tester ce type de modèle au pas de temps de la semaine dans le cadre spécifique des études d'impacts des poussières sur les épidémies de méningites, comme le modèle CHIMERE a pu l'être dans le cadre des études d'impact de l'ozone sur la santé (Valari *et al.*, 2011).

A l'échelle du Mali, Sultan *et al.* (2005) ont montré un lien avec la position la plus au sud du front intertropical et l'intensité du vent d'Harmattan, c'est-à-dire plus le maximum de l'hiver a lieu tôt, plus l'augmentation de l'incidence se produit tôt. Ces résultats sont en accord avec nos résultats car ils montrent l'importance de la période de fortes températures pour déterminer le départ d'une épidémie à l'échelle régionale. En effet, cette période sera d'autant plus précoce que l'hiver se sera terminé tôt. De plus, l'incidence annuelle a été corrélée avec les anomalies de vent au Burkina Faso et au Niger (Yaka *et al.*, 2008). Cela a permis de produire une prévision de l'intensité des épidémies de la saison à venir expliquant 25% de la variabilité des épidémies.

L'originalité de la méthode proposée dans ce travail de doctorat réside dans l'étude des incidences hebdomadaires. Les données épidémiologiques hebdomadaires traitées durant cette thèse sont basées sur le nombre de cas suspectés par le diagnostic d'un médecin et non pas confirmés par un laboratoire. De plus, nous n'avons pas d'information sur le taux d'invasion, ni sur le taux de portage. En dépit de ces limitations, les résultats présentés ont montré un lien entre l'évolution de l'incidence d'une semaine à l'autre et la variabilité atmosphérique. De plus, l'incidence hebdomadaire modélisée est basée sur seulement deux paramètres à l'échelle des districts ainsi qu'à l'échelle des régions : la température et l'AI transformé. Bien que plus de 30% de la variabilité de l'incidence soit reproduite pendant les épidémies, notre modèle ne permet pas de prévoir l'amplitude des épidémies. Néanmoins, il permet de décrire correctement la phase ascendante des épidémies et donc déterminer la date de démarrage à l'échelle nationale. Les résultats obtenus permettent donc d'entrevoir la création d'un indice de risque d'épidémies basé sur la variabilité de l'atmosphère.

Comme nous avons sélectionné les années épidémiques, nous avons fait une hypothèse : c'est une limite maximum de l'incidence des méningites uniquement liée à l'irritation des voies respiratoires que nous avons cherchée. Cette sélection a permis de choisir les années où le portage est a priori

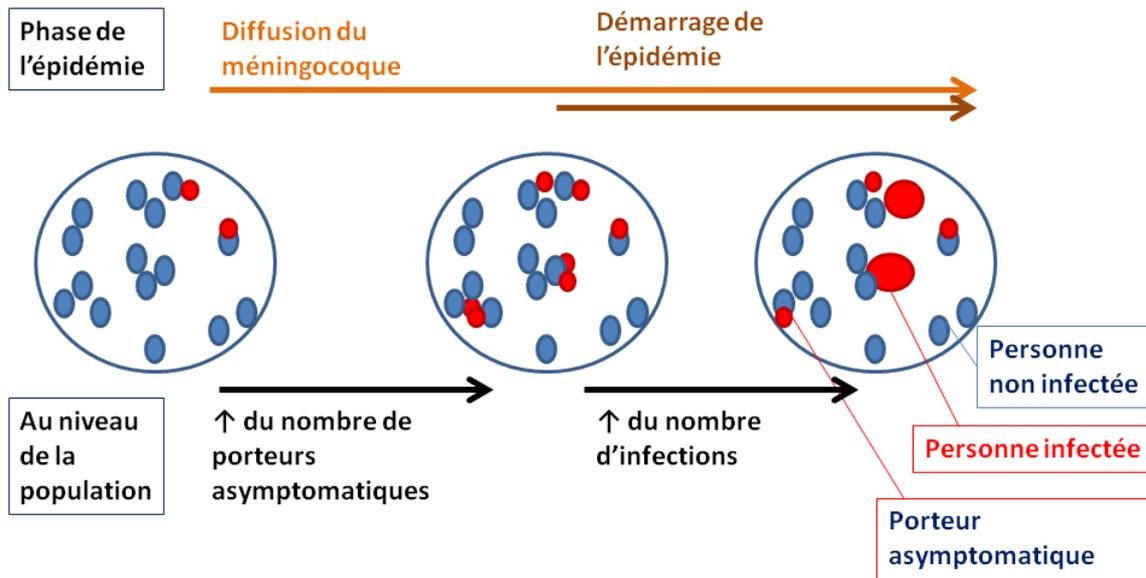


Figure IV.9. – Schéma de la phase de diffusion précédant l'épidémie et la phase épidémique avec le nombre de porteurs asymptomatiques et le nombre de personnes infectées (à partir du rapport de l'OMS, 1998).

élevé puisqu'il y a eu une épidémie (Figure IV.9). Nous avons donc défini une période de fort risque d'épidémie de méningites. Durant cette période, une épidémie est plus probable que durant le reste de la saison sèche. Mais les épidémies surviennent lorsque toutes les conditions sont réunies, c'est-à-dire le portage est élevé, la couverture vaccinale faible, l'immunité de groupe faible et probablement aussi la présence d'autres pathologies respiratoires. C'est pour cela que nous avons décidé de focaliser l'analyse uniquement sur les années des épidémies. Pour justifier ce choix, il faut analyser l'incidence des méningites qui est le nombre de cas divisé par la population égale au produit du taux de portage par le taux d'invasion :

$$(\text{cas/population}) = (\text{porteurs/population}) \times (\text{cas/porteurs}). \quad (4.iii)$$

Bien que la saisonnalité des deux taux soit envisageable, nos résultats suggèrent qu'un changement du taux d'invasion soit nécessaire pour reproduire la saisonnalité de l'incidence à large échelle. Nous avons étudié spécifiquement le rapport (cas/porteur) puisque notre hypothèse est qu'il y a un effet d'irritation des muqueuses par les fortes concentrations de poussières permettant l'invasion du méningocoque. C'est donc un effet direct et la réponse de l'épidémie est rapide. Il s'en suit une hausse des infections une dizaine de jours plus tard, due au délai d'incubation (Stephens *et al.*, 2007). A l'inverse pour le rapport (porteurs/population), il y a plusieurs mécanismes indirects possibles qui lient ce rapport à la variabilité atmosphérique. Mais la réponse temporelle à envisager peut être très variable en fonction de la densité de population, et donc le décalage ne serait pas constant.

Au niveau d'une communauté, les chiffres montrent qu'il est cohérent de considérer que ces deux taux varient. L'incidence observée dans les foyers en épidémie peut varier de quelques cas à plus de 1000 cas pour 100 000 habitants (Mueller et Gessner, 2010). Comme le taux de portage varie de 3 à 30% (Trotter et Greenwood, 2007), le taux d'invasion pourrait ainsi varier de 1 à 10% (ce qui correspond à une incidence locale variant de 3 à 3000 cas pour 100 000 habitants, voir équation 4.iii).

La saisonnalité de l'incidence des méningites semble donc être contrainte par la saisonnalité de la température et des poussières. On peut interpréter la saisonnalité de l'incidence des méningites

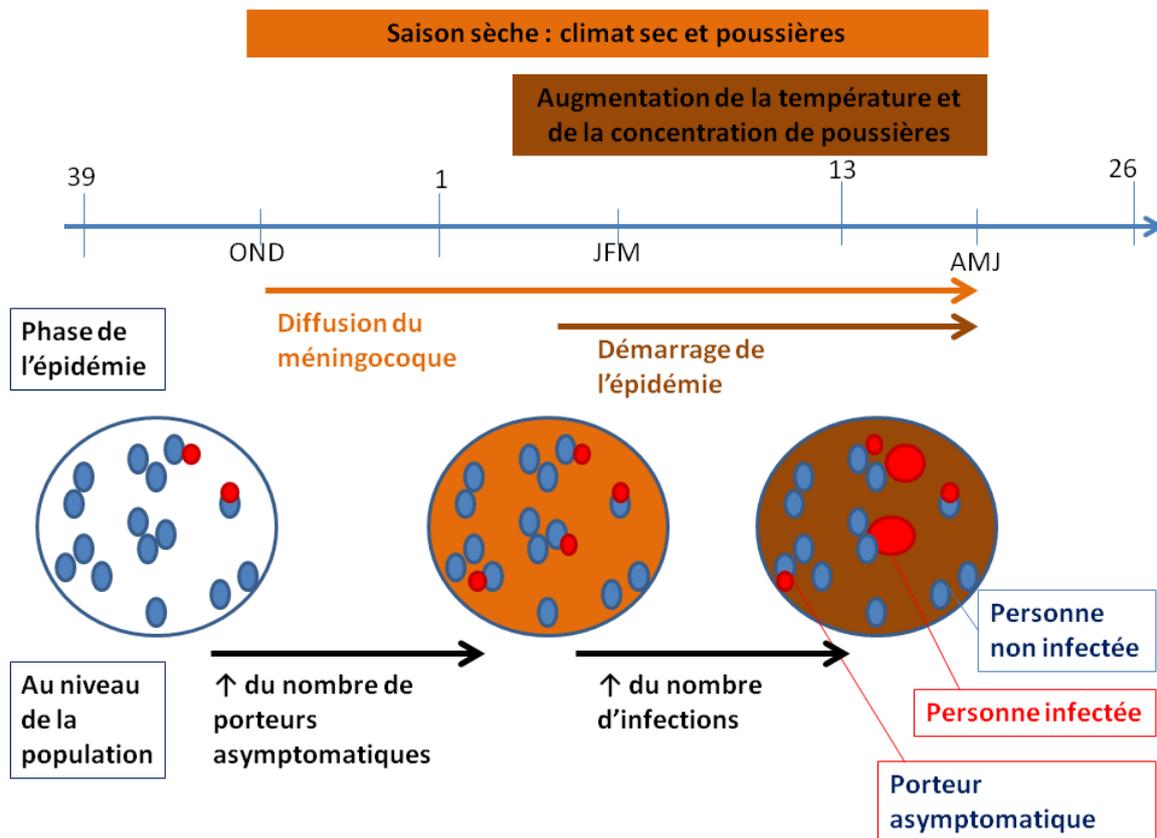


Figure IV.10. – Schéma exploratoire des deux effets de l’atmosphère sur les phases de l’épidémie dans la ceinture des méningites avec la phase de diffusion et la phase de démarrage.

comme étant liée à une augmentation du taux d’invasion qui atteint un maximum entre mars et avril au Sahel. Par conséquent, les fortes températures et les fortes concentrations de poussières semblent agir sur les épidémies en favorisant l’invasion du méningocoque et donc en agissant sur la population comme un révélateur de la répartition spatiale du portage (Figure IV.10). Néanmoins, seules les études de portage de la bactérie avant et pendant les épidémies, peuvent confirmer ce type de schéma exploratoire (Trotter et Greenwood, 2007; Mueller et Gessner, 2010).

En conséquence, nous avons montré que l’augmentation rapide du niveau de poussières doit être considérée comme un signal d’alerte d’un risque d’épidémie plus élevé dans les semaines suivantes. Il est possible de prendre des précautions comme l’utilisation de masques durant les semaines de forte concentration de poussières, ou la prescription de sirop antitussif, ou encore de recommander une activité minimale à l’extérieur pour éviter le dessèchement des voies respiratoires.

■ Perspectives

Dans le but de préciser ou d’améliorer les résultats, le principal problème de notre modèle de l’incidence est le fait qu’il est basé sur l’AI transformé. En effet, l’AI est un produit d’aérosols semi-quantitatif et nous avons vu que seulement 50% de la variabilité des concentrations de poussières était reproduite. Dans le cadre du projet ADCEM, les différentes situations météorologiques de la saison sèche ont été distinguées et regroupées en six types de temps. Il semble probable que la méthode employée pour raffiner l’AI pour représenter le niveau du sol puisse être améliorée en fonction de ces types de temps (Yahi *et al.*, 2013).

De plus, une amélioration importante pourrait être obtenue en le remplaçant par un autre jeu de données de poussières. D'autres produits d'aérosols comme les AOT "deep-blue" de la sonde MODIS (Hsu *et al.*, 2004), ou les AOT de MISR, ou encore l'IDDI (de deuxième génération) fait à partir de la sonde SEVERI sur le satellite MSG (Meteosat Second Generation), pourraient permettre d'améliorer la représentativité des niveaux de poussières. Mais chaque produit possède des aptitudes et des défauts différents (Banks *et al.*, 2013), il est nécessaire de les tester dans le cadre des études d'impact des poussières sur la santé comme cela a été présenté au troisième chapitre pour l'AI (Deroubaix *et al.*, 2013). En outre, des données réanalysées d'épaisseurs optiques sont aussi disponibles depuis 2011 grâce au projet européen MACC (Monitoring Atmospheric Composition and Climate). Néanmoins, quel que soit le produit d'AOT utilisé, il est nécessaire de modifier le cycle des épaisseurs optiques en aérosols pour qu'il soit représentatif de la concentration de poussières en surface durant toute l'année. Pour cela, seules les séries de mesures des concentrations de poussières au niveau du sol peuvent permettre de justifier cette modification.

Du point de vue du modèle de l'incidence basé sur l'atmosphère, il faudrait analyser les dates de dépassements de seuils (chapitre 4, section 2.1.2) et surtout les dates de démarrage (par un test de rupture de pente) en agrégeant au niveau des régions que nous avons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (chapitre 4, section 2.1.3).

Dans le but de confirmer les résultats, il faudrait tout d'abord s'intéresser aux districts des pays frontaliers et notamment au Nigeria. Nos résultats montrent que le sud-est du Niger est la zone de risque maximal et cette zone contient des districts en bordure du Nigeria. Par conséquent, il semble très probable que le nord du Nigeria possède les mêmes caractéristiques, notamment l'incidence des méningites maximale en avril.

Les résultats de ces travaux de thèse montrent l'importance des températures élevées et des forts niveaux de poussières. Nous avons montré que ces deux variables sont caractéristiques de la variabilité du climat et de la variabilité des poussières. En avril, il y a une zone de maximum de l'incidence modélisée au sud du Niger qui correspond au maximum de température et de poussières simultanément. De plus, il semble que les fortes incidences coïncident avec la période de la DTS (Lavaysse *et al.*, 2009). De ce fait, nous pouvons supposer que, dans les autres pays de la ceinture, cette coïncidence se vérifie aussi. Ce phénomène suit un parcours similaire chaque année car, entre décembre et janvier, la DTS se trouve à l'est de la ceinture puis, de février à mars, elle se déplace vers le sud-ouest, enfin, d'avril à mai, elle migre vers le nord-ouest. Il se pourrait donc que les différences de période d'hyperendémicité entre les pays de la ceinture suivent aussi ce calendrier mais il y a peu de données épidémiologiques hebdomadaires. En outre, il faudrait disposer de données confirmées par un laboratoire pour confirmer ces résultats.

