

Université Gaston Berger de Saint-Louis

École Doctorale des Sciences de l'Homme et de la Société

Formation doctorale de géographie - Laboratoire Léïdi

Parcours : Écosystèmes et environnement

Option : Climatologie



Fréquence des aérosols désertiques dans l'extrême Nord-Sénégal (Stations de Saint-Louis, Podor et Matam) : *effets radiatifs, conséquences sur la visibilité horizontale et impacts sanitaires*

Thèse pour le Doctorat de Géographie

Présentée par

M. Demba GAYE

Soutenue publiquement le samedi 11 mars 2017 à l'Amphi B (UGB)

Jury

- Pr. Mouhamadou Mawloud DIAKHATÉ, UGB, Directeur de Thèse
- Pr. Pascal SAGNA, UCAD, Rapporteur
- Pr. Boubou Aldiouma SY, UGB, Rapporteur
- Dr. André D'ALMEIDA (Chargé d'enseignements, UGB), Encadrant

Dédicaces

À mes Parents : Hamady Ciré GAYE et Dieynaba Aguibou MBOW

À mes Sœurs : Aïssata, Maynouma, Dieynaba, Rayhana, Mariame, Houléye et Salamata

À mes Frères : Amadou, Abou n° 1 et 2, Ciré, Ousmane, Aly et Oumar

À mes belles sœurs Coumba et Gaïssiry

À mon Oncle El Hadj Mamoudou MBOW

À ma famille THIAM à Nouakchott

À mon très cher encadrant Dr. André D'ALMEIDA

À la famille KANE à Saint-Louis

À mes collègues du Laboratoire Leïdi

Spécialement à Thérèse NDIAYE, à Ngagne FALL et à Abdoulaye GUISSÉ

Puisque "mo limi juuma" à mes amis d'hier, d'aujourd'hui et de demain

Dédicace spéciale

à mes nièce et neveu : Aïssata et Baba

Remerciements

En plus d'être Encadrant de tous mes travaux de recherche, **Dr. André D'ALMEIDA** m'a appris à rejeter ce que je n'aurai jamais dû choisir... ceci a pleinement contribué à ce que je suis devenu aujourd'hui.

Comment remercier M. D'ALMEIDA ? voilà la question que je me suis toujours posé. Hasardeusement ou pas, en revisitant les œuvres d'un grand écrivain africain, je tombai sur l'une de ses citations qui m'apporta du "soulagement" « *Quel que soit la valeur du présent fait à l'homme, il n'y a qu'un seul mot pour témoigner la reconnaissance inspirée par la libéralité et ce mot c'est : MERCI* ». Merci de m'avoir transmis, jour après jour, votre expérience dans la recherche, le travail et la vie... Merci de m'avoir donné la confiance, le soutien et les bases de mon travail, en me poussant à sortir le meilleur de moi-même, pour que j'entreprene ce défi... Merci pour les qualités hautement humaines et la totale disponibilité que vous m'avez toujours manifestée. Et surtout merci pour l'affection manifeste que vous portez à ma personne !

Mes remerciements vont à l'endroit du **Professeur Mouhamadou Mawloud DIAKHATÉ**, Directeur scientifique de cette thèse. Ce fut une grande chance de travailler avec vous... D'abord pour m'avoir permis d'obtenir le financement du matériel de mes stations de captage de particules de poussières par l'IRD à travers PATEO et ensuite pour la confiance que vous avez placée en moi en me confiant certaines de vos tâches pédagogiques (cours, animation de séminaires, ...) qui ont constitué pour moi de véritables séances d'initiation et de perfection des acquis. Merci infiniment pour tout !

J'ai eu le privilège que **Professeur Pascal SAGNA** ait accepté de rapporter cette thèse. Quoi de plus honorable pour un disciple que je suis que d'être évalué par l'une des rares voix autorisées en climatologie ? l'honneur est d'autant plus grandiose qu'il m'est difficile de le remercier. Puisse-t-il trouvera ici l'expression de ma profonde gratitude !

Mes vifs remerciements vont aussi à l'endroit du **Professeur Boubou Aldiouma SY**, d'abord pour tout ce qu'il fait pour nous, d'être là pour nous écouter et apporter conseils et suggestions dans le cadre de cette thèse et dans la recherche scientifique de façon plus élargie. Je le remercie ensuite pour avoir accepté volontiers de rapporter cette thèse. Merci pour cet honneur et merci pour Tout !

Ce travail doit beaucoup aux échanges et discussions toujours fructueux avec les collègues du Laboratoire Leïdi au sein de la salle des doctorants de Géographie que nous avons labélisée affectueusement "*Salon de coiffure*" du fait des interventions très critiques lors des séances de partage de projets de recherche ou de présentation des résultats de thèses, au sortir desquels les présentateurs ont une orientation plus claire de ce qui les attend. Merci pour l'initiative !

Je n'ai pas de mots pour remercier **Pr. Aly TANDIAN**, alors je me contente juste de lui dire **merci** et lui exprimer toute ma reconnaissance pour tout le soutien qu'il m'a apporté notamment en prenant en charge l'impression à la fois de la première version et de la version finale de cette thèse. *Certes Dieu récompense toujours les bienfaits !*

Ma thématique de recherche m'a obligé à me rapprocher des agences et institutions dans la phase de collecte de données. De ce fait, je suis redevable à ceux qui m'en ont facilité l'accès. Mes remerciements à **M. Abdoulaye BA** de l'ANACIM avec qui je collabore depuis mes travaux de mémoire de master.

À Saint-Louis, j'adresse un vif remerciement aux **gestionnaires de données** du centre de santé et au bureau des archives du centre hospitalier régional.

Ma reconnaissance va aussi à l'endroit de la **Direction du Domaine de l'UGB** pour m'avoir trouvé un site sécurisé pour l'installation d'une de nos stations de captage de particules de poussières et d'avoir mis ma disposition des techniciens lors de sa mise en place et pendant la phase de collecte.

À Podor, Ndioum et Ourosogui je remercie les **agents du Service National de l'Information Sanitaire (SNIS)** pour leur collaboration dans l'obtention des données sanitaires utilisées dans cette thèse. Spécial merci à **M. BA**, agent de la station Météo de Podor de m'avoir octroyé un site pour l'implantation de l'une de mes stations de captage de particules de poussières et pour y avoir veillé quotidiennement. À Matam, je remercie énormément **Dr. SECK** du centre de santé d'avoir mis à ma disposition les archives et une salle de travail pour de meilleures conditions d'exploitation.

Je ne serais pas remercier mes familles d'accueil lors de décentes sur le terrain notamment à Podor et à Matam où je remercie respectivement la formidable **famille MBODJ** et ma **famille MBOW**

La thèse c'est aussi un cadre social apaisé. Un énorme merci à mon cher oncle **EL Hadj MBOW** pour la confiance qu'il a placée à nous et pour ses conseils éclairés aux moments de doutes et quand le vent de la colère souffle sur nos esprits. Si vous savez oh! Combien vous nous éclairez le chemin !

Qu'il me soit permis de remercier mon guide *Le Pole Cassé Cheikhouna Ahmedina TIDJANI* par la grâce de qui... sous bénédiction de son Grand-père Seydina MOHAMED (que Salut et paix soient sur Lui !), la lumière de Salat-al Fatihi m'a apporté la paix dans l'âme (Qu'Allah Sanctifie son précieux secret et nous accorde du bienfait par sa grâce !)

Finalement, le plus gigantesque des mercis va à l'endroit de **mes parents**. Plein d'énergie, ils ont toujours été là pour écouter nos doutes et pour les estomper. Leurs conseils ont toujours été et restent les clefs qui nous ouvrent les portes du grand destin. En fait, leur seul souci est qu'on se soucie de rien. Merci pour la confiance, la patience, l'optimisme et l'espoir. Merci pour les petites attentions qui changent la vie et la rendent plus légère. Veuillez-leur accorder, Maître de l'univers, longue vie et pleine santé !!!

Sommaire

Dédicaces	I
Remerciements	II
Sommaire	IV
Sigles et Acronymes	VI
Liste des illustrations	VIII
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	XIV
Avant-propos	XVII
Introduction Générale	1
Chapitre I : Contexte scientifique, Cadre théorique et conceptuel, Méthodologie et Climatologie de l’Afrique de l’Ouest	5
1. Contexte scientifique de l’étude	5
2. Cadre théorique	8
3. Analyse conceptuelle	13
4. Éléments de Méthodologie	19
5. Climatologie de l’Afrique de l’Ouest	36
Chapitre II : Étude des éléments du climat à l’extrême Nord-Sénégal : Stations synoptiques de Saint-Louis, Podor et Matam	76
1. Le vent	76
2. Température et Humidité relative	90
3. Evaporation et Insolation	100
4. La pluviométrie	102
5. Analyse intégrée des différents éléments du climat à l’extrême Nord-Sénégal (synthèse climatique)	122
Chapitre III : Aérosols désertiques : cycle, zones sources et saisonnalité des émissions ..	124
1. Généralité sur les aérosols	124
2. Cas spécifique des aérosols désertiques	139
3. Cycle des aérosols désertiques ; de la formation de la matière érodable au dépôt des particules	159
4. zones sources africaines du nord de l’Equateur et saisonnalité des émissions	181
Chapitre IV : Analyse de l’évolution des fréquences de lithométéores et étude de leurs effets radiatifs dans l’extrême Nord-Sénégal	201

1. Evolution et répartition de la fréquence du nombre de jours de lithométéores dans l'extrême Nord-Sénégal.....	201
2. Étude des concentrations en particules de lithométéores à l'extrême Nord-Sénégal.....	215
3. Effets radiatifs des poussières désertiques dans l'extrême Nord-Sénégal	226
Chapitre V : Poussières désertiques dans l'extrême Nord-Sénégal : action sur la visibilité horizontale, conséquences socio-économiques et impacts sanitaires	245
1. Actions des poussières lithométéoriques sur la visibilité horizontale aux stations de l'extrême Nord-Sénégal.....	245
2. Conséquences socio-économiques dues à la réduction de la visibilité par les poussières désertiques	266
3. impacts sanitaires des poussières désertiques dans l'extrême-Nord Sénégal.....	270
Conclusion générale	315
Références bibliographie.....	324
Webographie	348
Annexes	349
Table des matières	360

Sigles et Acronymes

AERONET : Aeronet RObotic NETwork

AEW : Ondes d'Est Africaines

AFSSET : Agence Française de Sécurité Sanitaire, de l'Environnement et du Travail

Al : Aluminium

AMMA : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine

ANACIM : Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie

AOD : Aérosol Optical Depth

AVL : Alvéolaire

BPCO : Broncho-Pneumopathie Chronique Obstructive

Ca : Calcium

CCN : Cloud Condensation Nuclei (Noyaux de condensation nuageuse)

DABEX : Dust And Biomass-Burning EXperiment

DODO : Dust Outflow and Deposition to Ocean

ET : Extra-thoracique

Fe : Fer

FIT : Front Intertropical

GARP : Global Atmospheric Research Program

GATE : GARP Atlantic Tropical Experiment

GERBILS : Geostationary Earth Radiation Budget Intercomparison of Longwave and Shortwave radiation

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

InVS : Institut français de Veille Sanitaire

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

JEA : Jet d'est africain

JOST : Jet d'Ouest Sub-Tropical

LG : Lignes de grains

LLJ : Low Level Jet (courant-jet à basse altitude)

LW : Long Wave (grandes longueurs d'onde)

MA : Macrophages alvéolaires

MAO : Mousson de l'Afrique de l'Ouest

MCS : Mesoscale Convective System (systèmes convectifs de méso-échelle)

MISR : Multi-angle Imaging Spectroradiometer

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MPOC : Maladies pulmonaires obstructives chroniques

NP : Nanoparticules

OMM : Organisation Mondiale de la Météorologie

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PM₁₀ : Particules de taille < 10 µm

PST : Particules en Suspension Totale

PUF : Particules ultrafines

RADAGAST : Radiative Atmospheric Divergence using ARM mobile facility, GERB data and AMMA Stations

SAMUM : SAharan Mineral dUst ExperiMent

SEVIRI-MSG : Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager-Meteosat Second Generation

SHADE : SaHAran Dust Experiment

SHL : Saharan Heat Low (dépression thermique saharienne)

Si : Silicium

SPSS : Statistical Package on Socials Sciences

SSA : Single Scattering Albedo (Albédo de simple diffusion)

SW : Short Wave (courtes longueurs d'onde)

TB : Trachéo-bronchique

TCM : Tableaux Climatiques Mensuels

TEJ : Jet d'est tropical

TOMS : Total Ozone Mapping Spectrometer

VV : visibilité horizontale minimale

ZCIT : Zone de Convergence Intertropicale

µg.m⁻³ : Microgramme par mètre cube

µm : Micromètre

Liste des illustrations

Liste des figures

Figure 1 : Localisation de la zone étudiée	7
Figure 2 : Stations de captage de particules : station de l'UGB (1), station de Podor (2), station de Woudourou (3), zoom sur la tête de l'appareil (4).	33
Figure 3 : Schéma représentatif de la mousson tiré du site AMMA International.....	38
Figure 4 : Ligne de flux (trait noir continu) à 200 hPa le 25/07/55.	43
Figure 5 : Coupe horizontale de la Composante U du vent à 200 hPa ($m.s^{-1}$) sur l'Afrique de l'Ouest.....	44
Figure 6 : Vent zonal et jet d'est africain (JEA) à 600 hPa entre le 21 et 31/08/2000 pendant la campagne JET2000.	46
Figure 7 : Vitesse et localisation latitudinale de l'AEJ, moyenne journalière, pour une mousson humide et une mousson sèche	47
Figure 8 : Schéma conceptuel de la circulation atmosphérique en zone tempérée	48
Figure 9 : Schéma conceptuel représentant, en moyenne zonale, les éléments clés de la mousson africaine pendant l'été boréal	49
Figure 10 : Les zones de convection sèche et humide en Afrique de l'Ouest durant la saison de mousson.....	50
Figure 11 : Image Bi-satellite infrarouge du 08 octobre 2007 à 00 UTC	51
Figure 12 : Nébulosité associée aux MCS oust-africains pendant les quatre mois de la mousson d'été.....	53
Figure 13 : Au Sahel, dans la région du delta central du Niger, la mousson s'accompagne de l'arrivée de lignes de grains	54
Figure 14 : Coupe verticale d'un schéma de ligne de grains d'après LAFORE et MONCRIEFF, (1989).	55
Figure 15 : Fréquence d'occurrence de la dépression thermique pour les mois janvier , juin et juillet.....	60
Figure 16 : Cycle saisonnier des pluies mensuelles (cm/mois) sur l'Afrique de l'Ouest entre janvier et décembre	62
Figure 17 : Pluies journalières (en mm/jour) moyenne entre 10°E et 10°W.....	68
Figure 18 : Direction moyenne des vents à la station de Matam (1984-2013)	84
Figure 19 : Direction moyenne des vents à la station de Saint-Louis (1984-2013).....	84
Figure 20 : Direction moyenne des vents à la station de Podor (1984-2013)	85

Figure 21 : courbes de vitesses moyennes pour les stations de Saint-Louis, Podor et Matam ...	89
Figure 22 : Fréquence des moyennes des températures aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam.....	91
Figure 23 : fréquences des observations par tranches de températures aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam	95
Figure 24 : évolution décennale des températures aux stations de Saint-Louis (1), Podor (2) et Matam (3) (1984-2013).....	97
Figure 25 : Taux d'humidité relative aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam	98
Figure 26 : Evolution des taux d'évaporation moyenne mensuelle aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam	100
Figure 27 : variabilité du nombre d'heure d'insolation aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1984-2013).....	101
Figure 28 : Pluviométrie moyenne mensuelle aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1984-2013).....	106
Figure 29 : Répartition mensuelle des occurrences du maximum pluviométrique aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1984-2013)	109
Figure 30 : Variations de la pluviométrie mensuelle au cours des années extrêmes aux stations de Saint-Louis (1992 et 2010), Podor (1984 et 2001) et Matam (1992 et 2000) de 1984 à 2013.	110
Figure 31 : Ecart à la moyenne pluviométrique aux stations du Nord Sénégal (1984-2013)..	113
Figure 32 : Evolution des précipitations de 1954 à 2013 aux stations de Saint-Louis (a), Podor (b) et Matam (c) suite à l'application du test de PETTITT	115
Figure 33 : Périodes de rupture et de reprise aux stations de Saint-Louis (a), Podor (b) et Matam (c) (1954-2013).	117
Figure 34 : Corrélation Nombre de jours de pluies/hauteurs d'eau annuelle aux stations de Matam, Podor et Saint-Louis	121
Figure 35 : Illustration d'un aérosol en mélange interne hétérogène.	130
Figure 36 : Description granulométrique d'une population d'aérosols et de leurs processus de formation et de dépôt. Adaptée de WHITBY (1978).....	132
Figure 37 : Trois modes de l'aérosol atmosphérique suivant leur distribution en nombre (PUTAUD et al., 2003).	133
Figure 38 : Distribution de la moyenne de l'épaisseur optique des aérosols (de juin 2000 à Mai 2010), mesurée par Multi-angle Imaging Spectroradiometer (MISR).....	136
Figure 39 : Image du satellite MODIS représentant les aérosols le 10 juin 2004.....	137

Figure 40 : Image SeaWiFS du 26/02/2000 montrant un panache d'aérosol saharien. NASA/GSFC, image SeaWiFS d'un panache d'aérosols désertiques au-dessus de la mer du Japon	140
Figure 41 : Localisation des zones désertiques et des principaux déserts.....	142
Figure 42 : Localisation de 131 'hot spots' issus des observations spatiales de TOMS	143
Figure 43 : Représentation de l'effet du sol sur l'écoulement de l'air et de la contrainte tangentielle T exercée par l'écoulement sur le sol (ALFARO, 1997).....	161
Figure 44 : Bilan des forces auxquelles est soumis un grain de diamètre D_p sous la contrainte de cisaillement (T) :	162
Figure 45 : Mouvements des grains du sol sous l'action du vent (Illustration des phénomènes régissant la mobilisation d'une particule par le vent)	163
Figure 46 : Illustrations du processus de sandblasting dans le cas où la particule entraînée dans un mouvement de saltation et de reptation.....	164
Figure 47 : Localisation des principaux processus météorologiques entraînant le soulèvement d'aérosols	165
Figure 48 : Images d'un soulèvement d'aérosols désertiques associé à la convection humide (Haboob).....	169
Figure 49 : Panaches de poussière au large de l'Afrique	171
Figure 50 : Budget annuel de poussières transportées depuis les côtes de l'Afrique de l'Ouest (0 km) vers les Barbade (4500 km)	172
Figure 51 : Vitesse de dépôt sec calculée en fonction de la taille de particules (courbe bleue) selon le modèle de Slinn et Slinn (1981) comparée à la vitesse de sédimentation (courbe noire)	174
Figure 52 : Schéma des processus de dépôt humide : « Rain-out » et « Wash-out ».....	175
Figure 53 : Moyenne annuelle du flux de dépôt ($g/m^2/an$) pour la période 1987-1990.....	176
Figure 54 : Dépôt sec annuel des poussières désertiques simulé par ALADIN ($g.m^{-2}.an^{-1}$) moyenné sur la période 2006-2010 sur l'Afrique au Nord de l'Equateur.....	177
Figure 55 : Dépôt sec saisonnier des poussières désertiques simulé par ALADIN ($g.m^{-2}.an^{-1}$) moyenné sur la période 2006-2010 sur l'Afrique au nord de l'Equateur.....	178
Figure 56 : Dépôt humide des poussières désertiques, pour le mois de janvier, simulé par ALADIN (en $g.m^{-2}.an^{-1}$) moyenné sur la période 2006-2010 sur l'Afrique au nord de l'Equateur	179
Figure 57 : Dépôt humide saisonnier des poussières désertiques simulé par ALADIN (en $g.m^{-2}.an^{-1}$) moyenné sur la période 2006-2010 sur l'Afrique au nord de l'Equateur	180

Figure 58 : Moyenne annuelle de l'IDDI de METEOSAT-IR sur la période 1984-1993 indiquant la localisation des principales zones sources d'aérosols désertiques en Afrique au Nord de l'Equateur	183
Figure 59 : Moyenne mensuelle sur la période 1980-1992 de l'AI de TOMS ($\times 10$) illustrant les principales zones sources de l'Afrique au Nord de l'Equateur	183
Figure 60 : La fréquence d'activation des zones sources en Afrique du Nord calculée à partir des Aerosol Index (AI) issus des observations spatiales de l'imageur OMI durant la période 2006-2010.....	184
Figure 61 : Tempêtes de sable saharien-phénomènes de différentes intensités, soulevant des quantités variables de sable à des hauteurs différentes	185
Figure 62 : les reliefs et la position géographique de la dépression de Bodélé au Tchad.....	186
Figure 63 : Une image satellite et une photo prise durant la campagne BoDex 2005 montrant l'aspect du sol dans la dépression de Bodélé au Tchad.....	187
Figure 64 : Fréquence moyenne (%) tri-horaire de la visibilité réduite par les lithométéores à moins de 500 dam durant la saison sèche (novembre à mars)	190
Figure 65 : Le cycle annuel des émissions d'aérosols désertiques depuis les sources nord africaines obtenu à partir des valeurs de AI de TOMS ($\times 10$) sur la période de 1980 à 1992 ...	192
Figure 66 : Concentrations saisonnières des aérosols en Afrique et en océan Atlantique entre Mars 2000 et Novembre 2005-MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiomètre) de la NASA.	193
Figure 67 : Fréquence saisonnière de l'activation des sources d'aérosols désertiques dévirée des images SEVIRI-MSG dans l'infrarouge	194
Figure 68 : Principales trajectoires du transport des aérosols désertiques émis depuis les sources Africaines au nord de l'Equateur	196
Figure 69: Principales trajectoires de transport des panaches d'aérosols désertiques depuis l'Afrique au nord de l'Equateur suivant les différentes saisons, inspiré de l'étude de MIDDLETON (1986)	196
Figure 70 : panaches de poussière au large de l'Atlantique.....	198
Figure 71 : Sortie de poussières désertiques sur l'Ouest de la Méditerranée (image SeaWiFS du 18/7/2000. NASA/GSFC.....	199
Figure 72 : Evolution des fréquences journalières suivant le type de lithométéore aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam de 1965 à 2014.....	202
Figure 73 : Répartition moyenne journalière des fréquences suivant le type de lithométéore aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam de 1965 à 2014.....	203

Figure 74 : Répartition mensuelle et saisonnière des deux types de lithométéores les plus fréquents aux niveaux des stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1965-2014).....	205
Figure 75 : fréquence des types de lithométéor suivant en saisons sèche et humide aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1965-2014).....	206
Figure 76 : Evolution annuelle (juin-mai) du nombre de jours de lithométéores aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam de 1965 à 2014.....	210
Figure 77 : Evolution de la fréquence annuelle (juin-mai) d'après le test de PETTITT et mise en évidence des points de rupture aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1965-2014).....	212
Figure 78 : Evolution du nombre de jours de lithométéores (saison sèche) au cours des années saisonnières aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam de 1965 à 2014.....	213
Figure 79 : Distribution de la fréquence des concentrations journalières en PST aux stations de l'extrême Nord-Sénégal (1965-2014)	218
Figure 80 : Distribution de la fréquence des concentrations journalières en PM ₁₀ aux stations de l'extrême Nord-Sénégal (1965-2014)	219
Figure 81 : Distribution de la fréquence des concentrations mensuelles en PST et PM ₁₀ aux stations du Nord-Sénégal (1965-2014)	221
Figure 82 : Concentration annuelle en PST et en PM ₁₀ (à gauche) et différence de niveaux de concentration entre les périodes 1972-1992 et 1993-2014 (à droite) aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam	223
Figure 83 : Résultats du test de BUIHAND appliqué aux concentrations en particules (PST à gauche) et (PM ₁₀ à droite) dans les stations de Saint-Louis, Podor et Matam de 1965 à 2014	224
Figure 84 : schéma de l'impact d'une couche d'aérosol désertique sur le rayonnement solaire et tellurique.....	228
Figure 85 : (a) Flux radiatif descendant solaire (bleu) et infrarouge (noir) et (b) Température du sol mesurées au sol à Niamey pendant la tempête de sable de mars 2006 durant l'expérience RADAGAST	231
Figure 86 : Forçage radiatif semi-direct en fonction du type de nuage (cumulus ou stratocumulus) et de sa position par rapport à la couche d'aérosol	235
Figure 87 : Schématisation de l'augmentation de la concentration en particules de poussières conduisant à l'augmentation du nombre de gouttelettes et la diminution de leur taille.....	237
Figure 88 : Schématisation de l'effet d'albédo (1 ^{er} effet indirect) et d'augmentation du temps de vie (2 nd effet indirect) des nuages.....	238
Figure 89 : Impact du réchauffement sur le vent thermique	243

Figure 90 : Répartition journalière de la visibilité horizontale < 10 km, 5 km et 1 km pour cause de la présence de lithométéores dans les stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1965-2014)	248
Figure 91 : Evolution de la fréquence (%) de la visibilité < 1 km, < 5 km, < 10 km pour raisons de présence de poussières désertiques au cours des différentes phases climatiques dans les stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1965-2014).....	250
Figure 92 : Evolution mensuelle de la visibilité (km) réduite pour cause de présence de lithométéore et fréquence (%) de la visibilité < 5 km aux stations de l'extrême Nord-Sénégal	252
Figure 93 : Rapport saisonnier visibilité < 5 km/visibilité < 10 km aux stations de l'extrême Nord-Sénégal de 1965 à 2014.....	254
Figure 94 : corrélation Visibilité horizontale réduite et concentration en PST (à gauche) et PM ₁₀ (à droite) aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1965-2014).....	259
Figure 95 : Evolution de la moyenne annuelle et moyenne centrée sur 5 ans de la visibilité réduite pour cause d'événements de lithométéores aux stations de l'extrême Nord-Sénégal de 1965 à 2014.....	261
Figure 96 : Résultats du test de BUISSHAND appliqué aux moyennes annuelles de la visibilité horizontale réduite pour cause de concentrations en particules lithométéoriques dans les stations de Saint-Louis (a), Podor (b) et Matam (c) de 1965 à 2014.....	265
Figure 97 : Activités de transport affectée lors de la réduction de la visibilité par les poussières désertiques ?	267
Figure 98 : Activités de commerce affectées lors de la réduction de la visibilité par les poussières désertiques ?	267
Figure 99 : Type d'affectation du transport et du commerce lors des événements de mauvaise visibilité par les poussières désertiques à l'extrême Nord-Sénégal.	268
Figure 100 : Mobilité affectée par la réduction de la visibilité ?	269
Figure 101 : Dépôt par sédimentation le long des parois des voies aériennes	275
Figure 102 : Dépôt par impaction inertielle	276
Figure 103 : Dépôt par interception	276
Figure 104 : Dépôt par diffusion	276
Figure 105 : Dépôt régional en fonction de la taille des particules et par type de respiration ..	277
Figure 106 : Composantes chimiques des poussières désertiques en suspension dans l'air à l'extrême Nord-Sénégal	292

Figure 107 : Variabilité annuelle de la fréquence des pathologies respiratoires imputables aux poussières désertiques aux niveaux des structures de Ndioum (toutes pathologies confondues), Podor (Bronchite + Pneumopathie), Saint-Louis (Bronchite + Pneumopathie) et Ourosogui (Broncho-Pneumopathie)	299
Figure 108 : variabilité saisonnière de la fréquence des pathologies respiratoires imputables aux poussières désertiques aux hôpitaux de Ndioum et Ourosogui	301
Figure 109 : Corrélation fréquences saisonnières Pathologies respiratoires/Poussières en suspension (a) ; Pathologies respiratoires/Niveau de concentration en PM ₁₀ des poussières en suspension (b).....	302
Figure 110 : Ellipses de Bois de la fréquence trimestrielle des pathologies imputables aux poussières aux hôpitaux d'Ourosogui (en haut) et Ndioum (en bas).....	304
Figure 111 : Fréquence par sexe des Bronchite et Pneumopathie dans l'extrême Nord-Sénégal	309
Figure 112 : Fréquence des bronchite et pneumopathie dans l'extrême Nord-Sénégal suivant les différentes classes d'âge.....	312
Figure 113 : taux de morbidité des populations les plus sensibles (enfants et personnes âgées) aux pathologies respiratoires	313

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif de l'approche méthodologique	34
Tableau 2 : Fréquence des vents 1984-2013 à la Station de Saint-Louis.....	76
Tableau 3 : Fréquences des Rhumbs (pourcentages des observations).....	77
Tableau 4 : Fréquence des vents 1984-2013 aux stations de Podor (en haut) et Matam (en bas)	78
Tableau 5 : Fréquences des Rhumbs (1984-2013) pour les stations de Podor et Matam	79
Tableau 6 : Fréquence des moyennes des températures aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam.....	91
Tableau 7 : Fréquence des températures par tranches de 1984-2013.....	94
Tableau 8 : Fréquences des observations par tranches de températures aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam	94
Tableau 9 : Pluviométrie moyenne mensuelle aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1984-2013).....	105

Tableau 10 : Variations de la pluviométrie mensuelle au cours des années extrêmes de 1984 à 2013 aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam.....	110
Tableau 11 : Pluviométrie annuelle et écarts à la moyenne aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1984-2013).....	112
Tableau 12 : corrélation r de Pearson hauteur d'eau annuelle/nombre de jours de pluie aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam sur la période 1965-2014	120
Tableau 13 : Estimation des émissions annuelles (en Tg/an) des principaux types d'aérosols	126
Tableau 14 : Gammes de concentration en masse et en nombre de l'aérosol dans des environnements typiques.....	128
Tableau 15 : Temps de résidence des différents types d'aérosols	135
Tableau 16 : Récapitulatif des émissions globales annuelles d'aérosols désertiques (en Tg/an) estimées à partir de différents modèles globaux.	141
Tableau 17 : Les émissions annuelles, le temps de résidence moyen et la charge moyenne en aérosols désertiques dans l'atmosphère.....	144
Tableau 18 : Exemple de rayons médians caractérisant les distributions granulométriques (en nombre) des aérosols désertiques obtenues par ajustement lognormale des observations issues de différentes stations nord africaines.....	147
Tableau 19 : Composition chimique moyenne des sols désertiques,	151
Tableau 20 : Moyennes saisonnières de l'albédo de simple diffusion dérivées des inversions de niveau 2.0 (algorithme version 2) des mesures photométriques du réseau AERONET/PHOTONS pour les sites en Afrique de l'Ouest	155
Tableau 21 : Indices de réfraction ($n + k \cdot 10^{-3}i$) des aérosols désertiques nord africains	158
Tableau 22 : Vitesse de friction seuil (en m/s) pour différents types de surface sec.	162
Tableau 23 : Fréquences annuelles de jours de lithométéores dans la station de Saint-Louis (1965-2014).....	208
Tableau 24 : Fréquences annuelles de jours de lithométéores dans la station de Podor (1965-2014).....	208
Tableau 25 : Fréquences annuelles de jours de lithométéores dans la station de Matam (1965-2014).....	208
Tableau 26 : Relation entre la visibilité horizontale (VV en Km) et la concentration en PST ou PM ₁₀ (C en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).....	217
Tableau 27 : Fréquence des concentrations journalières en PST à station de Saint-Louis de 1965 à 2014.....	217

Tableau 28 ; : Fréquence des concentrations journalières en PST à la station de Podor de 1965 à 2014.....	217
Tableau 29 : Fréquence des concentrations journalières en PST à la station de Matam de 1965 à 2014.....	217
Tableau 30 : Fréquence des concentrations journalières en PM ₁₀ aux stations de l'extrême Nord-Sénégal de 1965 à 2014.....	219
Tableau 31 : répartition journalière (%) de la visibilité < 10 km, < 5 km et < 1 km pour raisons de la présence d'aérosols désertiques aux stations de l'extrême Nord-Sénégal de 1965 à 2014	247
Tableau 32 : Fréquence (%) de la réduction de la visibilité à moins de 10 m, 5 km et 1 km pour cause de lithométéores aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam aux cours des phases climatiques de 1965 à 2014	249
Tableau 33 : variation du Rapport saisonnier VV< 5 km/ VV< 10 km à la station de Saint-Louis sur la série 1965-2014	255
Tableau 34 : variation du Rapport saisonnier VV< 5 km/ VV< 10 km à la station de Podor (33) sur la série 1965-2014	255
Tableau 35 : variation du Rapport saisonnier VV< 5 km/ VV< 10 km à la station de Matam sur la série 1965-2014	256
Tableau 36 : Visibilités-limites pour décrire les types de lithométéores, sources et régions d'études	258
Tableau 37 : Récapitulatif des différents mécanismes d'élimination par région respiratoire ...	282
Tableau 38 : Nombre annuel d'épisodes de concentration en PM ₁₀ dans les stations de l'extrême Nord-Sénégal de 1965 à 2014	290
Tableau 39 : Taux de fréquence des pathologies respiratoires dominantes suivant les stations	297
Tableau 40 : Régularité des principales maladies consultées à l'hôpital de Ndioum	305
Tableau 41 : Morbidité des pathologies respiratoires imputables à l'inhalation des particules de poussières à l'Hôpital de Ndioum	306
Tableau 42 : Morbidité des pathologies respiratoires imputables à l'inhalation des particules de poussières au District de Saint-Louis	306
Tableau 43 : Fréquence des Bronchites et Pneumopathies par sexe de 2011 à 2015 à l'extrême Nord-Sénégal.....	308

Avant-propos

Cette thèse marque à la fois la continuité de notre TER (Travail d'étude et de recherche) entamé depuis le master dans le cadre de notre mémoire qui portait sur « Étude de l'évolution du climat à Saint-Louis ; analyse de la variabilité des aérosols : le cas des brumes sèches » et l'élargissement de notre thématique et champ de recherche. Élargissement de notre thématique de recherche d'autant qu'ici, l'étude porte sur l'ensemble des d'aérosols désertiques autrement dit tous les types de lithométéores (*brumes sèches, brumes de poussières, chasse-sables et tempête de poussières*) qui caractérisent l'extrême Nord-Sénégal ; élargissement de notre champ de recherche puisqu'en plus de la station de Saint-Louis, ce travail s'étale sur toute la partie extrême Nord-Sénégal à travers aussi les stations de Podor et Matam.

Le but de ce travail est d'abord de suivre l'évolution de la fréquence des lithométéores dans cette zone purement sahélienne de l'extrême Nord-Sénégal suivant différentes séquences temporelles sur un demi-siècle (50 ans) d'observation. Cette thèse se veut par la suite, d'évaluer les impacts de ces types de temps dans cette bande septentrionale du pays à travers trois dimensions : dimension physico-environnementale (*effet radiatif et conséquence sur la visibilité horizontale*), dimension sociale (*conséquences sur les activités socio-économiques et sur la mobilité quotidienne des populations*), dimension humaine (*conséquences sanitaires*). Cette analyse 3D fonde d'ailleurs tout l'intérêt de ce travail.

Cette thèse réalisée au sein du laboratoire Leïdi « dynamiques des territoires et développement » est issue de la Formation Doctorale de Géographie avec comme parcours Ecosystème et Environnement, (Option : Climatologie). Elle s'inscrit dans la thématique de l'École Doctorale (ÉD) des Sciences de l'Homme et de la Société (SHS) de l'Université Gaston Berger de Saint-Louis.

*« Que la force me soit donnée de supporter ce qui ne peut être
changé et le courage de changer ce qui peut l'être, mais
aussi la sagesse de distinguer l'un de l'autre »*

Marc-AURELE, IIe siècle après J.-C.

Introduction Générale

La compréhension des systèmes climatiques et météorologiques et de leurs changements mis en évidence lors des dernières décennies fait partie des enjeux environnementaux les plus importants auxquels nos sociétés devront faire face. À l'heure où une grande partie de l'humanité est potentiellement exposée aux effets majoritairement néfastes (tempêtes, cyclones, sécheresses, canicules, épisodes de pollution de l'air...), de ces changements climatiques, la mise en place de politiques de développement durable semble inévitable mais nécessite une meilleure connaissance des problèmes auxquels nous sommes confrontés. C'est pour cela que la communauté scientifique cherche à affiner sa connaissance des mécanismes physico-chimiques qui ont lieu dans l'atmosphère.

La composition de l'atmosphère terrestre est un mélange complexe où sont présentes des espèces chimiques sous forme gazeuse mais aussi sous forme de particules liquides ou solides en suspension. L'aérosol atmosphérique est défini comme l'ensemble des particules solides, liquides ou mixtes en suspension dans l'air et joue un rôle important sur la qualité de l'air et sur la régulation du système climatique (IPCC, 2007). L'étude des aérosols se réalise à différentes échelles (**aux échelles régionales et globales, aux échelles locales**) selon leurs répercussions ou leurs influences :

Aux échelles globales et régionales, ces aérosols sont étudiés pour **leurs influences sur le climat**. Les aérosols altèrent de manière directe le bilan radiatif terrestre en absorbant et/ou en diffusant le rayonnement solaire entrant et les radiations thermiques sortantes (CHARLSON et al., 1991 ; KAUFMAN et al., 2002). Indirectement, les particules agissent sur le climat en jouant le rôle de noyaux de condensation pour la vapeur d'eau et en modifiant les propriétés des nuages comme l'albédo (TWOMEY, 1974) ou leur temps de vie (ALBRECHT, 1989 ; LOHMANN et FEICHTER, 2005). A ces échelles, la matière particulaire est également observée pour ses répercussions sur la capacité oxydante de l'atmosphère. Les réactions hétérogènes à la surface ou au sein des particules modifient la composition chimique de la phase gazeuse.