D'autre part, il est important de confirmer l'hypothèse de base de cette thèse, le mécanisme de dégradation des muqueuses du système respiratoire. C'est ce qui a été initié dans la deuxième phase du programme AMMA (projet AMMA-phase 2, groupe "climat-méningites") grâce à un partenariat entre le laboratoire Biogéosciences et le Laboratoire d'Aérodologie. De plus, nous avons montré l'importance de la température et des effets des températures élevées sur le corps et surtout les muqueuses de voies respiratoires ont déjà été démontrés (Sherwood et Huber, 2010). De plus, cette variable a déjà été liée à l'incidence des méningites (Greenwood *et al.*, 1984). Au Sahel, les températures des mois de mars, avril et mai sont parmi les plus élevées de celles relevées dans des régions habitées et elles sont aussi souvent supérieures à la température du corps. Enfin, s'il y existe un impact des fortes tem-

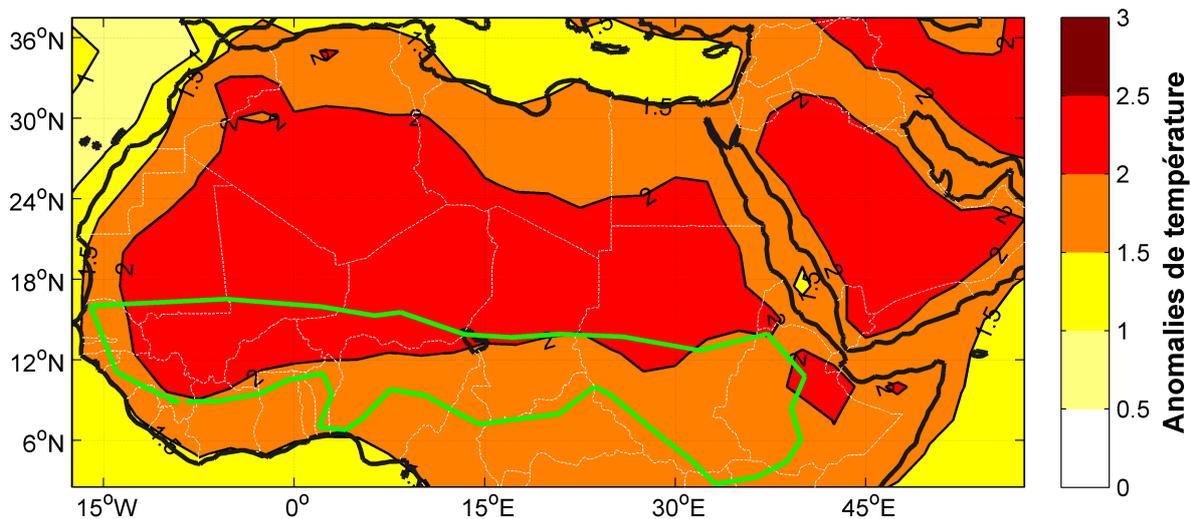


Figure IV.11. – Anomalies trimestrielles de température (pour les mois de mars, avril et mai) entre la période future (pour la moyenne de 8 modèles CMIP5 sur la période 2031-2070 avec le scénario rcp4.5) et la période de référence (sur la période 1960-1999) ; à partir des données et de la méthode proposée par (Monerie *et al.*, 2012).

pératures et des fortes concentrations de poussières, cet impact devrait être le plus important au Sahel.

Dans le but d'extrapoler les résultats dans le futur, la température est la variable portant le poids maximum dans le modèle de l'incidence proposé. De plus, les champs de température sont bien reproduits par les simulations numériques du climat. Par exemple, avec les données de plusieurs modèles climatiques en prenant le même scénario créé par le Groupe d'expert Intergouvernemental sur le Climat (Taylor *et al.*, 2012), il est possible de sonder le climat du futur en les moyennant pour obtenir un multi-modèle (Santer *et al.*, 2009). A partir des données utilisées par (Monerie *et al.*, 2012), les anomalies de température dans le futur (2031-2070) ont été créées en comparant avec la période actuelle (1960-1999).

On constate sur cette figure que l'augmentation de la température concerne tout le domaine pendant la période du maximum des épidémies (mars-avril-mai). L'ouest de la ceinture est associé à une hausse de température plus importante (Monerie *et al.*, 2012). Il se pourrait d'après la Figure IV.11 qu'il y ait une plus forte occurrence au Mali car on constate que la température y sera particulièrement élevée au cours de la période 2031-2070. Bien sûr il faut rester prudent aujourd'hui avec les sorties de modèles mais au cours des deux prochaines décennies les modèles climatiques et la dynamique des maladies infectieuses seront liés (Rodó *et al.*, 2013). De plus, parallèlement à l'augmentation de la température, il est possible que les événements de poussières diminuent. En effet, durant la période de 1984 à 2011, il a été constaté que les événements de poussières ont diminué alors que la température n'a cessé d'augmenter (Cowie, 2012).

Les prévisions de l'effet possible du changement climatique sur les épidémies de méningites sont à prendre en compte au Sahel (Fink *et al.*, 2005). Ils sont intégrés dans les plans nationaux de programme d'action pour la santé (les PANAs) mis en place par l'OMS pour les pays en voie de développement (Manga *et al.*, 2010). Mais avant tout, ce sera un challenge pour la population du Sahel qui augmente rapidement (Mpofu, 2013).

Annexes

Outils statistiques

■ Le principe de l'analyse en composantes principales dans le cas de deux variables

Lorsque l'on souhaite étudier deux variables pour lesquelles on dispose d'observations (des valeurs en fonction du temps), soit $X_1(\text{temps})$ et $X_2(\text{temps})$, il est possible de représenter l'une en fonction de l'autre dans le plan, tel que : $X_1(X_2)$; ou inversement $X_2(X_1)$.

Chaque point (ou observation ou individus) correspond à un pas de temps (t), ces coordonnées dans le plan sont associées à un couple de valeur : $(X_1(t), X_2(t))$. L'ensemble de ces points forme un nuage de point. La dispersion de ce nuage dépend de l'écart-type (Ect) des deux variables et de leur covariance (Cov), que le coefficient de corrélation (R) résume tel que :

$$R(X_1, X_2) = Cov(X_1, X_2) / (Ect(X_1) \times Ect(X_2)) \quad (4.iv)$$

R est symétrique car $R(X_1, X_2) = R(X_2, X_1)$. R permet de décrire le nuage en définissant l'axe de meilleur allongement du nuage, c'est l'axe principal du nuage, qui est le meilleur résumé du nuage de point par une droite (Pearson, 1901; Hotelling, 1933). Il est important de noter que cet axe n'est pas la droite de régression de X_1 à partir de X_2 (ou inversement de X_2 à partir de X_1), qui minimise les erreurs faites sur X_1 (ou inversement sur X_2). Ceci est illustré par la Figure IV.12, on peut aussi remarquer sur cette figure, que l'on peut définir un autre axe passant par le centre de gravité du nuage C , perpendiculaire à la droite du "meilleur ajustement" (i.e. la première et la deuxième composante principale du nuage de point).

■ Le principe dans le cas de plusieurs variables

Il est possible de visualiser à 3 dimensions un nuage de point et donc son axe de meilleur allongement. Bien que pour quatre dimensions et plus la visualisation ne soit pas possible, la recherche de cet axe reste mathématiquement identique. Plus généralement, lorsqu'on dispose d'un nuage d'observations de plusieurs dimensions, on parle d'inertie (somme des variances des variables considérées). Le principe de l'ACP consiste à rechercher l'axe sur lequel le nuage de points est le plus "étalé", autrement dit on cherche la rotation des axes initiaux permettant la meilleure visualisation du nuage. On cherche donc la rotation des axes initiaux qui maximisent la variance du nuage. Ces transformations sont faites par des combinaisons linéaires des variables initiales. Ce sont les composantes principales ou axes factoriels (Richman, 1986), que l'on note : CP ou F.

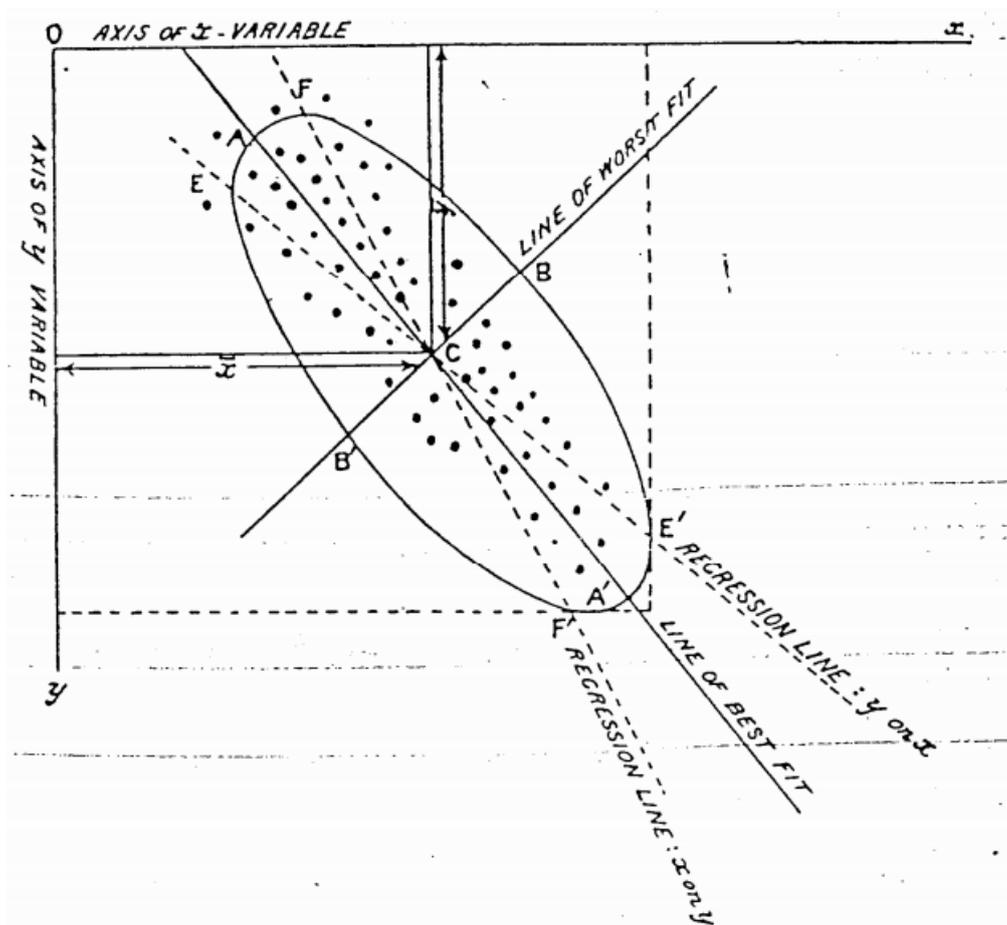


Figure IV.12. – Extrait de l'article de Pearson (1901), la recherche de la "droite du meilleur ajustement"

■ La méthode de l'analyse en composante principale

La matrice d'entrée est un tableau dont les colonnes sont composées de n variables (X_1, X_2, \dots, X_n), et les lignes sont les observations. Ce tableau ou matrice est noté X , et sa transposée est noté X' . On définit alors la matrice d'inertie C , telle que : $C = X'X$. Lorsque les données de la matrice d'entrée sont centrées (c'est-à-dire, on retranche à chaque observation la moyenne de la variable correspondante), cette matrice est la matrice de variance/covariance. Lorsque les données de la matrice d'entrée sont centrées-normées (ou réduites ou standardisées ; c'est-à-dire, on divise chaque observation centrée par l'écart-type de la variable correspondante), cette matrice est la matrice de corrélation.

La matrice C est diagonalisable dans une base orthonormée car la matrice C est une matrice carrée et réelle (de dimension $n \times n$), qu'il est possible de décomposer en valeur propre (λ_α ; c'est l'inertie portée par l'axe α), associée à un vecteur propre (u_α ; c'est la direction de l'axe α). La diagonalisation permet d'obtenir les composantes principales (CP_α ou les axes factoriels F_α) :

$$C \times u_\alpha = \lambda_\alpha \times u_\alpha \quad (4.v)$$

On peut alors écrire la matrice d'entrée X à partir des composantes principales, telle que :

$$CP_\alpha = X \cdot u_\alpha = a_{\alpha,1}X_1 + a_{\alpha,2}X_2 + \dots + a_{\alpha,n}X_n \quad (4.vi)$$

Où les $a_{\alpha,i}$ sont des coefficients réels.

La diagonalisation de C permet d'exprimer le vecteur qui explique le maximum d'inertie du nuage par le premier vecteur propre. De même, le deuxième vecteur qui explique la plus grande part de l'inertie restante, est le deuxième vecteur propre, etc. Les vecteurs propres sont donc hiérarchisés, et ils définissent les directions des axes factoriels, résumant les axes d'allongement de la matrice initiale de manière hiérarchisée. Ainsi, chaque mode de variabilité indépendant est une composante principale (définie par sa valeur et son vecteur propre). La part de variance de X liée à un mode est donc le rapport entre la valeur propre correspondante et la somme des valeurs propres (c'est la diagonale de la matrice C , ou la trace).

■ L'interprétation des composantes principales

Le fait que le nuage soit allongé dans une direction préférentielle est interprétable. La nouvelle variable (la première composante principale, combinaison linéaire des variables initiales) permet de différencier le plus les différentes observations des variables d'entrée. Il convient alors d'expliquer pourquoi, et donc de trouver quelle signification peut avoir cette nouvelle variable (formée par une combinaison linéaire des variables d'entrée). Pour commencer l'interprétation, il est généralement nécessaire d'étudier les corrélations entre les composantes principales et les variables de départ.

On espère alors pouvoir extraire de cette nouvelle variable, un caractère complexe, qui n'est pas directement mesurable par une seule variable. Les applications de l'ACP sont multiples, par exemple pour la compression de l'information, pour le traitement de signal, ou encore pour l'enseignement (à partir des notes des élèves, on détermine les élèves ayant des aptitudes scientifiques ou littéraires) ; pour la santé (à partir des constantes médicales, on diagnostique une maladie) ; pour l'économie (à partir des indicateurs économiques, on détermine l'industrialisation d'une région) ; pour le sport (à partir des résultats à des épreuves, on détermine les performances). Et, dans notre cas, pour la géophysique à partir d'observations quantitatives de la nature, on détermine des phénomènes. Dès 1956, cette technique a été appliquée à la météorologie et à la climatologie (Lorenz, 1956). Les

conditions climatiques à large échelle sont aujourd'hui classiquement décrites par les premières composantes principales du champ en deux dimensions d'une variable telle que le vent, la température ou l'humidité (Corti *et al.*, 1999; Hoerling *et al.*, 2001; Miller *et al.*, 2006).

Enfin, quand il n'y a pas une direction privilégiée dans le nuage de point, chaque mode porte alors la même part d'inertie. Ainsi, avec 3 variables, si le 1^{er} axe factoriel correspond à 40% de l'inertie, cela montre que le nuage n'a pas d'axe d'allongement remarquable puisque 40% est très comparable à $100/3 = 33\%$. A l'inverse, avec 30 variables, un 1^{er} axe factoriel correspondant à 40%, montre un axe d'allongement très significatif puisque $100/30 = 3\%$ est très inférieur à 40%.

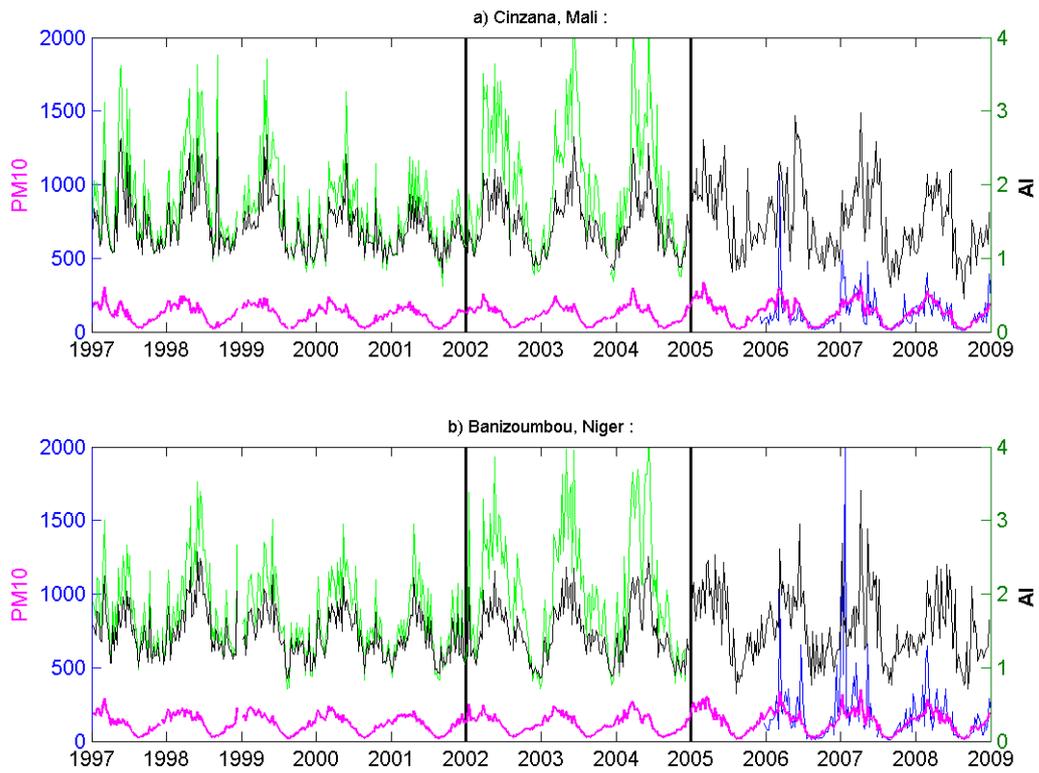
■ La constitution de la matrice d'entrée et l'application à la base de données

Dans ce manuscrit, l'ACP est utilisée dans un premier temps sur des variables *homogènes*, puis dans un deuxième temps sur des variables *hétérogènes*. Il est recommandé d'utiliser une ACP centrée pour des variables *homogènes*, c'est-à-dire des variables ayant une même unité de mesure. On travaille alors sur la matrice C de variance/covariance. Mais pour des variables *hétérogènes*, il faut utiliser une ACP réduite. La matrice C est dans ce cas la matrice de corrélation car les données sont standardisées, et les composantes principales sont alors les vecteurs propres de la matrice de corrélation C.