Aux échelles locales, les aérosols sont étudiés pour **leurs répercussions nocives sur la santé humaine**. Les études épidémiologiques ont révélé une connexion claire entre les hauts niveaux de particules enregistrés et les effets sur la santé de la population, comme la mortalité ou les problèmes respiratoires et cardiovasculaires (DOCKERY et al., 1993). A ces échelles, ces

aérosols sont également observés pour leurs effets phyto-toxiques sur les écosystèmes. Le dépôt ou la pénétration des particules sur ou au sein des végétaux altèrent les principaux processus physiologiques des plantes et sont susceptibles de réduire significativement la productivité des cultures agricoles (CHAMEIDES et al., 1999). Les aérosols sont aussi considérés aux petites échelles pour leurs impacts socio-économiques. Une réduction notable de la visibilité est généralement associée à des épisodes intenses de concentration particulaire de par les propriétés des aérosols à diffuser et/ou à absorber le rayonnement solaire (WU et al., 2005). Le patrimoine architectural est quotidiennement dégradé par les retombées de particules sur les monuments et bâtiments (LEFÉVRE et al., 2002).

Outre les échelles globales, régionales ou locales, les aérosols sont également étudiés selon **leur typologie**. Cette dernière est évidemment différente d'une région du globe à une autre, de par ses sources d'émissions et son climat. IL y apparait qu'en Afrique au Nord de l'Equateur et dans les zones désertiques, sont essentiellement émis les lithométéores connus encore sous le nom d'aérosols désertiques ou poussières minérales, le Sahara étant la source la plus forte. Les estimations actuelles suggèrent que ces aérosols constituent, avec une contribution d'environ 40%, le deuxième apport en masse (environ 2000 Mt/an) au flux total annuel d'émission d'aérosols naturels, derrière les sels de mer. Cependant les incertitudes sur ces estimations des flux massiques demeurent considérables.

Le terme « aérosols désertiques (lithométéores) » ou « poussières minérales » désigne ici les aérosols provenant de l'érosion éolienne des zones arides et semi-arides. Il s'agit d'un processus très majoritairement naturel (conséquence de la friction exercée par le vent sur une surface érodable). Néanmoins, comme le soutient PIERRE (2010) lorsqu'une activité humaine modifie de façon directe ou indirecte les propriétés de la surface (par exemple l'agriculture ou le pâturage), une contribution anthropique à l'émission d'aérosols minéraux peut apparaître et doit alors être prise en compte.

Comme ces aérosols sont d'origine primaire, leur diamètre à l'émission est généralement compris entre quelques dixièmes et plusieurs dizaines de microns (voir par exemple D'ALMEIDA et SCHÜTZ, 1983). En regard des autres particules présentes dans l'atmosphère, ce sont donc des particules relativement grossières, qui contribuent essentiellement au mode micronique des aérosols atmosphériques.

Comme les autres types d'aérosols, les aérosols minéraux ont différents impacts climatiques, biogéochimiques et sanitaires au cours des étapes de leur cycle de vie. Néanmoins, de par leur

composition, leur taille, leur abondance ou la localisation de leurs sources, les effets induits par la présence de ces aérosols minéraux présentent des spécificités notables.

En plus de leur aspect spatial et de leur typologie, les aérosols désertiques sont étudiés suivant leur **échelle temporelle** :

Evidemment, tous ces impacts sont dépendants au premier ordre des concentrations d'aérosols minéraux présents dans l'atmosphère. Les émissions de poussières minérales sont par nature un phénomène sporadique qui ne se produit que lorsque des vitesses de vent importantes (en tous cas supérieures à 7 m.s^{-1}) sont observées. Lorsque l'on intègre ces événements sporadiques sur des échelles de temps de quelques années, on note que les quantités d'aérosols minéraux en suspension dans l'atmosphère présentent des cycles saisonniers marqués. C'est le cas, par exemple, en zone sahélienne où le maximum de concentration au sol est mesuré au printemps en raison d'un intense transport d'aérosols sahariens, alors que le minimum de concentration coïncide avec le maximum de précipitation en saison de mousson (MARTICORENA et al., 2010).

A des échelles de temps plus longues, par exemple décennales, les contenus atmosphériques en aérosols minéraux peuvent être mis en relation avec des variations climatiques régionales, périodiques ou non. Celles-ci affectent le contenu en poussières, soit en modifiant les propriétés de la surface, soit en modifiant les conditions de leur transport et de leur dépôt.

Les phases de sécheresse qu'a connues le Sahel sont un exemple typique de situation où des variations importantes sur des échelles de temps pluriannuelles du contenu en poussières ont été observées, en lien avec des modifications significatives des conditions de précipitation et des propriétés des surfaces en zones sources. Ainsi, une augmentation très importante du nombre de jours de brume sèche a été enregistrée par exemple à Gao au Mali, de façon concomitante à une diminution continue du volume de précipitations lors de la période sèche des années 1970-1980. N'TCHAYI et al. (1997) en concluent que, durant de telles périodes de sécheresse, en raison de la diminution de la couverture végétale, le Sahel pourrait représenter une source importante d'émission d'aérosols minéraux.

PIERRE (2010) note qu'à une échelle de temps encore plus grande, une corrélation peut être observée entre le contenu en particules minérales dans l'atmosphère et l'alternance des cycles glaciaires et interglaciaires. PETIT et al. (1999) semblent confirmer cette avancée en soutenant que d'après des mesures effectuées dans des carottes glaciaires et des sédiments marins, les dépôts

d'aérosols minéraux sont nettement plus élevés en période glaciaire qu'en période interglaciaire. MAHOWALD et al. (1999) ; CLAQUIN et al. (2003) de conclurent que cela est vraisemblablement dû aux effets combinés d'une extension des zones arides émettrices, d'une diminution des précipitations et donc de l'abatement des particules, et d'une circulation atmosphérique renforcée en période glaciaire.

Ces résultats illustrent l'importance de considérer les aérosols désertiques surtout en notre zone sahélienne et de mieux quantifier l'évolution de leur fréquence et d'étudier leurs impacts climatiques, environnementaux et sanitaires.

Chapitre I : Contexte scientifique, Cadre théorique et conceptuel, Méthodologie et Climatologie de l'Afrique de l'Ouest

1. Contexte scientifique de l'étude

À la fin des années 1960 une sécheresse climatique sans précédent a frappé toute la zone sahélienne de l'Afrique de l'Ouest. Toute la communauté scientifique à l'instar du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) s'accorde aujourd'hui pour admettre que l'une des conséquences majeures de cette sécheresse au Sahel est l'évolution à la hausse des fréquences d'aérosols désertiques en particulier les lithométéores, notamment dans sa partie sud. Cette hausse des phénomènes d'aérosols laisse apparaître, depuis une quarantaine d'années des inquiétudes qui n'ont jamais été autant sérieusement manifestées auparavant.

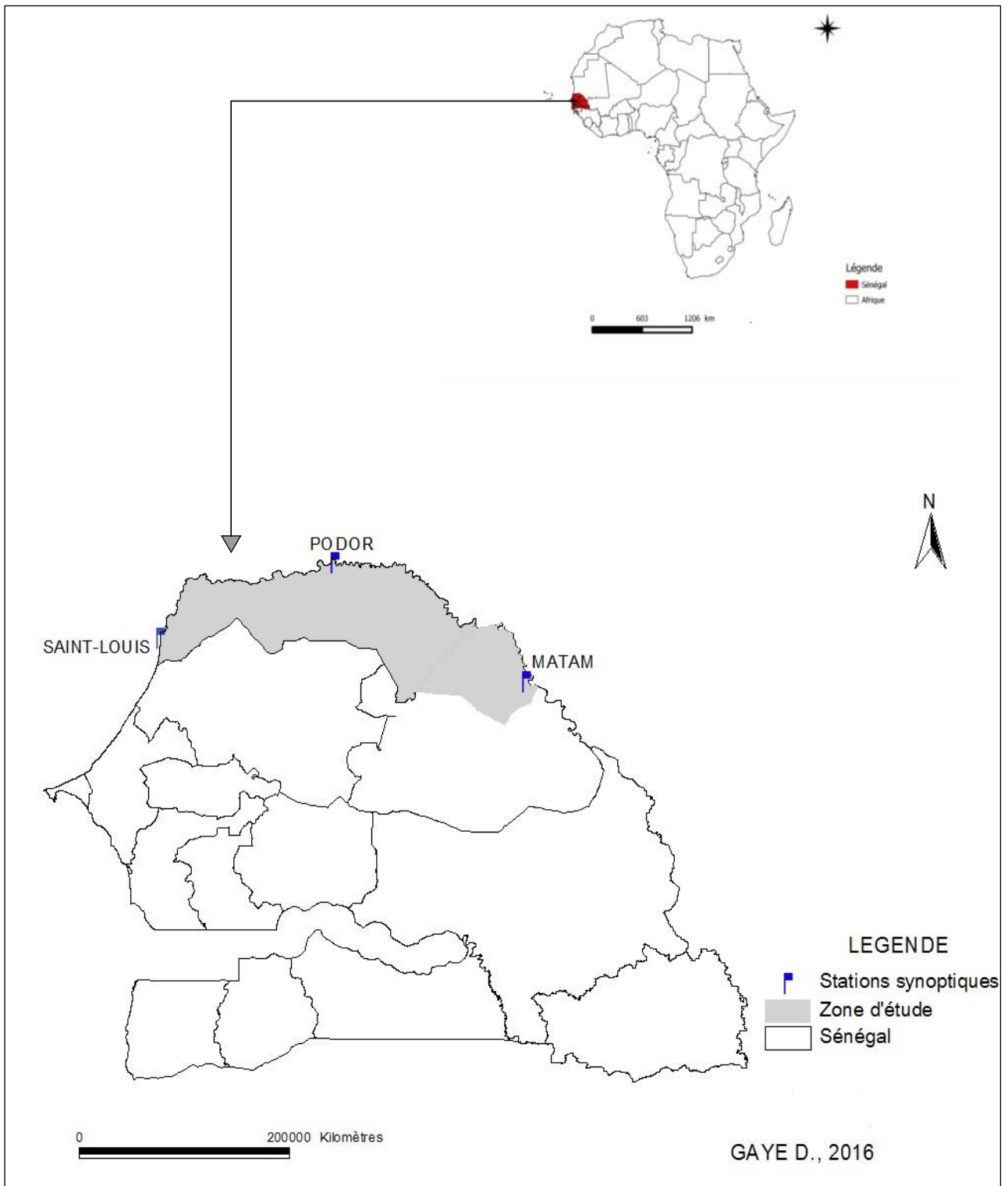
En effet la question principale que se posent le monde scientifique et les chercheurs dans le domaine est : *quelles conséquences ont les aérosols sur l'équilibre atmosphérique de la planète ?* Bien qu'elles soient de taille micronique, les trois milliards de tonnes (DUCE 1995, RAMASWAMY et al. 2001) de particules injectées dans l'atmosphère chaque année jouent un rôle important sur le bilan énergétique, le cycle de l'eau et l'équilibre dynamique de l'atmosphère (CLAQUIN et al. 1998, MYHRE et al. 2003, HIGHWOOD et al. 2003, TANRE et al. 2003, GRINI et al. 2006, MILTON et al. 2008, SLINGO et al. 2008, CAVAZOS et al. 2009, MALLET et al. 2009). Ils absorbent et diffusent les rayonnements solaires et telluriques, entraînent une modification du taux d'échauffement atmosphérique et peuvent servir de noyaux de condensation. Ils constituent ainsi un des agents cruciaux du changement climatique (RAMASWAMY et al. 2001, FORSTER et al. 2007). Cependant les méthodes de caractérisation des aérosols par télédétection (satellitaire ou aéroportée) n'ont cessé de s'améliorer grâce à la mise en œuvre de nouveaux instruments et aux efforts considérables de la communauté scientifique du fait que de grandes incertitudes demeurent encore sur l'estimation de ces impacts à cause d'une connaissance incomplète des propriétés physiques et chimiques de ces aérosols ainsi que de leur répartition spatiale (ANDERSON et al., 2003). Cette méconnaissance est aujourd'hui une des plus grandes sources d'incertitude pour la compréhension du climat (GIEC, 2001).

Dans son rapport de 2007 la GIEC soulignait que la poursuite de l'étude et du suivi des aérosols à grande échelle est donc primordiale pour pouvoir comprendre le comportement actuel du climat et anticiper son évolution.

Outres ces incertitudes quant à leurs effets radiatifs, d'énormes interrogations ont découlé sur ce que l'évolution des phénomènes d'aérosols pourrait engendrer sur l'environnement et sur la santé des populations. Ces inquiétudes ont conduit à des travaux d'étude et de recherche qui ont été et continuent d'être menés par des équipes de recherche, des spécialistes, dans le but d'analyser et d'évaluer les impacts environnementaux et sanitaires que ces phénomènes d'aérosols sont susceptibles d'engendrer. A noter que jusqu'ici les aspects environnemental et sanitaire des aérosols sont relégués au second plan au profit du cadre purement radiatif.

D'une part cette thèse s'inscrit dans la perspective de suivi des aérosols à grande échelle afin de comprendre le comportement du climat présent à travers l'étude de l'évolution des fréquences et l'estimation des différents effets radiatifs de ces aérosols. D'autre part elle s'inscrit dans le contexte d'évaluation des impacts environnementaux notamment sur la visibilité horizontale ainsi des impacts socio-économiques qui découlent de ceux-ci à l'extrême nord Sénégal et de détermination des conséquences sur la santé des populations de cette zone. En effet allant de Saint-Louis à Matam, l'extrême Nord-Sénégal (couvrant dans le cadre de cette étude les stations synoptiques de Saint-Louis Podor et Matam) est la première partie du pays réceptrice des influences climatiques du Sahara et du Sahel. Avec les hausses de fréquences des aérosols solides, elle ne déroge pas à la règle. Ici aussi l'une des conséquences majeures que la grande sécheresse a léguées est la hausse marquée des phénomènes des lithométéores.

Figure 1 : Localisation de la zone étudiée



2. Cadre théorique

2.1. Problématique de l'étude

Le thème sur la variabilité des paramètres climatiques dans leur généralité semble être l'une des questions les plus inquiétantes dont le monde ne s'est jamais soucié jusqu'ici. L'évolution du climat général a fini de faire l'unanimité de la quasi-totalité des scientifiques. Cette évolution s'observe dans toutes les régions du globe notamment en zone sahélienne où les conséquences sur l'environnement, sur les écosystèmes et sur les activités socio-économiques en général sont de plus en plus fréquentes et de plus en plus menaçantes.

Si la sécheresse des années 1970/1980 ne serait pas la cause majeure la plus absolue de cette péjoration des paramètres climatiques au sahel, elle est tout de même celle la plus retenue.

À l'instar de tous les pays Ouest Africains au climat Soudano-sahélien, le Sénégal est soumis aux mutations induites par cette grande sécheresse, mutations dont les impacts environnementaux et climatiques (dynamique éolienne, déficits pluviométriques, hausse spectaculaire des observations d'aérosols désertiques, etc.) n'ont jamais été autant notés auparavant. Et c'est au nord du pays que ces impacts semblent être plus manifestes.

Allant de Saint-Louis à Matam, l'extrême Nord-Sénégal se situe entièrement dans la partie sahélienne du pays. De par sa position géographique, elle fait partie des écosystèmes les plus représentatifs et les plus variés en terme de micro-climats de la grande sous-région sahélienne de l'Afrique de l'Ouest car étant à la fois sous l'influence de plusieurs types de masses d'air. Sa particularité réside dans sa diversité climatique. En effet si sa partie ouest se distingue par son climat doux avec des températures dépassant très rarement la barre des 30°, son centre et surtout son extrémité est sont en grande partie sous l'influence de l'Alizé continental (Harmattan) chaud et sec engendrant des températures maximales pouvant allées jusqu'à plus de 40°. C'est du côté pluviométrique où résiderait l'homogénéité de la Région. Cette partie du Sénégal se caractérise dans sa généralité par sa faible hauteur des précipitations moyennes annuelles avec une alternance d'années excédentaires et déficitaires. Ces années déficitaires se succèdent beaucoup plus régulièrement que celles excédentaires et cela depuis quelques décennies (GAYE, 2013). En effet comme dans toute la zone sahélienne de l'Afrique de l'Ouest, l'extrême Nord-Sénégal est loin d'être épargné des conséquences climatiques de la sécheresse que connaît le Sahel depuis une quarantaine d'années. Même s'il fait partie des régions du pays qui connaissent depuis toujours les moyennes pluviométriques les plus faibles, les impacts de la grande sécheresse y sont néanmoins très constatables et considérés. Parallèlement à ce déficit de la pluviométrie avec

un cumul annuel parfois inférieure à 100mm (exemples : Saint-Louis en 1992 avec 58,6mm ; Podor en 1983 et 1984 avec respectivement 76,3 et 65,6mm), des épisodes d'aérosols désertiques deviennent depuis lors de plus en plus manifestes et s'étalant sur toute les saisons de l'année.

L'une des motivations principales des travaux réalisés dans le domaine des aérosols est la nécessité de comprendre et d'évaluer leur impact sur le climat de notre planète (KING et al., 1999) mais aussi leurs conséquences sur l'environnement et sur la santé des populations. En effet, par l'intermédiaire de différents mécanismes physiques et chimiques, ces particules ont un impact important sur le bilan radiatif terrestre et donc sur le changement climatique (SCHWARTZ et al., 1995, YU et al., 2006). De grandes incertitudes demeurent cependant sur l'estimation de cet impact à cause d'une connaissance incomplète de leurs propriétés physiques et chimiques ainsi que de leur répartition spatiale (ANDERSON et al., 2003). Cette méconnaissance est aujourd'hui une des plus grandes sources d'incertitude pour la compréhension du climat (GIEC, 2001). Cependant, les conclusions du GIEC montrent que l'impact radiatif des aérosols anthropiques est du même ordre de grandeur que celui des gaz à effet de serre d'origine humaine et par conséquent contribuerait au réchauffement de l'atmosphère.

Sur le plan environnemental et sanitaire des populations, d'énormes interrogations ont découlé sur ce que l'évolution des phénomènes d'aérosols pourrait en engendrer. Ces inquiétudes ont conduit à d'énormes travaux d'étude et de recherche qui ont été et continuent d'être menés notamment par le GIEC mais aussi par des équipes de recherche, des spécialistes dans le but de définir les conséquences environnementales et les effets sur la santé humaine que ces phénomènes d'aérosols sont susceptibles d'engendrer.

L'ensemble de ces travaux s'accorde pour reconnaître que ces impacts environnementaux se traduisent entre autres par le dépôt de particules sur les sols et la végétation et que les conséquences peuvent à la fois être positives que négatives. Mais l'impact environnemental majeur est la réduction de la visibilité horizontale qui constitue aussi un méfait de lourdes conséquences notamment sur le quotidien des populations ainsi que sur les activités socio-économiques de celles-ci.

Sur le plan sanitaire des résultats intéressants ont découlé des études épidémiologiques comme celles récemment effectuées aux Etats-Unis (ANDERSON, 2000). Ces dernières ont conduit l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) à estimer qu'une augmentation moyenne annuelle de $10\mu\text{g m}^{-3}$ d'aérosols de diamètre inférieur à $10\mu\text{m}$ (PM_{10}) peut induire entre 5 et 10% de mortalité supplémentaire. Des études toxicologiques indiquent que les particules fines

représenteraient un risque considérable, ce qui est d'ailleurs confirmé par les études épidémiologiques récentes (LADEN et al., 2006). Par ailleurs sur le tableau des maladies fréquentes dressé en Afrique, une bonne part de celles concernant les pays sahéliens aurait un rapport direct avec les poussières désertiques. Il s'agit entre autres de la **Pneumopathie**, de la **Bronchite**, de la **Toux/Rhume**, de l'**Asthme** et autres **Pathologies respiratoires...**

De ce fait et en raison de ces conséquences multiples et variées, la poursuite de l'étude et du suivi des aérosols à grande échelle est donc primordiale pour comprendre le comportement actuel du climat mais aussi la nature des conséquences de la fréquence à la hausse des phénomènes d'aérosols sur l'environnement et sur la santé des populations afin de permettre aux populations locales et aux décideurs d'anticiper les éventuelles conséquences sur les milieux et sur les populations, et ainsi définir des politiques stratégiques de prévention et/ou d'adaptation durables.

2.2 La question de recherche

La combinaison de l'ensemble des inquiétudes manifestées à travers les interrogations précédemment dégagées nous amène à formuler une question centrale de recherche : ***Comment la fréquence des aérosols désertiques évolue-t-elle dans l'extrême Nord-Sénégal et qu'elles en sont les impacts ?***

2.3 Enjeux et Objectifs de la Thèse

L'intérêt scientifique grandissant pour les aérosols est motivé avant tout par les craintes quant à leurs effets sur la santé publique et le climat terrestre, mis en évidence lors de nombreuses études scientifiques.

A l'échelle globale et régionale, les aérosols sont au cœur des préoccupations actuelles sur le changement climatique. Les études récentes ont démontré que la présence d'aérosols dans l'atmosphère modifiait de façon importante le bilan radiatif terrestre, soit en augmentant directement la quantité de lumière réfléchie vers l'espace, soit en intervenant indirectement dans la formation des nuages et des précipitations.

Au niveau local, les aérosols sont reconnus pour leur impact sur la visibilité, sur le sol et la végétation. Ils y sont responsables des épisodes de pollution particulaire ayant des répercussions sur la qualité de l'air, et par conséquent sur la santé humaine. De nombreuses études épidémiologiques confirment l'existence d'un lien fort entre les concentrations en aérosol et l'augmentation des maladies respiratoires et cardiovasculaires observée ces dernières années.

De ces constats et avancées scientifiques, l'étude de l'évolution des fréquences d'aérosols et de leurs conséquences devient un enjeu majeur tant du point de vue du questionnement scientifique sur le climat futur (long terme) que du point de vue du grand public et des décideurs politiques vis à vis des questions environnementales et de santé humaine (court et moyen terme).

L'objectif de cette thèse est double :

- Premièrement, il s'agit d'une part d'étudier l'évolution des fréquences d'aérosols à l'extrême Nord du Sénégal et d'analyser leur variabilité à différents pas de temps ; d'autre part mettre en évidence les différents effets radiatifs que les phénomènes d'aérosols sont susceptibles d'engendrer. Le but est de permettre d'avoir une idée quant à leur éventuelle part de responsabilité sur l'état actuel du climat et de leur influence sur la pluviométrie de la région.

- Secundo, d'une part, du fait que les aérosols sont reconnus pour leurs effets sur l'environnement à travers leur influence sur la visibilité horizontale, il est question ici d'évaluer le degré de réduction de la visibilité horizontale par les poussières désertiques et d'étudier les impacts socio-économiques qui découlent de celle-ci aux principales stations de notre zone d'étude. D'autre part il s'agit à travers l'analyse chimique des particules des poussières désertiques en suspension d'étudier la toxicité des lithométéores mais également de répertorier à travers les registres des principales structures et services de santé les différentes pathologies respiratoires susceptibles d'être causées et/ou exacerbées par des particules de poussières désertiques respirables. Le but est de comprendre les méfaits socio-environnementaux de la hausse de fréquence des lithométéores dans la région afin de permettre aux populations locales et décideurs politiques d'anticiper sur ce que pourraient être les conséquences sur les milieux et sur les populations, et ainsi définir des politiques stratégiques d'adaptation durables.

2.4. Justification et intérêt du sujet

Notre sujet intitulé « *Fréquences des aérosols désertiques dans l'extrême Nord-Sénégal (stations de Saint-Louis, Podor et Matam) : effets radiatifs, conséquences sur la visibilité horizontale et impacts sanitaires* » trouve sa justification d'une part dans le fait que comme partout au Sahel, l'extrême Nord-Sénégal est fortement marquée par une fréquence des phénomènes d'aérosols désertiques. Qu'il s'agisse entre autres de brumes sèches, de chasses sable, de brumes de poussières ou de tempêtes de sable, le nombre de jour de présence de ces lithométéores ainsi que leur durée et leur persistance connaissent dans cette région du Sénégal une croissance menaçante jamais égalée avant les années de la grande sécheresse climatique sahélienne. Si jadis les quelques manifestations de ces phénomènes d'aérosols ne se notaient dans

cette zone qu'en saison sèche, la situation semble depuis quelques décennies s'étaler petit à petit sur les mois humides de l'année avec toutefois une variété typologique apparente.

D'autre part l'une des conclusions faites et par le GIEC et par des équipes de recherche ainsi que des spécialistes dans le domaine est qu'en plus de leurs impacts radiatifs sur l'atmosphère, les aérosols sont reconnus pour avoir une influence non moins importante sur la mousson alors que nous savons que c'est cette dernière qui est responsable de la quasi-totalité des pluies au Sahel et donc à l'extrême Nord-Sénégal.

En dehors de ces aspects purement climatiques, notre sujet trouve son intérêt dans son cadre socio-environnemental. En effet face à une population aussi vulnérable que celle de l'extrême Nord-Sénégal, les phénomènes d'aérosols ont depuis des décennies été au cœur des maladies parmi les plus manifestes en cette zone. Du fait de cette situation inquiétante des fréquences de ces aérosols et les conditions sociales des populations en dégradation continue, il apparaît intéressant de mener des recherches sur cette question qui jusqu'ici reste très peu évoquer pour ne pas dire qu'elle est quasiment ignorée par nos équipes de recherche. Sur le plan environnemental, les aérosols sont reconnus pour leur action sur la visibilité horizontale, d'ailleurs cette dernière est le principal indicateur de la présence d'aérosols. Avec aujourd'hui une réduction de la visibilité très souvent notée dans nos régions, réduction de la visibilité qui elle même source d'importants impacts sur le quotidien des populations ainsi que sur leurs activités socio-économiques, il est d'un intérêt capital de s'interroger sur cette thématique.

2.5. Hypothèses de recherche

L'organisation d'un travail de recherche se situe autour d'une ou de plusieurs **hypothèse (s)** pour la raison qu'elles procurent à la recherche un fil conducteur particulièrement efficace. Ainsi partant de ce qui a été souligné dans la problématique, nous avançons **l'hypothèse principale suivante** : d'une fréquence importante et variée, les aérosols désertiques sont sources d'énormes conséquences physiques et humaines à l'extrême Nord-Sénégal. Cette hypothèse principale peut être scindée en quatre hypothèses secondaires :

Hypothèse 1 : la fréquence des lithométéores, en terme du nombre de jours de présence et en termes de niveaux de concentrations en particules est importante et varie à différents pas de temps aux stations de l'extrême Nord-Sénégal.

Hypothèse 2 : les aérosols désertiques sont sources de divers effets radiatifs et affectent la dynamique atmosphérique dans l'extrême Nord-Sénégal.

Hypothèse 3 : les événements de poussières désertiques réduisent la visibilité horizontale et cette réduction affectent fortement le quotidien des populations ainsi que leurs activités socio-économiques dans l'extrême Nord-Sénégal.

Hypothèse 4 : les pathologies respiratoires en lien direct et/ou indirect avec les poussières respirables sont très fréquentes et régulières dans cette région extrême Nord-Sénégal.

La vérification de ces hypothèses nécessite une approche méthodologique adaptée en vue de leur confirmation, de leur infirmation ou de leur relativisation.

3. Analyse conceptuelle

3.1. Le concept d'aérosol

Le terme aérosol a été utilisé pour la première fois à la fin de la Première Guerre mondiale pour décrire des nuages de particules microscopiques et submicroniques utilisées à des fins militaires (guerre chimique et bactériologique, écran de particules pour affecter la visibilité et masquer les troupes en opération). Il a été introduit par analogie avec celui d'hydrosol, qui correspond à des particules en suspension dans un liquide.

Aérosol est un terme générique désignant tout système de particules solides ou liquides en suspension dans un milieu gazeux ; ce dernier étant l'air lorsque l'on parle de l'aérosol atmosphérique (FRIEDLANDER, 1977 cité par FALLY¹). Plusieurs définitions sont données à cette notion d'aérosol atmosphérique. TOMBETTE² entend d'aérosol atmosphérique, toute particule en suspension dans l'air, c'est-à-dire la phase condensée sous forme liquide et solide, à l'exclusion de celle liée à l'eau. Il s'agit d'un système complexe polydispersé et inhomogène (c'est-à-dire contenant des particules de taille et de composition différentes), formé d'une mixture de particules originaires de sources diverses et ayant des comportements différents. L'aérosol atmosphérique est instable ; sa composition, sa distribution de taille et la phase dans laquelle se trouvent les particules (liquide, solide) sont fortement variables dans le temps et dans

¹ FALLY S. 2001, *Composition, propriétés et comportement des aérosols atmosphériques, des brouillards, des rosées et des pluies en région bruxelloise*, Thèse de doctorat, Sciences de la Terre et de l'Environnement, Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, 418p.

² TOMBETTE M., 2007, *Modélisation des aérosols et de leurs propriétés optiques sur l'Europe et l'Île de France : validation, sensibilité et assimilation de données*. Thèse de doctorat, spécialité sciences et techniques de l'environnement, Ecole nationale des ponts et chaussées, 274p.

l'espace (SPURNY, 1987). Sa composition est en effet continuellement modifiée par des processus physiques et chimiques de transformation et d'élimination.

Différents termes sont utilisés pour décrire des types de particules d'aérosols, et cela suivant la forme, le comportement, l'origine des particules, etc., mais cette terminologie n'est pas toujours respectée³. Les poussières (*dust* en anglais) sont des particules solides, le plus souvent supérieur à 1µm, mises en suspension par des procédés mécaniques tels que l'érosion éolienne (exemples : tempête de sable, cendres, poussière de route, pollens). Le terme « fumée » (en anglais *smoke* ou *fume*) s'applique à des particules en général plus fines provenant d'une combustion. En anglais « *fume* » est réservé à des particules plus fines provenant de la condensation d'une vapeur. Les brouillards (en anglais *fog* ou *smog*) sont formés par une suspension de particules liquide résultant de la condensation d'une vapeur, ou encore d'une pulvérisation. Dans l'atmosphère près du sol on utilise le terme brouillard lorsque la visibilité est réduite à moins de 1 kilomètre. Les particules ont une dimension supérieure à 5µm.

Les brumes (*mist* ou *haze* en anglais) sont constituées par des gouttelettes plus petites ou par des particules plus solides. Elles correspondent à un trouble de visibilité moins important que les brouillards, sauf cas exceptionnel de brume sèche dans les régions désertiques ou semi désertiques. Notons que la langue anglaise, plus riche dans ce domaine, divise les brumes en *haze* (que l'on peut encore traduire par voile atmosphérique) et *mist*, et les brouillards en *fog* et *smog*. Ce dernier est un mélange de fumées, de polluants et de particules d'eau, que l'on trouve dans les villes polluées.

Selon FONTAN⁴ d'autres terminologies sont utilisées dans le domaine des aérosols. Les PM (Particules de Matière) 10, PM 2,5 et PM 1) sont respectivement des particules dont la dimension est inférieure à 10 µm, 2,5 µm et 1 µm. Ce sont des mesurées par leur masse. Elles proviennent de sources diverses : l'érosion éolienne, l'érosion marine, l'activité industrielle qui rejettent directement des particules à la suite de combustion incomplètes, mais aussi de procédés divers de fabrication.

Les aérosols sont donc par définition, les particules liquides ou solides en suspension dans l'air (exception faite des hydrométéores). Leurs diamètres typiques couvrent quatre à cinq ordres de grandeur (SEINFELD et PANDIS, 2006), de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres. Ils présentent un large éventail de compositions chimiques et de formes, qui

³ FONTAN J., 2004, *Les Pollutions de l'air, les connaître pour les combattre*, paris, vuibert nouvelle édition, 211p.

⁴ Op. cit.

dépendent de leurs origines et de leur évolution dans l'atmosphère. Dans de nombreux domaines, les aérosols d'environ 0.05 à 10 µm de diamètre présentent le plus grand intérêt. Par exemple, c'est pour cette gamme de taille que les particules interagissent le plus efficacement avec le rayonnement électromagnétique solaire et tellurique.

3.2. Le concept de lithométéore

Les brumes sèches, brumes de poussières, chasse-sable (poussière) et tempêtes de poussières (sables) sont les principaux aérosols désertiques caractérisant l'extrême Nord-Sénégal. Ces types de temps sont plus connus sous une terminologie générale "Lithométéore".

Lithométéore découle du grec, *lithos* "Pierre" et *meteôros* "élevé dans les airs". Connue en anglais sous le terme "lithometeor", un lithométéore est défini par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) dans l'Atlas international des nuages (1973) comme « un météore consistant en un ensemble de particules dont la plupart sont solides et non aqueuses et qui se trouvent plus ou moins en suspension dans l'atmosphère ou soulevées par le vent ». Ces aérosols désertiques sont de véritables types de temps caractéristiques des régions arides et semi-arides. Certes, ces lithométéores observés à l'extrême Nord-Sénégal ont connu, comme d'ailleurs c'est le cas dans tout le Sahel, un accroissement très remarquable depuis les premières années de la grande sécheresse climatique, mais il est à noter que ces phénomènes étaient connus depuis des décennies sous le nom de vents de sable. Déjà, tout au début des années cinquante DUBIEF (1952, 1953) utilisait cette notion de vent de sable pour parler de ces lithométéores sans chercher à y déterminer une quelconque typologie. Ne pensait-il pas comme Coudé-Gaussen et Rognon lorsque ces derniers affirmaient qu'« il est illusoire de vouloir distinguer vents de sables et vents de poussières,... ». En fait, DUBIEF justifiait son souci par le fait que « *les observateurs ne possédant pas de critères précis pour savoir quand il est justifié de noter "vent de sable", en sont réduits à leurs impressions personnelles. Celles-ci seront nécessairement différentes d'un individu à l'autre, variables pour l'un d'entre eux au cours de son séjour. Un nouveau venu aura tendance à noter trop de vents de sable, un ancien à ne signaler que des tempêtes. [...]. En bref, ces observations sont entachées d'un coefficient personnel important* ». Ceci est d'autant plus vrai que la plupart des études relatives aux lithométéores est basée sur le critère de visibilité pour mesurer ces phénomènes. On comprend alors toute la complexité typologique des lithométéores. Cependant, malgré les difficultés énormes de caractérisation des types lithométéoriques, une différence manifeste existe entre les brumes sèches, les brumes de poussières, les chasse-sable et les tempêtes de poussières.

Il importe de noter à priori que les lithométéores diffèrent les uns des autres selon qu'ils résultent d'une suspension dans l'atmosphère ou qu'ils soient directement mobilisés par le vent. Les **brumes sèches** et les **brumes de poussières** constituent les poussières en suspension alors que les **chasses-sables** et les **tempêtes de poussières** caractérisent la catégorie directement mobilisée par le vent. Alors que les premières (les brumes sèches et les brumes de poussières) correspondent à une situation postérieure à un soulèvement de particules fines, la deuxième catégorie (les chasse-sable et les tempêtes de poussières) caractérise un phénomène qui associe pleinement la dynamique éolienne et le transport des particules.

Si NOUACEUR (2004) soutenait que « l'appréciation du phénomène lithométéorique est assez subjective, les définitions de l'atlas météorologique sont incomplètes, dans la mesure où la description du type de temps reste insuffisante puisqu'elle ne fait pas état du phénomène déclencheur, force du vent et turbulence dynamique ou thermique », ce souci semble résolu, la force du vent est à présent reconnu comme critère fondamental de caractérisation de ces aérosols désertiques même si la capacité de déflation d'un vent d'une force quelconque dépendra aussi de la nature du sol, de l'état de sa surface et de son degré de sécheresse. Les chasse-sable et les tempêtes de poussières ne se déclenchent que lorsque les vents atteignent des vitesses assez fortes permettant une déflation, un soulèvement de particules et leur transport. NOUACEUR⁵ notait d'ailleurs dans ce sens qu'il ne peut avoir de tempêtes de sable (de poussière) que lorsqu'on a des vents de vitesses généralement supérieures à 6 m/s. Par contre, pour les brumes sèches et les brumes de poussières, puisqu'il s'agit de phénomène de poussières suspension, leur manifestation ne se note qu'en « temps relativement calme pour permettre la suspension durable des particules fines ».