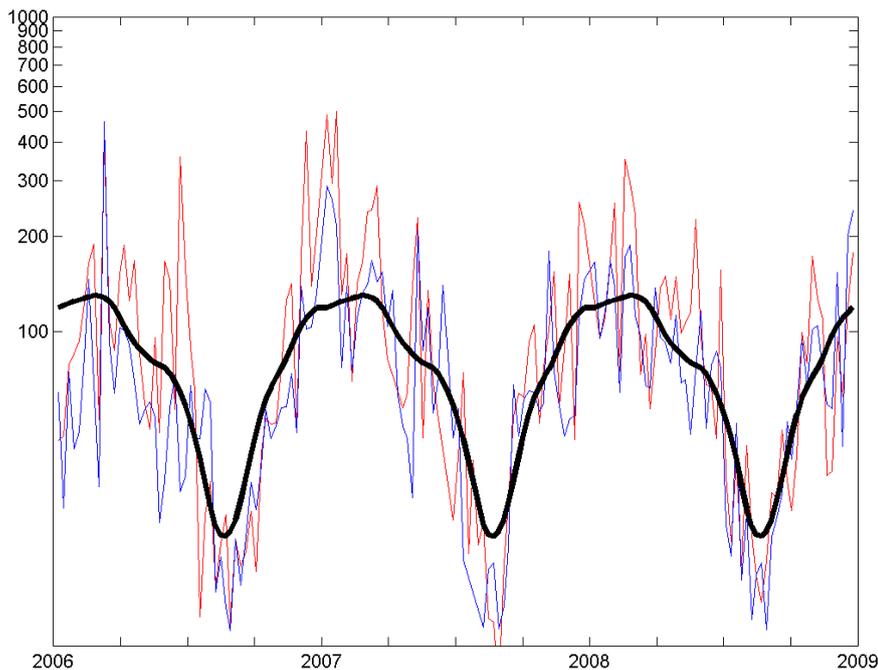
Dans le premier cas (qui correspond à la section 1.2 du chapitre 2), la matrice d'entrée X peut être vue comme un nuage de points à 920 dimensions, autrement dit à 920 variables. En effet, la fenêtre de l'Afrique (Equateur - 40° nord ; 20° ouest - 40° est) est composée de $n = 23 \times 40 = 920$ variables, c'est le nombre de points de grille d'ERA-Interim compris dans la fenêtre. De plus, le nuage de points est composé de $k = 52 \times 19 = 988$ observations, c'est le nombre de semaines sur la période 1989-2008. La série temporelle de la α^{me} composante principale est notée dans cette section F_α (il y a une valeur à chaque un pas de temps d'observation) que l'on obtient par une combinaison linéaire des variables initiales définie par : $F_\alpha = X.u_\alpha$. Puis dans cette partie, on étudie les structures spatiales des coefficients de corrélation entre les F_α et les variables de départ par une carte de corrélations.

Dans le deuxième cas (qui correspond à la section 2.2 du chapitre 2 et la section 2.1 du chapitre 4), la matrice d'entrée est composée des variables décrivant le climat (ERA-Interim) et des variables poussières (AI-OMI, AOT et PM). On a $n = 7$ variables et 3 années de mesures communes au pas de temps ($k = 3 \times 52 = 156$ observations hebdomadaires). La série temporelle de la α^{me} composante principale est notée, dans cette section, CP_α ; définie de même par : $CP_\alpha = X.u_\alpha$. Dans cette partie, on peut étudier les corrélations entre les CP et les variables de départ en projetant ces valeurs dans un diagramme, nommé plan factoriel, formé par deux composantes principales. Pour les deux premières composantes, c'est le plan principal qui permet de visualiser les corrélations des variables avec la CP_1 et la CP_2 . Dans ce plan, le cercle de significativité (à 0,01% d'erreur, soit un niveau de confiance 99%) permet de visualiser les corrélations non-significatives (car elles pourraient être dues au hasard). On utilise la valeur seuil de corrélation, définie par la table de Bravais-Pearson, que l'on prend à l'infini (0,2540 à 99%) puisque le nombre de degrés de liberté est supérieur à 100. En effet, $v = k-n-1$; avec v le nombre de degrés de liberté, k le nombre d'observations et n le nombre de variables d'entrée ($v = 156-7-1 = 148$).

Annexe de l'article "Seasonality of meningitis in Africa and climate forcing : aerosols stand out"

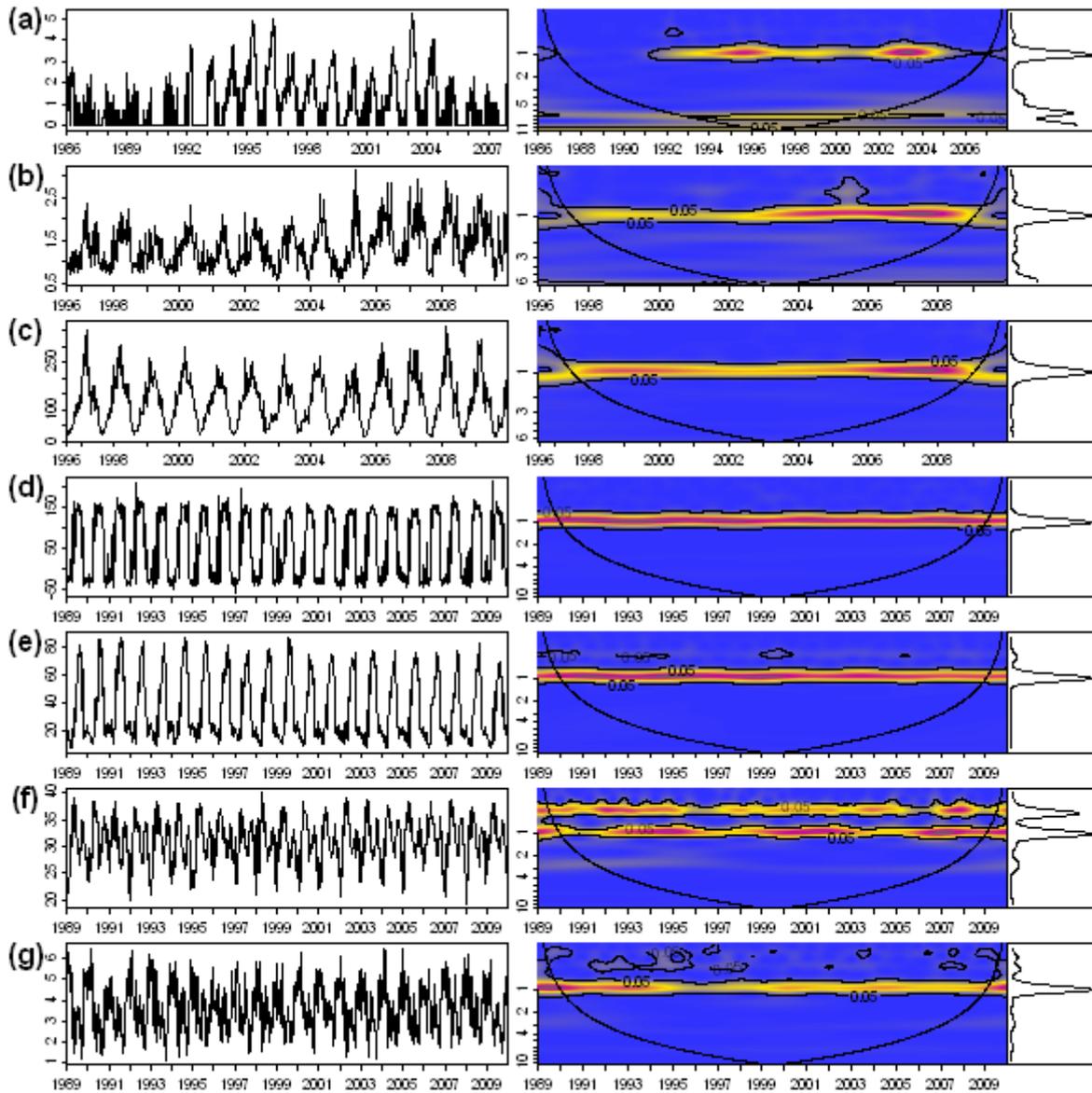


SUPPLEMENTARY FIGURE 1: Time series of AI (green line), DUST (black line), PM (blue line) and DUST_c (pink line) are plotted over the respective collection periods, for the ground-based weather stations of Cinzana (A) and Banizoumbou (B) (see location on Figure 1). AI and DUST scales are given on the right axis; PM and DUST_c scales on the left axis. The vertical thick black lines delimit the three periods of observation of AI.

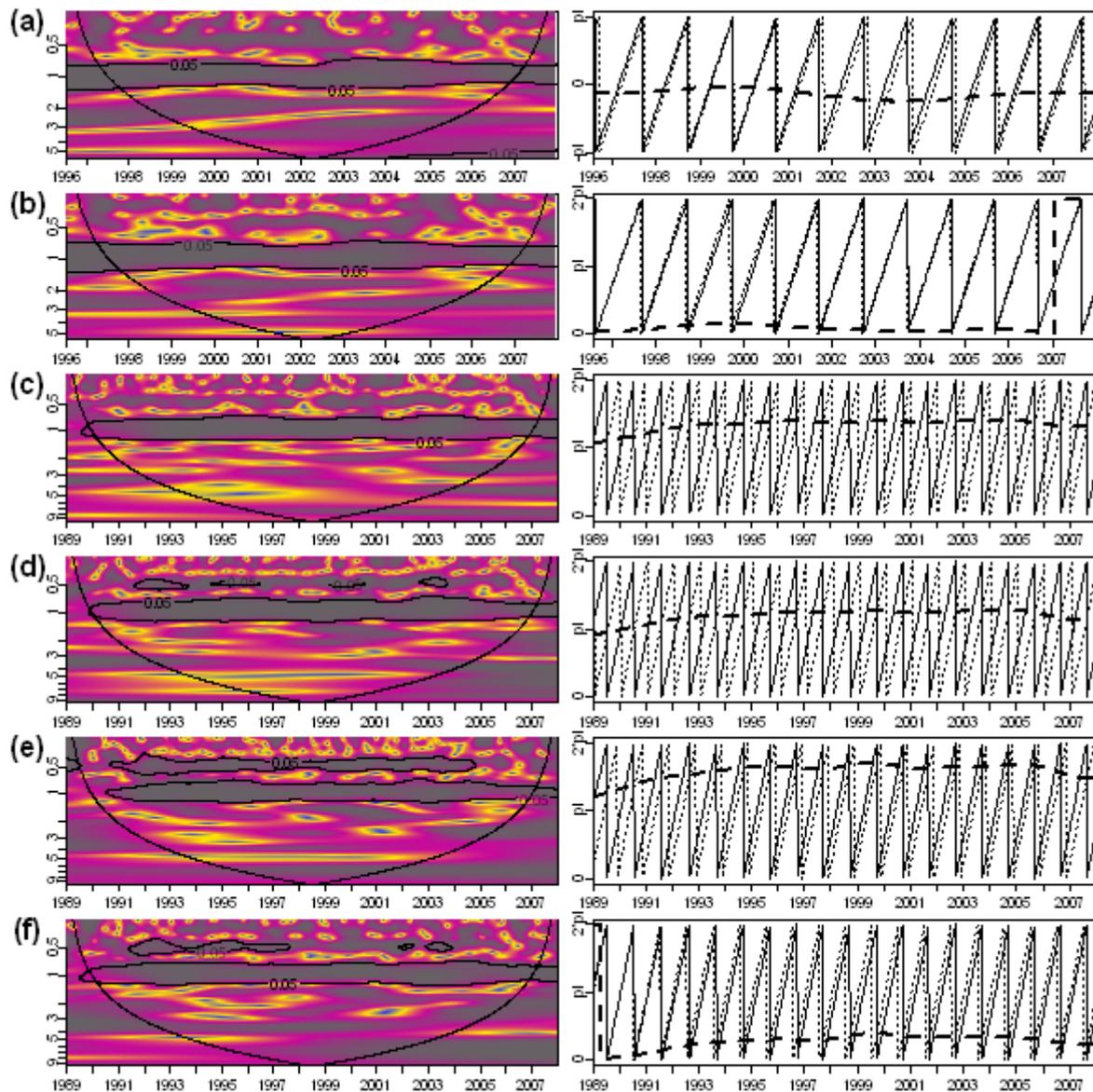


SUPPLEMENTARY FIGURE 2: Particulate matters (PM) data was collected at two ground-based weather stations in Banizoumbou and Cinzana (see location on Figure 1) over the period 2006 to 2009. Corresponding DUST values were obtained by extracting and averaging a 3x3-pixel square centered on the location of the station. The weekly PM/DUST ratios were computed; log-transformed values are plotted here against time (Banizoumbou as a blue line, Cinzana as a red line). The ratios show a clear seasonal pattern, which is repeated each year and is similar in both stations. Log-transformed ratio values were further averaged for each week of the calendar year (log-transformation was used to prevent the impact of extreme values). A seasonal curve was obtained by smoothing these values using a lowess regression function, i.e. local first-degree polynomial regression fitted on 12 consecutive data points (thick black line). This annual pattern is considered as a correction curve and represents the week-specific proportion of dust located at ground level. The DUST time series were further corrected by multiplication with the value of this annual curve for the corresponding week. The time series that were obtained are dust values corrected to a certain extent from an altitude effect, and referred to as $DUST_C$ (values obtained at the two stations location are plotted in Supplementary Figure 1). As expected, $DUST_C$ gives a better approximation of PM than DUST: the correlation coefficients for DUST and $DUST_C$ vs. PM are 0.45 and 0.75 in Banizoumbou, respectively; 0.50 and 0.77 in Cinzana, respectively.

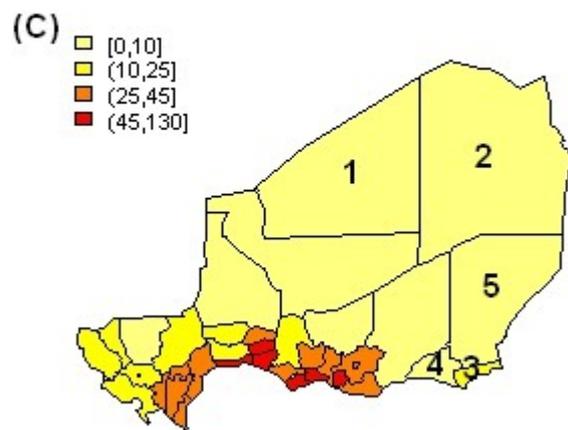
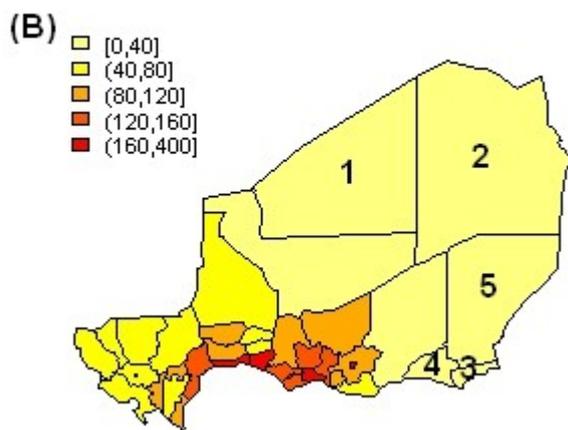
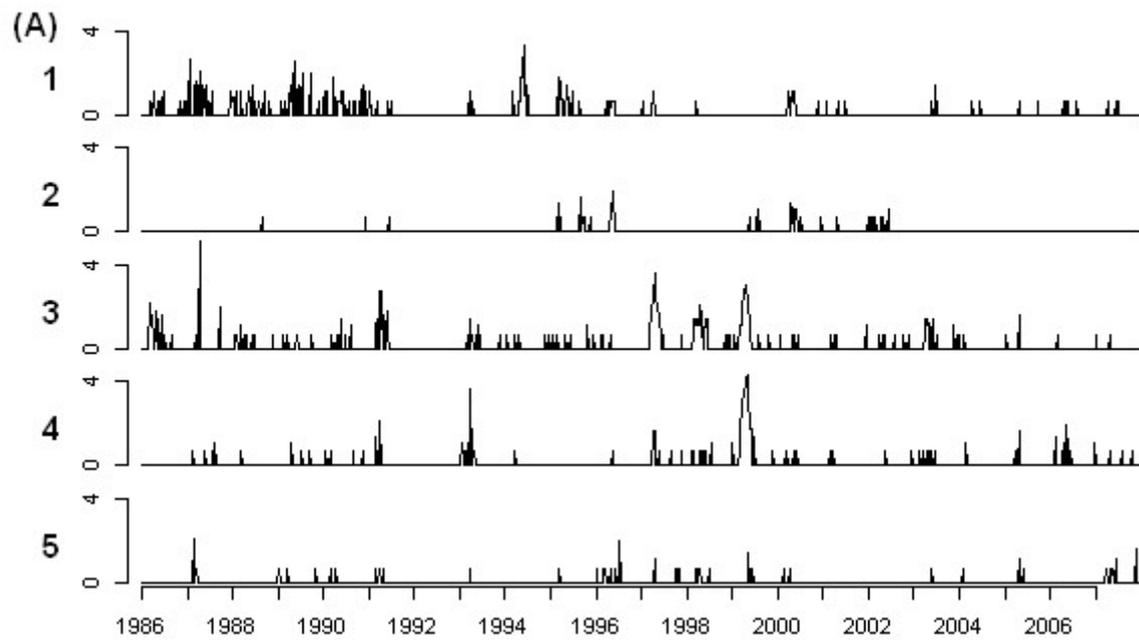
A cross validation was finally performed to test the robustness of the definition of our annual pattern. For each station-year (data for a given station over a given year, denoted SY), the annual pattern was defined as previously described using all data but this SY. The correction curve that was obtained was further used to reconstruct $DUST_C$ values for the given SY. Correlation coefficients were computed: on average, the correlation coefficients for DUST and $DUST_C$ vs. PM are 0.49 and 0.62 in Banizoumbou, respectively; 0.54 and 0.68 in Cinzana, respectively. The smallest increase between correlation coefficients of DUST and $DUST_C$ vs. PM is 0.06.



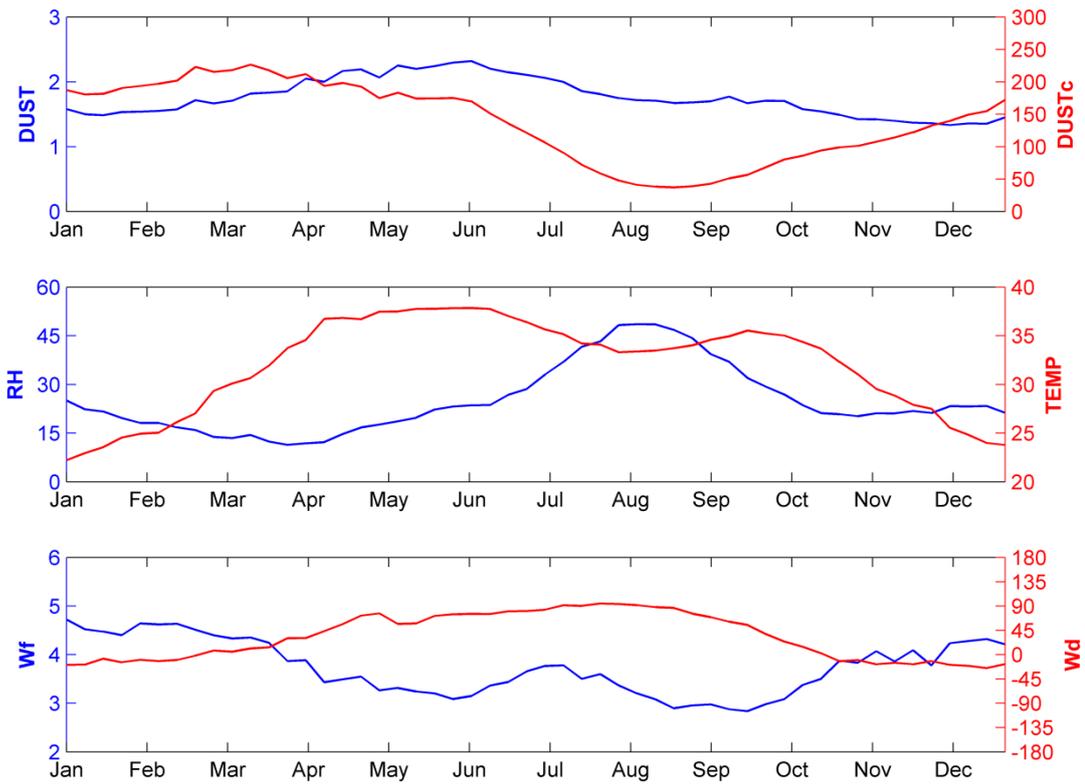
SUPPLEMENTARY FIGURE 3: Time series (left panels) and wavelet spectrums (right panels) of log-transformed meningitis incidence (a), DUST (b), DUST_C (c), Wd (d), RH (e), TEMP (f) and Wf (g) for the district of Magaria. The x-axis gives time (in years). On the right panels, the y-axis represents the periodicity (in years), the cupola delimits the cone of influence, and colours code for increasing values of wavelet coefficients, from dark blue to red. The black curves delimit the statistically significant areas at a 5% level.



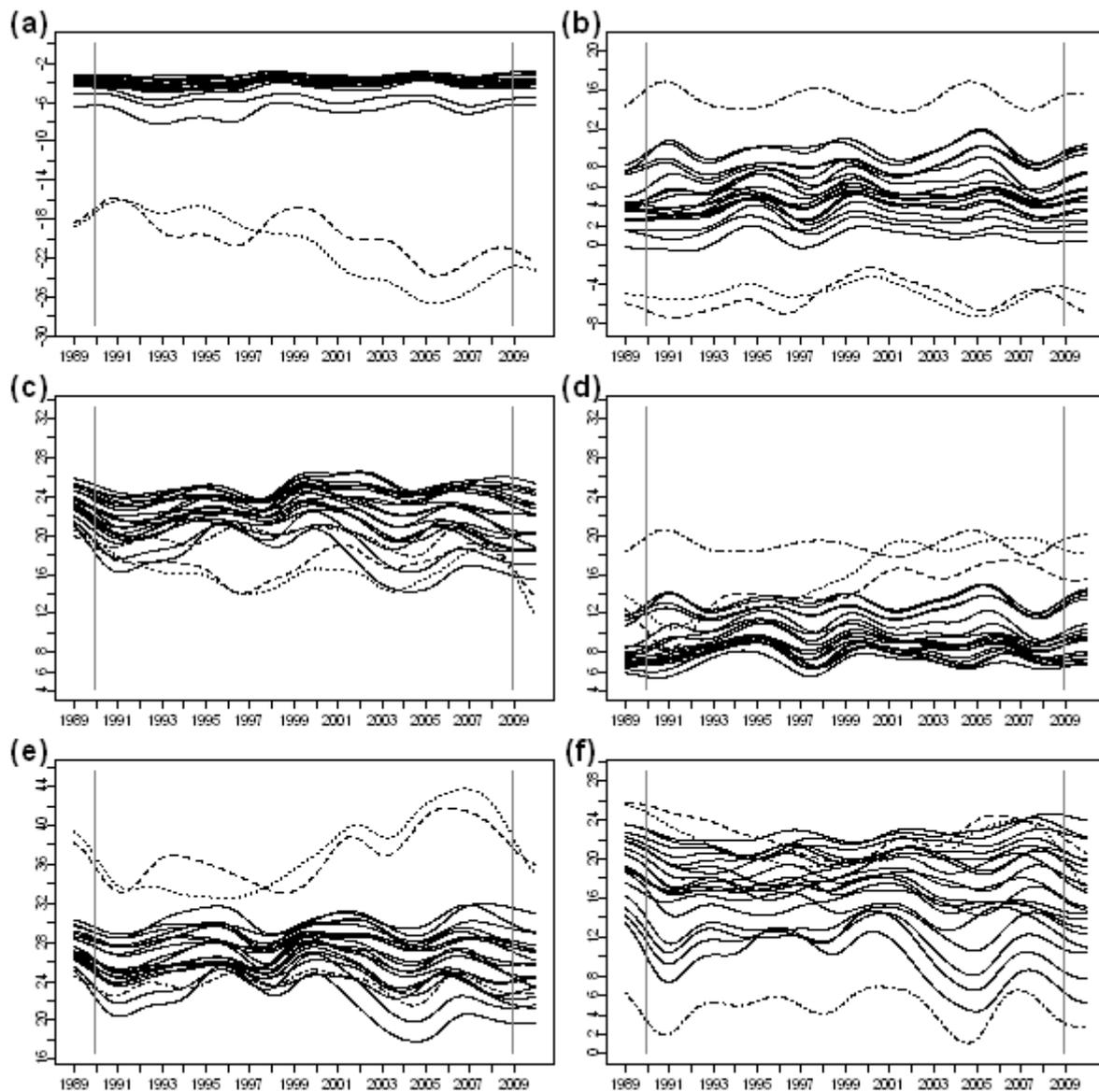
SUPPLEMENTARY FIGURE 4: Wavelet coherence (left panels) and phase difference for the annual periodicity (right panel) for log-transformed meningitis incidence compared to DUST (a), DUST_C (b), Wd (c), RH (d), TEMP (e) and Wf (f), for the district of Magaria. The x-axis gives time (in years). On the left panels, the y-axis represent the periodicity (in years), the cupola delimits the cone of influence and colours codes for increasing values of wavelet coefficients, from dark blue to red. The black curves delimit statistically significant areas at a 5% level. On the right panels, the full and dotted lines represent the phase for the first (meningitis) and second (dust/climate) variable respectively, and the thick dashed line gives the phase difference (in radian).



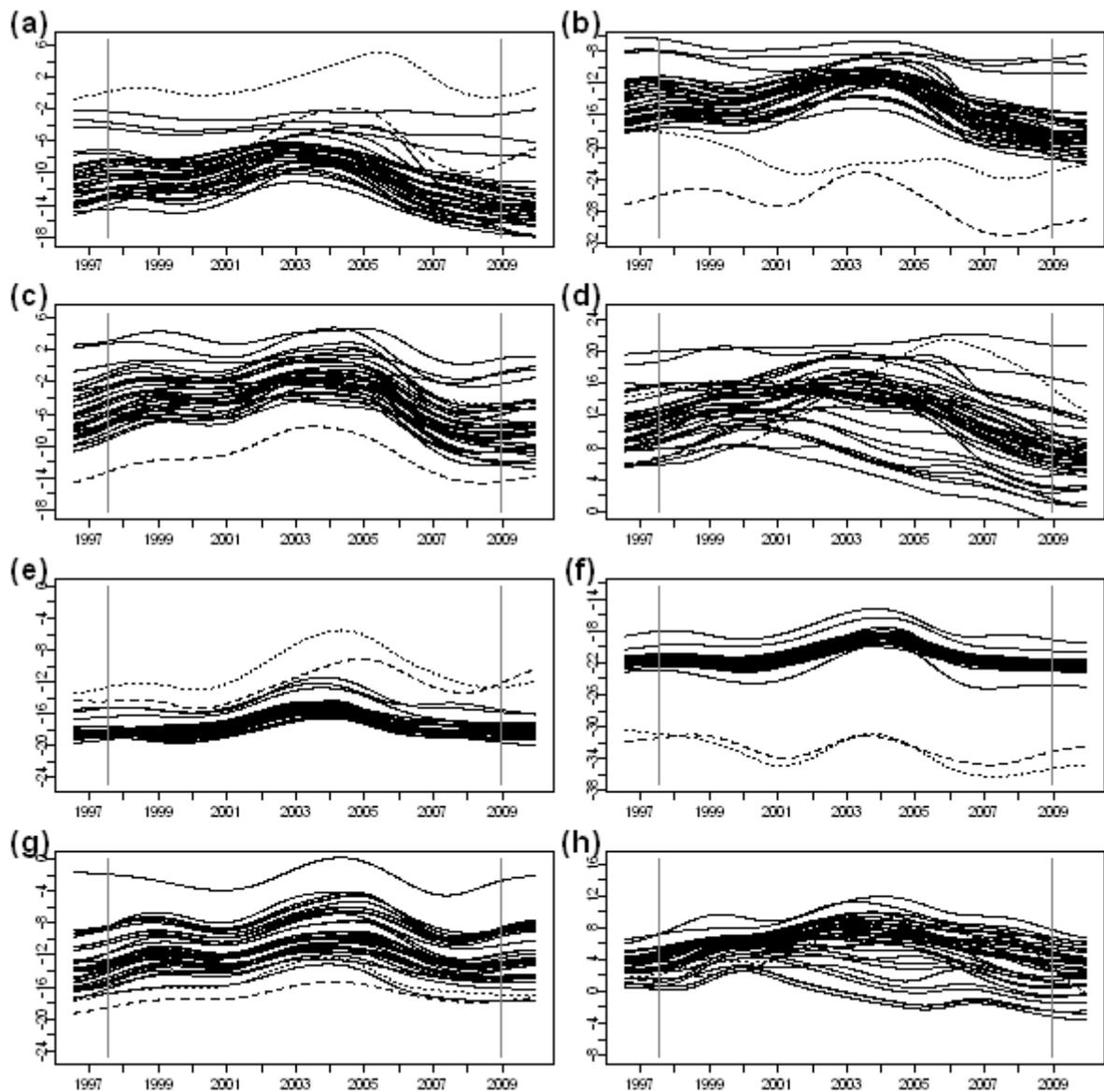
SUPPLEMENTARY FIGURE 5: Log-transformed time-series of meningitis cases over the period 1986 to 2007 for low density districts (1=Arlit, 2=Bilma, 3=Diffa, 4=Maine-Soroa, and 5=N'Guigmi) (A); mean annual incidence rates in cases/100 000 population computed over the period 1986 to 2007 (B) and district-level population density in 2007 in inhabitants/km² (C).



SUPPLEMENTARY FIGURE 6: Annual curve of averaged value over all Niger's pixel and by calendar week, for DUST and DUST_C (top graph), RH and TEMP (middle graph) and Wd and Wf (bottom graph).



SUPPLEMENTARY FIGURE 7: District-level curves of phase difference for the annual periodicity as a function of time (1989-2007) for Wd compared to RH(a), to TEMP (b), to Wf (c), RH compared to TEMP (d), to Wf (e) and TEMP related to Wf (f). The y axis gives the phase difference in weeks. Same scales are used for all graphs. Grey vertical lines mark the boundaries of the cone of influence. The dashed line depicts Aguié, the dotted line Bilma and the long-dash line Gaya.



SUPPLEMENTARY FIGURE 8: District-level curves of phase difference for the annual periodicity as a function of time (1989-2007) for DUST compared to Wd (a), RH (b), TEMP (c), Wd (d); and DUST_C compared to Wd (e), RH (f), TEMP (g) and Wf (h). The y axis gives the phase difference in weeks. Same scales are used for all graphs. Grey vertical lines mark the boundaries of the cone of influence. The dashed line depicts Aguié and the dotted line Bilma.