La description typologique des lithométéores nous paraissant la plus claire est celle faite par l'OMM dans l'*Atlas international des nuages* (1973) :

3.3. Les notions de brume sèche, brume de poussières, chasse-sable, tempête de poussière

► **Brume sèche**, de symbole "∞", brume sèche est définie comme une "suspension dans l'atmosphère de particules sèches, extrêmement petites, invisibles à l'œil nu et suffisamment nombreuses pour donner à l'air un aspect d'opalescence". Malgré qu'elles ne puissent être distinguées à l'œil nu, elles réduisent néanmoins la visibilité et donnent à l'air une apparence

⁵ NOUACEUR Z., Juin 2002, « *Les litho météores : des types de temps caractéristiques des régions arides et semi-arides* », Université de Rouen, Laboratoires d'études du développement des régions arides, Science et changements planétaires/Sécheresse. Volume 13, Numéro 2, Notes méthodologiques, pp 87-93,

caractéristique de fumée (brumeuse et opalescente). La brume sèche (haze en anglais) produit une voile uniforme au-dessus du paysage et en atténue les couleurs. Le voile a une teinte bleutée lorsqu'il est contre un fond foncé ou contre des objets sombres mais une teinte jaunâtre ou orangée lorsqu'il est contre un fond blanc (nuage à l'horizon, Soleil...), OZER⁶ parle d'une teinte jaunâtre ou rougeâtre communiquée aux objets lointains et brillants ou aux lumières devant lesquels la brume sèche est interposée. L'OMM préconise l'utilisation du terme brume sèche seulement lorsque ce lithométéore réduit la visibilité à moins de cinq kilomètres. Notons cependant que des chercheurs ont toutefois utilisé une variété importante de visibilités limites pour décrire ce type de lithométéore comme il est d'ailleurs le cas pour les autres types. Les brumes sèches correspondent au nombre « 05 » dans le code du temps présent (ww) que l'on retrouve dans les carnets d'observations.

► **Brume de poussières**, de symbole "S" est définie par l'OMM (dans le guide de l'observateur météorologistes, 1975) comme : "poussières en suspension dans l'air d'une manière généralisée, non soulevées par le vent au point d'observation ou à ses alentours au moment de l'observation". Les brumes de poussières possèdent les mêmes caractéristiques que les brumes sèches à la seule différence que les brumes de poussières sont marquées par une présence d'un dépôt de poussières au sol en leur présence contrairement aux brumes sèches qui sont caractérisées par une absence de dépôt de particules de poussières. À noter que les brumes de poussières (en anglais dust haze) correspondent au nombre « 06 » dans le code du temps présent (ww) que l'on retrouve dans les carnets d'observations.

► **Chasse-sable et Tempêtes de poussières** sont les lithométéores constitués d'ensembles de particules soulevées par le vent. Les chasse-sable ou chasse-poussières (en anglais "drifting ou blowing dust ou sand" sont définies comme "ensemble de particules de sable ou de poussières soulevées du sol, au lieu de l'observation ou dans son voisinage, à des hauteurs faibles ou modérées, par un vent suffisamment fort et turbulent". Cependant malgré que le déclenchement de ce type de lithométéore nécessite un vent fort et turbulent, NOUACEUR⁷ souligne qu'il n'y a pas lieu d'observer de tourbillon et de tempêtes de poussière ou de sable lorsque ce type de temps se manifeste.

⁶ OZER P., 2001. *Les Lithométéores en région sahélienne, un indicateur climatique de la désertification*, GEO-ECO-TROP, Revue internationale d'Ecologie et de Géographie tropicales, vol. 24, 327p.

⁷ NOUACEUR Z. 2004, « *Brume sèche, brume de poussière, chasse-sable et tempête de sable* », *Norois*, mis en ligne le 09 septembre 2008, consulté le 31 mars 2014. URL : <http://norois.revues.org/1188> ; DOI : 10.4000/norois.1188

Du fait que les chasse-sable peuvent se manifester aussi bien à des hauteurs faibles qu'à des hauteurs modérées, OZER⁸ a bien raison de parler de chasse-sable ou chasse-poussière bas et chasse-poussière ou chasse-sable élevées.

Pour les premières, l'OMM les définit comme "poussières ou sable, soulevés par le vent à faible hauteur au-dessus du sol. La visibilité n'est pas sensiblement réduite au niveau de l'œil de l'observateur (1m80)". Ne serait-il pas intéressant, toujours dans le souci de clarté des caractéristiques des chasse-sable (ou poussière) que l'OMM notait déjà en 1956 dans *l'Atlas International des Nuages* que pour celles à faible hauteur "les obstacles peu élevés sont voilés ou masqués par la poussière ou le sable en mouvement. La trajectoire des particules de poussière ou de sable est sensiblement parallèle à la surface du sol".

Pour les chasse-poussière (ou sable) à hauteur modérée ou assez élevée, l'OMM les définit dans *Vocabulaire Météorologique International* (1966) comme "poussière ou sable, soulevés par le vent jusqu'à des hauteurs assez importantes au-dessus du sol. La visibilité au niveau de l'œil de l'observateur est réduite de façon sensible". Elle (l'OMM) y ajoute que "la concentration des particules de poussière ou de sable est parfois suffisante pour voiler le ciel et même le soleil".

En outre, à faible hauteur ou à hauteur élevée, les chasses-sable ou chasse-poussière (de symbole "\$") correspondent au nombre "07" dans le code du temps présent (ww) que l'on retrouve dans les carnets d'observations.

S'agissant des **tempêtes de poussière** ou de sable l'OMM les définit comme un "ensemble de particules de poussières ou de sable puissamment soulevées du sol par un vent fort et turbulent, jusqu'à de grandes hauteurs" NOUACEUR⁹ ajoute à cette définition qu'il s'agit bien de "tempête de poussière ou de sable observée au moment de l'observation en vue du point d'observation, ou à ce point pendant l'heure précédente". OZER¹⁰ a tout à fait raison de souligner le caractère rarissime de ce type lithométéorique dans certaines stations. Dans les stations de Matam, Podor et Saint-Louis, cette affirmation est vérifiable. De 1965 à 2014 (notons que nous avons juste retenu cette période pour vérifier cette affirmation du fait qu'elle constitue notre période d'étude dans le cadre de cette thèse), seule l'année 1986 a enregistré jusqu'à 15 jours de tempêtes aux stations de Matam et de Podor et jamais une année n'a enregistré plus de 6 jours de tempêtes de poussières à la station de Saint-Louis. La moyenne interannuelle n'est que de 03 jours aux

⁸ Op.cit.

⁹ Op.cit.

¹⁰ Op.cit.

stations centre et est de l'extrême Nord-Sénégal et de seulement 02 jours à la station ouest de la zone.

Les tempêtes de poussières ou de sable (de symbole -S→) correspondent aux nombres "09 et 30 à 36" suivant leur violence et leur état de maturité dans le code du temps présent (ww) que l'on retrouve dans les carnets d'observations (OZER¹¹).

En conclusion cette analyse conceptuelle des types de lithométéores (Brume sèche, Brume de poussières, Chasse-sable, Tempête de poussières) caractéristiques des stations de l'extrême Nord-Sénégal, il est à noter que malgré l'existence d'une typologie variée et des caractéristiques assez différentes entre brumes sèches, brumes de poussières, chasse-sable et tempêtes de poussières, toutes ont une genèse soumise à une dualité climatique et édaphique. Pour le facteur climatique, il s'agit d'abord *du vent* (agent d'érosion), qui conditionne l'arrachage, le soulèvement et transport des particules. Le second facteur climatique est *la turbulence de l'atmosphère* qui conditionne la suspension des particules et la durabilité de cette suspension. Pour le facteur édaphique, il s'agit de *l'érodabilité du sol* qui détermine à priori l'arrachage des particules quel que soit la force du vent.

L'importance de la dualité climatique et édaphique dans la genèse des lithométéores n'est pas seulement du fait qu'elle constitue le dénominateur commun de ces différents types de temps, mais aussi qu'elle "aboutit à une localisation géographique si l'on considère le facteur pédologique et une caractérisation saisonnière et zonale si l'on prend en compte le paramètre climatique" (LEGRAND, 1990).

4. Éléments de Méthodologie

Le but de tout Travail d'Etude et de Recherche est de trouver une ou des réponses aux interrogations qu'on s'est faites à travers des hypothèses formulées au préalable. Ainsi pour atteindre les objectifs que nous nous sommes fixé, nous avons adopté une méthodologie qui comporte plusieurs axes définis en fonction des résultats attendus.

4.1. La revue documentaire

Pour réaliser une étude judicieuse sur les aérosols désertiques à travers notamment l'analyse de la variabilité de leur fréquence à différents pas de temps, la lecture d'un certain nombre d'ouvrages généraux, de travaux scientifiques, de rapport, d'articles entre autres a été nécessaire.

¹¹ Op.cit.

Cela nous a permis de cerner les contours de la thématique « aérosols » de façon générale, tout en dégagant la structure spécifique des « aérosols désertiques ». En plus de cette revue documentaire sur les aérosols, nous avons effectué une recherche documentaire très riche sur les principaux traits matérialisant la circulation générale atmosphérique de l'Afrique de l'Ouest, ceci dans le but de cerner cette fois-ci les contours climatiques de la grande région géo-climatique dans laquelle appartient notre zone étude, en dégagant la structure spécifique de ses caractéristiques.

Il s'agit d'une analyse globale de notre thème d'étude mais aussi des caractéristiques climatiques de la grande région d'appartenance de notre zone à partir du dépouillement de divers documents scientifiques nous intéressants.

4.1.1 Synthèse bibliographique

❖ Circulation générale atmosphérique en Afrique

Nous avons commencé ce travail par décrire la *circulation générale atmosphérique en Afrique* de l'Ouest du fait qu'il nous paraît utile en entreprenant une étude d'un paramètre qui constituerait un "type de temps caractéristique" d'une quelconque zone géographique, de mettre l'accent sur les principaux éléments qui déterminent la circulation atmosphérique du grand domaine climatique ou de la sous-région géographique dans le/laquelle elle appartient. Cette vision du fait n'a pas échappé à d'énormes auteurs qui, abordant une quelconque étude que ce soit sur l'Afrique au Nord de l'Equateur, que ce soit sur le Sahel de façon générale ou plus précisément sur l'Afrique de l'Ouest n'ont pas manqué à mettre un accent sur la circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest. Parmi ces travaux nous ne citerons que quelques-uns :

La thèse de Philippe PEYRILLE soutenue en 2005 à l'Université Paul Sabatier-Toulouse III qui aborde une étude idéalisée de la Mousson Ouest-Africaine à partir d'un modèle numérique Bi-dimensionnel. L'auteur y revisite tous les aspects de la Mousson en mettant l'accent à la fois sur les déterminants en basse, moyenne et haute altitude, éléments de compréhension de la MAO, le cycle diurne de la mousson africaine, le cycle saisonnier de la mousson et aussi la variabilité interannuelle et décennale.

Sous le même angle Lucas BESSON (2009) met en évidence les processus physiques responsables de l'établissement et de la variabilité de la mousson Ouest-africaine. Guylaine CANUT (2010) poursuit sur la même lancée et un peu plus en profondeur en fondant son étude sur l'interaction mousson/Harmattan à travers les échanges de petite échelle.

Dans sa thèse de doctorat de l'Université Paris VI soutenue le 18 décembre 2008 sur « Mécanismes de soulèvement d'aérosols désertiques en Afrique de l'Ouest » Diana BOU KARAM consacre le chapitre 1 au climat de l'Afrique de l'Ouest. Elle y a passé en revue les différentes saisons qui le déterminent et les divers éléments qui caractérisent chacune d'elles. Ces résultats sont en phase avec ceux de Suzanne CRUMEYROLLE qui en première partie de sa thèse présente les éléments (à savoir la circulation de la mousson, les systèmes convectifs de méso-échelle) et les mécanismes clefs (le gradient de température, les conditions de surface...) mais aussi nous parle de la campagne de l'AMMA (Analyse Multi-dimensionnelle de la Mousson Africaine) et de ses résultats.

Tout récemment dans sa thèse de doctorat de l'Université *Toulouse III-Paul Sabatier* spécialité : *Océan Atmosphère*, soutenue le 20 Décembre 2012, Mohamed MOKHTARI nous détaille en 7 pages (pp. 12-18) les Centre d'action de la circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest.

Ces auteurs sont parmi la longue liste de ceux qui à travers leur étude sous divers angles nous ont permis de savoir plus en claire les fondements des éléments, mécanismes, dynamiques et interactions du climat de l'Afrique de l'Ouest.

❖ **Aérosols désertiques**

✓ Descriptions et cycle de vie

Thème de cette thèse, notre tour d'horizon sur la question nous a conduits à consulter beaucoup de travaux abordant ce sujet. La quasi-totalité de ces derniers commencent d'abord par mettre l'accent sur l'aérosol atmosphérique ou sur l'aérosol de façon générale avant de se consacrer spécifiquement sur l'aérosol désertique ou poussière minérale. Parmi ces travaux, de nombreuses thèses mais aussi d'articles scientifiques, des rapports et ouvrages généraux dont nous ne citerons ici quelques-uns parmi des plus marquants :

J. FONTAN (2004). *Les Pollutions de l'air, les connaître pour les combattre*, paris, vuibert nouvelle édition, 211p.

Dans cet ouvrage, du chapitre 6 au chapitres 8, FONTAN fait une étude générale sur les aérosols à travers les principales définitions, leur caractérisation, les spectres granulométriques et fonction de distribution, le comment se comporte une particule d'aérosol et les conséquences des propriétés mécaniques (sur l'équilibre thermodynamique, sur le dépôt dans l'appareil respiratoire) et des propriétés optiques à savoir l'action sur la visibilité et sur le bilan radiatif sol-

atmosphère. Et dans le chapitre 8 il y consacre essentiellement une étude de l'aérosol atmosphérique, de ses origines et de ses caractéristiques.

Au troisième chapitre de la première partie et au chapitre 1 de la deuxième partie de son travail sur « *Validation du modèle global GOCART de NASA et son apport à l'étude des variations mensuelles des phénomènes de sable sur le Sahara Algérie* », BOUZID (2005) aborde également les généralités sur les aérosols (définition, propriétés, aérosols désertiques) et nous présente aussi la typologie et genèse des lithométéores ainsi que la variation annuelle des phénomènes de sable au Sahara. La thèse de Sophie FALLY a été très riche en enseignements. Après avoir déterminé la composition chimique, les propriétés et le comportement des particules d'aérosol, elle y a distingué à travers une récolte à la fois sur les végétaux et sur un collecteur inerte les aérosols atmosphériques des autres types d'aérosols. Elle y expose de façon explicite les causes de la variabilité spatio-temporelle des concentrations, l'influence de paramètres tels que la saison, la direction du vent, et le lieu de prélèvement. Suzanne CRUMEYROLLE (2008) dans « *Impact des systèmes convectifs sur les propriétés hygroscopiques des aérosols : Analyse de deux cas d'étude durant la campagne AMMA* », en plus de définir les propriétés physico-chimiques, nous renseigne sur les caractéristiques optiques et hygroscopiques des aérosols présents en Afrique de l'Ouest. Elle y étudie également l'impact des systèmes convectifs de méso-échelle (MCS) sur la modification de ses propriétés hygroscopiques des aérosols. Vincent MICHAUD (2009) est parmi la longue liste des thésards à avoir spécifiquement orienté leur étude sur les propriétés hygroscopiques des aérosols atmosphériques.

Les aérosols atmosphériques sont généralement étudiés en procédant par leur classement suivant leur source naturelle ou anthropique, leur caractère primaire ou secondaire et leur mode (fin ou grossier).

D'énormes travaux traitant ces éléments ont été consultés. Nous ne donnerons ici que quelques exemples :

Ibrahim El AOUBADI (2005) citant WHITBY (1976) distingue trois classes selon l'ordre de grandeur du rayon r de la particule (supposée sphérique) et éclaire sur le rôle de chaque particule en fonction de sa taille mais aussi les différents processus de transport et de dépôt auxquels elle est soumise. Il revient aussi sur la variabilité des durées de vie des particules et l'inhomogénéité de leur distribution globale selon qu'elles soient de mode fin ou gros.

Dans sa thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie sur « *Variabilité de la distribution verticale de l'ozone et des aérosols troposphériques en région méditerranéenne : processus de transport et impacts radiatifs* » Christoforos TSAMALIS (2009) classe les particules selon une gamme allant de nanomètres jusqu'à quelques centaines de micromètres. Il distingue aussi les particules fines des grosses selon l'origine, la transformation, les mécanismes d'éloignement par l'atmosphère, les techniques de mesure, la composition chimique, les propriétés optiques et les parcours suivis dans le système respiratoire. Et pour ces raisons il soutient que la discrimination entre les deux modes est fondamentale.

La thèse de doctorat d'Imad El HADDAD (2011) porte sur les fractions primaire et secondaire de l'aérosol. Alma HODZIC (2005) avait déjà fait les mêmes descriptions que lui. Tous deux reconnaissent que le caractère "primaire" est attribué aux aérosols directement émis dans l'atmosphère qu'ils soient naturels ou anthropiques alors que la notion "secondaire" est relative aux aérosols résultant de réactions chimiques en phase gazeuse (oxydation par l'ozone ou les radicaux hydroxyles) formant des espèces condensables capables de se fixer sur les particules existantes.

Clémence PIERANGELO (2005) distingue les aérosols troposphériques des aérosols stratosphériques. Il situe les premiers majoritairement dans les basses couches de l'atmosphère, du sol à quelques kilomètres, et les seconds à plus haute altitude, entre 12 et 30 kilomètres environ. Les aérosols naturels ou anthropiques sont très clairement décrits et explicités dans la thèse de Sophie PEYRIDIEU. Comme beaucoup d'auteurs, elle nous donne les différents types d'aérosols naturels et anthropiques. Elle attribue les premiers aux phénomènes naturels à savoir les actions mécaniques (action du vent), géochimiques (éruption) ou biochimiques (êtres vivants) et les seconds aux activités humaines à savoir les pratiques ancestrales (issues des traditions agricoles), les pratiques industrielles et les transports.

Pour ce qui est spécifiquement de l'aérosol désertique (encore nommé "poussière désertique" ou "poussière minérale" ou encore dans une mesure "Lithométéores"), beaucoup d'auteurs y ont largement fait une étude. Parmi ces travaux, des thèses, articles, ouvrages généraux... dont les suivant :

Benjamin AOUIZERATS (2010) définit les poussières minérales comme les particules présentes en surface assez légères pour pouvoir rester en suspension dans l'atmosphère. Il situe le diamètre médian de particule désertique entre 1 et 10 μm . Caroline PIERRE (2010) complète cette définition et souligne que pour l'aérosol désertique qui désigne les aérosols provenant de

l'érosion éolienne des zones arides et semi-arides, il s'agit d'un processus très majoritairement naturel (conséquence de la friction exercée par le vent sur une surface érodable). Elle retient que néanmoins, lorsqu'une activité humaine modifie de façon directe ou indirecte les propriétés de la surface (par exemple l'agriculture ou le pâturage), une contribution anthropique à l'émission d'aérosols minéraux peut apparaître et doit alors être prise en compte.

Cependant, CRUMEYROLLE et al. (2010) ont dernièrement mis en évidence, grâce à l'instrumentation aéroportée utilisée durant la campagne AMMA, la présence d'un mode fin centrée sur 80 nm dominant la distribution en nombre. La présence de ce mode fin peut également être observée dans les résultats des inversions des stations du réseau AERONET présentes notamment en Afrique depuis une dizaine d'année et fournissant la distribution en taille des particules. WARNER (1988) est parmi les premiers à étudier la composition chimique moyenne des sols désertiques. La thèse de Sophie PEYRIDIEU (2010) est parmi tous ces travaux qui s'accordent pour reconnaître que les aérosols désertiques représentent la première source en masse d'aérosols naturels présents dans l'atmosphère. Afin de mieux comprendre ces aérosols, PEYRIDIEU examine leur lien avec la circulation générale de l'atmosphère (à l'échelle globale), puis avec les conditions synoptiques (à l'échelle régionale) et enfin elle étudie les mécanismes entraînant leur émission (à l'échelle locale).

Les propriétés optiques et caractéristiques physico-chimiques de l'aérosol désertique ont largement été passées en revue dans la thèse de LAFON S., sur « *les oxydes de fer dans l'aérosol désertique en relation avec les propriétés optiques : caractérisation physico-chimique de poussières minérales générées en soufflerie* ». LEMAÎTRE (2011), mettant l'accent sur l'importance des aérosols désertiques souligne les incertitudes liées à ces derniers du fait de la grande variabilité temporelle et spatiale de leur concentration. O. PANCRATI (2003) ; SEINFELD et PANDIS (1998), JUNGE (1958) ; WHITBY (1976) ; ANDREAE (1995) ; WOLF et HIDY (1997) ; TEGEN et FUNG, (1995) ; RAMANATHAN (2001) ; TEGEN et al., (2000) ; HAYWOOD et al., (1999) ; HOUGHTON et al., (2001) sont parmi ces nombreux auteurs qui, en étudiant les aérosols désertiques, procèdent par différents classements : classification en fonction de leur dimension (les particules d'Aitken : [0,001 ; 0,1 μm], les particules fines (mode d'accumulation) : [0,1 ; 1 μm], les grosses particules: [1 ; 100 μm], classification des aérosols en fonction de leur domaine de résidence dans l'atmosphère (aérosols stratosphériques, aérosols troposphérique), classification en fonction de leur processus de formation (primaire et secondaire), classification des aérosols en fonction de leur origine (sources naturelles ou anthropogéniques).

Le cycle des aérosols désertiques a également été au cœur de notre préoccupation. La revue documentaire d'énormes travaux nous a permis d'en savoir un peu plus claire. Il a été mis en évidence par la quasi-totalité des auteurs sur la thématique parmi lesquels :

Julie VINCENT (2012) dans son Master Sciences et Génie de l'Environnement décrivant les cycles des poussières désertiques montre comment elles sont émises dans l'atmosphère, comment elles sont dispersées pendant leur transport atmosphérique et comment elles se déposent. La totalité des auteurs résume le cycle des aérosols en trois phases : l'émission, le transport et le dépôt [LAFON S. ; MOKHTARI (2012) ; BOU KARAM (2012) ; KOCHA (2011) ; C. PIERRE (2010) ; F. MALAVELLE (2011) ; OZER (2001) ; ...]. Tous s'accordent pour reconnaître que l'émission des particules désertiques nécessite la présence en quantité suffisante de la matière érodable et l'apport d'énergie éolienne à la surface suffisante pour vaincre les forces de cohésion interparticulaire. Le transport se fait suivant la taille de la particule mais aussi selon la présence des mécanismes turbulents d'origine thermique (mouvements convectifs) ou d'origine dynamique (liées aux conditions météorologiques ou aux influences orographiques). Selon les auteurs précédemment cités le dépôt quant à lui se fait généralement par voie sèche via l'impaction sur les reliefs ou la sédimentation sous l'action de la gravitation, ou par voie humide par incorporation des particules dans les nuages (washout) ou abattement des particules présentes sur le trajet des gouttes lors des précipitations.

On retiendra des auteurs comme PEWE et al., (1981) ; TUCKER et al., (1991) ; N'TCHAYI et al., (1997) ; GOMES et al., (2003) ... que du point de vue géographique, les régions du globe émettrices de poussières terrigènes sont essentiellement les régions désertiques. BACH, (1976) ; SCHUTZ et al., (1981) ; D'AIMEIDA, (1987) ; SWAP et al., (1992) sont en phase et admettent que la première région productrice d'aérosol désertique est le Nord de l'Afrique (le Sahara et le Sahel). Cette zone est la plus étendue et la plus étudiée et sa production annuelle est estimée entre 400 et 700 Mt.

Pas mal d'auteurs ont mené leur étude à distinguer les différents types des aérosols désertiques (lithométéores). Deux de ces auteurs ont le plus retenu notre attention et nous ont paru plus explicites sur ce sujet : il s'agit de Z. NOUACEUR et P. OZER. Dans « L'évolution des lithométéores en Mauritanie confirme une plus grande efficacité de l'action éolienne » (2001 et dans « Brume sèche, brume de poussière, chasse-sable et tempête de sable : des types de temps spécifiques des régions sèches » (2004) NOUACEUR retient quatre types de lithométéores (les brumes sèches, brumes de poussière, chasse-sable et tempête de sable) auxquels il ajoute des

phénomènes locaux comme les tourbillons de sable ou de poussière les murs de sables. OZER dans son ouvrage intitulé « les lithométéores en région sahélienne ; un indicateur climatique de la désertification » (2001) va un peu plus loin en scindant même ces types lithométéores en deux catégories suivant qu'ils soient en suspension dans l'atmosphère ou directement mobilisés par le vent. Selon lui la brume sèche, brume de poussière sont de la première catégorie alors que les chasse-sable et tempête de sable sont de la seconde catégorie.

✓ Fréquences et impacts

- Variabilité temporelle des fréquences

Pour ce qui est du cycle diurne des aérosols, il demeure encore peu ou mal documenté. BOU KARAM (2008) affirme dans ce sens que cela est lié au manque d'observations suffisamment fréquentes à l'échelle de la journée nécessaire pour l'étude de ce cycle. LEMAITRE (2011) d'y ajouter que hormis celles issues de satellites géostationnaires (SCHEPANSKI et al., 2009), les observations satellitaires ne permettent pas d'obtenir des données suffisamment fréquentes à l'échelle de la journée. Cependant les données de visibilité constituent le "seul" moyen adapté à l'étude ce cycle. OZER (2001) avait déjà indiqué avant BOU KARAM et LEMAITRE que la fréquence maximum des lithométéores est observée entre 09 et 15h alors que le minimum est localisé au milieu de la nuit (entre 21 et 03h).

En ce qui concerne la répartition mensuelle, beaucoup d'auteurs ont traité la question suivant la période de leur étude et suivant la zone choisie. KAUFMAN (2005) et CHIAPOLLO (2006) analysant les épaisseurs optiques dévirées respectivement des observations MODIS et celles issues de Météosat ont constaté un premier maximum d'épaisseur optique en été, un autre au mois de mars et le minimum en automne. Sur une fourchette plus large ENGELSTAEDTER et al. (2006) affirme que les émissions d'aérosols désertiques connaissent un minimum entre Octobre/Novembre et un maximum entre Avril et Août. BOU KARAM (2008) soutient que dans l'ouest et le nord-ouest de l'Afrique les émissions d'aérosols minéraux augmentent à partir du mois d'Avril et sont maximales en Juin/Juliet avant de décroître en Septembre. OZER (2001) semble beaucoup plus explicite sur cette question et affirme que dans les régions désertiques la fréquence maximales des lithométéores s'observe de Mars à Mai et la fréquence minimale de Septembre à Novembre soit durant les périodes de vitesse du vent respectivement maximum et minimum. A l'opposé, dans la bande sahélienne méridionale ainsi que dans la bande soudanaise, la fréquence maximum s'observe de Janvier à Mars, soit au cœur de la saison sèche alors que celle minimale se situe au cœur de la saison des pluies, de Juillet à Septembre. Quant aux stations

intermédiaires, elles présentent une fréquence maximale durant la période pré-hivernale juste avant l'installation de la saison des pluies.

Les fréquences maximale et minimale seraient donc en partie fortement liées aux caractéristiques climatiques saisonnières des différentes régions environnementales.

S'agissant de la variabilité interannuelle, CHIAPOLLO et MOULIN (2002) ont conduit une étude sur la période (1979-1997) sur la variabilité d'une année à une autre du transport des poussières désertiques depuis l'Afrique du Nord. Il sort de leur analyse une variabilité très marquée en hiver (Décembre-Mars) avec des années comme (1986) où les aérosols sont quasiment absents et des années (comme 1989) où les épaisseurs optiques en aérosols s'approchent de celles observées en été. LAURENT et al. (2008) ont montré, à partir d'une étude par modélisation sur la période 1996-2001, que la variabilité interannuelle des émissions depuis les zones sources de l'Afrique de l'Est s'élève à 60% alors qu'elles sont plutôt régulières depuis les zones sources l'Afrique de l'Ouest d'une année à une autre avec une variation de l'ordre de 20%. Pour ce cas de l'Afrique de l'Ouest, il a aussi été étudié par BARKAN et al. (2004) sur la période 1979-1992, il montre une discontinuité entre la période 1979-1982 (faible) et la période 1983-1992 (émissions élevées). BERTRAND et al. (1979) et OZER (2001) montrent une l'émission peut varier de façon significative sur des périodes de temps très longues. De nombreuses données mettent en évidence une augmentation générale des poussières désertiques sur les dernières décennies. OZER (2001) affirme dans ce sens que la fréquence des nuages de poussières durant la saison sèche (octobre-avril) a augmenté au-dessus de l'Afrique de l'Ouest d'un facteur 10 entre 1951 et 1997. Beaucoup d'auteurs dont MOULIN & CHIAPPELL (2004) s'accordent sur le fait que des conditions sèches persistantes au Sahel semblent être accompagnées d'une réduction des précipitations dans cette même région et d'une augmentation notable des émissions de poussières et de transport comme le montrent en particulier FOUQUART et al. (1986), à l'aide d'une série d'observation aéroportée. Pierre OZER semble résumer la situation dans son ouvrage « *les lithométéores en région sahélienne ; un indicateur climatique de la désertification* » (2001). Analysant l'évolution dans 10 stations sahéliennes, l'auteur avance que dans 8 des 10 la fréquence des jours avec lithométéores a relativement été faible durant les années cinquante et soixante, suivie d'une augmentation subite à la fin des années soixante ou au début des années septante. Ensuite on observe soit une certaine stabilité, soit une augmentation bien marquée au début des années quatre-vingts suivie alors d'un nouvel équilibre. Un premier maximum jamais atteint auparavant est enregistré en 1972 ou 1973, soit au plus forte de la première vague de sécheresse. Par la suite c'est l'année 1984 ou plus

globalement le centre de la seconde période dramatique de sécheresse, qui a connu le maximum de la fréquence annuelle des lithométéores en région sahélienne. Ozer de conclure que généralement, plus d'un jour sur deux a été affecté par la présence des lithométéores.

- Différents effets

Tous les auteurs sont unanimes sur le fait que les aérosols sont étudiés pour leurs deux effets majeurs : impacts radiatifs et conséquences sanitaires. À ces deux impacts majeurs s'ajoute leur action sur la visibilité horizontale. Du fait de la très longue liste des auteurs que nous avons pu consulter et qui ne peuvent tous être cités, nous ne retiendrons que quelques-uns parmi eux :

Dans sa thèse de doctorat de l'université de Toulouse, J. C. PERE (2010) affirme que par leur capacité de diffusion et d'absorption, les aérosols peuvent directement modifier le rayonnement solaire incident et le flux tellurique (effet radiatif direct et semi-direct). De plus, ils peuvent également modifier la microphysique des nuages par leurs propriétés physico-chimiques (effet radiatif indirect). Ces effets radiatifs des aérosols sont très détaillés dans quasiment tous les travaux scientifiques sur la thématique (BOU KARAM (2008), DUPART (2012), B. AOUIZERATS (2010), El AOUADI ((2005), CRUMEYROLLE, J. C. PERE (2010), PEYRIDOU (2010), Caroline PIERRE 2010), Cécile KOCHA (2011), MOKHTARI (2012), LEMAITRE (2011), ...). Ces effets résultent donc des processus d'interactions entre les aérosols, le rayonnement solaire et tellurique et les autres composantes du système terrestre, processus qui d'ailleurs sont complexes et difficiles à quantifier de manière précise. Quel que soit la façon de le dire par ces auteurs, il ressort de leur étude que ces effets radiatifs des aérosols peuvent aboutir à un refroidissement du système climatique (forçage radiatif négatif) ou à son réchauffement (forçage radiatif positif). D'après DUPART (2012) la valeur de ce forçage dépend en grande partie de la longueur d'onde et de l'échelle considérées. Dans ce sens SCHMIDT et al., (2010) soutient que ces valeurs sont différentes au sommet de l'atmosphère, en Surface et atmosphérique. Parlant de l'échelle, FORSTER et al., (2007) affirment qu'à celle globale, le dernier rapport de l'IPCC (2007) estime que le forçage radiatif direct des aérosols a, en moyenne, un effet de refroidissement au sommet de l'atmosphère ($-0.5 \pm 0.4 \text{ W/m}^2$) alors qu'à l'échelle régionale, cet effet radiatif direct peut devenir beaucoup plus important au-dessus de régions où la concentration en particules est importante.

Sur le plan environnemental et sanitaire, des études ont été faites et des résultats intéressants en ont découlé :

M. TILOT (2008) est parmi ces nombreux auteurs qui unanimement soutiennent que l'impact environnemental des aérosols se traduit notamment par le dépôt de particules sur les sols et la végétation et l'altération de l'activité photosynthétique des végétaux. JOHNSON et al., (2010) affirment que les aérosols minéraux sont d'importantes sources de fertilité dans les zones de retombées, grâce notamment au fer et au phosphore qu'ils contiennent mais qu'ils accentuent néanmoins le phénomène de désertification des zones sources. Toujours sur les effets environnementaux JICKELLS et al., (2005) admettent que le dépôt de sables désertiques dans les océans cause aussi de sérieux bouleversements sur le système biogéochimique marin.

Quelques scientifiques ont également tenté d'établir une relation entre visibilité horizontale et concentrations de particules dans l'atmosphère. Différentes relations ont été établies selon les auteurs suivant la période d'analyse mais aussi suivant la zone et le type de lithométéore [CHEPIL et WOODRUFF (1957) ; HAGEN et WOODRUFF (1973) ; BERTRAND (1976) ; D'ALMEIDA (1986) ; ETTE et OLODORE (1988) ; BAYOKO et FONGANG (1990) ; BEN MOHAMED et al. (1992) ; MBOUROU (1992) ; PATTERSON et GILLETTE (1997) ; OZER (2001) ; ...]. Tous s'accordent sur le fait que les concentrations de particules de poussières désertiques réduisent fortement la visibilité horizontale affectant souvent même d'autres impacts socio-économiques :

ADEFOTALU (1984) rapporte que la visibilité à Kano (Nord-Nigéria) est fréquemment très réduite par les lithométéores, ce qui mène couramment à la fermeture de l'aéroport. OZER (2001) soutient que les retards, annulations ou encore détournements d'avions sur d'autres aéroports dus à la visibilité médiocre sont devenus fréquents dans le Sahel. CAHILL et al. (1996) nous rapportent que la fermeture occasionnelle de l'aéroport militaire de China Lake (Californie) suite à la présence de lithométéores entraîne annuellement des pertes économiques de plusieurs millions de dollars.

Plusieurs travaux scientifiques ont également mis l'accent sur les conséquences sanitaires des aérosols désertiques (DOUMBIA (2012) ; MARANO et al. (2004), TILOT M. (2008) ; HEIMANN (pas de date) ; FONTAN (2004) ; OSTIGUY et al. (2008) ...). Tous ont avancé une relation certaine entre concentration de particule de poussières et fréquence de certaines maladies et infections. Dans ce sens LIAO et al. (1999) ; DONALDSON et al. (2001) et DELFINO et al. (2005) d'affirmer que des études toxicologiques ont montré le rôle des particules de poussières dans certaines atteintes fonctionnelles respiratoires, le déclenchement de crises d'asthme et la hausse du nombre de décès pour cause cardio-vasculaire. RAMGOLAM et al. (2009) ajoutent en

cet effet que la nocivité des aérosols dépend de leur concentration et de leur taille car les particules les plus fines (diamètre inférieur à 2.5 µm) peuvent pénétrer profondément le système respiratoire pour atteindre les alvéoles pulmonaires. La gravité de l'impact sanitaire des poussières aérosols fait que d'après MULLOT et al. (2009) un rapport de 2009 de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire, de l'Environnement et du Travail (AFSSET) concernant les effets des particules sur la santé montre qu'il n'existe pas de seuil de concentration des particules fines dans l'air ambiant au-dessous duquel il n'y aurait pas d'impact sanitaire.

MEDINA (2007) soutient dans son étude que les épidémiologistes de l'Institut français de Veille Sanitaire (InVS) définissent quant à eux l'impact de l'exposition aux particules comme étant "du même ordre que le tabagisme passif".

4.2 Collecte et traitement de données

4.2.1 La collecte de données

Etape indispensable dans notre travail, la collecte de données a été au cœur de notre agenda. Elle nous a amené à nous rendre à l'ANACIM (Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie) à Dakar afin de disposer trois types de données des stations de notre zone d'étude: des données de fréquences des lithométéores (notamment les brumes sèches, brumes de poussière, chasse-sable, tempête de poussières), principaux types d'aérosols désertiques caractérisant notre zone d'étude ; des données de la visibilité minimale et celles des éléments du climats (pluviométrie, température, vent, évaporation, insolation, humidité). Ceci nous a permis d'une part de vérifier la fiabilité de certaines données déjà obtenues auparavant et d'autre part de compléter notre base de données avec des relevés plus récentes. En dehors des données collectées à l'ANACIM qui constituent le cadre purement climatique (et environnemental avec la visibilité) de notre étude, nous nous sommes aussi rendus aux différentes structures sanitaires de notre zone d'étude (Centre hospitalier régional de Saint-Louis ; Centre de santé de Saint-Louis ; Centre de santé de Richard-Toll ; Hôpital de Ndioum ; Centre de santé de Podor ; Centre hospitalier régional de Ourossogui ; District sanitaire de Matam) dans le but de disposer des données sur la fréquence des maladies attribuables aux poussières désertiques (Bronchite, Pneumopathie, BPCO...) pour le cadre sanitaire de notre thèse.