Bibliographie

- D. O. Adefolalu. On Bioclimatological Aspects of Harmattan Dust Haze in Nigeria. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology, Series B*, 33(4) :387–404, 1984.
- L. Agier, H. Broutin, E. Bertherat, M. H. Djingarey, C. Lingani, W. Perea, et S. Hugonnet. Timely detection of bacterial meningitis epidemics at district level : a study in three countries of the African Meningitis Belt. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 107(1) :30–36, 2013a.
- L. Agier, A. Deroubaix, N. Martiny, P. Yaka, A. Djibo, et H. Broutin. Seasonality of meningitis in Africa and climate forcing : aerosols stand out. *Journal of the Royal Society, Interface*, 10(79) : 20120814, Feb. 2013b. ISSN 1742-5662. doi : 10.1098/rsif.2012.0814. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23221989>.
- S. Alfaro. *Simulation expérimentale et modélisation de la production d'aérosol minéral par érosion éolienne*. PhD thesis, Thèse de doctorat de l'université Paris 12, 1997.
- J.-M. Alonso et M.-K. Taha. Viroses respiratoires et surinfections bactériennes invasives. *Archives de Pédiatrie*, 10(11) :1013–1015, Nov. 2003. ISSN 0929693X. doi : 10.1016/j.arcped.2003.09.004. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.arcped.2003.09.004>.
- S. Altizer, A. Dobson, P. Hosseini, P. Hudson, M. Pascual, et P. Rohani. Seasonality and the dynamics of infectious diseases. *Ecology Letters*, 9(4) :467–84, Apr. 2006. ISSN 1461-0248. doi : 10.1111/j.1461-0248.2005.00879.x. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16623732>.
- R. A. Bagnold. The nature of saltation and of "bed-load" transport in water. *Royal Society of London Proceedings Series A*, 332 :473–504, 1973. doi : 10.1098/rspa.1973.0038.
- D. Balk, T. Pullum, A. Storeygard, F. Greenwell, et M. Neuman. A spatial analysis of childhood mortality in West Africa. *Population, Space and Place*, 10(3) :175–216, May 2004. ISSN 1544-8444. doi : 10.1002/psp.328. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/psp.328>.
- J. Banks, H. Brindley, C. Flamant, M. Garay, N. Hsu, O. Kalashnikova, L. Klüser, et A. Sayer. Inter-comparison of satellite dust retrieval products over the west African Sahara during the Fennec campaign in June 2011. *Remote Sensing of Environment*, 136(June 2011) :99–116, Sept. 2013. ISSN 00344257. doi : 10.1016/j.rse.2013.05.003. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425713001478>.
- L. Bengtsson, M. Kanamitsu, P. Kallberg, et S. Uppala. FGGE 4-dimensional data assimilation at ECMWF. *Bull. Amer. Meteor. Soc*, 63 :29–43, 1982. URL <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:FGGE+4-dimensional+data+assimilation+at+ECMWF.#0http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:FGGE+4-dimensional+data+assimilation+at+ECMWF#0>.

- P. Berrisford, D. Dee, K. Fielding, M. Fuentes, P. Kållberg, S. Kobayashi, et S. Uppala. The ERA-Interim Archive. *ERA report series*, pages 1–16, 2009. URL <http://centaur.reading.ac.uk/1997/>.
- J. P. Besancenot, M. Boko, et P. C. Oke. Weather conditions and cerebrospinal meningitis in Benin (Gulf of Guinea, West Africa). *European Journal of Epidemiology*, 13(7) :807–15, Oct. 1997. ISSN 0393-2990. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9384271>.
- F. Beucher. *Météorologie Tropicale : des alizés au cyclone*. Météo-France, 2010.
- N. Bharti, H. Broutin, R. F. Grais, M. J. Ferrari, A. Djibo, a. J. Tatem, et B. T. Grenfell. Spatial dynamics of meningococcal meningitis in Niger : observed patterns in comparison with measles. *Epidemiology and Infection*, 140(8) :1356–65, Aug. 2012. ISSN 1469-4409. doi : 10.1017/S0950268811002032. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22009033>.
- I. S. Blakebrough, B. M. Greenwood, H. C. Whittle, A. K. Bradley, et H. M. Gilles. The Epidemiology of Infections Due to *Neisseria meningitidis* and *Neisseria lactamica* in a Northern Nigerian Community. *Journal of Infectious Diseases*, 146(5) :626–637, Nov. 1982. doi : 10.1093/infdis/146.5.626. URL <http://jid.oxfordjournals.org/content/146/5/626.abstract>.
- P. Boisier, P. Nicolas, S. Djibo, M.-K. Taha, I. Jeanne, H. B. Maïnassara, B. Tenebray, K. K. Kairo, D. Giorgini, et S. Chanteau. Meningococcal meningitis : unprecedented incidence of serogroup X-related cases in 2006 in Niger. *Clinical infectious diseases : an official publication of the Infectious Diseases Society of America*, 44(5) :657–63, Mar. 2007. ISSN 1537-6591. doi : 10.1086/511646. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17278055>.
- D. Bou Karam, C. Flamant, P. Tulet, J.-P. Chaboureau, A. Dabas, et M. C. Todd. Estimate of Sahelian dust emissions in the intertropical discontinuity region of the West African Monsoon. *Journal of Geophysical Research*, 114 :D13106, July 2009. ISSN 0148-0227. doi : 10.1029/2008JD011444. URL <http://www.agu.org/pubs/crossref/2009/2008JD011444.shtml>.
- M. F. Boyd. *Malariology : A comprehensive survey of all aspects of this group of diseases from a global standpoint*. Vol. 2., volume 2. Saunders, Philadelphia, 1949.
- H. Broutin, S. Philippon, G. C. de Magny, M. F. Courel, B. Sultan, et J. F. Guegan. Comparative study of meningitis dynamics across nine African countries : a global perspective. *International Journal of Health Geographics*, 6 :8, 2007. doi : 2910.1186/1476-072x-6-29. URL <GotoISI>://WOS:000258208600001.
- G. Campagne, A. Schuchat, S. Djibo, A. Ousseini, L. Cisse, et J. P. Chippaux. Epidemiology of bacterial meningitis in Niamey, Niger, 1981-96, 1999.
- E. Carboni, G. E. Thomas, A. M. Sayer, R. Siddans, C. A. Poulsen, R. G. Grainger, C. Ahn, D. Antoine, S. Bevan, R. Braak, H. Brindley, S. DeSouza-Machado, J. L. Deuze, D. Diner, F. Ducos, W. Grey, C. Hsu, O. V. Kalashnikova, R. Kahn, P. R. J. North, C. Salustro, A. Smith, D. Tanre, O. Torres, et B. Veihelmann. Intercomparison of desert dust optical depth from satellite measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, 5(8) :1973–2002, 2012. URL <http://www.atmos-meas-tech.net/5/1973/2012/http://www.atmos-meas-tech.net/5/1973/2012/amt-5-1973-2012.pdf>.
- O. Cavalieri, F. Cairo, F. Fierli, G. Di Donfrancesco, M. Snels, M. Viterbini, F. Cardillo, B. Chatenet, P. Formenti, B. Marticorena, et J. L. Rajot. Variability of aerosol vertical distribution in the Sahel. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(24) :12005–12023, 2010. doi : 10.5194/acp-10-12005-2010. URL <GotoISI>://WOS:000285581000002.

- A. J. Chalmers et W. R. O'Farrell. Preliminary remarks upon epidemic cerebrospinal meningitis as seen in the Anglo- Egyptian Sudan. *Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 29(101-116) : 117–129, 1916.
- J. S. Cheesbrough, a. P. Morse, et S. D. Green. Meningococcal meningitis and carriage in western Zaire : a hypoendemic zone related to climate ? *Epidemiology and Infection*, 114(1) :75–92, Feb. 1995. ISSN 0950-2688. URL <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2271347&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.
- W. S. Chepil. Properties of soil which influence wind erosion : IV. State or dry aggregate structure. *Soil Sci.*, 72 :387–401, 1951.
- I. Chiapello et C. Moulin. TOMS and METEOSAT satellite records of the variability of Saharan dust transport over the Atlantic during the last two decades (1979 à 1997). *Geophysical Research Letters*, 29(8) :14–17, 2002. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2001GL013767>.
- I. Chiapello, J. M. Prospero, J. R. Herman, et N. C. Hsu. Detection of mineral dust over the North Atlantic Ocean and Africa with the Nimbus 7 TOMS. *J. Geophys. Res.*, 104(D8) :9277–9291, 1999. ISSN 0148-0227. doi : 10.1029/1998JD200083. URL <http://dx.doi.org/10.1029/1998JD200083>.
- I. Chiapello, C. Moulin, et J. M. Prospero. Understanding the long-term variability of African dust transport across the Atlantic as recorded in both Barbados surface concentrations and large-scale Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) optical thickness. *J. Geophys. Res.*, 110(D18) : D18S10, 2005. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2004JD005132>.
- R. Clavaud, P. Geslin, et B. Gicquel. *Méningites bactériennes : stratégies de traitement et de prévention*. INSERM, Paris, 1996. URL <http://lara.inist.fr/handle/2332/1376>.
- A. Colombini, F. Bationo, S. Zongo, F. Ouattara, O. Badolo, P. Jaillard, E. Seini, B. D. Gessner, et A. Da Silva. Costs for households and community perception of meningitis epidemics in burkina faso. *Clinical infectious diseases : an official publication of the Infectious Diseases Society of America*, 49(10) :1520–5, Nov. 2009. ISSN 1537-6591. doi : 10.1086/644623. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19842972>.
- S. Corti, F. Molteni, et T. N. Palmer. Signature of recent climate change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes. *Nature*, 398(6730) :799–802, Apr. 1999. ISSN 0028-0836. doi : 10.1038/19745. URL <http://dx.doi.org/10.1038/19745>.
- G. Coudé-Gaussen, P. Rognon, G. Bergametti, L. Gomes, B. Strauss, J. Gros, et M. Le Coustumer. Saharan dust on Fuerteventura Island (Canaries) : chemical and mineralogical characteristics, air mass trajectories, and probable source. *Journal of Geophysical Research*, 92(D8) :9753–9771, 1987.
- S. Cowie. A Climatology of Dust-Emission Events over North Africa Based on 27 Years of Surface Observations. *Geophysical Research Abstracts*, 14 :9676, 2012. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2012EGUGA..14.9676C>.
- M. H. Craig, R. W. Snow, et D. le Sueur. A climate-based distribution model of malaria transmission in sub-Saharan Africa. *Parasitology today*, 15(3) :105–11, Mar. 1999. ISSN 0169-4758. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10322323>.

- L. E. Cuevas, I. Jeanne, A. Molesworth, M. Bell, E. C. Savory, S. J. Connor, et M. C. Thomson. Risk mapping and early warning systems for the control of meningitis in Africa. *Vaccine*, 25 Suppl 1 :A12–7, Sept. 2007. ISSN 0264-410X. doi : 10.1016/j.vaccine.2007.04.034. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17517453>.
- G. A. D’Almeida. A Model for Saharan Dust Transport. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25(7) :903–916, July 1986. ISSN 0733-3021. doi : 10.1175/1520-0450(1986)025<0903:AMFSDT>2.0.CO;2. URL [http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0450\(1986\)025<0903:AMFSDT>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0450(1986)025<0903:AMFSDT>2.0.CO;2).
- C. Darwin. *The voyage of the Beagle*. 1839.
- F. De Longueville, S. Henry, et P. Ozer. Saharan dust pollution : Implications for the Sahel? *Epidemiology*, 20(5) :808–809, 2009. doi : 10.1186/1476-069X-7-39.6. URL <http://hdl.handle.net/2268/21094>http://journals.lww.com/epidem/Abstract/2009/09000/Saharan_Dust_Pollution__Implications_for_the.28.aspx.
- F. De Longueville, Y.-C. Hountondji, S. Henry, et P. Ozer. What do we know about effects of desert dust on air quality and human health in West Africa compared to other regions? *Science of The Total Environment*, 409(1) :1–8, Dec. 2010. ISSN 1879-1026. doi : 10.1016/j.scitotenv.2010.09.025. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20934742><http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969710009861>.
- D. P. Dee, S. M. Uppala, a. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. a. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, a. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, a. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Hólm, L. Isaksen, P. Kå llberg, M. Köhler, M. Matricardi, a. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J.-N. Thépaut, et F. Vitart. The ERA-Interim reanalysis : configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656) :553–597, Apr. 2011. ISSN 00359009. doi : 10.1002/qj.828. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/qj.828>.
- J. Delehanty. *The northward expansion of the farming frontier in the 20th century central Niger*. PhD thesis, University of Michigan, 1990.
- I. Delrieu, S. Yaro, T. a. S. Tamekloé, B.-M. Njanpop-Lafourcade, H. Tall, P. Jaillard, M. S. Ouedraogo, K. Badziklou, O. Sanou, A. Drabo, B. D. Gessner, J. L. Kambou, et J. E. Mueller. Emergence of epidemic Neisseria meningitidis serogroup X meningitis in Togo and Burkina Faso. *PloS one*, 6(5) :e19513, Jan. 2011. ISSN 1932-6203. doi : 10.1371/journal.pone.0019513. URL <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3098835&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.
- A. Deroubaix, N. Martiny, I. Chiapello, et B. Marticorena. Remote sensing of desert dust aerosols over the Sahel : potential use for health impact studies. *EGU General Assembly 2012*, 2012. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2012EGUGA..1410479D>.
- A. Deroubaix, N. Martiny, I. Chiapello, et B. Marticorena. Suitability of OMI aerosol index to reflect mineral dust surface conditions : Preliminary application for studying the link with meningitis epidemics in the Sahel. *Remote Sensing of Environment*, 133 :116–127, June 2013. ISSN 00344257. doi : 10.1016/j.rse.2013.02.009. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425713000497>.
- G. Dhonneur. *Traité de météorologie tropicale. Application au cas particulier de l’Afrique occidentale et centrale*. Météo-France, Paris, 1985.

- J. P. Digoutte et C. J. Peters. General aspects of the 1987 Rift Valley fever epidemic in Mauritania. *Research in Virology*, 140(1) :27–30, 1987. ISSN 0923-2516. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2711042>.
- S. Djibo, P. Nicolas, J.-M. Alonso, A. Djibo, D. Couret, J.-Y. Riou, et J.-P. Chippaux. Outbreaks of serogroup X meningococcal meningitis in Niger 1995-2000. *Tropical Medicine & International Health*, 8(12) :1118–1123, Dec. 2003. ISSN 1360-2276. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14641847>.
- J. M. Drake. Limits to forecasting precision for outbreaks of directly transmitted diseases. *PLoS Medicine*, 3(1) :e3, Jan. 2006. ISSN 1549-1676. doi : 10.1371/journal.pmed.0030003. URL <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1288026&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.
- J. Dubief. Review of the North African climate with particular emphasis on the production of eolian dust in the Sahel zone and in the Sahara, 1979. URL <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Review+of+the+North+African+Climate+with+Particular+Emphasis+on+the+Production+of+Eolian+Dust+in+the+Sahel+Zone+and+in+the+Sahara#0>.
- V. Dukic, M. Hayden, et A. Forgor. The Role of Weather in Meningitis Outbreaks in Navrongo, Ghana : A Generalized Additive Modeling Approach. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 17 :442–460, 2012. URL <http://www.springerlink.com/index/MN2021781U787822.pdf>.
- A. Durand et J. Lang. Breaks in the continental environmental equilibrium and intensity changes in aridity over the past 20 000 years in the Central Sahel. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 12(1-2) :199–208, Jan. 1991. ISSN 08995362. doi : 10.1016/0899-5362(91)90069-B. URL [http://dx.doi.org/10.1016/0899-5362\(91\)90069-B](http://dx.doi.org/10.1016/0899-5362(91)90069-B).
- D. J. Earn, P. Rohani, B. M. Bolker, et B. T. Grenfell. A simple model for complex dynamical transitions in epidemics. *Science*, 287(5453) :667–670, Jan. 2000. ISSN 0036-8075. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10650003>.
- S. Engelstaedter et R. Washington. Atmospheric controls on the annual cycle of North African dust. *J. Geophys. Res.*, 112(D3) :D03103, 2007a. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2006JD007195>.
- S. Engelstaedter et R. Washington. Temporal controls on global dust emissions : The role of surface gustiness. *Geophys. Res. Lett.*, 34(15) :L15805, 2007b. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL029971>.
- P. M. Fayers et D. J. Hand. Causal variables, indicator variables and measurement scales : an example from quality of life. *Journal of the Royal Statistical Society : Series A (Statistics in Society)*, 165 (2) :233–253, 2002. URL <http://dx.doi.org/10.1111/1467-985X.02020>.
- F. Fécan, B. Marticorena, et G. Bergametti. Parametrization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas. *Annales Geophysicae*, 157 :149–157, 1998. URL <http://link.springer.com/article/10.1007/s00585-999-0149-7>.
- A. H. Fink, M. Christoph, V. Ermert, A. Kuhn, T. Heckelei, et B. Diekkrüger. Impact of global change south of the Sahara. In *Impacts of Global Change on the Hydrological Cycle in West and Northwest Africa - Nature*, volume 9, chapter Impact of, pages 16–23. 2005.