4.2.2 Le traitement de données (Choix des méthodes et des tests statistiques)

Il n'existe pas de procédés générateurs d'information en dehors des procédés de mesure (LABORDE, 2005). Cet adage, vieux comme le monde, s'applique à toute démarche scientifique et à la climatologie en particulier. Depuis des siècles, l'étude du climat suscite l'intérêt de

l'homme aussi bien d'un point de vue fondamental de compréhension des phénomènes, que d'un point de vue plus appliqué de prédétermination des risques et contraintes pour les activités humaines. L'étude des aérosols, en particulier ceux désertiques nécessite de disposer de longues et de plusieurs séries d'observations, soumises préalablement au test d'homogénéité et à l'assurance de leur fiabilité. La première étape dans cette analyse de données est donc de vérifier leur fiabilité et la seconde est de combler les lacunes observées. Pour ce faire, l'informatique est un excellent outil d'aide aux traitements statistiques des données dans une étude diagnostique du climat, surtout lorsqu'il s'agit d'une approche exploratoire à plusieurs variables. Les méthodes statistiques ont pour intérêt d'analyser l'organisation de l'espace géographique sur le plan climatologique de façon générale. C'est dans cette optique que BOUROCHE et SAPORTA (1980), cités par DOUKPOLO (2007), ont montré l'importance des techniques statistiques qui donnent un aperçu général des paramètres météorologiques et mettent en relief les liaisons, les ressemblances et les dissemblances qui existent entre les données de différentes stations.

Les données statistiques utilisées dans ce travail sont essentiellement quantitatives. Nous les avons traitées avec beaucoup de prudence et vigilance. Il s'agit en premier d'une exploitation des données des fréquences des lithométéores, de la visibilité minimale et celles des éléments du climat. Ce traitement s'est fait avec un maximum de tableaux et graphiques (diagrammes, courbes...) qui révèlent plus que l'écrit les événements majeurs intervenus au cours de la période d'étude et qui permettent d'apprécier le mieux les tendances des différents paramètres représentés. Le but donc est d'observer l'évolution ou la variabilité de chacun de ces paramètres climatiques et ainsi déterminer pour certains paramètres les périodes de faibles et fortes fréquences et éventuellement corrélérer la tendance de certains paramètres (par exemple forte fréquence de lithométéore et réduction de visibilité). Ces graphiques permettent en effet d'améliorer la qualité des informations avancées. En second lieu il s'agit d'explorer cette fois-ci des données sanitaires. Nous avons d'abord procédé à plusieurs dépouillements de ces données du fait des énormes renseignements que nous avons voulu tirer de celles-ci (l'évolution du taux de fréquence de ces maladies et infections attribuables aux poussières désertiques, du taux de fréquence suivant les classes d'âge mais aussi suivant le sexe...). Pour y arriver nous avons renseigné plusieurs tableaux suivant le but visé, et l'ensemble des informations renseignées dans ces tableaux est illustrés par des diagrammes et histogrammes de fréquences. Ce qui nous permet de faire le constat au visuel. Plusieurs logiciels statistiques généralistes et spécialisés ont été employés dans ce sens de traitement de données. *Excel* surtout dans l'élaboration des bases de données et le traitement graphique de certains paramètres ; *SPSS* surtout pour le traitement de

variables croisées et de tests de corrélation de paramètres (test de corrélation r de PEARSON), *Khronostat* surtout pour des tests de rupture de tendance dans les séries d'observation, de stationnarité des variables (test de PETTITT, de BUIHAND...).

4.3. Les mathématiques

Certaines informations nécessitent l'usage des équations mathématiques. Ce fut le cas dans cette thèse avec l'estimation du niveau de concentration en particules de poussières. En effet, des données sur le niveau de concentration en particules de poussières se fait entre autres par la transformation des données de visibilité minimale à travers des Equations (Relations) mathématiques qui existent dans la littérature. Celles employées sont résumées au **tableau 26**.

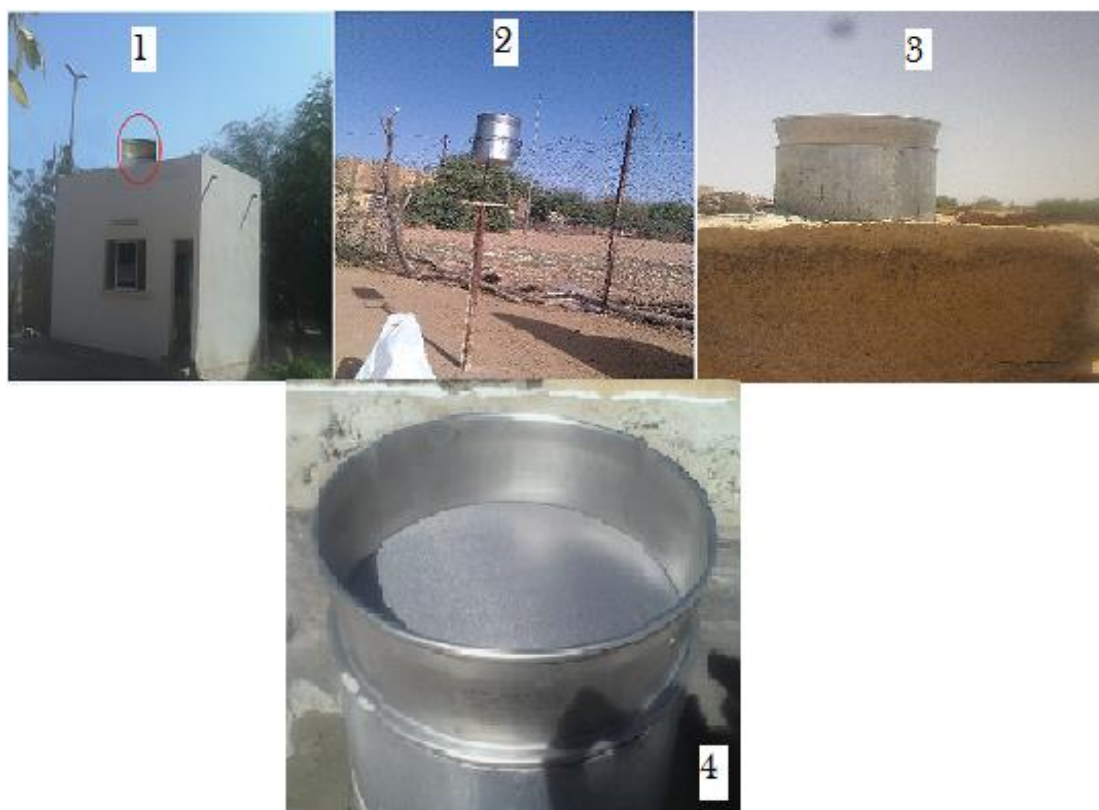
Les équations de Bertrand et Ben Mohamed et al. permettent d'obtenir les niveau de concentration en particules de poussières toutes dimensions confondues, alors que celle de D'Almeida permet à travers les données de visibilité minimale de ressortir les niveaux de concentrations pour seulement les particules fines ($d < 10 \mu\text{m}$) qui sont donc des particules inhalables par les voies respiratoires des personnes exposées, c'est-à-dire ayant un impact sanitaire.

4.4. L'échantillonnage des particules et analyse au laboratoire

Pour vérifier les caractéristiques chimiques des particules de poussières désertiques à l'extrême Nord-Sénégal, il est impératif de procéder d'abord à des campagnes de collectes de particules qui, nécessitent des capteurs. Dans ce sens nous avons pu disposer et installer trois stations de captage de particules (**figure 2**) dans la zone : une station à l'ouest (à Saint-Louis, installée à l'Université Gaston Berger), une station à Podor (installée au niveau de la station météorologique) et une station à Matam (installée à Woudourou à une vingtaine de kilomètre à Vol d'oiseau de Matam).

Pour chaque station, le capteur est composé d'un tamis inox (Acier inoxydable) de 200 mm de diamètre et 0.1 mm de maille, il s'agit des tamis de maille dimensionnée pour le captage seulement de particules de poussières désertiques (0.1 mm correspond à la dimension limite supérieur d'une particule de poussière désertique) et d'un récipient inox permettant de contenir les particules piégées par le capteur.

Figure 2 : Stations de captage de particules : station de l'UGB (1), station de Podor (2), station de Woudourou (3), zoom sur la tête de l'appareil (4).



La technique de prélèvement consiste d'abord à placer l'appareil dans un lieu dégagé et à une hauteur de 3 à 5 m pour éviter des influences éventuelles de l'entourage du milieu. Ensuite observer une durée suffisante pour le captage d'une quantité suffisante devant constituer l'échantillon et enfin procéder à la collecte et à la confection de l'échantillon qui sera acheminée au laboratoire pour l'analyse des composantes. Il s'agit ici de l'analyse chimique. Le but est de distinguer les différentes composantes chimiques des particules de poussières désertiques dans cette partie extrême Nord-Sénégal, permettant de renseigner sur leur toxicité et ainsi de risques qu'elles présentent sur la santé des populations exposées.

4.5. Enquêtes de vulnérabilité

Il s'agit des enquêtes menées auprès des populations sur l'impact de la mauvaise visibilité induite par des événements de poussières sur leurs activités socio-économiques et sur leurs déplacements quotidiens. Le questionnaire est adressé aux acteurs concernés par de tels impacts notamment les transporteurs routiers, les commerçants (pour les activités socio-économiques) et des personnes choisies au hasard pour les questions concernant les déplacements quotidiens des populations. Le logiciel *Sphinx* est utilisé pour la confection du questionnaire et l'exploitation des résultats. Les logiciels *Excel* et *SPSS* ont été utilisés pour le traitement de ces données qualitatives.

4.6. Traitement cartographique

La cartographie utilisée dans ce travail à consister à spatialiser les différentes stations (sites) de notre zone d'étude considérées dans cette thèse. Il s'agit d'abord de localiser l'ensemble de la zone d'étude dans la carte géographique du Sénégal et d'y répertorier les différents sites sur lesquels porte l'étude. Ce traitement est fait à l'aide du logiciel *ArcView 3.2*.

Le *tableau 1* résume l'approche méthodologique.

Tableau 1 : Récapitulatif de l'approche méthodologique

Eléments de Méthodologie	Outils	Techniques/Méthodes	Résultats attendus
• Revue documentaire	- Ouvrages généraux et spécialisés, - Thèses, - Rapport d'étude, - Articles scientifiques, ...	✓ Lectures avec prise de notes, ✓ Synthèse, ...	➤ Etats des connaissances
• Collecte de données quantitatives		✓ Consultation des structures	➤ Disposer des données quantitatives climatiques, lithométéoriques, de visibilité horizontale, sanitaires, ...
• Traitement de données quantitatives	Logiciels statistiques : - Excel, - SPSS, - Khronostat	✓ Traitements statistiques, ✓ Analyses descriptives, ✓ Test de corrélation ✓ Test non-paramétriques, ✓ etc.	➤ Suivi de l'évolution de la fréquence des variables à différents pas de temps, ➤ Corrélations entre variables, ➤ Détection des tendances de rupture, de reprise dans les séries, ...
• Les mathématiques	Equations de : - Bertrand, - Ben Mohamed et al., - D'Almeida	✓ Transformation des données de la visibilité minimale en données de concentration en particules de poussières	Estimation des niveaux de concentration en : ➤ PST (particules en suspension totale), ➤ PM ₁₀ (particules fines de taille < 10 µm)
• Collecte et analyse chimique de particules de poussières désertiques	- Stations de captage de particules, - Laboratoire d'analyse chimique	✓ Choix des sites idéals pour l'installation des capteurs, ✓ Mise en place des capteurs, ✓ Observation d'une durée suffisante pour la collecte de l'échantillon, ✓ Echantillonnage ✓ Analyse chimique des échantillons	➤ Identifier les composantes chimiques des poussières ➤ Etude de leur toxicité
• Enquête de vulnérabilité face à la réduction de la VV par les lithométéores	- Questionnaire (logiciel <i>Sphinx</i>)	✓ Interroger les personnes concernées par l'étude	➤ Etudier les impacts de la mauvaise visibilité sur les activités socio-économiques et sur la mobilité quotidienne des populations
• Cartographie	Logiciel <i>ArcView 3.2</i>	✓ Traitement cartographique des données de coordonnées géographiques des sites de l'étude	➤ Localisation de la zone d'étude ➤ Identification des sites de l'étude

4.7. Difficultés rencontrées

Trois difficultés majeures ont été rencontrées au courant de cette thèse. La première est liée à l'acquisition de toutes les données nécessaires pour ce travail. Le souci n'était pas dû à la disposition de ces dernières auprès des institutions en charge mais plutôt au coût exorbitant qu'elles nous sont revenues. En fait, nous travaillons sur trois stations, pour chacune d'elles, il fallait des données de tous les paramètres du climat, des données de tous les types de lithométéores sur lesquels porte l'étude, des données de visibilité minimale et sur 50 ans (1965-2014) pour chaque paramètre. Le nombre important des paramètres qui sont facturés par unité (une quinzaine), par année (50 ans) et par station (trois) nous a imposé de durs sacrifices financiers. La deuxième difficulté majeure était liée à l'acquisition très tardive des capteurs devant constitué nos stations de captage de particules. Les entreprises en vente de ces matériels au Sénégal n'en disposant pas (plus), il nous a fallu par le biais d'une de ces dernières adresser la commande à l'extérieur, en Allemagne plus précisément, ce qui a pris beaucoup de temps et qui a fait qu'on a pu en disposer qu'en dernière année de la thèse. Ceci ne nous a empêché dès lors de couvrir toute la durée de ce travail, ce qui, hélas ! nous aurait permis de vérifier l'éventuelle variabilité saisonnière et/ou annuelle des composantes chimiques des poussières désertiques dans cette partie purement sahélienne du Sénégal. La troisième difficulté a concerné les données sanitaires. Nous n'avons pu disposer de ces données sur une série voulue du fait entre autres aux problèmes liés à l'archivage des données aux niveaux des structures de santé étudiées. Ceci serait dû à une absence ou un manque d'un travail d'approche entre les différents sous-services composants les Districts et hôpitaux. Ce n'est que récemment que des services de supervision ont été mis en place ou rendus plus dynamiques pour exercer ce travail de collecte et de gestion de ces données des différents sous-services. Néanmoins, malgré ces difficultés, des sacrifices et efforts ont été consentis pour arriver aux résultats présentés aux chapitres II, IV et V. La dernière partie de ce chapitre I aborde la circulation atmosphérique générale en Afrique de l'Ouest.

5. Climatologie de l'Afrique de l'Ouest

En Afrique de l'Ouest et au Sahel, l'alternance de deux masses d'air qui s'opposent par leur humidité détermine le cycle saisonnier du climat.

La saison sèche, d'octobre-novembre à mai, est soumise aux influences des masses d'air boréal en provenance des régions continentales de l'hémisphère nord. Deux anticyclones caractérisent ces masses d'air :

- l'anticyclone des Açores, essentiellement localisé dans les basses couches de l'atmosphère, est à l'origine des vents frais et riches en vapeur d'eau venant du nord : les alizés,
- l'anticyclone maghrébin ou l'anticyclone du Sahara donnant naissance à l'Harmattan, vent chaud et sec de direction nord-est à est, chargé de sable et de poussière.

Durant la saison humide (de juin à septembre), les basses pressions pelliculaires liées à l'énorme apport radiatif que reçoit le Sahara laissent pénétrer les masses d'air austral issues de l'anticyclone Sainte-Hélène. Ce sont des vents maritimes très humides et tièdes de direction sud-ouest appelés moussons.

Les deux masses d'air boréal (Harmattan) et austral (mousson) convergent vers une ceinture dépressionnaire d'environ 200 km de large, appelée Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT). Cette zone de convergence dessine l'équateur météorologique dont la trace au sol est connue sous le nom de Front Intertropical (FIT). Le FIT est situé en moyenne vers la latitude 8° N en janvier-février et atteint 20° N en juillet-août qui sont ses positions extrêmes méridionale et septentrionale. Différentes zones de temps sont définies selon la position du front au cours du cycle annuel des oscillations du FIT.

5.1. La circulation en Saison sèche

La saison sèche, d'octobre-novembre à mai, est soumise aux influences des masses d'air boréal en provenance des régions continentales de l'hémisphère nord. Deux anticyclones caractérisent ces masses d'air : l'anticyclone des Açores (essentiellement localisé dans les basses couches de l'atmosphère, étant à l'origine des vents frais et riches en vapeurs d'eau venant du nord : les alizés) et l'anticyclone maghrébin ou l'anticyclone du Sahara donnant naissance à l'Harmattan. Ce sont d'ailleurs ces vents de basses couches appelés Harmattan qui dominent la circulation atmosphérique. Ces vents sont la réponse au fort gradient de pression méridien résultant de la

présence de l'anticyclone du Sahara et de la zone de basses pressions au niveau de l'équateur. L'Harmattan de l'Afrique du Nord a donc une origine continentale et parcourt une longue surface désertique où les températures sont élevées et la quantité de vapeurs d'eau est extrêmement faible. Ainsi, l'Harmattan est un vent extrêmement sec, chaud la journée, froid durant la nuit et souvent chargé de poussières (HAMILTON et ARCHIBALD, 1945). La saison hivernale, en Afrique au nord de l'Equateur, est également marquée par la formation, durant la nuit, de jets de basses couches (Low Level Jets, LLJs) dans la circulation d'Harmattan. Les LLJs se forment au-dessus du continent Africain tout au long de l'année mais leur fréquence d'occurrence est plus importante en hiver qu'en été. Ainsi, d'après BOU KARAM (2008) 50% des nuits hivernales connaissent la formation de LLJs contre 30% en été (on reviendra sur les LLJs dans les pages qui suivent). De plus, la fréquence d'occurrence et l'intensité des LLJs sont accentuées par la présence d'orographie qui influence le flux général d'Harmattan. C'est typiquement le cas au-dessus de la dépression de Bodélé au Tchad, du centre du Niger et de l'Est du Soudan (BOU KARAM, 2008).

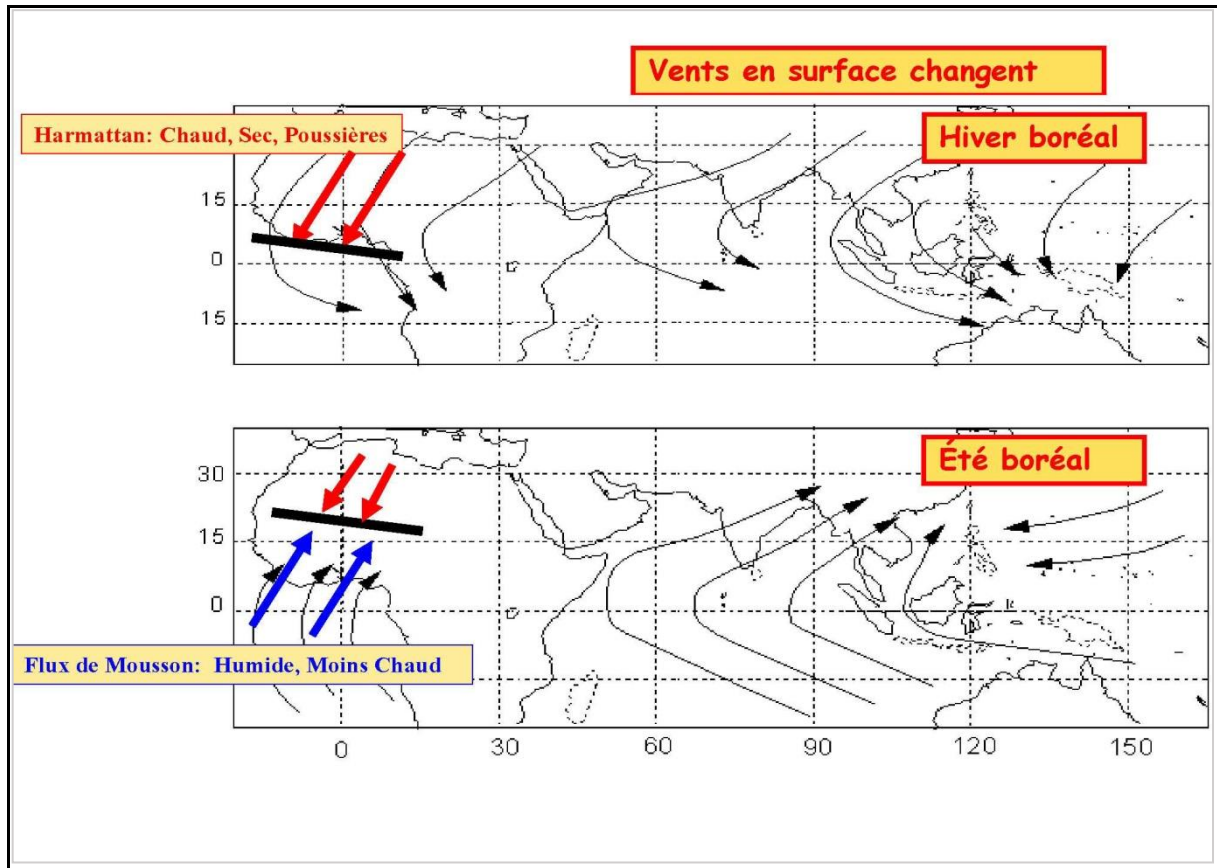
5.2. La dynamique de la « mousson » ou saison des pluies

D'une durée beaucoup plus courte que la saison sèche, la mousson est un terme venant de "Mausam" ou "mawsin" en arabe, signifiant saison et qui sous-entend saison des pluies. Le système de mousson, essentiellement continental, est généralement décrit comme un changement de direction des vents de surface au passage de l'équateur et par conséquent de la présence des pluies. Par extension et abus de langage, les régions terrestres subissant une alternance entre saison sèche et saison humide sont appelées « zones de mousson » (PEYRILLE, 2006). Or toutes les régions possédant une saison des pluies ne sont pas des zones de mousson. Pour être définie comme tel, une saison des pluies doit strictement respecter les critères établis par RAMAGE (1971) qui sont un changement de la direction du vent entre Janvier et Juillet d'au moins 120° (inversion des alizés), une fréquence moyenne d'occurrence de chaque régime de vent supérieure à 40% en Juillet et Janvier, et un vent moyen supérieur à 3 m/s pendant au moins un mois.

Les principales zones de mousson en accord avec ces critères sont l'Asie du Sud-Est avec la Mousson Indienne, l'Afrique de l'Ouest et la partie sud du continent Africain, mais aussi le Nord-Ouest de l'Australie. Ces dernières correspondent aux régions localisées là où se réalise la plus grande oscillation saisonnière de la zone de convergence inter-tropicale (ZCIT) qui est la signature principale de cette mousson (REDELSPERGER et al., 2002) et qui constitue la surface de rencontre en moyenne troposphère entre l'Harmattan (vents de nord-est provenant du Sahara

et transportant de l'air chaud et sec) et les alizés (vents de sud-ouest provenant de l'océan Atlantique et transportant de l'air plus froid et humide) comme représenté sur la *figure 3*.

Figure 3 : Schéma représentatif de la mousson tiré du site AMMA International



La mousson est caractérisée par des systèmes pluviogènes divers, isolés, organisés en amas ou structurés en lignes (appelés « lignes de grains »).

Pour l'Afrique de l'Ouest, la mousson a lieu lors de l'été boréal (de Juin à Septembre) passant d'une position côtière, le long du Golfe de Guinée (5°N), à une position plus au Nord, loin dans les terres, sur le Sahel (10°N), à la limite Sud du Sahara. Ce décalage vers le Nord de la convection permet le développement des précipitations intenses vers la zone sahélienne très dépendante de ces apports puisque ce sont les seules sources d'eau de cette région. La Mousson Africaine n'est pas d'une intensité régulière d'une année à l'autre comme le montre GRIST et NICHOLSON (2001), ce qui explique parfois des sécheresses très importantes. Les sécheresses provoquées par ces irrégularités dans le régime pluviométrique ne sont pas seulement limitées au Sahel, mais sont aussi observées sur les côtes du Golfe de Guinée (LEBEL et al., 2000). Le déficit hydrique de ces régions a un fort impact sur la croissance et sur le développement économique notamment sur l'agriculture, principale ressource des pays de l'Afrique de l'Ouest. Ces

sécheresses sont la signature de la variabilité du climat en Afrique de l'Ouest. Or, cette variabilité temporelle est toujours difficile à évaluer même en connaissant l'un de ses facteurs climatiques dominant qu'est la Mousson de l'Afrique de l'Ouest (MAO). Ces difficultés sont principalement dues aux interactions complexes entre l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère qui semblent contrôler la dynamique de la Mousson de l'Afrique de l'Ouest et le cycle de vie des systèmes pluviométriques.

Dans le but de comprendre ces interactions et ces variations, la communauté internationale a mis en place un programme d'Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine (AMMA), s'échelonnant sur la période 2001-2012, dont les deux principaux buts sont :

- Améliorer la compréhension de la Mousson Africaine de l'Ouest et de son influence sur l'environnement physique, chimique et de la biosphère aux échelles régionale et globale,
- Produire les connaissances qui permettront de relier la variabilité du climat aux problèmes de santé, de ressources en eau et de sécurité alimentaire pour les nations de l'Afrique de l'Ouest et de définir ainsi les stratégies de surveillance appropriées.

Le déclenchement de la mousson (Onset) est classiquement défini (voir par exemple SULTAN et JANICOT, 2003) comme une migration subite (en quelques jours) des précipitations vers le nord, sans critère dynamique ou thermodynamique encore clairement identifié qui permettrait de caractériser cette mise en place même si pas mal d'auteurs ont tenté d'en donner des explications.

5.3. La circulation de Mousson

La circulation de mousson africaine de façon générale s'organise en effet à l'échelle régionale (*figure 9*) autour d'éléments clés du mouvement zonal en haute et moyenne troposphère (le Jet d'est tropical, le Jet d'est africain et le Jet d'Ouest subtropical), ainsi qu'en basses troposphère (le flux de mousson et l'Harmattan). La circulation de mousson africaine implique également à l'échelle régionale une zone de convergence en basses couches connus sous le nom de Front intertropicale ainsi que deux principales structures convectives : la ZCIT, caractérisée par un maximum de température potentielle équivalente (θ_e), et la dépression thermique saharienne associée à un maximum de température potentielle θ . Le cycle saisonnier de la mousson africaine, qui revêt une importance cruciale pour les populations locales, fait l'objet d'une description détaillée et enfin de cette partie sur la mousson, un accent est mis sur son cycle diurne.

5.3.1. La circulation dans les basses couches

5.3.1.1. Le flux de mousson

Le flux de mousson est un vent de sud-ouest dans les basses couches dirigé de l'océan Atlantique vers le continent. Son épaisseur varie de 3000 m sur la mer à moins de 1000 m vers 15-20°N.

L'origine de ce flux est liée au gradient méridien de température (et donc de pression existant entre l'océan au sud et le continent au nord) qui s'oriente, à partir du printemps, du sud vers le nord, avec des températures de surface autour de 26°C dans le golfe de Guinée (0°N) et proche de 40-45°C sur le Sahel (15°N). Ce gradient thermique permet à l'alizé sud et à l'équateur météorologique de traverser l'équateur géographique. Cet alizé de direction initiale Sud-est se retrouve au nord de l'équateur dévié vers l'ouest par la force de Coriolis passant ainsi à une direction Sud-ouest générant le flux de Mousson.

Entre mars et mai, la vitesse moyenne du flux de mousson reste de faible intensité (3 à 5 m/s). Vers fin-juin ou début juillet, le flux s'accélère et peut atteindre une force moyenne de 10 m/s car le gradient thermique océan-continent se renforce avec la mise en place d'une langue d'eau froide équatoriale qui fait chuter la température de surface de la mer de 26 à 24°C. Ce mécanisme est lié à la divergence du transport d'Ekman.

Le flux de mousson apporte l'humidité nécessaire à la formation des zones de convection profonde. L'intensité du flux de mousson et son contenu énergétique sont alors déterminants pour le positionnement de la convection nuageuse sur le continent du fait qu'il constitue le principal moyen de transport de l'humidité depuis l'océan (de la vapeur d'eau issue de l'évaporation de la surface océanique) vers les terres.

Le flux de mousson est bien marqué durant la nuit du fait de l'absence du mélange turbulent (BLACKADAR, 1957). Son intensité atteint un maximum durant les premières heures de la matinée avec des vents de l'ordre de 20m/s aux alentours de 500m d'altitude (LOTHON et al., 2008). Sur la verticale et au nord de 14°N, la couche d'air humide et relativement froid associée au flux de mousson durant la nuit, s'étend sur 1500 à 2000 m d'altitude depuis la surface (BOU KARAM et al., 2008)

BEUCHER souligne que la taille du continent dans l'hémisphère d'été joue un rôle clé dans l'établissement ou non du flux de mousson. Il soutient qu'en effet, un flux de mousson ne peut pas s'établir si le continent n'est pas suffisamment étendu pour favoriser le creusement d'une

dépression thermique en surface ; c'est d'ailleurs pour cette raison, poursuit-il que la zone de mousson sur l'Amérique centrale n'est pas étendue spatialement. L'épaisseur du flux de mousson dépend avant tout de sa localisation : sur mer, il est proche de l'épaisseur du flux d'alizés (2 à 3 km), sur continent, il dépend avant tout de la distance qui le sépare de la côte

5.3.1.2. L'Harmattan

L'Harmattan est un vent de basses couches et de secteur NE, chaud et sec, en provenance du Sahara. Il est présent toute l'année sur l'Afrique du nord, à l'est du méridien de Greenwich. Il est particulièrement intense en hiver (5-8 m/s en moyenne mensuelle). Son intensité, variable au cours de l'année, est en partie liée à la circulation cyclonique au niveau du Sahara. En été, il est associé à une dorsale anticyclonique localisée sur le bassin méditerranéen, et présente alors une intensité beaucoup plus faible (3-5 m/s en moyenne mensuelle). L'Harmattan est contrôlé par le gradient de pression qui existe entre le Heat Low et les anticyclones Libyen et des Açores (SULTAN et JANICOT, 2003).

5.3.1.3. Le front Intertropical (FIT)/ Inter Tropical Discontinuity (ITD)

La rencontre entre le flux d'Harmattan et le flux de mousson crée une zone de convergence en basses couches appelée Front intertropical (FIT). Il faut remonter à la fin des années 40, après la seconde guerre mondiale, pour trouver l'origine du mot FIT : les prévisionnistes de l'époque avaient trouvé une similitude entre la structure pensée du front de mousson et les fronts des moyennes latitudes. La comparaison n'a plus lieu d'exister, mais la terminologie de FIT est restée. Dans le monde anglo-saxon, on préfère toutefois parler de discontinuité intertropicale (Inter Tropical Discontinuity ou ITD). Le FIT marque donc la limite entre les masses d'air sec sahariennes et les masses d'air humide océaniques. L'Harmattan chaud et sec, surmonte le flux de mousson dans la ZCIT.

D'après BESSON (2009) le FIT peut-être défini comme la configuration isobarique formée d'un anticyclone (celui de Sainte-Hélène dans le cas présent), auquel fait face, dans l'autre hémisphère, une dépression (Dépression Saharienne-Heat Low). Le gradient trans-équatorial ainsi créé dirige les vents vers la dépression, à travers les isobares (puisque composante horizontale de la force de Coriolis est nulle)

Le matin, la trace du FIT en surface correspond à la position du minimum de pression et devient alors le centre de la dépression thermique saharienne.

La trace du FIT en surface suit la position apparente du soleil, avec un décalage de 6 à 8 semaines. Il se déplace du sud au nord de mars à août, et de nord au sud de fin août à fin février. Au cœur de la mousson d'été, lorsque le flux de mousson est le plus intense, la trace en surface du FIT se positionne en moyenne vers 20°N sur l'Afrique de l'Ouest. En hiver, le FIT se positionne le long de la côte vers 5°N : sa trace en surface se confond alors avec celle de la ZCIT.

Au cœur de la mousson d'été, le FIT présente une structure penchée, en hiver, le FIT, qui se retire vers la côte, présente au contraire une structure verticale.

L'analyse de la structure verticale du FIT réalisée par de nombreux auteurs (ex. LE VOURC'H et al., 2002) a permis de définir une structure quasi-permanente qui détermine les différents types de temps qui peuvent être observés en Afrique de l'Ouest :

- **Zone A** : située au Nord de la trace au sol du FIT, elle correspond au climat sec de type saharien. Les lithométéores associés sont généralement les brumes sèches, les brumes de sable, les vents de sable. Dans certains cas, des pluies liées aux invasions d'air froid boréal peuvent se produire (« pluie des mangues »),

- **Zone B** : située au Sud de la trace au sol du FIT, elle est caractérisée par une faible épaisseur de flux de mousson. Au-dessus règne l'Harmattan. Les formations nuageuses présentent de fortes évolutions diurnes et peuvent provoquer des orages isolés en cours d'après-midi,

- **Zone C** : elle correspond à la zone où l'impact du flux de mousson est maximal, et où se trouve la plus forte convergence. Cette région est divisée en deux zones. Le régime perturbé de la **zone C1** située au nord est à dominante orageuse. Les perturbations mobiles de l'Afrique y circulent qu'ils s'agissent des ondes d'Est ou des lignes de grains (LG). La **zone C2** est caractérisée par des précipitations abondantes et régulières, mais avec un caractère moins instable,

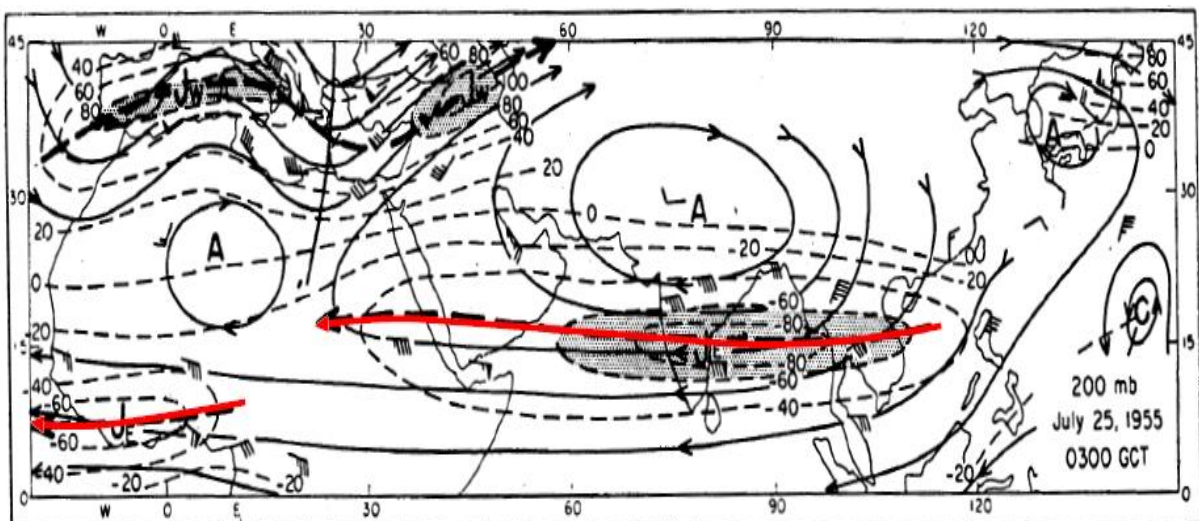
- **Zone D** : zone où l'alizé de l'hémisphère Sud est dévié par l'équateur, elle ne présente pas encore de composante Ouest. Cette zone de divergence est à l'origine d'une saison sèche particulière au Sud de 5°N.

5.3.2. Circulation en moyenne et haute altitude (troposphère)

5.3.2.1. Le jet d'est tropical

Le jet d'est tropical (TEJ), jet de haute troposphère situé entre 0 et 5° Nord constitue la branche horizontale d'altitude de la cellule de type Walker. Ce courant jet, de plus grande extension spatiale que le Jet d'est africain (JEA, voir ci-dessous), doit son existence au gradient thermique établi entre l'océan Indien et les hauts plateaux de l'Himalaya, qui introduit une source de chaleur dans les couches moyennes et élevées de la troposphère pendant l'été boréal. Il n'entre en pleine activité que lorsque la Mousson Africaine est pleinement établie (SULTAN, 2002). Entre fin juin et début septembre, il se positionne sur l'Afrique de l'Ouest vers 10°N et atteint une force moyenne de 15-18m/s. A grande échelle, la mousson indienne alimente le TEJ via la cellule de Walker appelée également mousson transverse. Cette cellule permet de transporter de l'énergie potentielle sur de grandes distances et participe ainsi au maintien du TEJ jusqu'en Afrique de l'est (ici leur maintien est dû par le dégagement de chaleur latente au sein de la ZCIT). Le TEJ se renforce à nouveau sur l'Afrique de l'Ouest grâce aux hauts géopotentiels qui se développent en été vers 200 hPa au niveau du Sahara en réponse au chauffage thermique de surface et, dans une moindre mesure, à la chaleur latente par les systèmes convectifs de méso-échelle (autrement dit en raison du gradient thermique entre zones continentale et océanique). Il disparaît ensuite sur l'océan Atlantique à cause de la relative uniformité des températures.

Figure 4 : Ligne de flux (trait noir continu) à 200 hPa le 25/07/55.



Le Jet d'est tropical (TEJ) présente deux maxima (flèches rouges) : le premier sur l'Asie du sud-est, le second sur l'Afrique de l'ouest. Source : KOTESWARAM, 1958

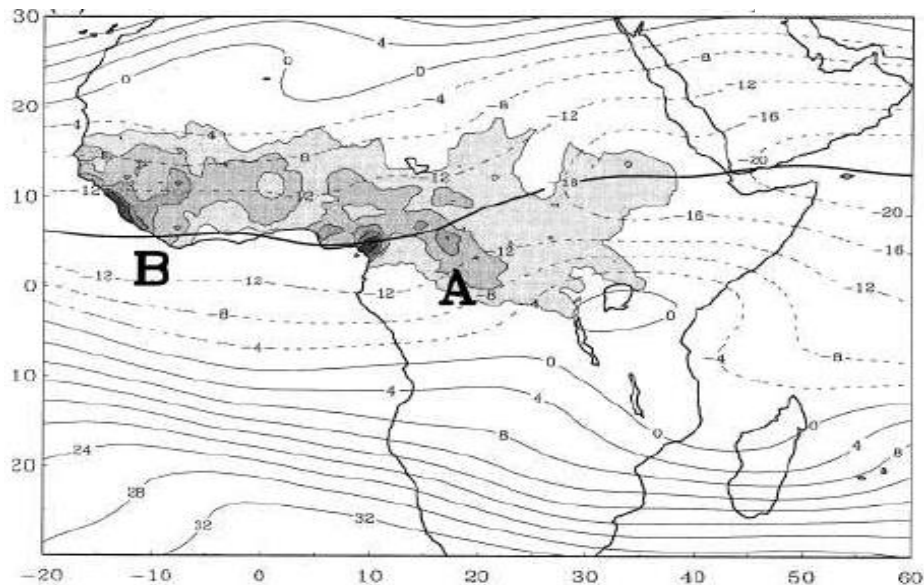
Le jet d'est tropical est situé entre les deux Jet Sub-Tropicaux (STJ) au nord et au sud. L'évolution de ce jet montre comme pour l'AEJ une variation d'intensité et de localisation (entre Juillet et Août) durant la saison et entre une année sèche et une année humide. Lors d'une année sèche le TEJ est plus faible et près de l'équateur. Pour une année humide il est plus fort et plus au nord.

Ce comportement apparaît donc opposé à celui de l'AEJ et suggère une anticorrélation tout au moins concernant l'intensité (FONTAINE et JANICOT, 1992).

L'évolution du TEJ signe particulièrement bien la mise en place de la mousson (SULTAN, 2002 ; FONTAINE et JANICOT, 1992). En effet, l'installation du TEJ se réalise juste après l'Onset. Cette caractéristique est observée quelle que soit l'intensité de la Mousson Ouest Africaine.

Les courants jet peuvent présenter des noyaux de vent intense (renforcement local du vent), communément appelé « Jet Streak » en altitude.

Figure 5 : Coupe horizontale de la Composante U du vent à 200 hPa ($m.s^{-1}$) sur l'Afrique de l'Ouest.



Les zones grises représentent les précipitations au sol (Nicholson et Grist, 2003)

Le principal jet streak du TEJ, zone de vent plus fort, est localisé en moyenne à $25^{\circ}E-10^{\circ}N$ (zone A sur Figure 4), et correspond au 1^{er} maximum de convection en Afrique centrale. Le second streak est localisé au sud du 2^{ème} maximum de convection (Zone B sur Figure 5), situé sur la côte de l'Afrique de l'ouest ($15^{\circ}O - 10^{\circ}N$).

Deux processus peuvent expliquer ces streaks :

- l'injection de masse d'air par l'activité convective située à l'Est,
- une réponse géostrophique au dégagement de la chaleur latente associé.

Ces deux zones se distinguent par les propriétés suivantes (voir également la Figure 5) :

- **Zone A** : Cette zone de l'Afrique centrale se trouve en sortie de la principale branche asiatique du TEJ. Elle est associée à une augmentation de la divergence des niveaux supérieurs qui pourrait favoriser les développements convectifs (REITER, 1969). Ceci suggère que la variabilité du TEJ contrôle en partie la variabilité des précipitations en Afrique Equatoriale,

- **Zone B** : Cette zone, principale région d'activité convective de l'Afrique de l'Ouest, se trouve au Nord de l'axe du TEJ. THORNCROFT et BLACKBURN (1999) attribuent la formation du TEJ au réchauffement induit par la convection. Ainsi, la variabilité du TEJ serait une réponse à, et non la cause de, la variabilité des précipitations, tandis que d'autres auteurs (DRUYAN et HALL, 1996, REITER, 1969) suggèrent que le TEJ favorise les développements convectifs. Comme nous le montrerons dans la suite, cette dernière hypothèse semble être en accord avec les résultats obtenus dans le cadre de la comparaison entre une année sèche et une année humide faite dans la première étape de ce travail.

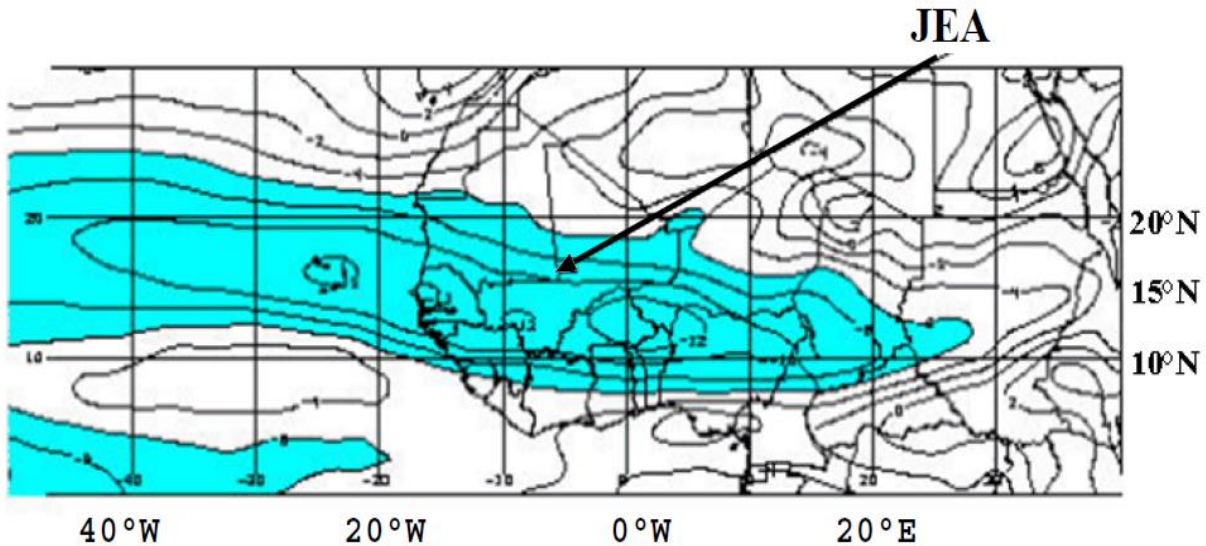
Ces deux zones d'activité convective produisent une rupture zonale apparente du TEJ (REDELSPERGER et al., 2002) en sortie de flux à 25°E (Zone A) et en entrée de flux à 15°O (Zone B). La localisation des cœurs de TEJ dépend ainsi fortement de la localisation des maximums de convection qui migrent de concert de l'Est vers l'Ouest.

5.3.2.2. Le Jet d'est africain

Le Jet d'est africain (JEA) est un jet de moyenne troposphère, situé entre 600 et 700 hPa et venant de l'Est. Il s'étend de la mer rouge (vers 50°E) jusqu'à l'Atlantique est (vers 40°W), soit sur près de 10 000 km de long. Il s'observe pendant toute la période de mousson d'été (de fin avril à fin octobre) sur la région sahélienne. Le JEA se situe vers 10°N en régime de pré-mousson (mai-juin) et de retrait (septembre-octobre), et remonte entre 13 et 15°N au cœur de l'été (juillet-août, voir figure). En juillet, le JEA atteint en moyenne mensuelle une intensité de 9 m/s sur l'Afrique de l'est (50°E), perd un peu de sa vigueur sur l'Afrique centrale (7 à 8 m/s vers 20-30°E) et atteint son maximum sur l'Afrique de l'Ouest (11 m/s entre 0°W et 40°W) en hiver, ce

flux d'est s'établit le long de la côte africaine (vers 5°N) mais devient trop faible (5 m/s en janvier) pour conserver son appellation de JEA.

Figure 6 : Vent zonal et jet d'est africain (JEA) à 600 hPa entre le 21 et 31/08/2000 pendant la campagne JET2000.



Les zones en vert correspondent aux zones où l'intensité du JEA est supérieure à 12kt

Source : THORNCROFT, 2000. Reproduit avec la permission de THORNCROFT et adapté (notation) par BEUCHER F. d'après ce dernier

L'origine du JEA est thermique : les vents d'est vers 600-700 hPa s'intensifient pendant la mousson d'été en liaison avec le renforcement du gradient méridien de température et d'humidité en basse troposphère entre le Sahara (45°C en surface et faible humidité) et le golfe de Guinée (25°C en surface et forte humidité) (BURPEE, 1972 ; THORNCROFT et BLACKBURN, 1999). Un fort gradient implique ainsi un fort AEJ (FONTAINE et JANICOT, 1992). Les observations suggèrent également un rôle important du gradient d'humidité du sol. Sans un fort gradient d'humidité du sol, le gradient de température méridien ne semble plus pouvoir produire un AEJ avec les intensités observées (COOK, 1999). Ces deux mécanismes seraient nécessaires au maintien de l'AEJ durant toute la saison.

La circulation méridienne verticale associée à la ZCIT, la dépression thermique Saharienne (Heat Low) et les vents zonaux associés semblent également jouer un rôle important dans le maintien de l'AEJ (THORNCROFT et BLACKBURN, 1999 ; BURPEE, 1972).

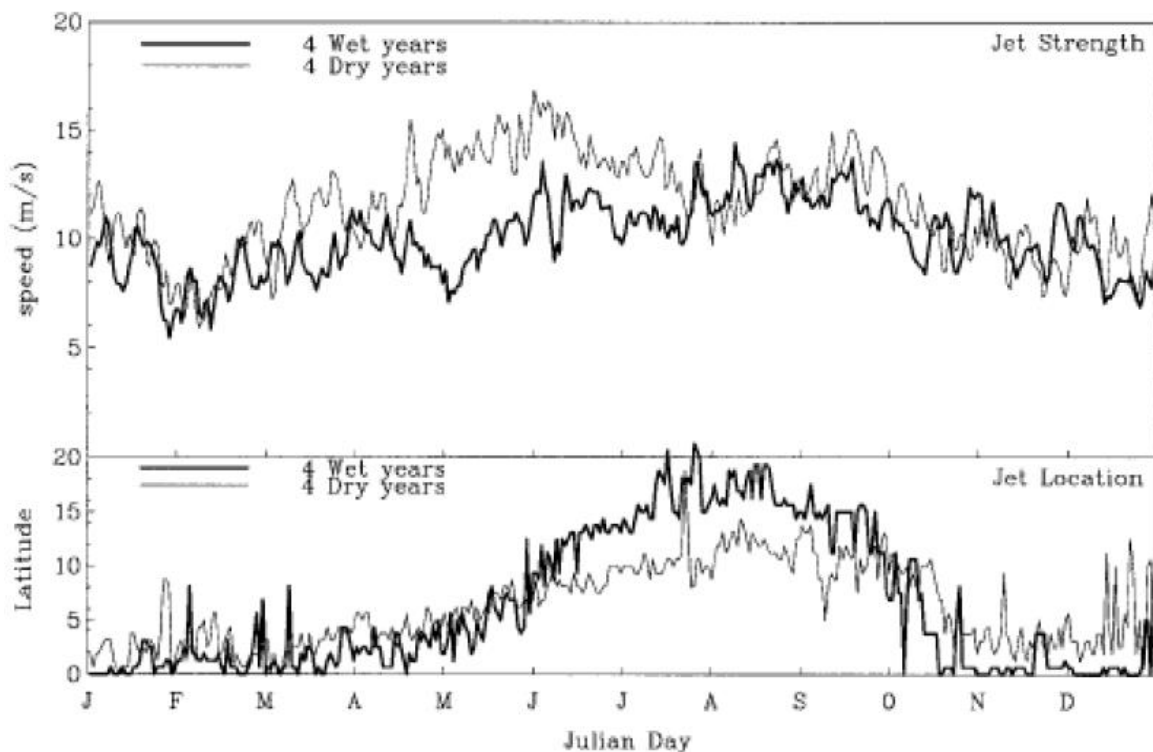
Le JEA joue un rôle important dans la formation d'événement pluvieux de type lignes de grains. Les mécanismes de développement et de structuration des lignes de grains sont pilotés principalement par le cisaillement vertical de vent et par les intrusions d'air sec, qui dépendent

eux-mêmes de la position et de la force du JEA. Les lignes de grains et autres systèmes convectifs de méso-échelle s'observent plus fréquemment sur le flanc sud du JEA que sur son flanc nord, car les ondes d'est y sont plus nombreuses (plus de convergence) et d'épaisseur du flux de mousson y est plus important (point de convection libre plus facilement atteint).

L'AEJ présente de fortes variations spatiales et temporelles. Ses variations en intensité (entre mi-Avril et fin Août) ou en localisation (entre Juin et mi-Septembre) semblent même gouverner l'intensité des précipitations (NEWELL et KIDSON, 1984) :

- Année sèche : l'AEJ est plus fort (12 m.s^{-1} en moyenne) et près de l'équateur (10°N) (*figure 7*),
- Année humide : l'AEJ est plus faible (10 m.s^{-1} en moyenne) et plus au nord (15°N) (*figure 7*).

Figure 7 : Vitesse et localisation latitudinale de l'AEJ, moyenne journalière, pour une mousson humide et une mousson sèche



(GRIST et NICHOLSON, 2001)

Lors d'une saison sèche, le jet plus fort est également beaucoup plus étendu (entre 0° et 12°N), étouffant ainsi l'ensemble des mouvements ascendants au sein de la mousson (ZCIT), pouvant ainsi expliquer la différence d'intensité en précipitation (GRIST et NICHOLSON, 2001). L'affaiblissement de l'AEJ lors d'une mousson intense pourrait résulter de l'apparition d'instabilités barotropes et baroclines qui puisent leur énergie dans le jet (cisaillements

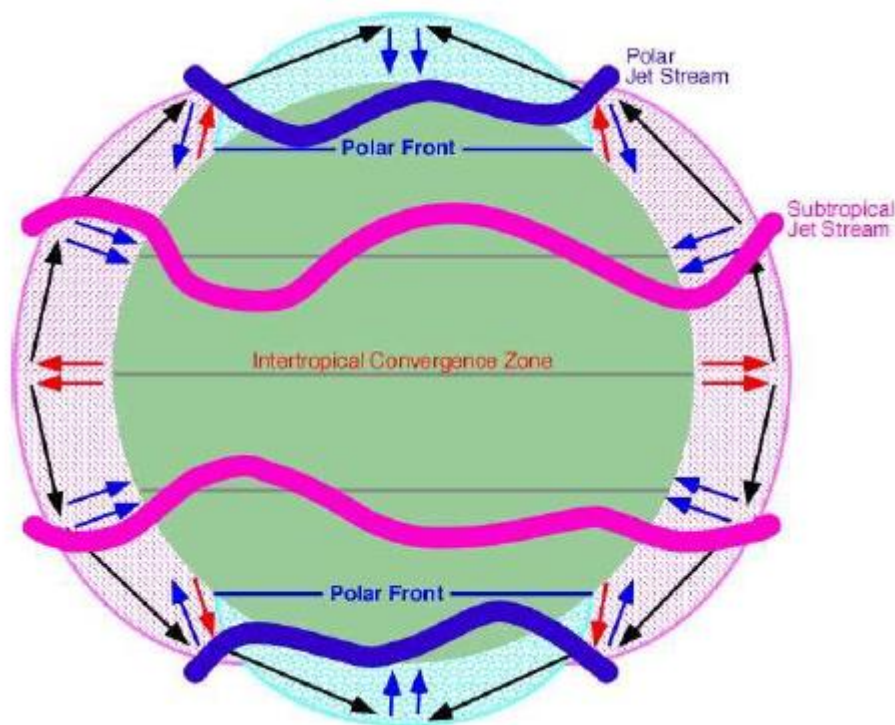
horizontaux et verticaux) menant au développement des ondes Est-Africaine (AEW) (REDELSPERGER et al., 2002).

5.3.2.3 Jet d'Ouest Sub-Tropical (JOST)

Les deux Jets Ouest Sub-Tropicaux (Nord et Sud) (*figure 8*), situés en haute troposphère et haute latitude au niveau des branches subsidentes des cellules d'Hadley, sont de directions opposées à l'AEJ et au TEJ et présentent de fortes ondulations Nord-Sud. Ces jets résultent de la conservation du moment cinétique des particules d'air entraînées par les branches horizontales des cellules d'Hadley qui se retrouvent ainsi avec une énergie cinétique plus forte que l'environnement et donc avec une composante de vent vers l'Est.

L'intensité des JOST est donc liée à l'activité des cellules de Hadley, et par conséquent pour l'Afrique de l'Ouest, à la convection profonde humide dans la ZCIT.

Figure 8 : Schéma conceptuel de la circulation atmosphérique en zone tempérée



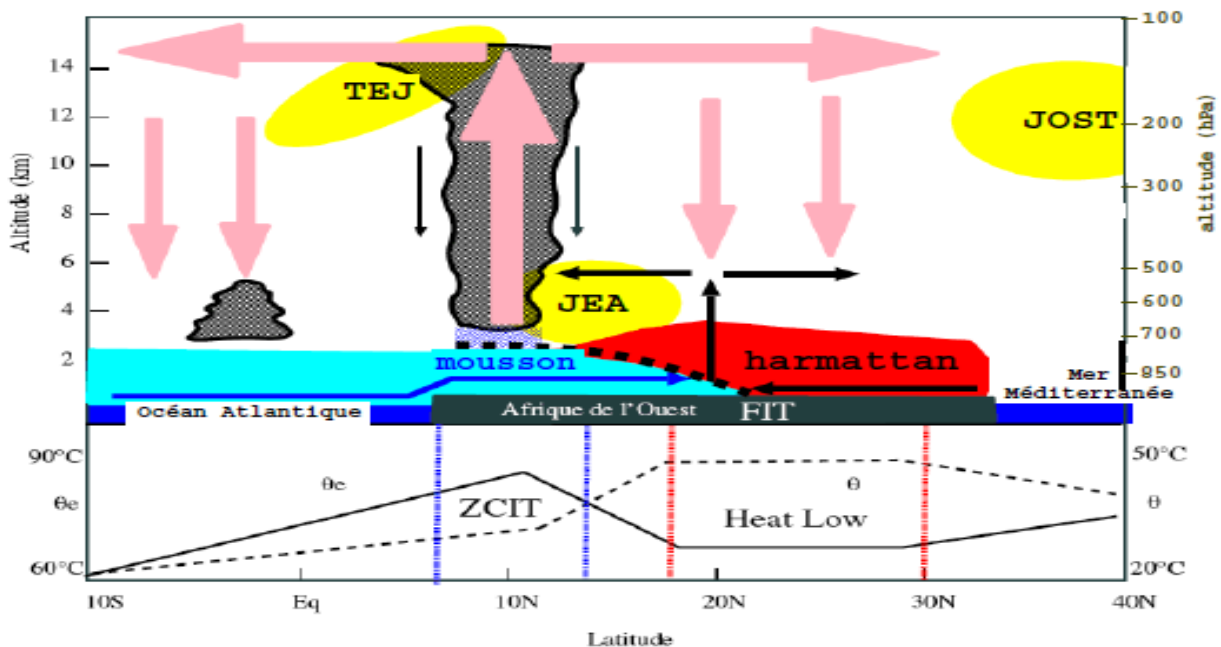
PIDWIRNY (2006)

La migration du JOST vers le nord très importante pour l'installation de la Mousson Africaine dépend donc de l'activité et de la localisation des cellules de Hadley. Comme le montre le diagramme Hovmüller donnée par la Figure 7, le JOST migre vers le Nord avant l'installation de la mousson, il se déplace alors de 25°N à 40°N en juillet, et n'influence plus le Sud de l'Afrique de l'Ouest. Le Jet atteint sa position la plus au Nord lors de la pleine activité de la Mousson

Africaine. Le JOST reprend sa localisation initiale lors du recul de la mousson en Septembre (FONTAINE et JANICOT, 1992).

Toutes ces composantes de la dynamique atmosphérique qui prennent part au développement de la Mousson Africaine de l'Ouest, ont des fonctionnements individuels qui sont maintenant parfaitement identifiés et connus. Par contre, de grandes inconnues restent sur les processus gouvernant leur évolution. Leurs interactions et les effets de ces interactions (mise en phase, interaction non linéaire, résonance etc.) sur le déclenchement et la modulation de l'intensité des précipitations aux échelles intra et inter-annuelles, sont également encore mal compris.

Figure 9 : Schéma conceptuel représentant, en moyenne zonale, les éléments clés de la mousson africaine pendant l'été boréal



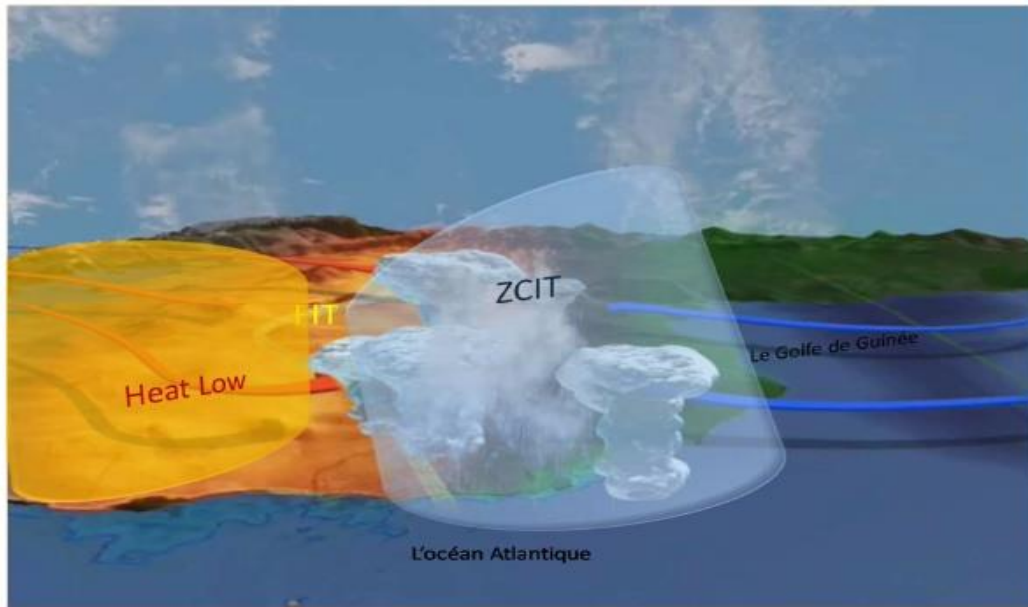
Circulation méridienne (flux de mousson et d'Harmattan, en basses couches), mouvements verticaux, et vents zonaux dominants (JEA, TEJ, et JOST). Le front intertropical (FIT) est représenté par une ligne noire en trait épais tiretés. Le graphique du bas représente les profils méridiens de la température potentielle θ et de la température équivalente θ_e dans la couche limite atmosphérique. Source : d'après les ateliers AMMA 2004.

5.3.2.4. Les zones de convection sèche et humide

Comme nous l'avons vu jusqu'ici, la circulation de la mousson africaine s'organise à l'échelle régionale autour d'éléments clés du mouvement zonal en haute et moyenne troposphère (TEJ, JEA et JOST), ainsi qu'en basse troposphère (le flux de mousson et l'Harmattan). Elle implique aussi à la même échelle une zone de convergence en basses couches connue sous le nom Front Intertropical. Mais à ces éléments clés s'ajoutent deux principales structures convectives de

grande échelle que sont la *Zone de Convergence Intertropicale* (ZCIT), caractérisée par un maximum de température potentielle équivalente et la *dépression thermique saharienne* (SHL : Saharan Heat Low) associée à un maximum de température de surface entre juin et septembre (LAVAYSSSE et al., 2009). Ces deux principales structures convectives sont essentielles dans le fonctionnement de la mousson Africaine.

Figure 10 : Les zones de convection sèche et humide en Afrique de l'Ouest durant la saison de mousson



Source : BOU KARAM (2008)

5.3.2.4.1. La ZCIT (ou convection profonde humide) et les systèmes convectifs de méso-échelle (MCS)

D'environ 200 km de large, la Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT) est une ceinture dépressionnaire située en moyenne troposphère et marque la rencontre en cette altitude des deux masses d'air boréal (Harmattan) et austral (mousson). Cette zone de convergence dessine l'équateur météorologique dont la trace au sol est connue sous le nom de Front Intertropical (FIT) décrit précédemment. En effet la convergence en basse couche du flux de mousson et de l'Harmattan est évacuée par ascendance et sous forme de chaleur latente au niveau du maximum de température potentielle équivalente (SULTAN et JANICOT 2003, SULTAN et al. 2007) permettant une convection profonde très active qu'est cette Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT).

Sur le continent africain l'alternance des saisons sèches et humides en Afrique résulte principalement de la migration de la ZCIT. L'arrivée de la ZCIT au-dessus du continent à partir du mois de Mai annonce l'arrivée des pluies sur le Sahel (SULTAN et JANICOT, 2000 ; LE

BARBE et al., 2002). En particulier, son arrivée au-dessus de l’Afrique de l’Ouest y marque le début de la saison des pluies. Cependant, BOU KARAM (2008) souligne que la vision continue des pluies dans la ZCIT est trompeuse car elles sont en majorité apportées par des systèmes convectifs de méso-échelle (MCS). La convergence dans la ZCIT a en effet tendance à s’organiser en MCS. Les MCS sont plus violents, mieux organisés et vivent plus longtemps lorsque le cisaillement vertical de vent est fort en basses couches et lorsque de l’air sec est présent en moyenne troposphère, ce qui est plus fréquent sur terre que sur mer (BEUCHER, 2010). Les MCS ou lignes de grains fournissent la majorité des pluies sur l’Afrique de l’Ouest (MATHON et LAURENT, 2002 ; LE BARBE et al., 2002 ; D’AMATO et LEBEL, 1998). Ces systèmes se déplacent d’Est en Ouest et modulent les précipitations sur des périodes de 5 à 6 jours. BEUCHER soutient que la vitesse discrète d’un amas convectif est de l’ordre d’une dizaine de nœuds en liaison avec les vents d’est observés sur l’ensemble de la troposphère tropicale. Cependant, ces vitesses varient fortement non seulement d’un système à l’autre mais aussi dans le temps et dans l’espace. Une fois arrivés sur l’Atlantique, ils se transforment parfois en cyclones. La variabilité intra-saisonniers est constituée d’une succession de phases actives/inactives de ~10 à 20 jours pendant la période de Juillet à Septembre (BOU KARAM, 2008).

Figure 11 : Image Bi-satellite infrarouge du 08 octobre 2007 à 00 UTC

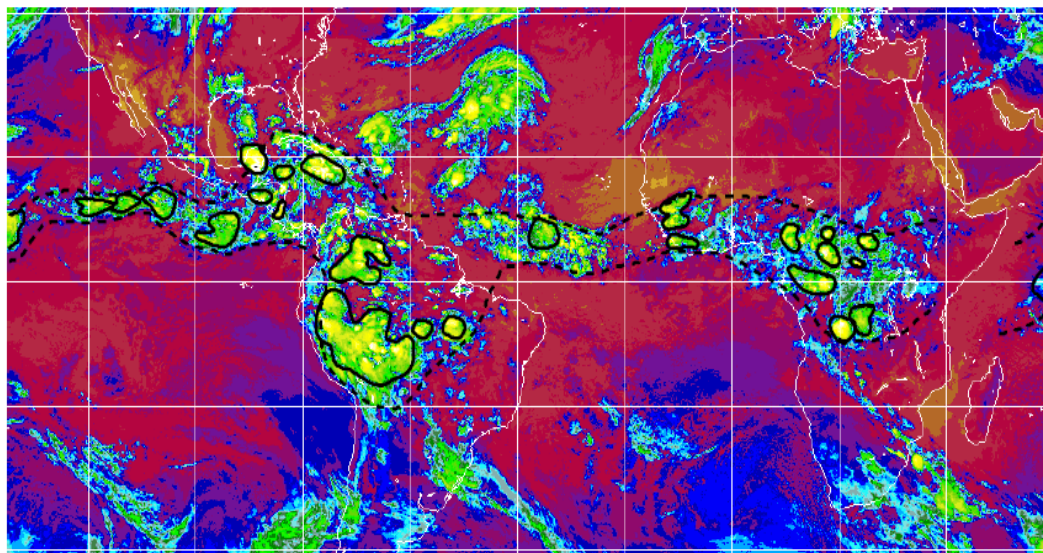


Image couleur recomposée allant du rouge-orangé (zones chaudes sans nuages) au vert-blanc (zones froides représentant des nuages à sommets élevés comme les cumulonimbus). Les MCS (systèmes convectifs de méso-échelle) visibles au sein de la ZCIT sont entourés par un trait noir continu ; l’enveloppe en traits tiretés noirs représente la position climatologique de la ZCIT au mois d’octobre et correspond à la trajectoire moyenne des amas convectifs sur cette échelle temporelle. Source : Météo-France repris par BEUCHER (2010)

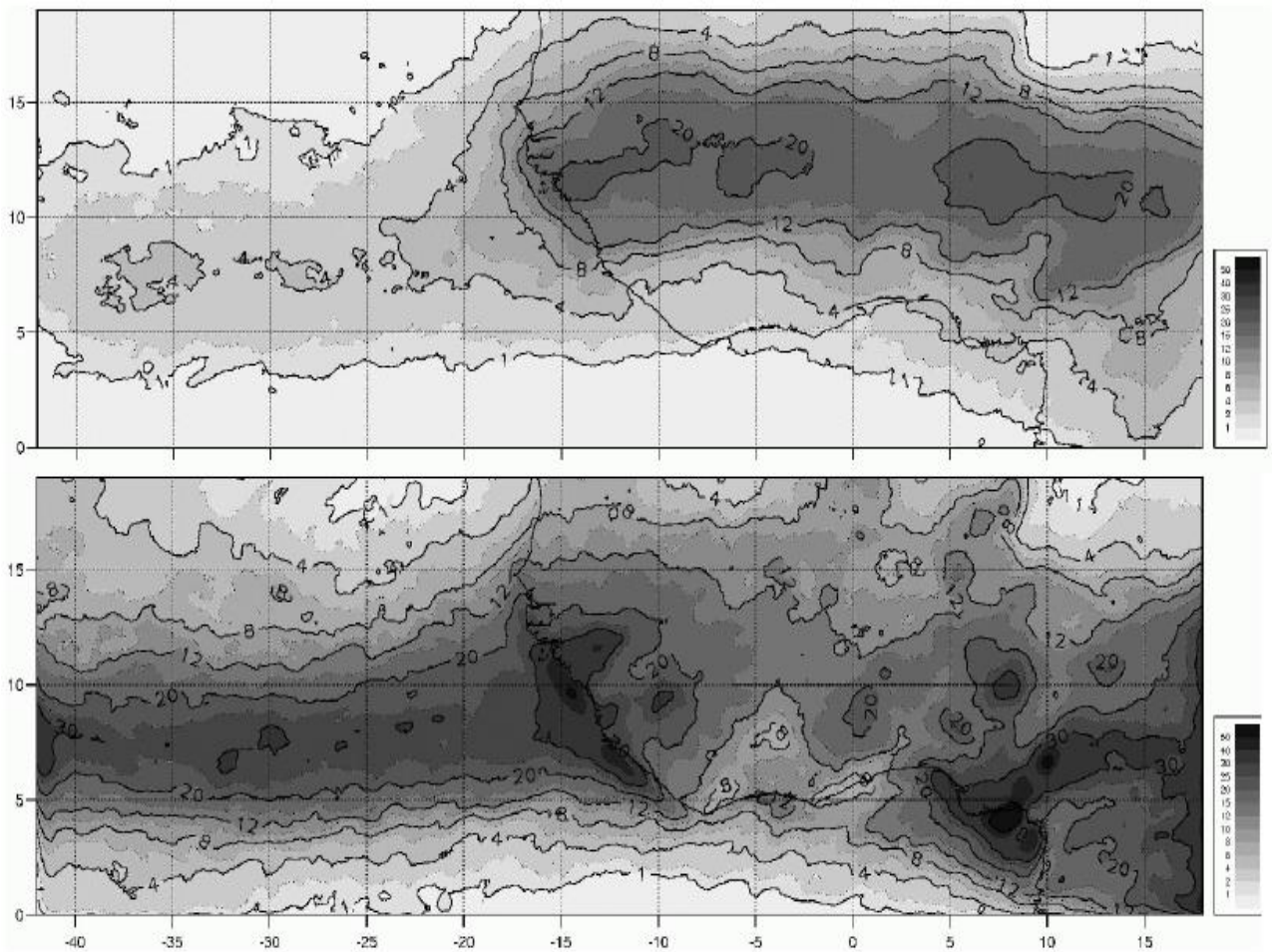
Sur l'océan, la ZCIT et le FIT se superposent. Sur le continent, les forces d'inhibition convective (CIN) qui sont associées à une plus forte aridité des basses couches de l'atmosphère provoquent un décalage spatial, avec la ZCIT au Sud du FIT.

La ZCIT subit un déplacement saisonnier au cours de la saison qui se décompose en quatre étapes (SULTAN et JANICOT, 2003) :

- Avril-1^{ière} moitié de Mai, la ZCIT est centré sur l'équateur et la côte sud de l'Afrique,
- 2^{ième} moitié de Mai-Juin, la ZCIT est quasi stable autour des 5°N,
- 1^{ière} moitié de Juillet, la ZCIT migre très rapidement vers le nord pour atteindre un second état stable,
- 2^{ième} moitié de Juillet-fin Août, la ZCIT voit l'intensité de ces précipitations augmenter.

Dans les tropiques, la convection profonde a tendance à s'organiser en MCS, c'est à dire en groupe de cumulonimbus reliés entre eux par une enclume stratiforme commune. Dans les régions tropicales, les MCS atteignent souvent des dimensions de plusieurs centaines de kilomètres et une durée de vie de plusieurs heures voire plusieurs jours (*figure 13*). Ils sont classés en deux groupes : *les lignes de grains* et *les amas nuageux*. Une étude réalisée sur les MCS ouest-africains par Tomasini et al., 2005 montre que les "MCS rapides" (lignes de grains) s'observent plutôt dans la bande sahélienne (10°N-15°N) (*figure 12*) alors que les "MCS lents" se localisent surtout soit près des côtes africaines (5°N-10°N), soit au niveau du relief (relief guinéen, Monts Cameroun), ou encore au niveau de la ZCIT maritime sur l'Atlantique est (*figure 12*).

Figure 12 : Nébulosité associée aux MCS oust-africains pendant les quatre mois de la mousson d'été



En haut, "MCS rapides", c'est-à-dire possédant une vitesse de déplacement élevée (>10 m/s) ; en bas, "MCS lents", c'est-à-dire présentant une faible vitesse de déplacement (<10 m/s). La nébulosité est calculée à l'aide du logiciel de Météo-France ISIS à partir d'images infrarouge MÉTÉOSAT7. Ce logiciel fournit en fait le nombre d'heures par mois pendant lesquelles les nuages ont atteint 5000km^2 de superficie avec une température de brillance de -40°C . Source : TOMASINI et al., 2005 repris par BEUCHER (2010).

Par ailleurs, il faut rappeler que l'ensemble de ces MCS voyage vers l'ouest sous l'influence des vents d'est que l'on observe au sein de la moyenne et haute troposphère (JEA et TEJ). Pour les lignes de grains, il s'agit de tours nuageuses précipitantes de grande extension verticale (jusqu'à 17 km de haut) qui sont appelées « grains » en français ou « Squall » en anglais. Ces cellules sont le plus souvent alignées, d'où le nom de « ligne de grains ». Elles sont caractérisées par leur grande vitesse de propagation (de l'ordre de $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) et la forme plus ou moins convexe de leur bordure avant (REDELSPERGER et al., 2002). Par contre, les amas nuageux se déplacent plus lentement (quelques $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) et possèdent des formes plus variées. L'organisation de la convection en lignes a d'abord été remarquée par les prévisionnistes d'Afrique de l'ouest (HAMILTON et ARCHBOLD, 1945 ; ELRIDGE, 1957) qui en utilisant des données synoptiques

conventionnelles et des mesures de vent en altitude, ont pu donner les principales caractéristiques de ces systèmes convectifs. Les lignes de grains sont alors perçues comme un alignement de cumulonimbus (partie convective) suivi d'une large enclume (partie stratiforme) se dirigeant de l'est vers l'ouest, plus rapidement que le vent ambiant. Leur passage au sol est caractérisé par une violente rafale accompagnée d'une brusque chute de température (de l'ordre de 4°C), précèdent l'arrivée des pluies de 2 à 3 min, d'une augmentation de l'humidité relative (+10%), d'une augmentation de la vitesse du vent (+2 m/s soit +7,6 km/h⁻¹) et d'un changement de direction du vent (180°). Le front de rafale délimite les courants descendants froids qui s'étalent sous l'air chaud à l'avant du système et permettent ainsi de produire d'autres cellules convectives.