- F. Gasse. Diatom-inferred salinity and carbonate oxygen isotopes in Holocene waterbodies of the western Sahara and Sahel (Africa). *Quaternary Science Reviews*, 21(7) :737–767, Mar. 2002. ISSN 02773791. doi : 10.1016/S0277-3791(01)00125-1. URL [http://dx.doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00125-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00125-1).
- J. K. Gibson. ECMWF re-analysis project report series : ERA description. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, 1, 1997.
- D. A. Gillette et P. A. Goodwin. Microscale transport of sand-sized soil aggregates eroded by wind. *J. Geophys. Res.*, 79(27) :4080–4084, 1974.
- D. A. Gillette et T. R. Walker. Characteristics of airborne particles produced by wind erosion of sandy soil, high plains of West Texas. *Soil Sci.*, 123 :97–110, 1977.
- P. Ginoux et O. Torres. Empirical TOMS index for dust aerosol : Applications to model validation and source characterization. *J. Geophys. Res.*, 108(D17) :4534, 2003. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2003JD003470>.
- F. D. Giuseppe et A. Tompkins. The skill of ECMWF long range Forecasting System to drive impact models for health and hydrology in Africa. *Geophysical Research Abstracts*, 14 :5140, 2012. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2012EGUGA...14.5140D>.
- L. Gomes, G. Bergametti, G. Coudé-Gaussen, et P. Rognon. Submicron desert dusts : a Sandblasting process. *Journal of Geophysical Research Letters.*, 95 :13927–13935, 1990.
- A. S. Goudie et N. Middleton. *Desert Dust in the Global System*. Springer, Heidelberg, 2006. ISBN 3540323554. URL <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=4m6xempfY1gC&pgis=1>.
- A. S. Goudie et N. J. Middleton. Saharan dust storms : nature and consequences. *Earth-Science Reviews*, 56(1-4) :179–204, 2001. doi : 10.1016/s0012-8252(01)00067-8. URL <GotoISI>://WOS:000172668100003.
- N. C. Grassly et C. Fraser. Seasonal infectious disease epidemiology. *Proceedings of the Royal Society B*, 273(1600) :2541–2550, Oct. 2006. ISSN 0962-8452. doi : 10.1098/rspb.2006.3604. URL <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1634916&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.
- R. Greeley et J. D. Iversen. *Wind as a geological process*, Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- B. M. Greenwood. Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene Meeting at Manson House , London , Manson Lecture Meningococcal 10 December 1998. 44 :341–353, 1999.
- B. M. Greenwood, a. K. Bradley, P. G. Cleland, M. H. Haggie, M. Hassan-King, L. S. Lewis, J. T. Macfarlane, a. Taqi, H. C. Whittle, a. M. Bradley-Moore, et Q. Ansari. An epidemic of meningococcal infection at Zaria, Northern Nigeria. 1. General epidemiological features. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 73(5) :557–62, Jan. 1979. ISSN 0035-9203. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/531909>.
- B. M. Greenwood, A. K. Bradley, I. S. Blakebrough, S. Wali, et H. C. Whittle. Meningococcal disease and season in sub-Saharan Africa. *The Lancet*, 323(8390) :1339–1342, 1984. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140673684918300>.

- J. M. Griffiss. Epidemic Meningococcal Disease : Synthesis of a Hypothetical Immunoepidemiologic Model. *Review of Infectious Diseases*, 4(1) :159–172, Jan. 1982. doi : 10.1093/clinids/4.1.159. URL <http://cid.oxfordjournals.org/content/4/1/159.abstract>.
- J. Guégan, S. Morand, et R. Poulin. Are there general laws in parasite community ecology ? The emergence of spatial parasitology and epidemiology. pages 22–42. 2005.
- K. Gyan, W. Henry, S. Lacaille, A. Laloo, C. Lamsee-Ebanks, S. McKay, R. M. Antoine, et M. A. Monteil. African dust clouds are associated with increased paediatric asthma accident and emergency admissions on the Caribbean island of Trinidad. *International Journal of Biometeorology*, 49(6) :371–376, 2005. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00484-005-0257-3>.
- N. Hall et P. Peyrillé. Dynamics of the West African monsoon. *Journal de Physique IV*, 139 :81–99, 2006. doi : 10.1051/jp4. URL <http://jp4.journaldephysique.org/articles/jp4/abs/2006/08/jp4139007/jp4139007.html>.
- D. Hayward et J. Oguntoyinbo. *The climatology of West Africa*. Hutchinson, London, 1987. URL <http://www.getcited.org/pub/102604768>.
- J. M. Haywood, J. Pelon, P. Formenti, N. Bharmal, M. Brooks, G. Capes, P. Chazette, C. Chou, S. Christopher, H. Coe, J. Cuesta, Y. Derimian, K. Desboeufs, G. Greed, M. Harrison, B. Heese, E. J. Highwood, B. Johnson, M. Mallet, B. Marticorena, J. Marsham, S. Milton, G. Myhre, S. R. Osborne, D. J. Parker, J. L. Rajot, M. Schulz, A. Slingo, D. Tanre, et P. Tulet. Overview of the Dust and Biomass-burning Experiment and African Monsoon Multidisciplinary Analysis Special Observing Period-0. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 113 :20, 2008. doi : D00c1710.1029/2008jd010077. URL <GotoISI>://WOS:000261669700001.
- B. Heinold, I. Tegen, K. Schepanski, et O. Hellmuth. Dust radiative feedback on Saharan boundary layer dynamics and dust mobilization. *Geophysical Research Letters*, 35(20) :L20817, Oct. 2008. ISSN 0094-8276. doi : 10.1029/2008GL035319. URL <http://www.agu.org/pubs/crossref/2008/2008GL035319.shtml>.
- J. R. Herman et E. A. Celarier. Earth surface reflectivity climatology at 340-380 nm from TOMS data. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 102(D23) :28003–28011, 1997. ISSN 0148-0227. doi : 10.1029/97jd02074. URL <GotoISI>://WOS:000071162700002<http://dx.doi.org/10.1029/97JD02074>.
- S. M. Herrmann, A. Anyamba, et C. J. Tucker. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change*, 15(4) :394–404, Dec. 2005. ISSN 09593780. doi : 10.1016/j.gloenvcha.2005.08.004. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.08.004>.
- T. Hickler, L. Eklundh, J. W. Seaquist, B. Smith, J. Ardö, L. Olsson, M. T. Sykes, et M. Sjöström. Precipitation controls Sahel greening trend. *Geophysical Research Letters*, 32(21) :L21415, 2005. ISSN 0094-8276. doi : 10.1029/2005GL024370. URL <http://doi.wiley.com/10.1029/2005GL024370>.
- a. Hodgson, T. Smith, S. Gagneux, M. Adjuik, G. Pluschke, N. K. Mensah, F. Binka, et B. Genton. Risk factors for meningococcal meningitis in northern Ghana. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 95(5) :477–80, 2001. ISSN 0035-9203. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11706652>.

- M. P. Hoerling, J. W. Hurrell, et T. Xu. Tropical origins for recent North Atlantic climate change. *Science*, 292(5514) :90–2, Apr. 2001. ISSN 0036-8075. doi : 10.1126/science.1058582. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11292869><http://www.sciencemag.org/content/292/5514/90.abstract>.
- B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J. P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. A. Reagan, Y. J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak, et A. Smirnov. AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66(1) : 1–16, 1998. doi : 10.1016/s0034-4257(98)00031-5. URL <GotoISI>://WOS:000076092900001.
- B. N. Holben, D. Tanre, A. Smirnov, T. F. Eck, I. Slutsker, N. Abuhassan, W. W. Newcomb, J. S. Schafer, B. Chatenet, F. Lavenu, Y. J. Kaufman, J. V. Castle, A. Setzer, B. Markham, D. Clark, R. Frouin, R. Halthore, A. Karneli, N. T. O’Neill, C. Pietras, R. T. Pinker, K. Voss, et G. Zibordi. An emerging ground-based aerosol climatology : Aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 106(D11) :12067–12097, 2001. doi : 10.1029/2001jd900014. URL <GotoISI>://WOS:000169300200027.
- H. Hotelling. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *The Journal of Educational Psychology*, 24 :417–441, 1933.
- N. C. Hsu, J. R. Herman, O. Torres, B. N. Holben, D. Tanre, T. F. Eck, A. Smirnov, B. Chatenet, et F. Lavenu. Comparisons of the TOMS aerosol index with Sun-photometer aerosol optical thickness : Results and applications. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 104(D6) :6269–6279, 1999. doi : 10.1029/1998jd200086. URL <GotoISI>://WOS:000079363700021.
- N. C. Hsu, S. C. Tsay, M. D. King, et J. R. Herman. Aerosol properties over bright-reflecting source regions. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(3) :557–569, 2004. doi : 10.1109/tgrs.2004.824067. URL <GotoISI>://WOS:000220906000008.
- T. J. Irving, K. B. Blyuss, C. Colijn, et C. L. Trotter. Modelling meningococcal meningitis in the African meningitis belt. *Epidemiology and Infection*, 140(5) :897–905, May 2012. ISSN 1469-4409. doi : 10.1017/S0950268811001385. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21781369>.
- S. Janicot et B. Fontaine. L’évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l’Ouest. *La Météorologie*, 8 :28–53, 1993.
- S. Janicot, S. Trzaska, et I. Pocard. Summer Sahel-ENSO teleconnection and decadal time scale SST variations. *Climate Dynamics*, pages 303–320, 2001. URL <http://www.springerlink.com/index/D3A95A1W9XENCH38.pdf>.
- I. Jankowiak et D. Tanré. Satellite Climatology of Saharan Dust Outbreaks : Method and Preliminary Results. *Journal of Climate*, 5(6) :646–656, 1992. doi : 10.1175/1520-0442(1992)005. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1992JCl...5...646J>.
- P. W. Jordan et N. J. Saunders. Host Iron Binding Proteins Acting as Niche Indicators for *Neisseria meningitidis*. *Plos One*, 4(4) :13, 2009. doi : e519810.1371/journal.pone.0005198. URL <GotoISI>://WOS:000265505700026.
- C. Junge. The importance of mineral dust as an atmospheric constituent, in Saharan Dust. chapter 2, pages 49–60. John. Wiley & Sons, New York, morales c edition, 1979.
- L. M. Kinlin, C. V. Spain, V. Ng, C. C. Johnson, A. N. J. White, et D. N. Fisman. Environmental exposures and invasive meningococcal disease : an evaluation of effects on varying time scales. *American Journal of Epidemiology*, 169(5) :588–95, Mar. 2009. ISSN 1476-6256.

- doi : 10.1093/aje/kwn383. URL <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2640162&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.
- P. Knippertz et A. H. Fink. Synoptic and dynamic aspects of an extreme springtime Saharan dust outbreak. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(617) :1153–1177, Apr. 2006. ISSN 00359009. doi : 10.1256/qj.05.109. URL <http://doi.wiley.com/10.1256/qj.05.109>.
- I. Koren et Y. J. Kaufman. Direct wind measurements of Saharan dust events from Terra and Aqua satellites. *Geophysical Research Letters*, 31(6) :L06122, 2004. ISSN 0094-8276. doi : 10.1029/2003GL019338. URL <http://doi.wiley.com/10.1029/2003GL019338>.
- M. Kotecka. *Study of potential on meningitis in Niger and influence of dust aerosol*. PhD thesis, Stage de fin d'étude de Master-1 SIG (Roumanie), 2005.
- K. Kuhn, D. Campbell-Lendrum, A. Haines, J. Cox, C. Corvalán, M. Anker, et R. B. Malaria. Using climate to predict infectious disease epidemics. Technical report, WHO, Geneva, 2005.
- F. M. La Force, K. Konde, S. Viviani, et M.-P. Préziosi. The Meningitis Vaccine Project. *Vaccine*, 25 Suppl 1 :A97–100, Sept. 2007. ISSN 0264-410X. doi : 10.1016/j.vaccine.2007.04.049. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17521780>.
- J.-P. Lafore, C. Flamant, F. Guichard, D. J. Parker, D. Bouniol, a. H. Fink, V. Giraud, M. Gosset, N. Hall, H. Höller, S. C. Jones, a. Protat, R. Roca, F. Roux, F. Saïd, et C. Thorncroft. Progress in understanding of weather systems in West Africa. *Atmospheric Science Letters*, 12(1) :7–12, Jan. 2011. ISSN 1530261X. doi : 10.1002/asl.335. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/asl.335>.
- Lam et Ayers. Climate Change and Lung Disease, With Special Focus on Developing Countries. In P. Shankar, S. Raoof, et D. Gupta, editors, *Textbook of Pulmonary and Critical Care Medicine Vols 1 and 2*, volume 6, page 2248. JP Medical Ltd, New Delhi, 2011. ISBN 935025073X. URL <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=FbdBUHKv86MC&pgis=1>.
- L. Lapeyssonnie. Cerebrospinal meningitis in Africa. *Bulletin of the World Health Organization*, 28 : 1–114, 1963. URL <http://ukpmc.ac.uk/abstract/MED/14259333>.
- B. Laurent, B. Marticorena, G. Bergametti, J. F. Léon, et N. M. Mahowald. Modeling mineral dust emissions from the Sahara desert using new surface properties and soil database. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 113 :D14218, 2008. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2007JD009484>.
- C. Lavaysse, C. Flamant, S. Janicot, D. Parker, J. P. Lafore, B. Sultan, et J. Pelon. Seasonal evolution of the West African heat low : a climatological perspective. *Climate Dynamics*, 33(2) :313–330, 2009. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-009-0553-4>.
- C. Lavaysse, J.-P. Chaboureaud, et C. Flamant. Dust impact on the West African heat low in summer-time. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(658) :1227–1240, July 2011. ISSN 00359009. doi : 10.1002/qj.844. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/qj.844>.
- L. Lebart, A. Morineau, et M. Piro. *Statistiques exploratoires multidimensionnelles : L'Analyse en Composantes Principales*. Dunod, Paris, dunod edition, 1997.
- T. Lebel et A. Ali. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990 à 2007). *Journal of Hydrology*, 375(1-2) :52–64, Aug. 2009. ISSN 00221694. doi : 10.1016/j.jhydrol.2008.11.030. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169408005738>.