Figure 13 : Au Sahel, dans la région du delta central du Niger, la mousson s'accompagne de l'arrivée de lignes de grains



Celles-ci peuvent s'étendre sur plusieurs centaines de kilomètres de longueur et donner lieu à de violentes précipitations. © CNRS Photothèque

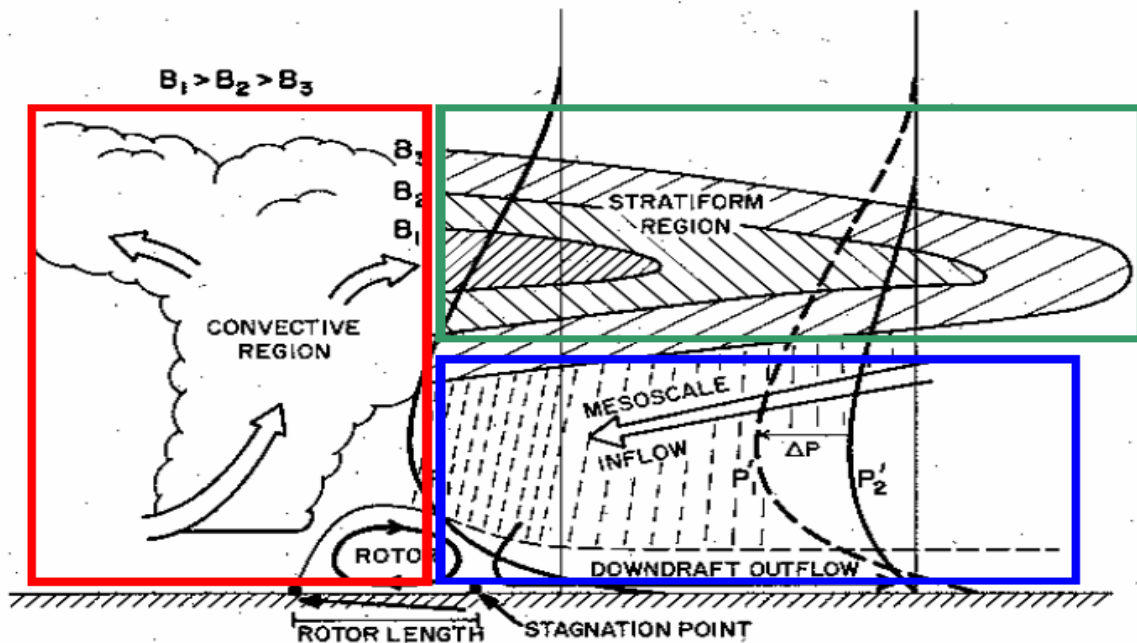
5.3.2.4.1.1. Structure verticale, intensité et variabilité des systèmes Lignes de Grains

Les lignes de grains (LG) sont des entités dynamiques atmosphériques, organisées en arc de cercle se déplaçant d'Est en Ouest, à l'origine des précipitations sur l'Afrique de l'Ouest. Ces entités sont composées (*figure 14*) : d'une partie convective à l'avant, d'une traîne stratiforme à l'arrière de la tour convective, et enfin un courant de densité.

Les lignes de grains nécessitent de conditions favorables pour se développer. Sans énergie potentielle disponible pour la convection, de cisaillement de vent et d'air sec, leur développement

ainsi que leur maintien est impossible (BARNES et SIECKMAN., 1984 ; LEMAITRE et TESTUD, 1986 ; LEMAITRE, 1982 ; MONKAM, 2002).

Figure 14 : Coupe verticale d'un schéma de ligne de grains d'après LAFORE et MONCRIEFF, (1989)



Partie convective : cadre rouge, partie stratiforme : cadre vert, courant de densité : cadre bleu.

HOUZE (2004) a mis en évidence que les lignes de grains étaient caractérisées par un bipôle d'anomalie de tourbillon potentiel, la première positive localisée à moyenne altitude, la seconde négative située au sommet de la convection.

Ces systèmes convectifs sont très souvent de grandes extensions (jusqu'à 1000 km) avec une durée de vie allant de 12h à quelques jours, et une vitesse de propagation de l'ordre de 15 m.s^{-1} (REDELSPERGER et al., 2002). Ils sont responsables de la majorité des précipitations de l'Afrique Sahélienne. On distingue deux types de ligne de grains.

Le premier de faible intensité se déclenche tôt le matin (0600 UTC) au Nord du plateau de Jos au Nigeria (10° E , 13° N), et se développe lors de sa propagation vers l'Ouest en produisant en moyenne autour de 14 mm de pluie (REDELSPERGER et al., 2002).

Le deuxième type résulte de cellules convectives se développant à la mi-journée (1100 UTC) sur l'Aïr au Niger (9° E , au Nord de 16° N) (REDELSPERGER et al., 2002). Ces cellules se propagent sur la pente des montagnes et se structurent rapidement en lignes. Elles se dirigent progressivement vers le Sud-Ouest et deviennent très intenses.

Les différences régionales dans la structure verticale moyenne de ces systèmes sont relativement faibles. Leurs caractéristiques principales sont une convection très développée verticalement avec une extension horizontale importante et une présence de nombreux hydrométéores au-dessus du niveau de congélation (GEERTS et DEJENE, 2005).

Si la formation initiale de ces lignes de grains est d'origine orographique, leur organisation et évolution dépendent totalement de la structure dynamique et thermodynamique de l'atmosphère. Cela se traduit par des différences notables, en terme d'intensité. Ainsi, les Lignes de Grains des régions arides et semi-arides sont plus développées verticalement (vitesses verticales plus fortes) et conduisent à des taux précipitants plus importants, donc à des intensités en réflectivité radar (liée à ces précipitations) plus importantes.

Le Sahel subit ainsi les orages les plus forts, en terme d'intensité et en terme de fréquence d'observation ou de répétitivité de ces événements intenses. Du point de vue de la mesure radar ces orages présentent des échos plus importants à basse altitude, une bande brillante radar plus faible suggérant un caractère plus convectif. L'évaporation des précipitations module cependant les précipitations qui tombent au sol selon que ces systèmes sont situés plus ou moins au nord sur le Sahel. Ainsi, en comparaison avec les orages du Sahel, la convection Saharienne bien que plus intense produit des précipitations plus faibles au sol.

Une forte variabilité diurne de l'intensité de ces orages se manifeste également dans la zone Est Africaine et les régions désertiques. La variabilité la plus faible se trouve dans la zone tropicale humide.

Cette variabilité se traduit par un maximum de précipitations en début d'après-midi. La zone tropicale humide possède un deuxième pic plus tard dans la nuit qui s'explique par l'existence en Afrique de l'Ouest côtière d'une forte convection offshore sur le Golfe de Guinée, notamment sur la Baie du Bénin.

Les lignes de grains sont en étroites relations avec les jets atmosphériques présents sur le continent Ouest Africain. En effet, plusieurs études (DRUYAN et HALL, 1996 ; DIONGUE et al., 2002 ; REDELSPERGER et al., 2002 ; NICHOLSON et GRIST, 2003 ; REITER, 1969 ; THORNCROFT et BLACKBURN, 1999) ont mis en évidence que les lignes de convections africaines sont localisées dans les zones de ruptures d'intensités du TEJ. Le TEJ a donc un lien étroit dans le développement et le cycle de vie des lignes de grains.

Une relation existe aussi entre la ligne de grains et l'AEJ. Le développement et la propagation de la convection se trouvent fortement corrélés à la présence d'un fort AEJ (LIANG, 2008). Ce pic de convection se situe au nord du maximum d'intensité du jet (MOHR et THORNCROFT, 2006).

L'initiation et la structure dynamique et microphysique de ces lignes de grains sont maintenant bien renseignées et comprises. Par contre l'origine de leur organisation et de leur cycle de vie sur l'ensemble du sous-continent Ouest africain reste une importante énigme.

5.3.2.4.1.2. Cycle de vie des lignes de grains

Le cycle de vie des lignes de grains peut être beaucoup plus complexe avec plusieurs phases d'affaiblissement et d'intensification et deux lignes de grains peuvent fusionner pour ne former qu'une seule ligne.

LEARY et HOUZE (1979) sont les premiers à avoir donné une description synthétique du cycle de vie des lignes de grains. Ils ont décomposé ce cycle en 4 phases :

La phase de formation : des cellules de convection de taille modérée se créent et s'alignent. Elles sont associées à des précipitations soutenues. Comme le font remarquer les auteurs, ce type de configuration ne donne pas obligatoirement lieu à la formation d'une ligne de grains. Seuls les systèmes dont l'alignement est perpendiculaire à la direction du vent près du sol auront une telle destinée, les autres ne formeront que de la convection « pop-corn » caractérisée par une durée de vie assez faible (quelques heures) et une vitesse de déplacement bien plus faible que celle des lignes de grains.

La phase d'intensification : à partir de là les courants subsidents issus des cellules de convection déjà présentes vont favoriser la formation de nouvelles cellules, aussi bien entre les cellules existantes qu'à l'avant du système, à savoir face au vent environnant. Ces nouvelles cellules sont dynamiquement plus intenses et, par là, plus développées et précipitantes. Les anciennes cellules, elles, se dissipent. On peut observer aussi la création d'un banc de cirrus en altitude à l'avant du système, lié à l'existence de forts vents d'altitude plus rapides que la ligne de grains. Il est à noter que le déplacement apparent d'une ligne de grains résulte en partie de la formation des nouvelles cellules à l'avant du système.

La phase mature : jusqu'ici les cellules de convection étaient bien distinctes et indépendantes. Lors de cette phase, les anciennes tours, en se désagrégant vont former une couverture homogène stratiforme à l'arrière des tours convectives. C'est là que la notion de système

convectif prend tout son sens car les tours actives sont maintenant reliées entre elles par cette zone stratiforme. Dès lors, chaque cellule active qui se dissipera ira alimenter la partie stratiforme. Inversement, cette zone, par les précipitations qui en sont issues, alimentera le courant de densité.

La phase de dissipation : lorsque les conditions de propagation deviennent moins favorables (moins d'énergie disponible dans l'environnement pour la création de nouvelles tours de convection), les nouvelles cellules deviennent moins actives et la zone stratiforme se dissipe. Cette phase est à la fois plus longue que les précédentes mais aussi plus difficile à repérer dans le cycle de vie classique d'une ligne de grains.

Ces lignes de grains, non seulement, participent aux transports énergétiques entre les régions tropicales et les régions tempérées mais fournissent la majorité des pluies sur l'Afrique de l'ouest (MATHON et LAURENT, 2002 ; LE BARBE et al., 2002 ; D'AMATO et LEBEL, 1998), et sont donc de première importance pour les populations locales.

5.3.2.4.2. La dépression thermique saharienne (Saharan Heat Low) ou convection sèche

Entre le printemps et la fin de l'été, on observe au nord du FIT une région subissant un réchauffement permanent qui se transmet à l'air sous-jacent par la turbulence. Celui-ci, en s'élevant, tend alors à constituer dans la basse troposphère une dépression marquée sur le Sahara, appelée dépression thermique (Heat Low). En effet, située au nord du Front Inter Tropical, la zone saharienne présente une forte température de surface, et donc une forte valeur de température potentielle liée à un forçage radiatif intense et à la capacité d'évaporation inexistante de cette région, faute de végétation (ELTAHIR et GONG, 1996). Il se développe une circulation thermique liée à ce maximum de température et au minimum de pression associée, **dépression thermique** (Heat Low) typique des régions désertiques (CHARNEY, 1975). Cette dépression thermique est également le siège d'une intense convection sèche. Le rôle de cette dépression et de la convection sèche intense associée est d'évacuer verticalement l'excédent d'énergie radiative des basses couches (+200 W/m², voir figure), et ainsi d'homogénéiser les profils verticaux de température et d'humidité. L'extension verticale de la dépression thermique saharienne est limitée à 600-700 hPa par la subsidence de grande échelle de la cellule de Hadley (GAMO, 1996). Cette subsidence renforce la divergence au sommet de la dépression thermique qui peut cependant atteindre 4 à 5 km d'altitude, provoquant ainsi un assèchement des couches moyennes de l'atmosphère qui peuvent être advectées dans la colonne d'air de la ZCIT. Ces

intrusions provoquent une diminution des précipitations (SULTAN et al., 2003, ROCA et al., 2005).

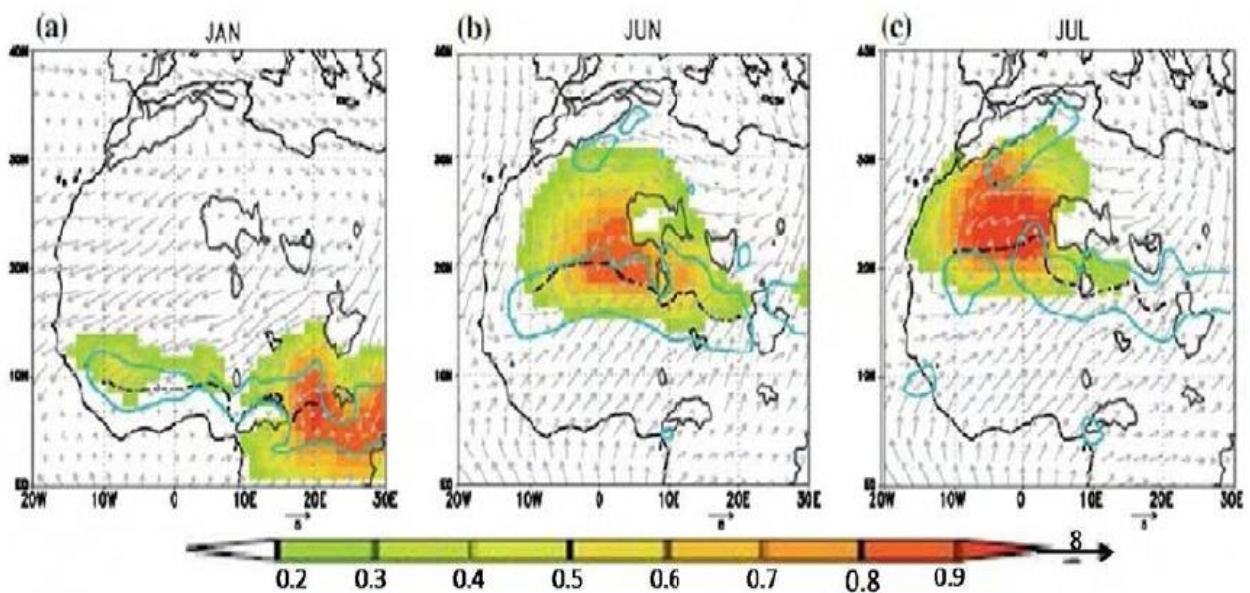
Les tempêtes de sable fréquentes dans les régions désertiques soulèvent des poussières qui se maintiennent ensuite en altitude (800-600 hPa) grâce aux mouvements verticaux présents dans la zone de convection sèche. Ces poussières jouent un rôle important sur le bilan radiatif de la dépression thermique : elles absorbent une partie du rayonnement solaire et réchauffent donc la couche d'atmosphère 800-600 hPa (Smith, 1986), mais limitent par contre la hausse de la température en surface. En conséquence, les aérosols modifient le profil vertical de température et modulent la hauteur de la couche limite. Certaines couches de poussières peuvent être transportées jusqu'à l'ouest du bassin Atlantique où elles prennent le nom de "couches d'air sahariennes" (SAL en anglais). Ces couches de poussières réduisent généralement l'activité des cyclones car elles s'accompagnent d'intrusions d'air sec en moyenne troposphère. Suite à la campagne AMMA 2006, des travaux sont également menés au Centre national de recherches météorologiques pour mesurer l'impact de ces poussières sur le climat africain car elles réduisent le forçage radiatif au sol.

Le nature des sols et le couvert végétal jouent également un rôle sur le bilan radiatif net au sol et sur les mouvements de grande échelle au sein de l'atmosphère (CHARNEY, 1975, ELTAHIR et GONG, 1996 ; BLAKE, 1983). Plus précisément, les déserts, du fait d'un fort albédo associé aux sols dépourvus de végétation, sont associés à une colonne d'air déficitaire en énergie solaire absorbée. L'atmosphère contenant peu de vapeur d'eau, l'effet de serre est peu efficace et c'est par un renforcement de la subsidence plutôt que par mouvement convectif qu'elle va combler ce déficit. Au cours des mouvements descendants, la particule atmosphérique aura de moins en moins de chance d'être saturée, ce qui accroît les conditions de sécheresse sur le désert. L'effet est finalement d'augmenter l'albédo de surface. D'après CHARNEY, un fort albédo de surface et du système "Terre-Atmosphère" réduit le déséquilibre énergétique sur la verticale et donc les mouvements verticaux. Ces processus accroissent les conditions de sécheresse sur le désert ce qui augmente encore l'albédo de surface par rétroactif. Une forte température de surface sur le Sahara favorise une convection sèche intense, augmente l'épaisseur de la couche de mélange, renforce la dépression thermique, et donc "aspire" le flux de mousson vers le nord. Ainsi, en 2003, année de canicule en Europe et Afrique du nord, le FIT est remonté jusqu'à 23°N. En revanche, plus la zone de convection sèche est intense, plus les mouvements compensatoires de subsidence situés à quelques centaines de kilomètres au sud et au nord se renforcent. Comme

cette subsidence érode le sommet du flux de mousson, la convection est alors moins active au niveau de la ZCIT.

En hiver, la dépression thermique se localise au-dessus de la République centrafricaine. En début de l'été elle est repérée au sud du Hoggar puis se déplace rapidement vers l'ouest, entre l'Atlas et le Hoggar, en Juillet (LAVAYSSE et al., 2009). L'intensification de la dépression thermique induit le renforcement de la circulation méridienne (4 m/s) et le déplacement du flux de mousson jusqu'à 20°N (LELE et LAMB, 2010).

Figure 15 : Fréquence d'occurrence de la dépression thermique pour les mois janvier, juin et juillet



La dépression thermique (couleur), vent à 925hPa (m.s^{-1} vecteur, valeur $8 \cdot 10^{-6}/\text{s}$ de la convergence horizontale (contour bleu), FIT (ligne noire pointillée, correspondant à la position minimum du géopotential à 925hPa entre 0°N et 28°N) et reliefs supérieurs à 925hPa (contour gris) pour les mois janvier (a), juin (b) et juillet (c). D'après LAVAYSSE et al., (2009)

Globalement, on peut dire que la dépression saharienne semble piloter la circulation de basses couches par un équilibre proche du géostrophisme (PARKER et al., 2005). L'intensité du Heat Low Saharien est liée à la température de surface qui avait été vue par les paléoclimatologues comme une des caractéristiques clés de l'époque du Sahara Vert. En effet, une forte température de surface sur le Sahara favorise une couche de mélange profonde, un renforcement de la dépression de surface et donc une plus forte aspiration de la mousson vers le nord. La circulation agéostrophique méridienne du SHL amène de l'air chaud et sec juste au-dessus du flux de mousson qui va inhiber la convection. Une forte activité du Heat Low renforce donc cette arrivée d'air sec qui érode le flux de mousson.

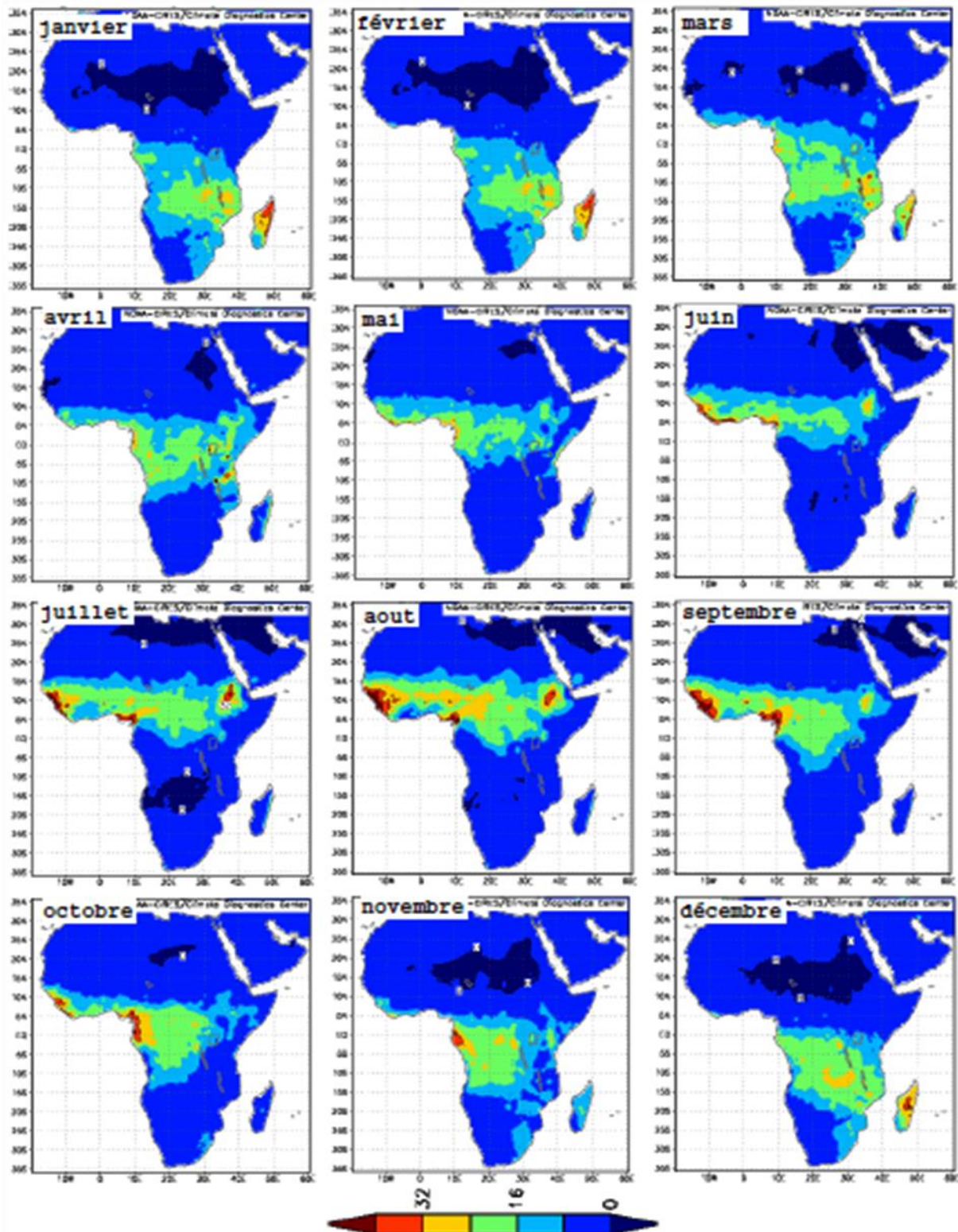
On a donc un fort contraste méridien au cours de l'été :

- la zone de mousson (ZCIT), située au sud du FIT, qui est une région humide avec une forte ESH (Energie statique humide) (ou θ_e), maximale près de la zone de pluie
- le Heat Low Saharien, qui est une zone chaude et sèche avec une faible θ_e mais ayant une forte température potentielle ou θ (cf. profils de θ et θ_e sur la figure en haut avec les jets).

5.3.3. Cycle saisonnier de la mousson

L'évolution de la MAO au cours du cycle saisonnier est certainement ce qui suscite le plus d'intérêt de la part des populations ouest-africaines. C'est en effet au cours du cycle annuel que les périodes sèches et humides se dessinent sur cette région. La première saison des pluies sur le nord du continent, appelée régime guinéen, s'étend d'avril à juin avec une zone de pluie centrée sur 5°N (*figure 16*). La deuxième période est le régime sahélien, plus au nord (10°N) amène la majorité des pluies aux peuples du Sahel et correspond à une période de sécheresse sur la Guinée. La transition brusque entre ces deux régimes est appelée "Onset " ou "saut de mousson", et marque une rupture du cycle saisonnier entre ces deux états quasi-permanents. SULTAN et JANICOT (2003) définissent le pré-onset comme la date où le FIT passe à 15°N en moyenne entre 10°E et 10°W (le 14 mai en moyenne sur 1968-1990) tandis que l'Onset est défini comme le passage rapide de la ZCIT de 5°N à 10°N.

Figure 16 : Cycle saisonnier des pluies mensuelles (cm/mois) sur l’Afrique de l’Ouest entre janvier et décembre



(1^{ère} ligne : janvier-février-mars, etc.). Moyenne mensuelle entre 1950 et 1999, tracée sur une grille de résolution 0.5° (en longitude et latitude). Source : Université de Delaware, reproduit avec la permission de la NOAA (<http://www.cdc.noaa.gov>) repris par BEUCHER (2010)

5.3.3.1. Période de chauffage sec (début janvier à fin mars)

En hiver, l'ensoleillement est au plus faible et centré au-dessus de l'équateur (Flux solaire incident $< 200\text{W.m}^{-2}$) en janvier dans les observations et les simulations (KOCHA, 2011). Or à cette période l'albédo est très fort entraînant une faible absorption du rayonnement incident par la surface ($\sim 250\text{W.m}^{-2}$). Ces deux facteurs contribuent à un rayonnement net minimal dans l'année entraînant des températures de surface très basses sur l'Afrique de l'Ouest ($< 16^\circ\text{C}$ au nord de 15°N). En revanche, dans le golfe de Guinée la température est très forte pendant l'hiver ($> 28^\circ\text{C}$ à partir de février, au sud de 5°N délimitant la côte). Le gradient de température méridien entre l'océan et le continent est donc très faible n'induisant pas de circulation méridienne du sud vers le nord mais favorisant plutôt une circulation du nord vers le sud.

Le faible gradient de pression entre le continent et l'océan n'entraîne pas de déviation des alizés qui convergent juste au-dessus de l'équateur (*figure 15*, dépression thermique en couleur et ITD (FIT) en ligne pointillé noire).

Les alizés de nord ne sont pas stoppés par le flux de mousson et descendent jusqu'à la côte sud de l'Afrique de l'Ouest. Ainsi, le flux d'Harmattan est au plus fort en hiver atteignant 6 m/s en moyenne. Localement, il dépasse fréquemment les 10m.s^{-1} . Or cette vitesse correspond généralement à la valeur seuil nécessaire au soulèvement d'aérosols. En hiver, ce phénomène soulève ainsi de grandes quantités d'aérosols et entretient une épaisseur optique de 1 en moyenne.

Sur l'océan, toujours selon KOCHA (2011), la présence de l'ITD combinée à des températures chaudes de la surface de la mer entraîne de fortes ascendances et beaucoup de chaleur latente favorisant la position de l'ITCZ au niveau de l'équateur qui entraînent des précipitations de l'ordre de 4mm/jour en moyenne.

Etant donné la faiblesse de la mousson indienne en hiver, celle-ci apporte peu d'énergie au TEJ. Celui-ci est donc très faible ($\sim 6\text{m.s}^{-1}$) et se situe juste au sud de la ZCIT. En hiver, le WSTJ est influencé par le fort gradient thermique entre le désert Saharien et les moyennes latitudes. Il est alors au plus fort ($\sim 40\text{m.s}^{-1}$) et centré vers 25°N . Quant au AEJ, il est centré à la latitude du maximum de baroclinie, au sud de l'ITD, c'est à dire au niveau de la côte en hiver.

5.3.3.2. Mise en place de la mousson, régime guinéen, « Pré-Onset » (début avril à fin juin)

À partir de mai l'ensoleillement devient de plus en plus fort et se déplace vers le nord. Ce forçage solaire induit un premier maximum de rayonnement solaire absorbé par la surface vers 14°N . Progressivement la température du sol et des basses couches augmente sur le désert jusqu'à

mi-mai (RAMEL et al. 2006). Par conséquent l'émission infrarouge de la surface augmente. Ajouté à cette perte radiative infrarouge, l'albédo du désert est de plus en plus fort (> 0.35 début juin) induisant une forte réflexion du rayonnement solaire incident. Au bilan le chauffage des basses couches de l'atmosphère par flux sensible reste cependant plus important que le refroidissement radiatif. L'excédent d'énergie en basse couche est alors évacué par convection sèche au niveau de la dépression thermique. La dépression thermique s'intensifie et se situe préférentiellement au sud-ouest du Hoggar en juin.

Le gradient de pression induit par le creusement de la dépression thermique saharienne en mai est assez intense et persistant pour entraîner un déplacement vers le nord des circulations atmosphériques. Les jets se déplacent vers le nord. D'autre part l'amplification du gradient thermique méridien entraîne une accélération de l'AEJ qui atteint alors sa valeur maximale climatologique autour de $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Les alizés du sud accélèrent et renforcent le flux de mousson et l'ITD atteint l'intérieur des terres, passant de 5°N en avril à 15°N en juin (NICHOLSON et GRIST 2003). Cette migration vers le nord peut être évaluée en moyenne autour du 14 mai (SULTAN et JANICOT 2003) et définit ainsi la date de pré-onset. En moyenne la vitesse de déplacement de l'ITD est de 8 km/jour pendant cette période (LELE et LAMB 2010). Cependant, l'ITD ne progresse pas de manière régulière. En effet, COUVREUX et al. (2010) observent des renforcements de la dépression thermique engendrant une aspiration du flux de mousson, froid et humide vers le nord qui va à son tour affaiblir la dépression thermique (PEYRILLE et al. 2007) et rééquilibrer la thermodynamique de basse couche. Ces advections qui durent 4-5 jours sont appelés pulsations de mousson et permettent d'humidifier les basses couches du Sahel. La convergence des vents au niveau de l'ITD est propice à la création de vents forts de part et d'autre de celui-ci provoquant le soulèvement d'aérosols (MARSHAM et al. 2008, BOU KARAM et al. 2009). D'autre part, des systèmes convectifs initiés au niveau de la ZCIT peuvent prendre une trajectoire nord-ouest et passer au-dessus d'un sol encore sec et nu avec de nombreuses sources d'aérosols minéraux. Les courants de densité engendrés par ces systèmes sont alors capables de soulever une grande quantité de poussières désertiques (KNIPPERTZ et al. 2007, FLAMANT et al. 2009). Ainsi, en été la quantité d'aérosols dans l'atmosphère reste très importante et l'épaisseur optique garde des valeurs équivalentes au mois d'hiver (~ 1). Seulement, ils ne sont plus transportés vers le sud mais vers l'ouest ou vers le nord (MIDDLETON et GOUDIE 2001) entraînant le déplacement du maximum d'AOD au centre de l'Afrique de l'Ouest.

En juin, le flux solaire incident poursuit son intensification et sa progression vers le nord. Or malgré cela le flux solaire absorbé par la surface diminue sur le Sahel. Ce phénomène peut être

en partie attribué à un albédo de plus en plus fort sur le Sahel ($> 0,35$) dû au manque de végétation. D'autre part l'advection d'air frais et humide par le nord-ouest et le sud de l'Afrique, l'augmentation de la quantité d'aérosols et de l'occurrence de couverture nuageuse sur le Sahel peuvent contribuer à une réduction du rayonnement solaire incident à la surface de -25% (KOCHA, 2011). Ce manque d'énergie solaire en surface se traduit par un ralentissement de l'augmentation du Rayonnement net à la surface et une baisse de la température à 2m. Le renforcement de la dépression thermique prend alors du retard sur la progression du soleil et peut induire un ralentissement de la progression du flux de mousson sur le continent (RAMEL et al. 2006).

L'apport d'humidité par la progression du flux de mousson sur le continent n'est pas suffisant pour contrebalancer la forte inhibition de la convection sur le Sahel. La convection profonde est donc préférentiellement au niveau de la côte. Cette position de la ZCIT très sud en début de la saison des pluies entraîne très peu de systèmes convectifs remontant sur le Sahel. JANICOT et al. (2008) mesurent un taux de systèmes convectifs rapides de moyenne-échelle remontant sur le Sahel de 4 par jours en moyenne.

5.3.3.3 Mousson, régime sahélien « Onset » (fin juin à fin août)

Fin juin, plusieurs acteurs de la mousson agissent pour provoquer le déplacement soudain en moins de 10 jours (SULTAN et JANICOT, 2000 ; 2003, LE BARBE et al. 2002) de la ZCIT de 5°N à 10°N passant du régime guinéen au régime sahélien. Cette période appelée saut de mousson (onset) déclare le début de la mousson en Afrique de l'Ouest. En moyenne, la date de l'onset est estimée autour du 24 juin (écart type de 8 jours) (SULTAN et JANICOT 2000, ATI et al. 2002, SULTAN et JANICOT 2003, FONTAINE et al. 2008). Bien que pas encore complètement expliquée, cette brusque rupture du cycle saisonnier entre deux états quasi permanents peut être expliquée par les phénomènes suivants :

- Le refroidissement des océans : Les alizés sont maximums au-dessus de l'océan et entraînent un refroidissement intense de la surface océanique ($< 22^{\circ}\text{C}$). Ce refroidissement est dû à l'augmentation du flux de chaleur latente (PHILANDER et al. 1996, WALLISER et SOMERVILLE 1994, XIE et SAIKI 1999), à des remontées d'eau froide (upwelling) (MITCHELL et WALLACE 1992, OKUMURA et XIE 2004, HAGOS et COOK 2008) et au pompage d'Ekman (PHILANDER et al. 1996, LI et PHILANDER 1997, CANIAUX et al. 2010). Ce refroidissement de la température de l'océan rétroagit sur l'atmosphère induisant à la fois une intensification du gradient thermique méridien qui pousse la ZCIT vers le nord (WARD 1998,

OKUMURA et XIE 2004) et une réduction de la chaleur latente entraînant une réduction des précipitations sur l'océan (GU et ADLER 2004, OKUMURA et XIE 2004, CANIAUX et al. 2010). D'autre part, MATTHEWS (2004) montre que 20 jours avant l'onset l'activité convective au-dessus de l'océan pacifique impliquant un affaiblissement de la Warm Pool générant deux ondes troposphériques se propageant le long de l'équateur, une de Kelvin vers l'est et une de Rossby vers l'ouest. Elles se rejoignent sur l'Afrique et leur interférence favorise le déclenchement de la convection à 10°N et l'intensification du flux de mousson (par anomalie de vent d'ouest dans les basses couches générées par l'onde de Kelvin).

- **Le renforcement de la dépression thermique** : Fin juin marque le maximum de rayonnement solaire incident se trouvant vers 25°N et induisant un second maxima de rayonnement solaire absorbé par la surface contribuant à renforcer la dépression thermique (RAMEL et al. 2006).

D'autre part, la présence de l'Atlas favorise l'existence d'une faible pression à l'ouest du massif et une haute pression à l'est par effet dynamique de l'orographie (SEMAZZI et SUN 1997). Les circulations associées à l'ouest cyclonique et à l'est anticyclonique permettent de renforcer la convergence des vents au sud de l'Atlas (SULTAN et JANICOT 2003). La présence du Hoggar crée une faible pression par effet dynamique et permet alors une intensification de l'Harmattan sec et chaud qui repousse d'entrée maritime au nord-ouest de l'Afrique. La dépression thermique se déplace alors rapidement vers l'ouest, entre l'Atlas et le Hoggar centré vers 22°N et 2°O (RAMEL et al. 2006, LAVAYSSE et al. 2009).

DROBINSKI et al. (2005) montrent que le renforcement de la dépression thermique est maximal 10 jours avant l'onset de la mousson. L'intensification de la dépression thermique induit le renforcement de la circulation méridienne. En basse couche le flux de mousson est alors plus intense (4 m/s) et se déplace jusqu'à 20°N (LELE et LAMB 2010), ligne pointillé noire). En altitude l'intensification de la circulation méridienne se traduit par une augmentation de la subsidence au-dessus de la côte de guinée inhibant les précipitations dans cette zone (ZHANG et AL. 2006).

- **La progression du flux de mousson** : HAGOS et COOK (2007) montrent que l'advection d'humidité en basse couche sur le Sahel par le flux de mousson devient alors plus forte que la composante divergente en moyenne troposphère et induit donc une augmentation de l'humidité en basse couche. L'augmentation à la fois de la température et de l'humidité sur le continent contribuent à la baisse du niveau de condensation libre et facilite le déclenchement de la

convection. D'autre part, une instabilité inertielle se crée ayant tendance à déplacer la ZCIT vers le nord (TOMAS et WEBSTER, 1997). Ce déplacement induit alors une rétroaction sur les précipitations étant d'une part positive sur le continent en augmentant l'humidité, les ascendances, la condensation et donc les précipitations et d'autre part négative sur l'océan en augmentant la subsidence inhibant les précipitations (ZHANG et al. 2006).

- **La croissance de la végétation** : Les premières pluies permettent la croissance de la végétation qui entraîne une rétroaction positive sur les précipitations. En effet, l'augmentation de la rugosité intensifie la convergence (COOK, 1997), la diminution de l'albédo entraîne une plus grande absorption de l'énergie dans le sol et enfin l'augmentation de l'évapotranspiration permet d'alimenter l'atmosphère en humidité (ZHENG et ELTAHIR 1998, ZHENG et al. 1999, PHILIPPON et FONTAINE 2002) d'autant plus que l'advection d'humidité de l'océan est de plus en plus faible à cause de la baisse de sa température de surface.

KOCHA (2011) sous cet angle soutient que ces différents acteurs permettent de déplacer rapidement le maximum de température potentielle équivalente que suit la ZCIT à 10°N. Contrairement à la situation sur l'océan où la zone de convection profonde (ZCIT) est au-dessus de la zone de convergence des vents (ITD) ; le nord du Sahel constitue une zone très sèche induisant une forte inhibition convective entraînant un décalage entre la ZCIT (~10°N) et l'ITD (~20°N).

À partir de juillet, l'intensité de la mousson augmente avec la température potentielle équivalente. L'apogée a lieu au moment où le rayonnement net incident est au plus fort, juste après le 2^{ème} minimum d'angle zénithal solaire. Le gradient de température potentielle équivalente (c.à.d. le gradient d'entropie en basse couche) méridien est un bon indicateur de l'intensité de la mousson (EMANUEL 1995, ELTAHIR et GONG 1996, FONTAINE et al. 1999 ; 2002). En effet, plus le gradient d'énergie statique humide est fort, plus la convection sèche est intense dans la zone chaude de la dépression thermique. La circulation cyclonique en basses couches est donc renforcée entraînant une advection de vapeur d'eau plus forte et plus de convergence d'humidité sur Terre. Ce phénomène entretient alors la convection profonde de la ZCIT. Ainsi :

- à échelle locale, le gradient vertical d'énergie statique humide joue sur la stabilité de l'atmosphère et impacte l'occurrence des systèmes convectifs ;

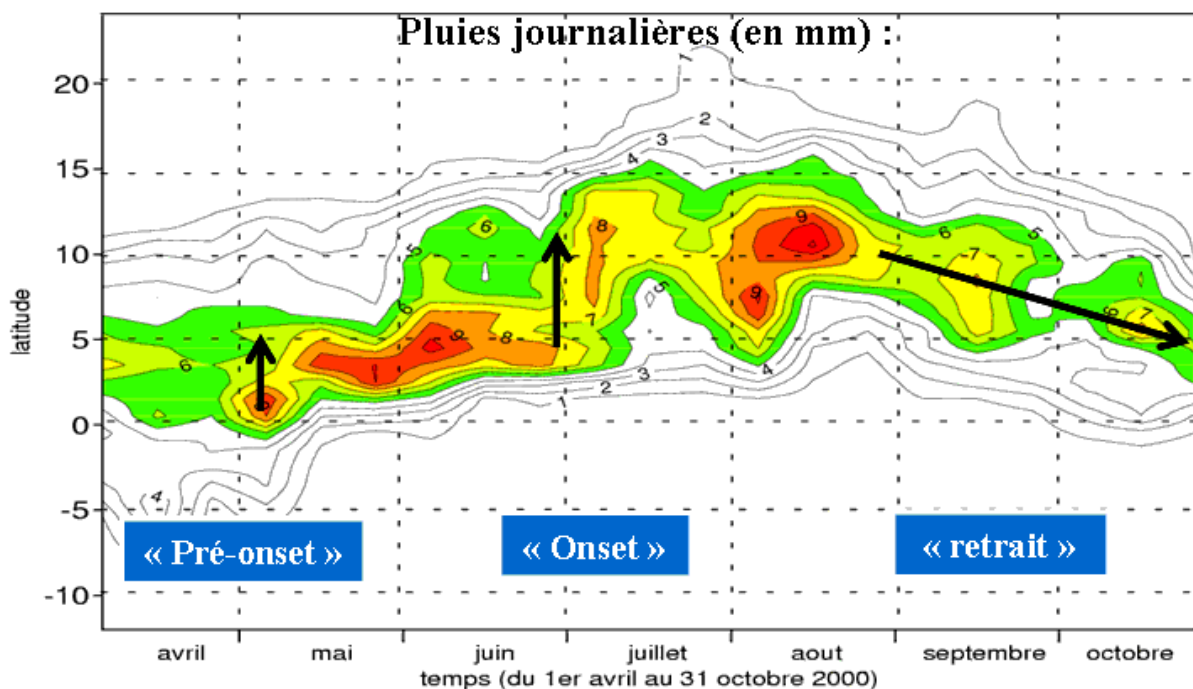
- à grande échelle, le gradient méridien d'énergie statique humide joue sur l'intensité de la circulation de mousson (PEYRILLE 2005).

En juillet-août, les moussons africaine et indienne sont au plus fort et nourrissent le TEJ qui atteint sa vitesse maximale (en moyenne $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (KRISHNAMURTI, 1971)). Sur le continent, en parallèle de l'apparition de convection profonde en juin sur le continent, on observe le développement d'ondes d'est africaines. L'AEJ, la convection profonde et les ondes d'est africaines interagissent de manière complexe (LEROUX et HALL 2009, CORNFORTH et al. 2009) qui résulte en un affaiblissement du AEJ.

5.3.3.4. Retrait de la mousson (début septembre à fin décembre)

À partir de septembre, l'ensoleillement se réduit ($R_{in} < 830\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ et R_{net} perd $60\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) et ne fournit plus l'énergie nécessaire au maintien de la mousson. La dépression thermique s'affaiblit et la ZCIT et les circulations atmosphériques associées se retirent lentement et progressivement. Contrairement à la mise en place de la mousson qui se fait par brusques avancées sur le continent (COUVREUX et al. 2010), l'ITD recule en moyenne à une vitesse de $15\text{km}/\text{jour}$ (LELE et LAMB 2010). Le sol humide et recouvert de végétation associé à un retrait lent de la mousson n'entraîne que très peu de soulèvement d'aérosols dont les valeurs sont minimales sur l'année ($\text{AOD} < 0.5$).

Figure 17 : Pluies journalières (en mm/jour) moyenne entre 10°E et 10°W



La première flèche noire indique la date du premier saut de début mai appelé « pré-onset », la deuxième flèche indique le second saut vers juin appelé « onset », et la troisième flèche correspond au « retrait » de la ZCIT vers le sud, retrait qui débute vers la fin août. Source : SULTAN et al., 2003. Reproduit avec la permission de "American Meteorological Society" et adapté (notations) par BEUCHER F. d'après ce dernier

5.3.3.5. Synthèse du cycle saisonnier de la mousson

Le cycle saisonnier de la mousson d'Afrique de l'ouest est certainement ce qui suscite le plus d'intérêt de la part de la communauté scientifique, car la date d'arrivée et l'intensité de la mousson constituent les premières préoccupations des populations ouest africaines. Comme indiqué précédemment, le déplacement de la ZCIT suit la position apparente du soleil avec un décalage de 6 à 8 semaines.

L'évolution de l'atmosphère africaine est illustrée par l'évolution du vent zonal. On retiendra qu'en hiver (Janvier-Février-Mars), le flux de mousson se forme mais ne pénètre pas sur le continent. Le JEA est positionné sur la côte, au maximum de baroclinie alors que le TEJ se trouve le long de l'équateur.

La première saison des pluies observée sur le continent ouest-africain correspond au premier saut de la ZCIT qui migre brusquement de 2°N à 5°N début mai : c'est la phase de pré-mousson appelée « pré-onset » ou « régime guinée » par les climatologues. Pendant cette période, le FIT (qui correspond à la limite nord du flux de mousson) remonte jusqu'à 15°N, le JEA se renforce (10 m/s en moyenne mensuelle) et migre vers 10°N, tandis que le TEJ (7 à 8 m/s en moyenne mensuelle) et le JOST restent positionnés à l'équateur et vers 30°N, respectivement.

La seconde période de pluies marque le second saut de la ZCIT qui passe de 5°N à 10°N en l'espace de quelques jours vers la fin juin (24 juin en moyenne avec un écart type de 8 jours) : c'est la phase de mousson appelée « onset » ou « régime sahélien » par les climatologues. Pendant la phase d'« onset », la température de surface de la mer dans le golfe de Guinée chute brutalement de 26 à 24°C et la pression de surface augmente de quelques hPa. Pendant ce temps, sur le Sahara, la température de surface continue d'augmenter, ce qui renforce la dépression thermique vers 25°N. Par conséquent, les gradients horizontaux de pression, de température et d'humidité augmentent entre le Sahara et le golfe de Guinée, ce qui favorise l'accélération du flux de mousson pendant cette phase et son extension méridienne vers le nord (fournie par la position du FIT) jusqu'à 20°N. Au cours de la phase d'« onset », le JEA migre de 10°N à 15°N en

conservant la même intensité, le TEJ remonte vers 10°N en s'intensifiant (15 m/s en moyenne mensuelle) et le JOST se déplace vers 40°N.

Enfin, à partir de fin août ou début septembre, la zone de pluie se retire vers le sud. Cette phase de « retrait » de la ZCIT paraît beaucoup plus linéaire que les phases d'« onset » ou de « pré-onset ». À partir du mois d'octobre, le flux de mousson se rétracte vers le sud, entraînant avec lui le FIT ; le JEA et le TEJ migrent également vers l'équateur tout en s'affaiblissant.

5.3.4. Le cycle diurne de la mousson

Le cycle diurne est un des modes de variabilité du climat le plus fondamental avec le cycle saisonnier car ils sont tous deux associés à une variation forte et "immanquable" du forçage solaire. Le cycle diurne de la convection et des pluies dans les tropiques a été l'objet de nombreuses études malgré le manque de données in situ. La première remarque importante est qu'il existe une forte différence entre la convection océanique, qui atteint son maximum tôt le matin, et la convection continentale qui est maximale en fin d'après-midi, début de soirée (YANG et SLINGO, 2001 ; DAI et TRENBERTH, 2004). Toutefois, la plupart des modèles numériques n'arrivent pas à reproduire correctement l'interaction de processus qui amène au déphasage du maximum de convection par rapport au maximum d'insolation. Ceci souligne donc qu'il est nécessaire de mieux comprendre les mécanismes qui pilotent le cycle diurne de la convection. L'Afrique de l'Ouest a été le lieu de mesures intensives durant la campagne GATE (**G**ARP (**G**lobal **A**tmospheric **R**esearch **P**rogram) **A**tlantic **T**ropical **E**xperiment), qui a permis d'établir les principaux résultats sur le cycle diurne de la convection africaine. L'Afrique de l'Ouest possède également un désert, qui est bien connu pour ses fortes variations thermiques au cours de la journée. Cependant la modulation de sa dynamique, le couplage avec les aérosols, et son interaction avec la circulation de mousson sont encore peu connus. On décrit dans ce qui suit les principaux points à retenir concernant le cycle diurne de la convection, du Heat Low et de la circulation de mousson à méso-échelle.

5.3.4.1 Modulation diurne de la convection et des pluies

La relation entre quantité de pluies et cycle diurne des systèmes convectifs est complexe. Généralement, les MCS à longue durée de vie semblent produire le plus de pluies pendant la nuit (ROWELL et MILFORD, 1993), ce qui correspond à la phase mature des MCS. PEYRILLE (2005) soutient dans sa thèse que les MCS à longue durée de vie sur le Sahel Central ont une couverture maximale entre 18h et 4h du matin. Par contre leur fréquence de passage n'est pas modulée pendant le cycle. MATHON et LAURENT (2002) notent également que la phase

d'initiation des MCS a lieu principalement entre 16h et 18h. Les MCS a durée de vie plus courte sont également modulés par le cycle diurne (DESBOIS et al., 1988 ; MATHON et LAURENT, 2002). Ils ont une fréquence et une couverture spatiale plus fortes durant la nuit.

Le cycle diurne des systèmes convectifs dépend également fortement de la latitude. MOHR (2003) montre en effet que sur quatre années, au nord de 10° N, le cycle diurne est bimodal, avec un maximum tôt le matin et vers 18h, alors qu'il est mono-modal plus au sud avec un pic à 20h. Il est également intéressant de noter que le cycle diurne moyen de la convection est monomodal (bimodal) durant les années humides (sèches). YANG et SLINGO (2001) ont également étudié le cycle diurne des précipitations à partir d'images satellites et ont trouvé un maximum entre le soir et tôt le matin. Un pic de pluie sur le méridien de Greenwich est observé tôt le matin et l'attribue au passage d'un MCS initié plus tôt sur l'orographie. Un jet de basses couches est également observé. Il semble se développer en association avec la dynamique du SHL et peut jouer un rôle dans l'organisation de la convection. L'AEJ et le TEJ connaissent très certainement un cycle diurne mais il est peu documenté. On peut penser qu'il joue un rôle dans l'organisation du transport d'humidité.

En terme d'interaction, le cycle diurne de la convection peut également avoir un impact sur la structure des ondes d'Est africaines via une rétroaction entre la surface, la convection et le rayonnement (TAYLOR et CLARK, 2001). En réduisant le taux d'évaporation de la végétation en zone sahélienne, les auteurs montrent à partir d'un modèle de climat que le cycle diurne des pluies est plus faible, mais avec une variabilité journalière plus forte, des MCS longs plus fréquents et finalement une activité des ondes d'est africaines (AEWs) plus importante. Les variations du flux de chaleur à la surface expliquent une grande partie de la structure thermique de basses couches des AEWs. En renforçant les anomalies de température, la surface influence la structure de l'onde sur le vent méridien.

5.3.4.2 Le Heat Low et la circulation de méso-échelle

Selon PEYRILLE (2005) le déclenchement des pluies est lié au degré d'instabilité de l'atmosphère et donc à la quantité d'énergie disponible en terme d'humidité et de température. La convergence d'humidité à méso et grande échelle joue donc un rôle important, dont le Heat Low est un des acteurs clés.

Les observations et la théorie ont montré que le Heat Low a une structure qui varie fortement au cours de la journée. RACZ et SMITH (1999) ont étudié le Heat Low australien à partir d'un modèle simplifié, hydrostatique, sans humidité ni aérosols. Ils montrent que le minimum de

pression arrive dans l'après-midi, vers 17h, donc décalé par rapport au maximum de chauffage au sol qui est maximal à 12h. La structure thermique du Heat Low, montre le développement d'une couche bien mélangée de 12h à 24h sous l'action de la turbulence, puis l'établissement d'une inversion dans les basses couches, maximales vers 6h, avec 200m de profondeur. La circulation atmosphérique associée à ce forçage thermique présente un maximum de tourbillon cyclonique dans les basses couches maximal vers 3h du matin, après une période de forte convergence.

La circulation est faible, avec des vents forts orientés parallèlement à la côte. En fin d'après-midi, le vent géostrophique est maximum alors que le vent réel est plus faible du fait du frottement turbulent. Une fois la turbulence en phase de décroissance (21h), l'écoulement s'ajuste à la différence de pression, et les vents accélèrent vers les basses pressions. De 21h à 3h du matin, l'effet de brise se renforce et un jet nocturne de basses couches se forme sous l'effet de la force de Coriolis.

Il est cependant difficile de donner un schéma universel de fonctionnement de Heat Low. SMITH (1986) établit un schéma d'équilibre du Heat Low à partir d'observations de la campagne SMONEX79 et trouve des ascendances en basses couches (850 hPa) surmontées par de la subsidence pendant la journée et de la subsidence sur toute la troposphère pendant la nuit. L'Afrique est également plus basse en latitude que l'Australie et le thalweg de mousson pénètre beaucoup plus à l'intérieur des terres que sur l'Australie ; le schéma proposé par RACZ et SMITH (1999) doit donc être confirmé sur l'Afrique à partir d'observations. On note cependant d'après la revue de PARKER et al. (2005) que FARQUHARSON (1939) ; SOLOT (1950) ; HAMILTON et ARCHBOLD (1945) observent à Khartoum, des vents de basses couches plus forts le matin vers 4-7h que l'après-midi, vers 11-15 h. PARKER et al. (2005) montrent que le cycle diurne de la circulation de basses couches pendant la mousson africaine est le résultat d'un concours entre le cycle diurne du SHL qui pilote la circulation et le cycle diurne de la couche de mélange qui tend à détruire cette circulation. Pendant l'après-midi, à 15h (PEYRILLE, 2005), les profils d'humidité et de vent sont homogènes sur la verticale entre 15°N et 20°N, marquant l'effet de la turbulence. Entre 18h et 00h la turbulence s'effondre, les vents accélèrent vers les basses pressions pour atteindre un équilibre proche du géostrophisme. Le flux est orienté vers le nord dans les basses couches avec un flux de retour orienté vers le sud est situé à 700 hPa. Pendant la nuit et le début de matinée, le flux de mousson entre 1000 et 800 hPa est maximal, et transporte un maximum d'humidité vers le nord du continent. A 12h le lendemain, cette circulation méridienne est très faible, "détruite" par la turbulence.

La circulation connaît donc une variation importante au cours de la journée, qui varie elle-même en fonction de la latitude. Des schémas conceptuels existent pour décrire l'évolution diurne du Heat Low, de la circulation de basses couches. Cependant les données manquent pour les valider. Les MCSs sont un peu mieux documentés mais les mécanismes qui contribuent à leur évolution diurne sont encore mal connus (orographie, jet de basses couches, etc.). Enfin il apparaît important de mieux comprendre le cycle diurne car les mécanismes qui le pilotent sont fondamentaux pour l'équilibre du système à plus grande échelle de temps. En effet initier la convection trop tôt ou placer un maximum de convection nuageuse à 15h au lieu de 18h n'a pas le même impact en terme de bilan radiatif au sol, élément déterminant pour les études climatiques et les prévisions à plus courtes échéances.

5.4. La période de transition

En Afrique de Ouest entre les saisons sèche et de mousson précédemment décrites, nous avons une période qui s'étend sur à peu près trois mois (Avri-Mai-Juin) et qui assure la transition : c'est la phase de pré-mousson appelée « pré-Onset » où « régime guinnén » par les climatologues. Ses débuts sont caractérisés par l'avancement latitudinal du FIT jusqu'à environ 12°N sans pour autant que la zone de pluie soit présente à cette latitude (SULTAN et JANICOT, SULTAN et al., 2007).

Cependant, l'avancement du FIT ne se fait pas d'une manière continue mais plutôt selon un mode de pulsations d'une période de 4-5 jours (COUVREUX et al., 2009). Ces pulsations contribuent au transport de l'humidité vers le nord dont le contenu est jusqu'à maintenant insuffisant pour le déclenchement de la convection profonde et des pluies y sont associées. Le FIT durant cette saison de pré-Onset présente un cycle diurne très marqué avec des oscillations latitudinales diurne de l'ordre de 200 km (POSPICHAL et CREWELL, 2007).

Cette saison de pré-mousson est marquée, vers sa fin, par ce qu'on appelle le saut de mousson ou Onset. Ceci représente le déplacement relativement rapide de la zone de pluie de 5°N à 10°N en environ 20 jours annonçant ainsi l'arrivée des pluies au-dessus du Sahel. La date climatologique de l'Onset est le 24 juin avec 8 jours d'écart type (SULTAN et JANICOT, 2003).

En conclusion de ce sous-chapitre, nous retiendrons que la circulation générale en Afrique de l'Ouest est le résultat du déséquilibre du bilan énergétique annuel du rayonnement solaire entre les tropiques et les zones voisines des pôles.

En effet, entre les Tropiques, la quantité moyenne d'énergie solaire reçue annuellement est supérieure à celle reçue au niveau des pôles. Il y a donc un déséquilibre énergétique qui est à

l'origine du transfert d'énergie, moteur principal de la circulation méridienne en Afrique de l'Ouest. Les masses d'air constituent, alors, les vecteurs de transfert d'énergie avec des zones d'ascendance (basses pressions) vers l'équateur et des zones de subsidence (hautes pressions) vers 30° de latitude de part et d'autre de l'équateur. Les principaux centres d'action en Afrique de l'Ouest sont l'anticyclone des Açores dans l'hémisphère nord et l'anticyclone de Sainte-Hélène dans l'hémisphère sud. Pendant l'hiver de l'hémisphère nord, l'anticyclone des Açores se prolonge sur le continent et entraîne sur la majeure partie de l'Afrique de l'Ouest un régime d'alizés de direction nord-est, l'Harmattan. Ces alizés qui n'atteignent jamais l'équateur présentent des caractéristiques particulières liées à leurs variations de direction et de vitesse. On distingue ainsi l'alizé maritime à trajectoire océanique, donc généralement humide et aux écarts thermiques faibles, et l'alizé continental marqué par une forte évolution diurne et très sec dans les basses couches.

Pendant l'été de l'hémisphère nord, les hautes températures dues à l'intense rayonnement solaire conduisent à l'installation d'une dépression sur le Sahara (dépression thermique) vers 20° N. Parallèlement, le renforcement de l'anticyclone de Sainte-Hélène conduit les alizés de l'hémisphère Sud à traverser l'équateur et à pénétrer dans l'Afrique occidentale en étant déviés vers l'Ouest par la force de Coriolis. Au-dessus du Golfe de Guinée, ce flux trans-équatorial se charge en humidité, c'est l'installation sur l'Afrique de l'Ouest d'un régime de mousson favorable au développement de systèmes convectifs. La ceinture intertropicale où convergent les deux masses d'air (alizés du Nord-Est et alizés du Sud-Ouest) d'origine et de caractéristiques différentes porte le nom de Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) dont la trace au sol caractérisant la zone de convergence entre le flux d'Harmattan et le flux de mousson sur l'Afrique de l'Ouest qui est appelée Front intertropical (F.I.T).

Dans les basses couches la circulation est dominée par les flux de Mousson et d'Harmattan. Le flux de mousson est un vent de sud-ouest dans les basses couches, dirigé de l'Océan Atlantique vers le continent. Il est relativement plus froid, chargé en humidité par l'océan et son épaisseur ne dépasse pas 2 km. Le flux d'Harmattan est un vent (alizé) chaud, sec et poussiéreux d'Afrique de l'Ouest qui souffle du nord-est vers le sud-ouest en provenance du Sahara vers le golfe de Guinée. Le point de convergence au sol de ces deux flux porte le nom de FIT (Front intertropical).

En altitude, la circulation en Afrique de l'ouest est caractérisée par trois courants de vent fort assimilés à des jets : Le Jet d'Est Africain (AEJ), Le jet d'Est tropical et Jet d'Ouest SubTropical (JOST), caractérisés par des vents zonaux.

À ces éléments clés de la circulation générale en Afrique de l'Ouest s'ajoutent deux principales structures convectives de grande échelle que sont la *Zone de Convergence Intertropicale*

(ZCIT), caractérisée par un maximum de température potentielle équivalente et la *dépression thermique saharienne* (SHL : Saharan Heat Low) associée à un maximum de température de surface entre juin et septembre (LAVAYSSE et al., 2009). Ces deux principales structures convectives sont essentielles dans le fonctionnement de la mousson Africaine.

La compréhension de la climatologie d'une région quelconque doit aussi passer en dehors de l'étude de la grande circulation atmosphérique générale par l'analyse des éléments du climat de celle-ci. Le chapitre II aborde cette analyse des éléments du climats de l'extrême Nord-Sénégal à travers les stations synoptiques de Saint-Louis, Podor et Matam.

Chapitre II : Étude des éléments du climat à l'extrême Nord-Sénégal : Stations synoptiques de Saint-Louis, Podor et Matam

L'analyse des éléments du climat à l'extrême Nord-Sénégal nous amènera à revisiter les principaux paramètres qui caractérisent sa situation climatique à travers ses différentes stations synoptiques. Ainsi on y passera en revue le vent, la température, l'humidité relative, l'évaporation, l'insolation et la pluviométrie.

1. Le vent

1.1 Répartition mensuelle des vents au sol

➤ *La station de Saint-Louis*

Tableau 2 : Fréquence des vents 1984-2013 à la Station de Saint-Louis

Secteur	Moi	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
N		15	21	24	25	20	08	01	01	03	24	20	12	174
NNE		00	02	02	01	01	00						03	9
NE		09	03	02								07	12	33
ENE		03											01	4
E		03	03									01	02	9
ESE														0
SE														0
SSE														0
S														0
SSW														0
SW														0
WSW														0
W							08	08	19	09	01			45
WNW							01	05		02				8
NW					01	02	09	15	10	14	01			52
NNW				02	03	07	03			02	03	02		22

La première constatation est qu'à l'ouest de l'extrême Nord-Sénégal (station de Saint-Louis) le secteur Nord fournit un pourcentage énorme des fréquences par rapport aux autres directions. Il est suivi de très loin du secteur Nord-Ouest.

Si nous faisons le total des fréquences sur la période 1984-2013, pour les rhumbs du Nord-Ouest à Nord-Est inclus, nous obtiendrons 81.4% des observations. Le secteur Ouest, pris de l'Ouest-Nord-Ouest à l'Ouest-Sud-Ouest inclus totalise près de 15% des observations. Ce qui ne laisse aux autres rhumbs que 3.7% (ENE-SE 3.7 ; SW-SSE 00%). Ce qui témoigne le caractère océanique de la station dont l'originalité climatique repose d'abord sur l'influence des alizés maritimes et des courants océaniques qui atténuent les contrastes saisonniers du climat Soudano-sahélien.

Tableau 3 : Fréquences des Rhumbs (pourcentages des observations)

Rhumbs	Observation
NW-NE	81.4%
WNW-WSW	14.9%
ENE-SE	3.7%
SW-SSE	00%

Durant un peu plus de 80 % du temps à l'Ouest de la région, à la station de Saint-Louis, le vent souffle dans un secteur étalé sur 90° d'angle ; environ 15% du temps sont soumis à un vent soufflant dans un secteur étalé sur un angle de 45° et le peu de temps (moins de 4%) qui reste est dominé par un vent soufflant dans un secteur étalé sur un peu plus de 67° d'angle.

À l'ouest de l'extrême Nord-Sénégal, le secteur axé sur le Nord domine largement la circulation, suivi du secteur axé sur l'Ouest. Le reste de la rose ne représente que des périodes secondaires à forte dispersion et faible fréquence.

La situation est tout autre au centre (station de Podor) et à l'est (station de Matam) de la Région.

➤ Les stations de Podor et Matam

Tableau 4 : Fréquence des vents 1984-2013 aux stations de Podor (en haut) et Matam (en bas)

Mois Secteur	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
N			07	07							08	02	24
NNE													0
NE		05	08	02	02						03	01	21
ENE		04	02										6
E	27	16	03	05	01						17	24	93
ESE													0
SE	01	04	03										8
SSE			01										1
S										04	01		5
SSW													0
SW					03	03	02	15	11	07			41
WSW													0
W				08	05	27	27	14	19	15			115
WNW													0
NW		01	02	06	19	01	01			04	02	02	38
NNW			03										3

Mois Secteur	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
N			05	08	03						04	02	22
NNE													0
NE	03	05	07								01		16
ENE		01	02										3
E	24	17	05	02						02	19	23	92
ESE													0
SE	03	03	02									02	10
SSE			01										1
S											02		2
SSW													0
SW					01	01	05	09	10	07			33
WSW						02		01	01				4
W			02	05	14	23	25	20	19	19	02		129
WNW			03	03									6
NW		03	02	11	11	03				02	02	02	36
NNW			03										3

Alors qu'à la partie ouest de la zone (station de Saint-Louis), le secteur Nord domine largement la fréquence des vents, au centre (station de Podor) et à l'Est la réalité est tout autre. À Podor comme à Matam nous avons une présence très marquée de secteurs en parfaite opposition : le secteur Nord à Est et celui d'Ouest témoignant le caractère saisonnier des stations. Le Nord à Est qui marque l'harmattan, vent chaud et sec et souvent chargé de poussière qui y souffle pendant la saison sèche et le secteur Ouest qui est plutôt humide et témoignant la période de Mousson, dominant le temps pendant les mois pluvieux.

Tableau 5 : Fréquences des Rhumbs (1984-2013) pour les stations de Podor et Matam

Podor		Matam	
Rhumbs	Observations	Rhumbs	Observations
N-E	41%	N-E	39%
WSW-WNW	32%	WSW-WNW	37%
NW-NNW	12%	NW-NNW	11%
ESE-SSE	2%	ESE-SSE	3%
S-SW	13%	S-SW	10%

A eux seul, les secteurs Nord à Est et Ouest dominant la circulation à plus de 70% des observations aussi bien pour la station de Podor que celle de Matam. La durée de présence du secteur Nord à Est (Harmattan) au niveau de ces deux stations témoigne de leur continentalité. Si nous faisons le total des fréquences sur la période 1984-2013, pour les rhumbs du Nord à Est inclus, nous obtiendrons 41% des observations pour Podor et 39% pour Matam. Le secteur Ouest, pris de l'Ouest-Nord-Ouest à l'Ouest-Sud-Ouest inclus totalise 32% des observations pour Podor et 37% pour Matam. Ce qui signifie qu'à environ 40% du temps, le vent souffle dans un secteur étalé sur 90° d'angle (N-E) et sur un angle de 45° pour plus de 30% (32% pour Podor et 37% pour Matam) du temps.

1.2 Analyse détaillée des vents

Deux modes d'analyse peuvent être envisagés : l'analyse au cours de l'année ou de la journée des vents par secteur défini (direction des vents) et l'étude de l'évolution du régime des vents pour les mêmes périodes (évolution de la circulation au sol au cours de l'année). Nous allons utiliser les deux modes à la fois même si le premier nous paraît plus explicite et donne plus l'idée sur la continuité.

1.2.1 Analyse par direction

Vent du Nord : le véritable vent du nord (qui à la partie ouest de l'extrême Nord-Sénégal est localement confondu très souvent avec celui du Nord-Nord-Ouest ou du Nord-Nord-Est) s'est manifesté sur environ 50% du temps de la période 1984-2013 à la station de Saint-Louis. NICOLAS (1959) dit que « c'est un vent essentiellement nocturne, n'apparaissant que très rarement à la période chaude de la journée entre midi et 18h ». Ici (à l'ouest à l'extrême Nord-Sénégal), il domine la circulation d'octobre à Mai. Cependant ce ne serait pas une direction normale de la grande circulation, mais la manifestation d'un accident survenu au vent du Nord-Nord-Ouest dévié en deçà de la direction normale de l'Alizé du Nord-Est par la brise nocturne de terre violente, soit au contraire une déviation trop marquée du vent du Nord-Nord-Est résultant de l'Alizé à l'approche de la masse océanique. Au centre (station de Podor) et à l'est de la zone (station de Matam), la situation est tout autre. Ici ce vent ne se présente que très faiblement, son temps de présence n'atteint jamais 10% (6% à Matam et 7% à Podor sur la période 1984-2013).

Vent du Nord-Nord-Est : si à l'ouest de la Région sa fréquence est infiniment inférieure à celle du vent du Nord (9% sur la période 1984-2013), au centre et à l'est, ce vent n'existe même pas (0% aux stations de Podor et de Matam). À la partie ouest de la zone (station de Saint-Louis) il s'agit encore d'un vent nocturne. Il se trouve localisé au cœur de la saison sèche. Il proviendrait d'une déviation normale de l'Alizé du Nord-Est à l'approche de la masse océanique.

Vent du Nord-Est : nettement moins fréquent que les vents du Nord à la station de Saint-Louis mais de même fréquence (toujours faible) que ce dernier aux stations du centre (Podor) et de l'est (Matam), les vents du Nord-Est, qui devraient être l'Alizé nord, comme faut nous y attendre, il ne se manifeste que de novembre à mars à l'ouest et au centre de la région avec une prolongation jusqu'au mois de Mai à l'est de la zone. Ce vent apparaît plus particulièrement durant les heures de la journée (vent diurne). Il se superpose très souvent avec les vents du Nord-Nord-Est, ce qui montre donc une rotation du Nord-Nord-Est au Nord-Est en fin de matinée au moment où la brise de terre cesse de souffler.

Vent de l'Est-Nord-Est : contrairement aux vents du Nord et du Nord-Nord-Est, il s'agit ici d'un vent diurne localisé entre 10 et 15h, manifestant cette fois une influence de la direction de l'Alizé. Son maximum serait obtenu en décembre et en janvier mais sa présence ne dépasse jamais 2% des observations quel que soit la station considérée dans la zone.

Vent d'Est : communément appelé harmattan, à l'ouest (station de Saint-Louis) il est relativement rare et son caractère principal est son irrégularité d'une année à l'autre.

Contrairement au centre (station de Podor) et à l'est (station de Matam) où il est l'un des plus fréquents (environ 30% des observations) et plus représentatifs avec une régularité suivant les années. Si de 1984 à 2013 il n'est présent que pendant les mois de décembre, janvier voire février à la station de Saint-Louis, au centre et à l'est de la région il s'étale sur sept mois (respectivement de Novembre à Mai et d'Octobre à Avril). A l'ouest, il se manifeste que très sporadiquement toute l'année contrairement au centre et à l'est où sa courbe d'évolution se caractérise par une hausse de fréquence de Novembre à Janvier suivie d'une baisse régulière jusqu'à Avril-Mai où ses fréquences atteignent les valeurs les plus faibles. Ce vent se localise le plus souvent à la période chaude de la journée (12 et 15h à l'ouest mais apparaît un peu plus tôt au centre et à l'est, parfois dès 10h et y disparaissent bien plus tard).

Vent de l'Est-Sud-Est : il est inexistant dans toutes les stations de la zone. Jamais il n'est apparu de 1984 à 2013. Notons toutefois qu'il fut un véritable vent de saison humide ou saison des pluies des années anciennes à la station de Saint-Louis. NICOLAS (1959) nous dit que jusqu'à la fin des années 50 il se localisait entre juin et octobre, mais se manifestait d'une manière fugace.

Vent du Sud-Est : de fréquence analogue à celle des vents de l'Est-Sud-Est à la station de Saint-Louis, ces vents y sont inexistants. Au centre et à l'est par contes ils apparaissent quoique très faiblement (3% des observations à Matam et 2% à Podor). Dans ces deux parties de la zone, ces vents sont mieux groupés de décembre-janvier à janvier entre les premières heures de la journée. C'est donc un vent se manifestant surtout à la période de réchauffement relatif de l'atmosphère. Ici il serait de faible vitesse et s'établissant pendant quelques heures entre période du vent d'Ouest.

Vent du Sud-Sud-Est : c'est également un vent de fréquence analogue à celles des vents de l'Est-Sud-Est et de Sud-Est à la station de Saint-Louis. Jamais il n'est noté à cette partie de la région de 1984 à 2013. Par contre aux stations de Podor et de Matam, il est enregistré même s'il est encore moins fréquent que le précédent (vent du Sud-Est) avec seulement 1% des observations. Il se localise uniquement et de façon insignifiante au mois de mars. C'est encore un vent diurne de peu d'importance et traduisant une rotation du système de vent au cours de la journée, encore que le plus souvent cette direction intermédiaire n'existe pas.

Vent du Sud : c'est encore l'un des vents les moins fréquents à la station de Podor et à celle de Matam avec respectivement (5 et 2% sur la période 1984-2013), étalé au cours de la journée en octobre et/ou novembre. Ici il apparaît que sporadiquement, ne durant jamais longtemps avec une

vitesse faible. Cependant il figure dans le lot des vents inexistants à l'ouest de la Région (station de Saint-Louis).

Vent du Sud-Sud-Ouest : alors qu'il apparaissait jusqu'à la fin des années 50 comme vent annonciateur de la circulation des moussons, il n'a jamais été enregistré depuis des décennies aux différentes stations de la Région. Il constitue avec le vent du secteur Est-Sud-Est les seuls à avoir ce caractère d'absence totale sur tout l'extrême Nord-Sénégal.

Vent du Sud-Ouest : alors qu'à la station de Saint-Louis il est inexistant, au centre (station de Podor) et à l'est (Station de Matam) nous entrons avec ces vents dans le domaine de la circulation des moussons. Nous trouverons immédiatement une fréquence accrue (9% des observations à la station de Matam et 12% à la station de Podor sur la période 1984-2013) essentiellement de mai à octobre, pendant la nuit et une grande partie de la journée. Le maximum est à mi-journée. La répartition au cours de la journée laisse cependant supposer qu'il s'agit là d'une direction liée non pas à un rythme diurne de brises mais à une position plus ou moins septentrionale du front intertropical. Ceci est confirmé par le fait que sa courbe d'évolution atteint son maximum aux mois les plus pluviaux (août et septembre).

Vent de l'Ouest-Sud-Ouest : ce vent n'est présent qu'à l'est de la région, à la station de Matam mais de très faible fréquence (4% des observations). À l'ouest et au centre du Nord Sénégal, il reste inexistant. À la station de Matam, il reste localisé au cœur de la saison des pluies. À notre avis il s'agit toujours de la masse d'air de Mousson du Sud-Ouest mais déviée vers l'Ouest et donnant l'impression d'un véritable vent de l'Ouest-Sud-Ouest.

Vent d'Ouest : alors qu'il marque l'entrée dans le domaine de la circulation de mousson à la station de Saint-Louis et n'y est présent qu'à partir du mois de juin pour disparaître avec le retrait de la FIT en septembre-octobre (avec 13% des observations), ce vent constitue avec celui du secteur Est les fréquences majeures au centre et à l'est de la Région avec respectivement 32% des observations à la station de Podor et 36% à celle de Matam. Ici, contrairement à ce que l'on croit ordinairement, ces vents débutent très tôt dans l'année. Nous en trouvons dès avril voire même fin-mars et jusqu'en octobre avec un très gros maximum irrégulièrement répartis entre juin-juillet-août. Le maximum qui, se situe à mi-journée pour le rhumb Ouest-Sud-Ouest, se situe ici à la seconde partie de la journée. Tout se passe comme si la brise, se renforçant au cours de la journée, déjette de plus en plus la Mousson vers l'Ouest. La fréquence totale atteint une valeur élevée, ce qui fait de ce vent l'un des éléments fondamentaux du régime éolien des stations de Podor et de Matam.