- M. Legrand, J. J. Bertrand, M. Desbois, L. Menenger, et Y. Fouquart. The Potential of Infrared Satellite Data for the Retrieval of Saharan-Dust Optical Depth over Africa. *Journal of Applied Meteorology*, 28(4) :309–319, 1989. doi : 10.1175/1520-0450(1989)028<0309:tpoisd>2.0.co;2. URL <GotoISI>://WOS:A1989U541200007.
- M. Leroux. *The Meteorology and Climate of Tropical Africa*, volume 2. Springer, Heidelberg, 1983. ISBN 3540426361. URL <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=v32qnYWh5gQC&pgis=1>.
- P. F. Levelt, G. H. J. Van den Oord, et M. R. Dobber. The ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5) :1093–1101, 2006. ISSN 01962892. doi : Urn:nbn:nl:ui:25-648485. URL <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=17743762http://repository.tue.nl/648485http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1624601>.
- J. F. Léon, Y. Derimian, I. Chiapello, D. Tanré, T. Podvin, B. Chatenet, A. Diallo, et C. Deroo. Aerosol vertical distribution and optical properties over M’Bour (16.96 deg W; 14.39 deg N), Senegal from 2006 to 2008. *Atmos. Chem. Phys.*, 9(23) : 9249–9261, 2009. URL <http://www.atmos-chem-phys.net/9/9249/2009/http://www.atmos-chem-phys.net/9/9249/2009/acp-9-9249-2009.pdf>.
- E. Lorenz. Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction. *Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Meteorology*, 1956. URL <http://www.o3d.org/abracco/Atlantic/Lorenz1956.pdf>.
- N. M. Mahowald et J.-L. Dufresne. Sensitivity of TOMS aerosol index to boundary layer height : Implications for detection of mineral aerosol sources. *Geophys. Res. Lett.*, 31(3) :L03103, 2004. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2003GL018865>.
- L. Manga, M. Bagayoko, T. Meredith, et M. Neira. Overview of health considerations within National Adaptation Programmes of Action for climate change in least developed countries and small island states. Technical report, 2010. URL http://www.who.int/entity/phe/Health_in_NAPAs_final.pdf.
- B. Marticorena, B. Chatenet, J. L. Rajot, S. Traore, M. Coulibaly, A. Diallo, I. Kone, A. Maman, T. N. Diaye, et A. Zakou. Temporal variability of mineral dust concentrations over West Africa : analyses of a pluriannual monitoring from the AMMA Sahelian Dust Transect. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(18) :8899–8915, 2010. doi : 10.5194/acp-10-8899-2010. URL <GotoISI>://WOS:000282429000014.
- N. Martiny et I. Chiapello. Assessments for the impact of mineral dust on the meningitis incidence in West Africa. *Atmospheric Environment*, 70 :245–253, May 2013. ISSN 13522310. doi : 10.1016/j.atmosenv.2013.01.016. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231013000290>.
- J. V. Martonchik, D. J. Diner, R. Kahn, B. Gaitley, et B. N. Holben. Comparison of MISR and AERONET aerosol optical depths over desert sites. *Geophys. Res. Lett.*, 31(16) :L16102, 2004. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2004GL019807>.
- R. May et R. Anderson. Population biology of infectious diseases : Part II. *Nature*, 280, 1979.
- M. McCarthy. Dust clouds implicated in spread of infection. *Lancet*, 358(9280) :478, Aug. 2001. ISSN 0140-6736. doi : 10.1016/S0140-6736(01)05677-X. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11513923>.

- C. McKenna-Neumann et W. G. Nickling. A theoretical and wind tunnel investigation of the effect of capillarity water on the entrainment of sediment by wind. *Can. J. Soil Sci.*, 69 :79–96, 1989.
- R. McPeters, S. Taylor, G. Jaross, et D. Haffner. Empirically corrected TOMS earth probe dataset. Technical report, NASA, 2007. URL <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Empirically+Corrected+TOMS+Earth+Probe+Dataset#1>.
- L. Menut, I. Chiapello, et C. Moulin. Predictability of mineral dust concentrations : The African Monsoon Multidisciplinary Analysis first short observation period forecasted with CHIMERE-DUST. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 114(D7) :n/a–n/a, Apr. 2009. ISSN 0148-0227. doi : 10.1029/2008JD010523. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2008JD010523>.
- R. L. Miller, G. A. Schmidt, et D. T. Shindell. Forced annular variations in the 20th century Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report models. *Journal of Geophysical Research*, 111(D18) :D18101, 2006. ISSN 0148-0227. doi : 10.1029/2005JD006323. URL <http://www.agu.org/pubs/crossref/2006/2005JD006323.shtml>.
- A. M. Molesworth, M. C. Thomson, S. J. Connor, M. P. Cresswell, A. P. Morse, P. Shears, C. A. Hart, et L. E. Cuevas. Where is the meningitis belt? Defining an area at risk of epidemic meningitis in Africa. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 96(3) :242–249, May 2002. ISSN 0035-9203. doi : [http://dx.doi.org/10.1016/S0035-9203\(02\)90089-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0035-9203(02)90089-1). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0035920302900891><http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12174770>.
- A. M. Molesworth, L. E. Cuevas, S. J. Connor, A. P. Morse, et M. C. Thomson. Environmental risk and meningitis epidemics in Africa. *Emerging infectious diseases*, 9(10) :1287–1293, 2003. URL <http://ukpmc.ac.uk/abstract/MED/14609465>.
- P.-A. Monerie, B. Fontaine, et P. Roucou. Expected future changes in the African monsoon between 2030 and 2070 using some CMIP3 and CMIP5 models under a medium-low RCP scenario. *Journal of Geophysical Research*, 117(D16) :D16111, Aug. 2012. ISSN 0148-0227. doi : 10.1029/2012JD017510. URL <http://www.agu.org/pubs/crossref/pip/2012JD017510.shtml>.
- Y. Monnier. Meningite cerebro-spinale, harmattan et deforestation. *Les cahiers d'outre-mer*, 1980.
- P. S. Moore. Meningococcal meningitis in sub-Saharan Africa : a model for the epidemic process. *Clinical infectious diseases : an official publication of the Infectious Diseases Society of America*, 14(2) :515–25, Feb. 1992. ISSN 1058-4838. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1554841>.
- C. Morales. The airborne transport of Saharan dust : A review. *Climatic Change*, 9(1) :219–241, 1986. URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF00140538>.
- D. M. Morens, G. K. Folkers, et A. S. Fauci. The challenge of emerging and re-emerging infectious diseases. *Nature*, 430(6996) :242–9, July 2004. ISSN 1476-4687. doi : 10.1038/nature02759. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15241422>.
- V. Moron. Guinean and sahelian rainfall anomaly indices at annual and monthly scales (1933 à 1990). *International Journal of Climatology*, 14(3) :325–341, Apr. 1994. ISSN 08998418. doi : 10.1002/joc.3370140306. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/joc.3370140306>.
- T. Mpofu. Urbanization and urban environmental challenges in Sub-Saharan Africa. *Research Journal of Agricultural and Environmental management*, 2(6) :127–134, 2013. URL <http://www.apexjournal.org/pdf/Mpofu3.pdf>.

- J. E. Mueller et B. D. Gessner. A hypothetical explanatory model for meningococcal meningitis in the African meningitis belt. *International Journal of Infectious Diseases*, 14(7) :E553–E559, July 2010. ISSN 1878-3511. doi : 10.1016/j.ijid.2009.08.013. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20018546>.
- J. E. Mueller, S. Yaro, Y. Madec, P. K. Somda, R. S. Idohou, B.-M. N. Lafourcade, A. Drabo, Z. Tarnagda, L. Sangaré, Y. Traoré, A. Fontanet, et B. D. Gessner. Association of respiratory tract infection symptoms and air humidity with meningococcal carriage in Burkina Faso. *Tropical medicine & international health : TM & IH*, 13(12) :1543–52, Dec. 2008. ISSN 1365-3156. doi : 10.1111/j.1365-3156.2008.02165.x. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18983283>.
- J.-A. Ndione, D. J. Bicout, B. Mondet, R. Lancelot, P. Sabatier, J.-P. Lacaux, M. Ndiaye, et C. Diop. Conditions environnementales associées à l'émergence de la fièvre de la vallée du Rift (FVR) dans le delta du fleuve Sénégal en 1987. *Environnement, Risques & Santé*, 4(2) :10005–10010, Mar. 2005. ISSN 1635-0421. URL <http://www.jle.com/fr/revues/medecine/bdc/e-docs/00/04/0B/6C/resume.phtml>.
- S. Nicholson. Sahel, West Africa. *Encyclopedia of Environmental Biology*, pages 261–275, 1995. URL <http://dweb.met.fsu.edu/people/nicholson/papers/sahel95.pdf>.
- G. M. N'Tchayi, J. Bertrand, M. Legrand, et J. Baudet. Temporal and spatial variations of the atmospheric dust loading throughout West Africa over the last thirty years. *Annales Geophysicae*, 12(2) : 265–273, 1994. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00585-994-0265-3>.
- K. O. Ogunjobi, Z. He, et C. Simmer. Spectral aerosol optical properties from AERONET Sun-photometric measurements over West Africa. *Atmospheric Research*, 88(2) :89–107, 2008. doi : 10.1016/j.atmosres.2007.10.004. URL <GotoISI>://WOS:000255801400001.
- P. C. Oke. Harmattan et méningite cérébro-spinale au Bénin. *Climat et Santé*, 11 :97–116, 1994.
- L. Olsson, L. Eklundh, et J. Ardö. A recent greening of the Sahel trends, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environments*, 63(3) :556–566, Nov. 2005. ISSN 01401963. doi : 10.1016/j.jaridenv.2005.03.008. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.008>.
- OMS. Gestion des épidémies de méningite en Afrique. Technical report, 2010. URL http://www.who.int/csr/resources/publications/HSE_GAR_ERI_2010_4/fr/index.html.
- J. Paireau, F. Girond, J.-M. Collard, H. B. Maïnassara, et J.-F. Jusot. Analysing spatio-temporal clustering of meningococcal meningitis outbreaks in Niger reveals opportunities for improved disease control. *PLoS neglected tropical diseases*, 6(3) :e1577, Jan. 2012. ISSN 1935-2735. doi : 10.1371/journal.pntd.0001577. URL <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3308932&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.
- I. Parent du Châtelet, B. D. Gessner, et A. da Silva. Comparison of cost-effectiveness of preventive and reactive mass immunization campaigns against meningococcal meningitis in West Africa : a theoretical modeling analysis. *Vaccine*, 19(25 a 26) :3420–3431, May 2001. ISSN 0264-410X. doi : [http://dx.doi.org/10.1016/S0264-410X\(01\)00066-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0264-410X(01)00066-4). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264410X01000664>.
- J. A. Patz, D. Campbell-Lendrum, T. Holloway, et J. A. Foley. Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438(7066) :310–317, Nov. 2005. ISSN 0028-0836. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nature04188>.

- K. Pearson. LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine Series 6*, 2(11) :559–572, Nov. 1901. ISSN 1941-5982. doi : 10.1080/14786440109462720. URL <http://dx.doi.org/10.1080/14786440109462720>.
- L. Perez, A. Tobias, X. Querol, N. Kanzli, J. Pey, A. Alastuey, M. Viana, N. Valero, M. Gonzalez-Cabri, et J. Sunyer. Coarse Particles From Saharan Dust and Daily Mortality, 2008. URL http://journals.lww.com/epidem/Fulltext/2008/11000/Coarse_Particles_From_Saharan_Dust_and_Daily.9.aspx.
- F. J. Petitjohn, P. E. Potter, et R. Siever. Sand and sandstone. *Springer-Verlag, New York*, 1972.
- S. Philippon, H. Broutin, G. Constantin de Magny, K. Toure, C. H. Diakite, N. Fourquet, M.-F. Courel, B. Sultan, et J.-F. Guégan. Meningococcal meningitis in Mali : a long-term study of persistence and spread. *International journal of infectious diseases : IJID : official publication of the International Society for Infectious Diseases*, 13(1) :103–9, Jan. 2009. ISSN 1878-3511. doi : 10.1016/j.ijid.2008.05.1223. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18674942>.
- A. J. Pollard et M. C. Maiden. Epidemic meningococcal disease in sub-Saharan Africa, towards a sustainable solution ? *The Lancet Infectious Diseases*, 3(2) :68–70, Feb. 2003. ISSN 14733099. doi : 10.1016/S1473-3099(03)00511-5. URL [http://www.thelancet.com/journals/a/article/PIIS1473-3099\(03\)00511-5/fulltext](http://www.thelancet.com/journals/a/article/PIIS1473-3099(03)00511-5/fulltext).
- J. M. Prospero et T. N. Carlson. Vertical and Areal Distribution of Saharan Dust over the Western Equatorial North Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 77(27) :5255–5265, 1972. ISSN 0148-0227. doi : 10.1029/JC077i027p05255. URL <http://dx.doi.org/10.1029/JC077i027p05255>.
- J. M. Prospero et R. T. Nees. Dust concentration in the atmosphere of the equatorial north atlantic : possible relationship to the sahelian drought. *Science (New York, N.Y.)*, 196(4295) :1196–8, June 1977. ISSN 0036-8075. doi : 10.1126/science.196.4295.1196. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17787085>.
- J. M. Prospero, P. Ginoux, O. Torres, S. E. Nicholson, et T. E. Gill. 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*, 40(1) :31, 2002. doi : 100210.1029/2000rg000095. URL <GotoISI>://WOS:000180574400003.
- J. M. Prospero, E. Blades, R. Naidu, G. Mathison, H. Thani, et M. C. Lavoie. Relationship between African dust carried in the Atlantic trade winds and surges in pediatric asthma attendances in the Caribbean. *International Journal of Biometeorology*, 52(8) :823–832, 2008. doi : 10.1007/s00484-008-0176-1. URL <GotoISI>://WOS:000260281500013.
- K. Pye. *Aeolian dust and dust deposit*. Academic Press, academic p edition, 1987.
- V. Ramanathan, P. J. Crutzen, J. T. Kiehl, et D. Rosenfeld. Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle. *Science*, 294(5549) :2119–2124, 2001. doi : 10.1126/science.1064034. URL <http://www.sciencemag.org/content/294/5549/2119.abstract>.
- Rapport OMS. Lutte contre les épidémies de méningite à méningocoque : Guide pratique OMS. Technical report, WHO, 1998. URL <http://www.who.int/csr/resources/publications/meningitis/whoemcbac983.pdf>.
- J. L. Redelsperger, C. D. Thorncroft, A. Diedhiou, T. Lebel, D. J. Parker, et J. Polcher. The African Monsoon Multidisciplinary Analysis : An International Research Project and Field Campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(12) :1739–1746, 2006.

- M. B. M. Richman. Rotation of principal components. *Journal of climatology*, 6 (3) :293–335, Jan. 1986. ISSN 01961748. doi : 10.1002/joc.3370060305. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/joc.3370060305><http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.3370060305/abstract>.
- X. Rodó, M. Pascual, F. J. Doblas-Reyes, A. Gershunov, D. a. Stone, F. Giorgi, P. J. Hudson, J. Kinter, M.-A. Rodríguez-Arias, N. C. Stenseth, D. Alonso, J. García-Serrano, et A. P. Dobson. Climate change and infectious diseases : Can we meet the needs for better prediction ? *Climatic Change*, 118(3-4) :625–640, Apr. 2013. ISSN 0165-0009. doi : 10.1007/s10584-013-0744-1. URL <http://link.springer.com/10.1007/s10584-013-0744-1>.
- T. Sandstrom et B. Forsberg. Desert dust : an unrecognized source of dangerous air pollution ? *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 19(6) :808–9, Nov. 2008. ISSN 1531-5487. doi : 10.1097/EDE.0b013e31818809e0. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18854705>.
- B. D. Santer, K. E. Taylor, P. J. Gleckler, C. Bonfils, T. P. Barnett, D. W. Pierce, T. M. L. Wigley, C. Mears, F. J. Wentz, W. Brüggemann, N. P. Gillett, S. A. Klein, S. Solomon, P. A. Stott, et M. F. Wehner. Incorporating model quality information in climate change detection and attribution studies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106 (35) :14778–83, Sept. 2009. ISSN 1091-6490. doi : 10.1073/pnas.0901736106. URL <http://www.pnas.org/content/106/35/14778.full>.
- E. C. Savory, L. E. Cuevas, M. a. Yassin, C. a. Hart, a. M. Molesworth, et M. C. Thomson. Evaluation of the meningitis epidemics risk model in Africa. *Epidemiology and infection*, 134(5) :1047–51, Oct. 2006. ISSN 0950-2688. doi : 10.1017/S0950268806005929. URL <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2870480&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.
- K. Schepanski, I. Tegen, et a. Macke. Comparison of satellite based observations of Saharan dust source areas. *Remote Sensing of Environment*, 123(0) :90–97, Aug. 2012. ISSN 0034-4257. doi : 10.1016/j.rse.2012.03.019. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425712001381><http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712001381>.
- C. Schmechtig, B. Marticorena, B. Chatenet, G. Bergametti, J. L. Rajot, et A. Coman. Simulation of the mineral dust content over Western Africa from the event to the annual scale with the CHIMERE-DUST model. *Atmos. Chem. Phys.*, 11(14) :7185–7207, 2011. URL <http://www.atmos-chem-phys.net/11/7185/2011/http://www.atmos-chem-phys.net/11/7185/2011/acp-11-7185-2011.pdf>.
- L. Schütz. Long range transport of desert dust with special emphasis on the Sahara. *Annals of the New York Academy of sciences*, 338 :515–532, 1980.
- J. Seinfeld et S. Pandis. *Atmospheric chemistry and physics : From air pollution to climate change*. Wiley, 1997.
- Y. Shao, M. R. Raupach, et P. A. Findlater. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind. *J. Geophys. Res.*, 98(D7) :12,719–12,726., 1993.
- S. C. Sherwood et M. Huber. An adaptability limit to climate change due to heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(21) :9552–5, May 2010. ISSN 1091-6490. doi : 10.1073/pnas.0913352107. URL <http://www.pnas.org/cgi/content/long/107/21/9552>.

- E. Shinn, D. Griffin, et D. Seba. Atmospheric transport of mold spores in clouds of desert dust. *Archives of environmental health*, 2003. URL <http://faculty.unlv.edu/bbuck/Dustposters/Shinnetal2003.pdf>.
- A. Sicé, E. Robin, et L. Brochil. Considération épidémiologiques sur la méningite cérébro-spinale au soudan français. *Bulletin de la Société de pathologie exotique*, 35 à 59, 1940.
- A. Slingo, T. P. Ackerman, R. P. Allan, E. I. Kassianov, S. A. McFarlane, G. J. Robinson, J. C. Barnard, M. A. Miller, J. E. Harries, J. E. Russell, et S. Dewitte. Observations of the impact of a major Saharan dust storm on the atmospheric radiation balance. *Geophys. Res. Lett.*, 33(24) : L24817, Dec. 2006. ISSN 0094-8276. doi : 10.1029/2006GL027869. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2006GL027869>.
- I. N. Sokolik, D. M. Winker, G. Bergametti, D. A. Gillette, G. Carmichael, Y. J. Kaufman, L. Gomes, L. Schuetz, et J. E. Penner. Introduction to special section : Outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 106(D16) : 18015–18027, 2001. doi : 10.1029/2000jd900498. URL <GotoISI>://WOS:000170579400025.
- R. Stanwell-Smith. Smoking, the environment and meningococcal disease : a case control study. *Epidemiology infection*, 112(112) :315–328, 1994. URL <http://journals.cambridge.org/production/action/cjoGetFulltext?fulltextid=4703956>.
- D. S. Stephens, B. Greenwood, et P. Brandtzaeg. Epidemic meningitis, meningococcaemia, and Neisseria meningitidis. *The Lancet*, 369(9580) :2196–2210, 2007. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140673607610162>.
- L. Stone, R. Olinky, et A. Huppert. Seasonal dynamics of recurrent epidemics. *Nature*, 446(7135) : 533–6, Mar. 2007. ISSN 1476-4687. doi : 10.1038/nature05638. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17392785>.
- B. Sultan et S. Janicot. Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability. *Geophysical Research Letters*, 27(20) :3353–3356, 2000. URL <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/1999GL011285/full>.
- B. Sultan et S. Janicot. The West African monsoon dynamics. Part II : The pre-onset and the onset of the summer monsoon. *Journal of Climate*, 16 :3407–3427, 2003. URL [http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442\(2003\)016%3C3407%3ATWAMDP%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442(2003)016%3C3407%3ATWAMDP%3E2.0.CO%3B2).
- B. Sultan, S. Janicot, et A. Diedhiou. The West African Monsoon Dynamics. Part I : Documentation of Intraseasonal Variability. *Journal of Climate*, 16(21) :3389–3406, 2003. URL [http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3389:TWAMDP>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442(2003)016<3389:TWAMDP>2.0.CO;2); [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3389:TWAMDP>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3389:TWAMDP>2.0.CO;2).
- B. Sultan, K. Labadi, G. Beltrando, et S. Janicot. La méningite à méningocoque au Mali et la circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest. *Environnement, Risques & Santé*, 3(1) :23–34, 2004. URL http://www.jle.com/fr/revues/sante_pub/ers/e-docs/00/03/FF/57/resume.phtml.
- B. Sultan, C. Baron, M. Dingkuhn, B. Sarr, et S. Janicot. Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128(1-2) :93–110, Jan. 2005. ISSN 01681923. doi : 10.1016/j.agrformet.2004.08.005. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192304001923>.

- a. Sunnu, G. Afeti, et F. Resch. A long-term experimental study of the Saharan dust presence in West Africa. *Atmospheric Research*, 87(1) :13–26, Jan. 2008. ISSN 01698095. doi : 10.1016/j.atmosres.2007.07.004. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169809507001196>.
- M. Taha, M. Achtman, et J. Alonso. Serogroup W135 meningococcal disease in Hajj pilgrims. *The Lancet*, 356 :2159, 2000. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140673600035029>.
- M.-K. Taha, A.-E. Deghmane, A. Antignac, M. L. Zarantonelli, M. Larribe, et J.-M. Alonso. The duality of virulence and transmissibility in *Neisseria meningitidis*. *Trends in Microbiology*, 10(8) : 376–382, Aug. 2002. ISSN 0966-842X. URL [http://dx.doi.org/10.1016/S0966-842X\(02\)02402-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0966-842X(02)02402-2).
- H. Tall, S. Hugonnet, P. Donnen, M. Dramaix-Wilmet, L. Kambou, F. Drabo, et J. E. Mueller. Definition and characterization of localised meningitis epidemics in Burkina Faso : a longitudinal retrospective study. *BMC infectious diseases*, 12(1) :2, Jan. 2012. ISSN 1471-2334. doi : 10.1186/1471-2334-12-2. URL <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3280175&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.
- K. E. Taylor, R. J. Stouffer, et G. a. Meehl. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4) :485–498, Apr. 2012. ISSN 0003-0007. doi : 10.1175/BAMS-D-11-00094.1. URL <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.
- A. Terranella, A. Cohn, et T. Clark. Meningococcal conjugate vaccines : optimizing global impact. *Infection and drug resistance*, 4 :161–9, Jan. 2011. ISSN 1178-6973. doi : 10.2147/IDR.S21545. URL <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3215346&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.
- R. Teyssou et E. Muros-Le Rouzic. Meningitis epidemics in Africa : a brief overview. *Vaccine*, 25 Suppl 1 :A3–7, Sept. 2007. ISSN 0264-410X. doi : 10.1016/j.vaccine.2007.04.032. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17643560>.
- N. Thomas. *Apport de la télédétection spatiale dans l'étude du lien aérosols-méningites en Afrique de l'Ouest*. PhD thesis, rapport de stage de Master-2, Université de Bordeaux 3, 2008.
- M. Thomson, A. M. Molesworth, M. Djingarey, K. R. Yameogo, F. Belanger, et L. E. Cuevas. Potential of environmental models to predict meningitis epidemics in Africa. *Tropical Medicine & International Health*, 11(6) :781–8, June 2006. doi : 10.1111/j.1365-3156.2006.01630.x. URL <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-3156.2006.01630.x/full>.
- M. C. Thomson, I. Jeanne, et M. Djingarey. Dust and epidemic meningitis in the Sahel : A public health and operational research perspective. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 7(1) :12017, 2009. URL <http://stacks.iop.org/1755-1315/7/i=1/a=012017>.
- M. C. Todd, R. Washington, J. V. Martins, O. Dubovik, G. Lizcano, S. M'Bainayel, et S. Engelstaedter. Mineral dust emission from the Bodélé Depression, northern Chad, during BoDEx 2005. *Journal of Geophysical Research*, 112(D6) :D06207, Mar. 2007. ISSN 0148-0227. doi : 10.1029/2006JD007170. URL <http://www.agu.org/pubs/crossref/2007/2006JD007170.shtml>.
- O. Torres, P. K. Bhartia, J. R. Herman, Z. Ahmad, et J. Gleason. Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation : Theoretical basis. *J. Geophys. Res.*, 103(D14) :17099–17110, 1998. URL <http://dx.doi.org/10.1029/98JD00900>.

- O. Torres, P. K. Bhartia, J. R. Herman, A. Sinyuk, P. Ginoux, et B. Holben. A long-term record of aerosol optical depth from TOMS observations and comparison to AERONET measurements. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(3) :398–413, 2002. doi : 10.1175/1520-0469(2002)059<0398:altroa>2.0.co;2. URL <GotoISI>://WOS:000173418300010.
- O. Torres, A. Tanskanen, B. Veihelmann, C. Ahn, R. Braak, P. K. Bhartia, P. Veefkind, et P. Levelt. Aerosols and surface UV products from Ozone Monitoring Instrument observations : An overview. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 112(D24) :14, 2007. doi : D24s4710.1029/2007jd008809. URL <GotoISI>://WOS:000252013800005.
- Y. Traoré, B.-M. Njanpop-Lafourcade, K.-L.-S. Adjogble, M. Lourd, S. Yaro, B. Nacro, A. Drabo, I. Parent du Châtelet, J. E. Mueller, M.-K. Taha, R. Borrow, P. Nicolas, J.-M. Alonso, et B. D. Gessner. The rise and fall of epidemic Neisseria meningitidis serogroup W135 meningitis in Burkina Faso, 2002-2005. *Clinical infectious diseases : an official publication of the Infectious Diseases Society of America*, 43(7) :817–22, Oct. 2006. ISSN 1537-6591. doi : 10.1086/507339. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16941360>.
- C. L. Trotter et B. M. Greenwood. Meningococcal carriage in the African meningitis belt. *The Lancet Infectious Diseases*, 7(12) :797–803, Dec. 2007. ISSN 1473-3099. doi : [http://dx.doi.org/10.1016/S1473-3099\(07\)70288-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1473-3099(07)70288-8). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1473309907702888>.
- C. J. Tucker, W. W. Newcomb, S. O. Los, et S. D. Prince. Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989. *International Journal of Remote Sensing*, 12(6) :1133–1135, June 1991. ISSN 0143-1161. doi : 10.1080/01431169108929717. URL <http://dx.doi.org/10.1080/01431169108929717>.
- K. L. Tyler. A history of bacterial meningitis. In *Handbook of clinical neurobiology*, volume 95, pages 417–433. Elsevier, 2009. ISBN 0072-9752.
- S. M. Uppala, P. W. Kallberg, a. J. Simmons, U. Andrae, V. D. C. Bechtold, M. Fiorino, J. K. Gibson, J. Haseler, a. Hernandez, G. a. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarinen, N. Sokka, R. P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M. a. Balmaseda, a. C. M. Beljaars, L. V. D. Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, a. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Hólm, B. J. Hoskins, L. Isaksen, P. a. E. M. Janssen, R. Jenne, a. P. McNally, J.-F. Mahfouf, J.-J. Morcrette, N. a. Rayner, R. W. Saunders, P. Simon, a. Sterl, K. E. Trenberth, a. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo, et J. Woollen. The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(612) :2961–3012, Oct. 2005. ISSN 00359009. doi : 10.1256/qj.04.176. URL <http://doi.wiley.com/10.1256/qj.04.176>.
- M. Valari, L. Menut, et E. Chatignoux. Using a Chemistry Transport Model to Account for the Spatial Variability of Exposure Concentrations in Epidemiologic Air Pollution Studies. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 61(2) :164–179, 2011. URL <http://dx.doi.org/10.3155/1047-3289.61.2.164>.
- H. C. Van de Hulst. *Light Scattering by Little Particles*. 1957.
- M. Virji. Pathogenic neisseriae : surface modulation, pathogenesis and infection control. *Nature Reviews Microbiology*, 7(ApRil), 2009. doi : 10.1038/nrmicro2097. URL <http://www.nature.com/nrmicro/journal/v7/n4/abs/nrmicro2097.html>.
- B. Waddy. African epidemic cerebrospinal meningitis. *Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, (60) :218–223, 1957.

- R. Washington. Atmospheric controls on mineral dust emission from the Bodélé Depression, Chad : The role of the low level jet. *Geophysical Research Letters*, 32(17) :L17701, 2005. ISSN 0094-8276. doi : 10.1029/2005GL023597. URL <http://www.agu.org/pubs/crossref/2005/2005GL023597.shtml>.
- R. Washington, M. Todd, N. J. Middleton, et A. S. Goudie. Dust-storm source areas determined by the total ozone monitoring spectrometer and surface observations. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(2) :297–313, 2003. doi : 10.1111/1467-8306.9302003. URL <GotoISI>://WOS:000184143400003.
- R. Washington, M. C. Todd, G. Lizcano, I. Tegen, C. Flamant, I. Koren, P. Ginoux, S. Engelstaedter, C. S. Bristow, C. S. Zender, A. S. Goudie, A. Warren, et J. M. Prospero. Links between topography, wind, deflation, lakes and dust : The case of the Bodélé Depression, Chad. *Geophys. Res. Lett.*, 33(9) :L09401, 2006. ISSN 0094-8276. doi : 10.1029/2006GL025827. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2006GL025827><http://www.agu.org/pubs/crossref/2006/2006GL025827.shtml>.
- D. Wilks. *Statistical methods in the atmospheric sciences*, volume 100. Academic Press, 1995. ISBN 9780123850225. URL <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=IJuCVtQ0ySIC&oi=fnd&pg=PP2&dq=statistical+methods+in+the+atmospheric+science&ots=amLpo0BJK0&sig=b7CsWfGlyASDxvpU2scwGuHLL6ch><http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=IJuCVtQ0ySIC&oi=fnd&pg=PP2&dq=Statistical+methods+in+the+atmospheric+sciences&ots=amLpo0BJL-&sig=nSYp77rkuCpevnXSQ04nac35Zn0>http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=IJuCVtQ0ySIC&oi=fnd&pg=PP2&dq=Statistical+methods+in+the+atmospheric+sciences&ots=amLpo0BJ0-&sig=vcA3gja_q4cEMF0jnUCXTA4Uo.
- H. Yahi, B. Marticorena, S. Thiria, B. Chatenet, C. Schmechtig, J. Rajot, et M. Crépon. Statistical relationship between surface PM10 concentration and aerosol optical depth over the Sahel as a function of weather type, using neural network methodology. *J. Geophys. Res.*, 2013.
- P. Yaka, B. Sultan, S. Janicot, N. Courel, et F. Marie-françoise. Cas des épidémies de méningite cérébro-spinale en zone climatique sahélo-soudanienne d’Afrique de l’Ouest. *Santé et systémique*, pages 19–30, 2007. doi : 10.3166/SAS.10.3-4.19-30.
- P. Yaka, B. Sultan, H. Broutin, S. Janicot, S. Philippon, et N. Fourquet. Relationships between climate and year-to-year variability in meningitis outbreaks : a case study in Burkina Faso and Niger. *International journal of health geographics*, 7 :34, Jan. 2008. ISSN 1476-072X. doi : 10.1186/1476-072X-7-34. URL <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2504476&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.
- B. Yarnal. *Synoptic climatology in environmental analysis : a primer*. Belhaven Press (London), belhaven p edition, 1993. URL <http://library.wur.nl/WebQuery/clc/582808>.
- C. S. Zender et E. Y. Kwon. Regional contrasts in dust emission responses to climate. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 110(D13) :7, 2005. doi : D1320110.1029/2004jd005501. URL <GotoISI>://WOS:000230640900001.
- N. Zeng. Atmospheric science. Drought in the Sahel. *Science (New York, N.Y.)*, 302(5647) :999–1000, Nov. 2003. ISSN 1095-9203. doi : 10.1126/science.1090849. URL <http://www.sciencemag.org/content/302/5647/999.short>.
- X. R. Zhu, J. M. Prospero, et F. J. Millero. Diel variability of soluble Fe (II) and soluble total Fe in North African dust in the trade winds at Barbados, 1997.