Vent d'Ouest-Nord-Ouest : de fréquence plus faible (8% des observations) que celle du vent du secteur Ouest à la station de Saint-Louis, il reste quasi-inexistant aux stations du centre et de l'est avec respectivement 2% des observations à Matam et 0% à Podor.

Vent du Nord-Ouest : il s'agit là du deuxième secteur le plus fréquent à la partie ouest de la Région (15% des observations à la station de Saint-Louis). Sa caractéristique la plus curieuse est de présenter une double variation de fréquences avec deux maxima, l'un en juillet (au milieu de la journée), le second en septembre s'étendant sur toute la journée, sauf entre quelques heures de la seconde partie de la journée. Un minima s'y associe et se situe en pleine saison des pluies, en Août. Au centre et à l'est de la zone, il reste aussi un vent de fréquences intéressantes (10% des observations à Matam et 11% à Podor). Ici aussi, il présente une caractéristique attirante. En effet, présent de février à juin-juillet, il disparaît totalement de la circulation pour réapparaître en octobre et s'étaler jusqu'au mois de décembre quoiqu'avec de faible vitesse.

Vent du Nord-Nord-Ouest : nous sommes ici en présence de vents de saison sèche déviés de l'alizé. La fréquence est non négligeable à la partie ouest de la région, plus précisément à la station de Saint-Louis. Vent essentiellement nocturne soufflant de mars à juin puis de septembre à novembre. Nous retrouvons ici l'influence de l'océan et de la brise de mer. Aux autres stations de la région, il reste un vent quasi-inexistant.

1.2.2 Evolution de la circulation au cours de l'année

Nous venons de voir l'évolution de chacun des rhumbs de la rose. Nous devons à présent envisager la situation au cours de la journée type pour chaque mois de l'année. Afin de constater les changements de situation entre les mois de la saison sèche et ceux de la saison des pluies nous commencerons l'analyse pour le mois de novembre qui marque le début de la saison sèche étant entendu que celui d'octobre constitue un mois de transition.

Figure 18 : Direction moyenne des vents à la station de Saint-Louis (1984-2013)

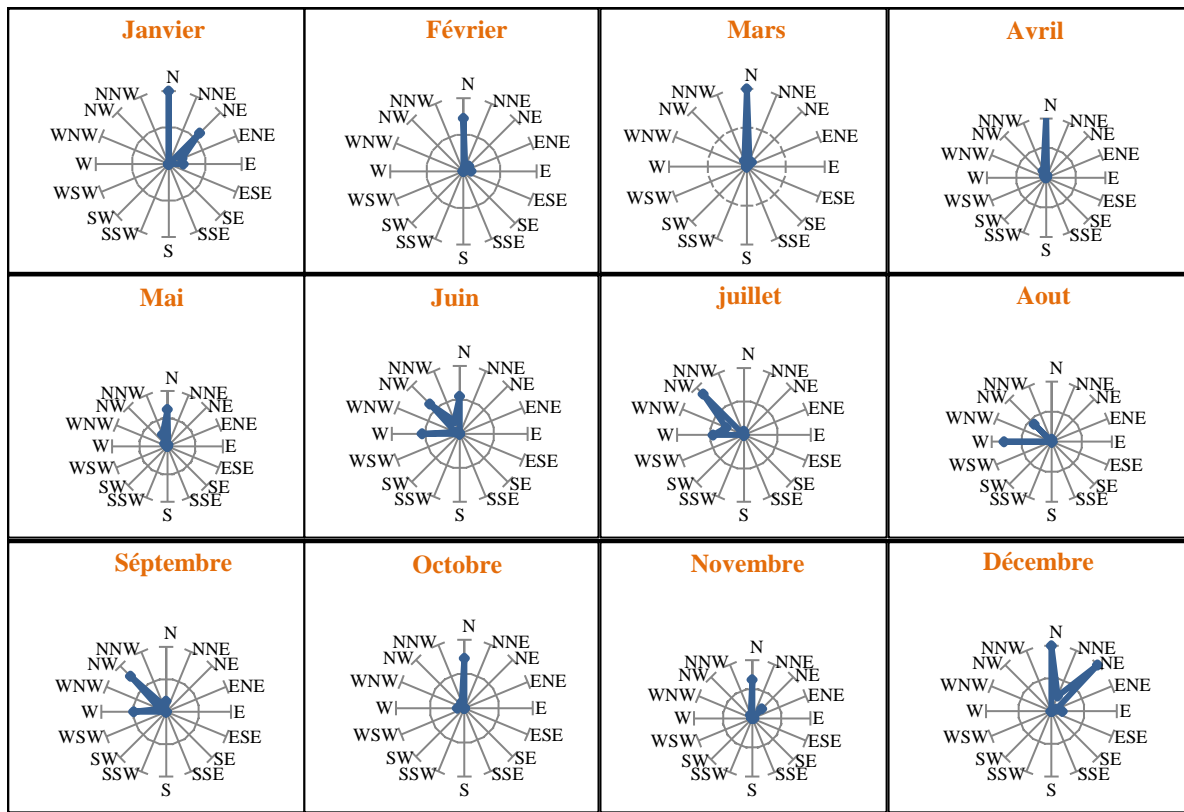


Figure 19 : Direction moyenne des vents à la station de Podor (1984-2013)

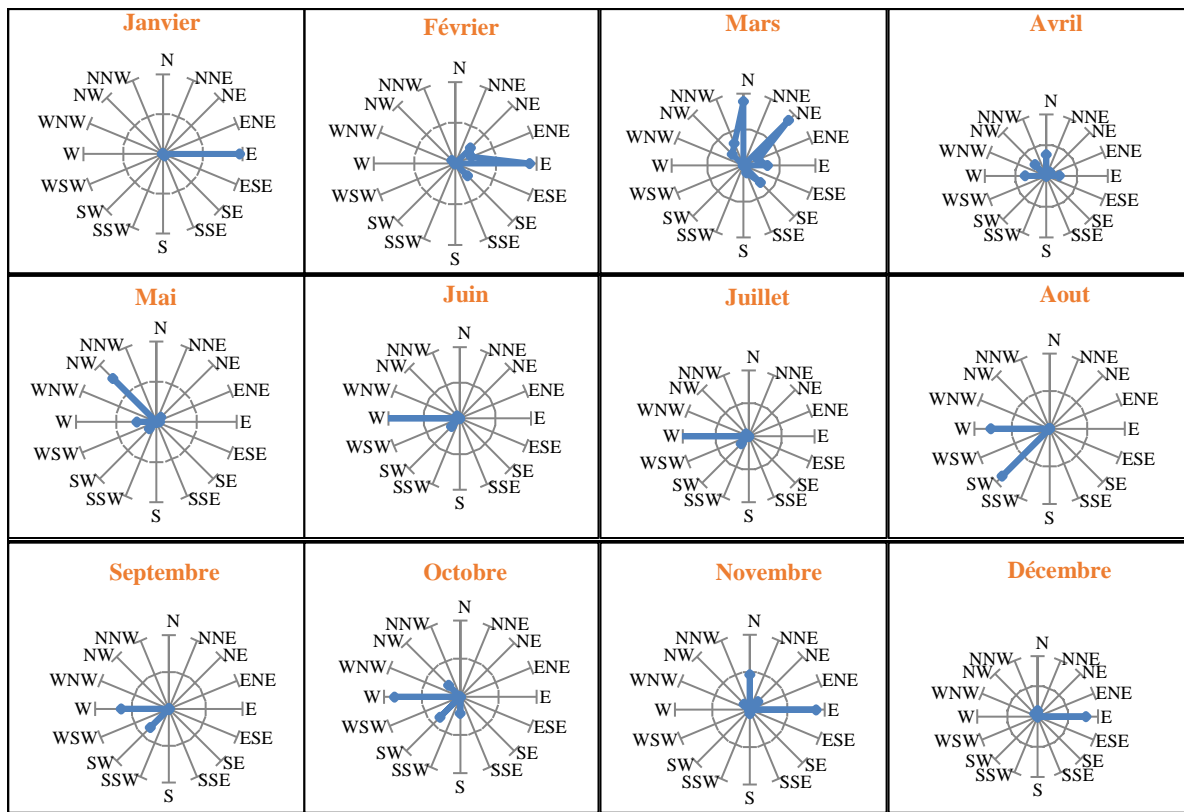
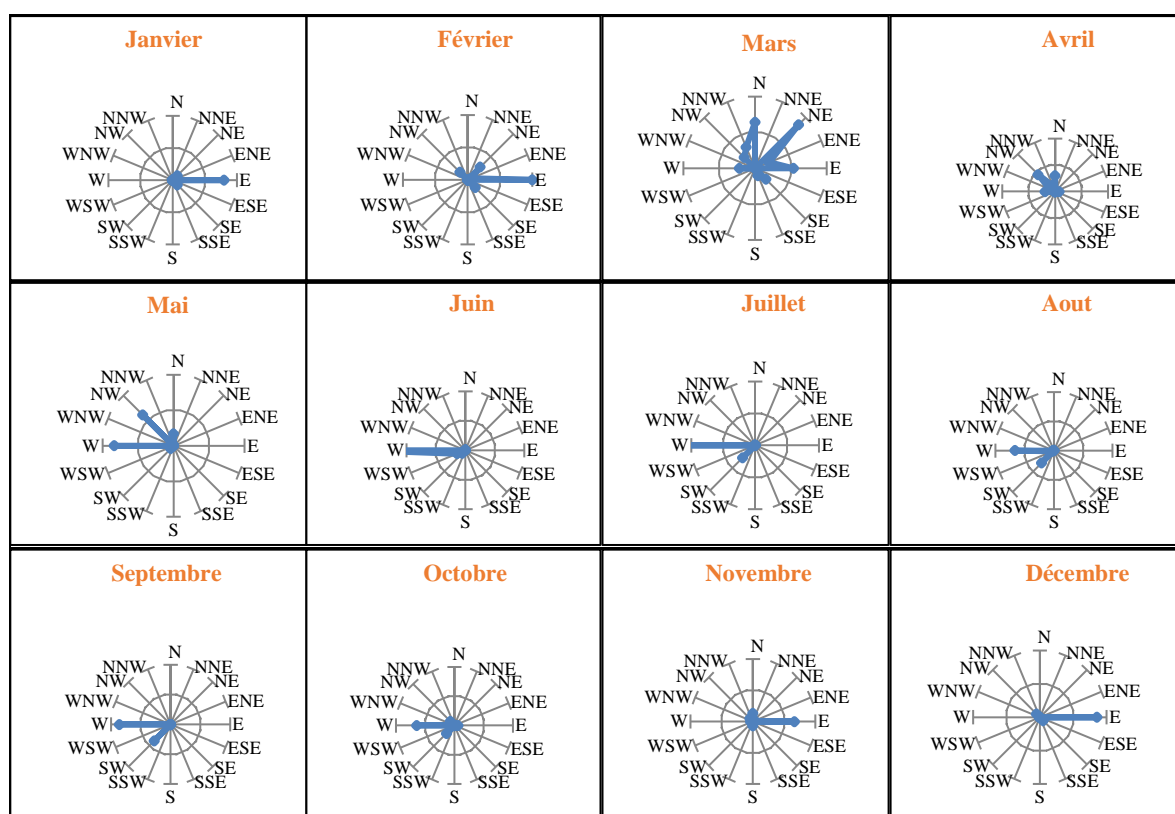


Figure 20 : Direction moyenne des vents à la station de Matam (1984-2013)



En **novembre** : à la fin de la haute saison, lorsque les masses de Mousson s'écartent vers le sud de la station, les vents du Nord-Nord-Ouest et Nord dominant la nuit à l'ouest de la région (station de Saint-Louis) et sont remplacés durant la période chaude de la journée par des vents du Nord-Est. Au cours de la matinée, les vents du Nord-Nord-Ouest disparaissent plus rapidement que ceux du Nord, ces derniers continuant à souffler jusqu'à midi. Entre 09h et 15h, les vents du Nord-Est se développent d'une manière fugace et l'on revient rapidement à la situation nocturne (NICOLAS, 1959). Dans l'ensemble les vents du Nord dominant toute la journée, seule la période d'échauffement maximum amène une orientation plus Ouest. Au centre (station de Podor) et à l'est (station de Matam) le vent du Nord associé cette fois-ci au vent du Nord-Est dominant la nuit et sont remplacés dès les premières heures de la journée par le vent du secteur Est qui s'étale sur toute la journée avec toutefois quelques glissements rapides et de faible intensité du vent de secteur Nord-Ouest. Alors qu'à la station de Saint-Louis c'est le vent du secteur Nord qui domine la circulation, aux stations de Podor et de Matam, il s'agit plutôt du vent du secteur Est qui caractérise le plus le régime éolien.

En **décembre** : à la station de Saint-Louis il n'existe plus de vents d'Ouest. Ceux du Nord subsistent au cœur de la journée, tandis qu'ils glissent dans l'ensemble de la circulation nocturne

du Nord-Nord-Ouest au Nord. La situation le jour reste la même, mais les rares vents du secteur Est tendent à s'installer, plus largement et à envahir une partie de la nuit. Aux stations du centre et de l'est de la région, la situation est analogue à celle de Novembre.

En **janvier** : à l'ouest de la région le regroupement de direction est remarquable. Les vents soufflent dans un seul secteur étalé sur un angle de 90° (Nord à Est) avec une énorme dominance du Nord dans l'après-midi et la première partie de la nuit et du Nord-Est à Est pendant la fin de la nuit et la matinée. Au centre et à l'est le vent du secteur Est contrôle quasiment seul la circulation de jour comme de nuit avec quelques faibles incursions du secteur Sud-Est à la station de Podor et d'alternance de faibles incursions des secteurs Sud-Est et Nord-Est.

En **février** : à la station ouest de la région le regroupement autour de deux directions principales se maintient avec une nette prédominance de Nord qui ne disparaît plus complètement aux heures chaudes. Mais il est parfois remplacé par des vents de Nord-Nord-Est et de Nord-Est. Ici et à ce mois, le secteur Est est rencontré aux heures les plus chaudes alors qu'il reste toujours dominant aux stations centre et est de la région où il continue de s'étaler sur toute la journée. Ici un fait est à souligner, c'est une orientation un peu plus au Nord des vents du secteur Est qui marque le retour dans la circulation des secteurs Est-Nord-Est à Nord-Est.

Dès le mois de **mars**, au centre et à l'est de la région il y a une nouvelle rotation vers le Nord avec renforcement de la fréquence des vents du Nord-Est et du Nord entre midi et minuit, le secteur Est reste bien présent mais ne maintient plus sa place prépondérante de façon continue. Notons un fait curieux ; le vent du Nord-Nord-Ouest qui n'avait jamais apparu jusqu'ici aux niveaux de ces deux stations est noté entre midi et minuit avec une fréquence non négligeable, ce qui confirme son caractère transitionnel, car il disparaîtra à nouveau en avril pour laisser la place aux vents du secteur Nord-Ouest. À l'Ouest de la région, à la station de Saint-Louis, le secteur Nord domine toujours la circulation avec même une fréquence plus élevée que les mois précédents. L'apparition du secteur Nord-Nord-Ouest y est à souligner, seulement qu'ici, il ne semble pas constituer une transition puisqu'il va se maintenir jusqu'au mois de juin avec des fréquences croissantes qui atteignent leur maxima au mois de Mai.

En **avril** la rotation amorcée aux stations de Podor et de Matam se développe et l'on assiste à un nouvel envahissement du secteur Nord-Ouest et même Ouest. Le maximum de fréquence tout au cours de la journée se concentre sur le Nord. Le Nord-Est ne représente plus qu'un vent nocturne et le secteur Est un vent très peu fréquent dans la matinée. L'essentiel de la circulation se situe dans le secteur étalé sur 90° d'angle (Nord à Ouest). À la station de Saint-Louis, même si le

secteur Nord exerce toujours sa dominance, une orientation vers l'Ouest s'amorce. Les vents du secteur Nord-Nord-Ouest et ceux du Nord-Ouest se manifeste à quelques heures de la journée et surtout la nuit.

En **mai** : à la partie ouest de la région (station de Saint-Louis) le mouvement général de glissement vers l'Ouest se poursuit et les vents de ce secteur (Nord-Nord-Ouest et Nord-Ouest) connaissent une augmentation de fréquence. Les vents du Nord commencent à s'affaiblir même si leur fréquence et intensité restent toujours élevées. Aux stations centre et l'est de la Région le secteur Est n'existe plus et la concentration sur le Nord-Ouest et Ouest est manifeste tout au cours de la journée. Le secteur Sud-Ouest fournit déjà des vents nocturnes, sporadiques tout au long de la journée.

Le mois de **juin** préfigure la situation de haute saison à la station de Podor et à celle de Matam. L'Ouest contrôle la majorité des observations, le Sud-Ouest se renforce. À la station de Saint-Louis, le secteur Nord ne domine plus la circulation. La majorité est sous contrôle du secteur Nord-Ouest. Le secteur Ouest apparaît et avec une fréquence très intéressante.

Le mois de **juillet** présente les mêmes caractéristiques que celles de juin aux stations centre et est de la région. À la station ouest de la région, celle de Saint-Louis, le secteur Nord ne disparaît pas totalement de la circulation mais ne se manifeste que par quelques incursions. L'essentiel des vents souffle sur le secteur étalé de Nord-Ouest à Ouest avec plus de 53% des observations pour le Nord-Ouest.

Cette situation anarchique de Nord-Ouest à Ouest se poursuit en **août** à la station de Saint-Louis à la seule différence que la majorité des fréquences change de secteur. L'Ouest enregistre près des 2/3 des observations. Les faibles incursions du secteur Nord se maintient toujours. Au centre et à l'est, les vents ne soufflent que d'un seul secteur étalé sur 45° (Ouest à Sud-Ouest). Cependant si à la station de Podor les deux rhumbs se répartissent équitablement la fréquence des observations, à la station de Matam 2/3 de ces dernières proviennent exclusivement de l'Ouest.

Le mois de **septembre** marque des changements importants à la station de Saint-Louis. Il faut noter une réapparition non négligeable des vents du Nord répartis tout au cours de la journée. La rotation amorcée depuis mars prend un sens adverse avec une décroissance continue des vents d'Ouest au profit de ceux du Nord-Ouest. À la station de Podor on retrouve la situation du mois de juin, donc un changement du sens de la rotation entamée depuis février. La majorité des

observations revient au rhumb Ouest. Par contre à l'est de la zone (station de Matam) la situation reste la même que celle d'aout.

En **octobre** il y a renversement de la situation à la station de Saint-Louis avec regroupement nocturne des vents du Nord-Nord-Ouest, tandis que le Nord retrouve très brusquement sa suprématie avec plus de 70% des observations et se fait sentir beaucoup plus à la période chaude de la journée. Sa fréquence et son intensité semblables à celles du mois de mars constituent les maxima annuels à cette partie ouest de la zone extrême Nord-Sénégal. Au centre et à l'est de la zone, les caractéristiques sont identiques que celles de septembre. Notons cependant des incursions du secteur Nord-Ouest témoignant le retour à la situation de saison sèche.

En résumé deux faits importants sont à retenir :

- Il y a un balancement des vents de grandes fréquences du Nord-Nord-Est à l'Ouest pour la station de Saint-Louis et de l'Est à Sud-Ouest pour les stations de Podor et Matam au cours de l'année, ce qui n'est nullement pour nous étonner et correspond au balancement de saisons.

- Alors qu'en saison sèche les grands vents présentent une certaine régularité d'extension diurne ou nocturne et qu'il est possible de définir des secteurs dominants, cette distinction devient difficile au cours de la saison des pluies où il y a plus de rythme journalier, où les grands vents apparaissent à toute heure, ce qui confirme l'affaiblissement du régime des brises à cette époque.

Nous voyons donc ici (pour toutes les stations) un caractère du rythme saisonnier se manifester : la rotation signalée en premier lieu commence beaucoup plus tôt que la saison des pluies proprement dite, ou « hivernage », ce qui ne devrait pas nous impressionner puisqu'étant dans une zone où la transition n'est pas brusque et pouvant s'étaler sur environ un mois.

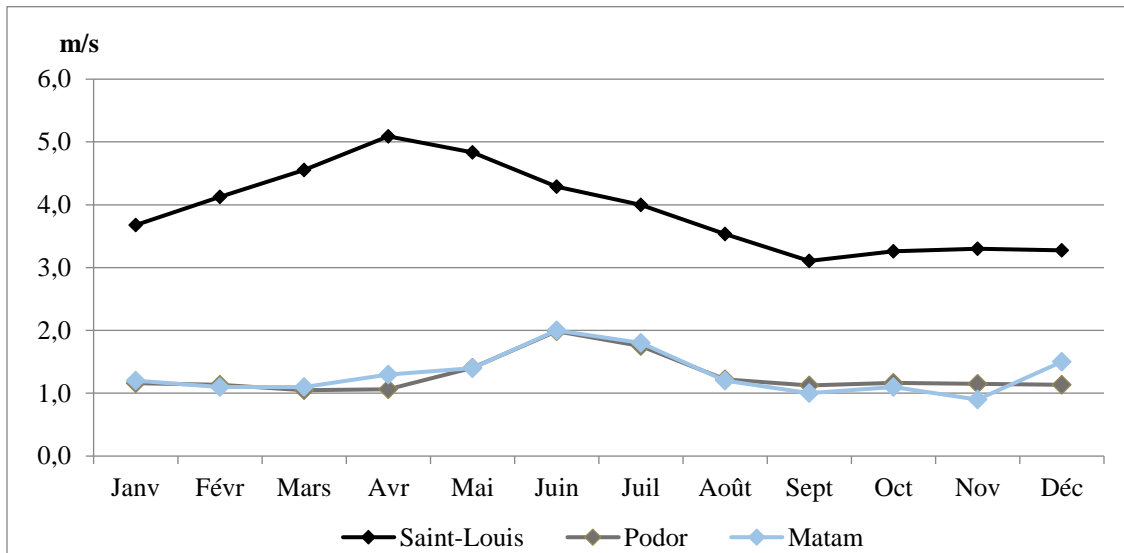
Les vents du secteur Ouest apparaissent d'une manière massive dès avril-mai aux stations de Podor et Matam (un peu plus tard à la station de Saint-Louis) et se retirent dès fin octobre-début novembre (un peu plus tôt pour la station de Saint-Louis). Ce mouvement cyclique du balancement des vents peut servir de critères pour le cœur de la saison sèche (février) et de la saison des pluies (Août).

1.3. Etude de la vitesse du vent

La vitesse du vent a une très grande importance en climatologie, car associée à la température elle nous donnera par la suite l'indice de refroidissement, élément fondamental pour étudier le climat.

Si nous reprenons notre période de 1984 à 2013 et que nous envisageons cette fois non plus la fréquence de direction, mais la vitesse moyenne par direction et par mois exprimée en m/s, nous pouvons apporter une nouvelle qualification aux types de vents.

Figure 21 : courbes de vitesses moyennes pour les stations de Saint-Louis, Podor et Matam



Tout d'abord examinons la marche annuelle, mois par mois, de la vitesse du vent. Le cycle annuel auquel on pourrait s'attendre, avec accroissement et diminution des vitesses suivant les saisons apparaît nettement mais inversement semble-t-il quand on compare la station de Saint-Louis à celles de Podor et Matam. Alors qu'au centre (station de Podor) et à l'est (station de Matam) de la zone les maximums des vitesses sont notés de Mai à Aout avec des pics aux mois de juin et juillet témoignant ainsi leur caractère "hivernal", la situation est tout autre à l'ouest de la zone (station de Saint-Louis). Ici on assiste dès fin-septembre à une croissance des vitesses et ce jusqu'à Avril/Mai. À partir de ce mois, une chute libre de la tendance s'opère jusqu'à la fin de la saison des pluies. On comprend alors qu'ici, c'est à la saison sèche que les valeurs fortes des vitesses de vent se notent avec le maxima au mois d'Avril qui dépasse souvent les 5 m/s. Un fait très important mérite d'être souligné. Alors qu'à l'est et au centre de la zone, la valeur maximale des vitesses ne dépasse quasiment jamais 2 m/s, à l'ouest, cette valeur ne constitue même pas le minima. Ici les plus faibles vitesses dépassent même 3 m/s (3.1 m/s au mois de septembre). Cela serait dû à la lutte acharnée entre les masses d'air océaniques et celles continentales qui se succèdent ou se superposent sans cesse entraînant le repoussement des unes par les autres. Mais ce repoussement nécessite une force seuil, ce qui implique une vitesse élevée. Contrairement à ce qui se passe aux stations de Podor et de Matam où nous assistons plutôt à un cycle de règne périodique entre l'Harmattan et le flux de mousson et où l'arrivée de l'un coïncide quasiment

avec le retrait de l'autre surtout lorsque c'est la mousson qui laisse la place à l'alizé continental (harmattan). Ce qui fait que le phénomène de repoussement ne se note que très rarement (ce serait seulement durant la période de transition). Le résultat est plutôt une installation et une période de règne quasiment stable de l'un comme de l'autre. Puisque le vent en place n'est pas souvent opposé à un autre qu'il tenterait de repousser par une certaine force ou qui tenterait de le repousser, ce qui fait qu'on n'assiste pas souvent à une vitesse très marquée des vents. Ce qu'y expliquerait même le caractère torride de l'Harmattan qui, chaud et sec et dont le flux a une vitesse de déplacement faible ou normale constitue un temps difficile.

2. Température et Humidité relative

2.1. Température

2.1.1. Valeurs moyennes

2.1.1.1. Evolution de la température moyenne au cours de l'année

L'étude de la variation de température moyenne au cours de l'année est faite selon une expression analogue à celle adaptée pour le vent. Tout d'abord nous notons une irrégularité de la marche de la température surtout pendant toute la saison sèche quel que soit la station considérée à l'extrême Nord-Sénégal. Cette irrégularité apparaît environ une heure après le lever du soleil. C'est le moment où la température commence à croître d'une manière plus ou moins uniformément à la diminution de l'amplitude.

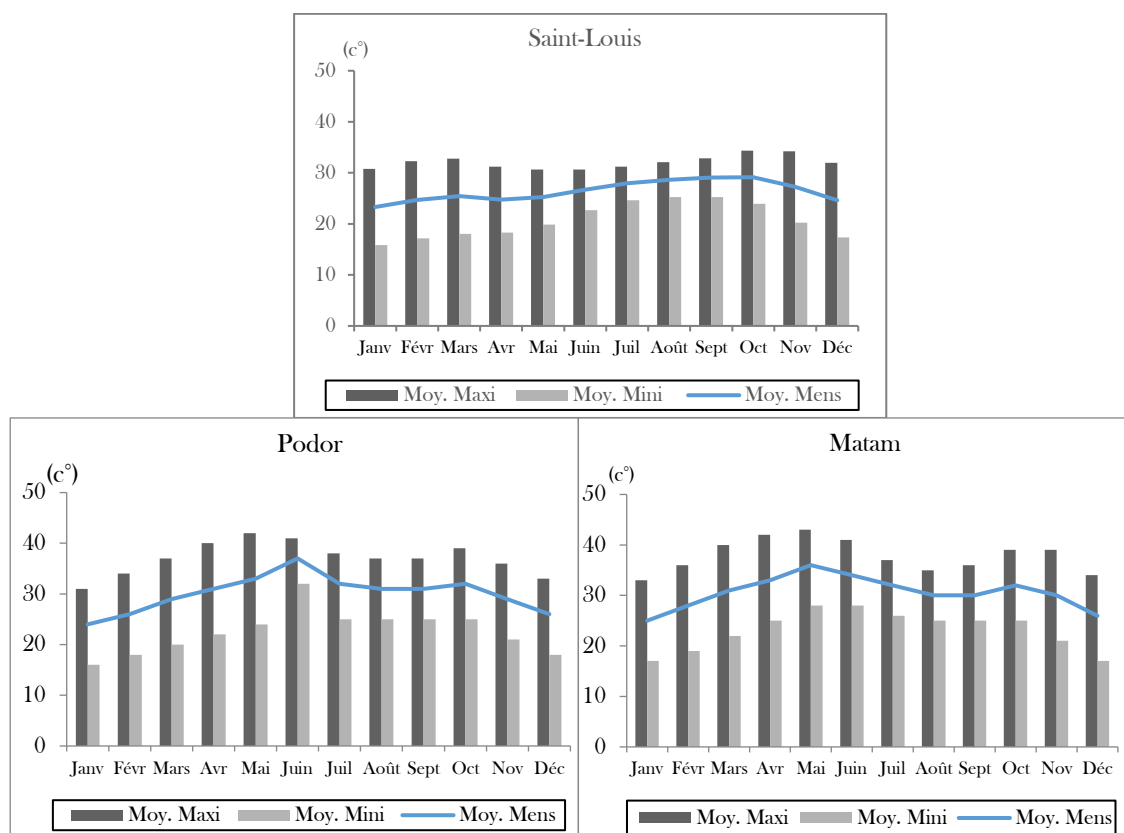
La moyenne maximale sur la période 1984-2013 oscille entre septembre et octobre avec 29° (le maxi des maxi est enregistré en octobre avec 34° et le maxi des mini en septembre avec 25°). Le mois de janvier enregistre à la fois le minimum des maxi et celui des mini avec respectivement moins de 31° et moins de 16°c . Ce qui fait de lui le mois le plus frais de l'année à l'ouest de l'extrême Nord-Sénégal (Station de Saint-Louis). En abordant les moyennes mensuelles, c'est-à-dire portant sur une seule année, nous constatons une amplitude de 6° . Au centre et à l'est de la zone, la situation est différente. Ici (station de Podor et de Matam) la moyenne maximale oscille entre Mai et Juin avec respectivement 37° au mois de Juin pour Podor et 36° au mois de Mai pour Matam. Au centre et à l'est de l'extrême Nord-Sénégal le maxi des maxi est enregistré au mois de Mai (avec respectivement 42° pour Podor et 43° pour Matam) et le maxi des mimi au mois de Juin (32° pour Podor et 28° pour Matam). Le trait commun entre ces différentes stations de la zone est à retrouver du côté des mimi. Comme à la station de Saint-Louis, le mini des maxi

et le mimi des mini sont connus au mois de Janvier avec respectivement 31 et 16° pour Podor et 33 et 17° pour Matam. L'amplitude thermique annuelle est de 13° au centre et 11° à l'est.

Tableau 6 : Fréquence des moyennes des températures aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam

Station de Saint-Louis (1984-2013)												
	Jan	Fév	Mar	Av	Mai	Jui	Jl	At	Sep	Oct	No	Dé
Moy. Maxi	31	32	33	31	31	31	31	32	33	34	34	32
Moy. Mini	16	17	18	18	20	23	25	25	25	24	20	17
Moy. Mens.	23	25	25	25	25	27	28	29	29	29	27	25
Station de Podor (1984-2013)												
Moy. Maxi	31	34	37	40	42	41	38	37	37	39	36	33
Moy. Mini	16	18	20	22	24	32	25	25	25	25	21	18
Moy. Mens.	24	26	29	31	33	37	32	31	31	32	29	26
Station de Matam (1984-2013)												
Moy. Maxi	33	36	40	42	43	41	37	35	36	39	39	34
Moy. Mini	17	19	22	25	28	28	26	25	25	25	21	17
Moy. Mens.	25	28	31	33	36	34	32	30	30	32	30	26

Figure 22 : Fréquence des moyennes des températures aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam



En **novembre** l'influence de la période chaude se fait encore nettement sentir pendant la journée dans tout l'extrême Nord-Sénégal avec bien sûr un peu moins à la station de Saint-Louis, mais le contraste journalier s'accuse. En **décembre** la figure se contracte par abaissement de températures nocturnes au-dessous de 20° entre 03 et 10h à l'ouest de la zone. Dans la journée à la station de Saint-Louis la ligne des 25° n'est plus recoupée qu'entre 12 et 17h au lieu de 10 et 18h en novembre où la température peut toutefois y dépasser les 30°. Au centre et à l'est, respectivement aux stations de Podor et de Matam la fréquence de température diurne la plus représentative se situe entre 27 et 28° mais toutefois le thermomètre y affiche 33/34° durant les heures chaudes (entre 12-17h).

Le mouvement général de contraction se poursuit en **janvier**, où disparaissent presque totalement les valeurs supérieures à 25°, sauf à 14h (à l'ouest) et entre 14-16h à Podor et à Matam. Pour ces deux stations, de 20 à 10h les nuits sont affectées par des températures inférieures à 20° alors qu'à Saint-Louis cette situation démarre dès 18h.

En **fin janvier-début février** la contraction atteint son maximum, avec une figure de type franchement océanique à l'ouest, à la station de Saint-Louis. Durant cette période, la journée presque toute entière s'y situe au-dessous de 25 degré, entre 25 et 27° au centre et à l'est. C'est l'une des figures les plus régulières de l'année.

Fin février au mois de Mars l'expansion reprend avec partout une augmentation des températures minimales et maximales. Un large débordement sur la ligne des 25° est observé à Saint-Louis entre 09 et 18h dépassant même les 30°C entre 13h et 16h. Au centre et à l'est de la zone la barre des 35°C est atteinte et même dépassée dès mi-mai (37°C et 40°C respectivement à Podor et à Matam).

Le mouvement reste stationnaire en **avril** à Saint-Louis mais les nuits deviennent légèrement plus chaudes. A stations de Podor et de Matam par conte l'ascendance continue. Les 40° sont désormais enregistrés à Podor aux heures chaudes de la journée alors qu'à ces mêmes heures le thermomètre affiche jusqu'à 42°C à Matam. Les heures de transition restent les mêmes pour toutes les stations.

C'est en **mai** que commence la véritable expansion des températures à Saint-Louis, les 30° sont presque maintenus chaque jour entre 11 et 17h. La figure tend à devenir sensiblement circulaire. Au centre et à l'est la chaleur se fait déjà sentir très tôt dans la journée, la température minimale

atteint 25° à Podor et même plus à Matam avec 27°. Entre 13h et 17h ces deux stations atteignent 43°C. Ce mois constitue avec Avril, les plus chauds de l'année aux stations de Podor et de Matam.

Juin apporte un brusque accroissement des chaleurs à la fois la nuit et le jour à l'ouest de l'extrême Nord-Sénégal (Station de Saint-Louis). Pratiquement toute la journée se situe au-delà des 30°. A contrario au centre et à l'est de la zone, une baisse de la température maximale est notée et les heures les plus chaudes se réduisent et ne se situent plus qu'entre 13h et 15h. À l'opposé, la température au petit matin qui constitue la minimale dépasse les 30° à Podor et 28° à Matam. Ce qui fait que malgré que les maximums connaissent une baisse, ce mois est le plus chaud en terme de moyenne journalière à Podor et deuxième après Mai à Matam avec respectivement 37 et 34°C.

A partir de **juillet** et jusqu'en **octobre**, la figure garde son allure ascendante à Saint-Louis, s'étalant progressivement et débordant la ligne des 30°, atteignant même les 34°C en octobre entre 12 et 17h. C'est à ce mois d'octobre que le maxi des maxi est enregistré. Durant cette période de 4 mois la température minimale ne descend quasiment plus en dessous de 25°C. C'est le moment le plus chaud à l'ouest de cette zone extrême Nord-Sénégal. Au centre et à l'est par contre la température est partout en baisse de Juillet à la troisième semaine du mois de septembre. Déjà le minima n'y dépasse plus les 25° alors qu'il y a juste quelques jours, il atteignait 30° à Podor et 28° à Matam. Ici le thermomètre n'indique plus les 40° même aux heures les plus chaudes. Mais dès fin-septembre les maxi connaissent une hausse légère et qui croitra au mois d'octobre avec des températures qui avoisineront les 40°C aux heures les plus chaudes de la journée. C'est à ce mois d'octobre que le maxima secondaire est noté aux stations de Podor et de Matam.

Voici un cycle complet annuel : Nous retrouvons le mois de Mai au point critique aux stations centre et est de la zone d'étude et le mois d'octobre à la station de Saint-Louis. Nous notons immédiatement que nous avons affaire à une double variation annuelle et diurne à l'extrême Nord-Sénégal. C'est un mode intermédiaire entre le type transverse, caractéristique des stations à variation essentiellement diurne (avec constance annuelle) et les stations du type vertical où la variation annuelle l'emporte sur la variation diurne. Nous obtenons une surface à un maximum de haute saison en mi-journée et un minimum de fin de nuit en saison sèche.

2.1.2. Les fréquences des températures

2.1.2.1. Groupement des fréquences par bandes larges

C'est un fait bien connu en analyse des fréquences que le choix des bandes, le découpage des séries introduit un élément permettant de faire ressortir telle ou telle propriété. Nous nous sommes par ailleurs efforcé de grouper les températures par séries autour des valeurs critiques. Ces valeurs sont les suivantes : supérieures à 30° ; 27° ; 25°. Notons que ce découpage n'est pas universel.

Tableau 7 : Fréquence des températures par tranches de 1984-2013

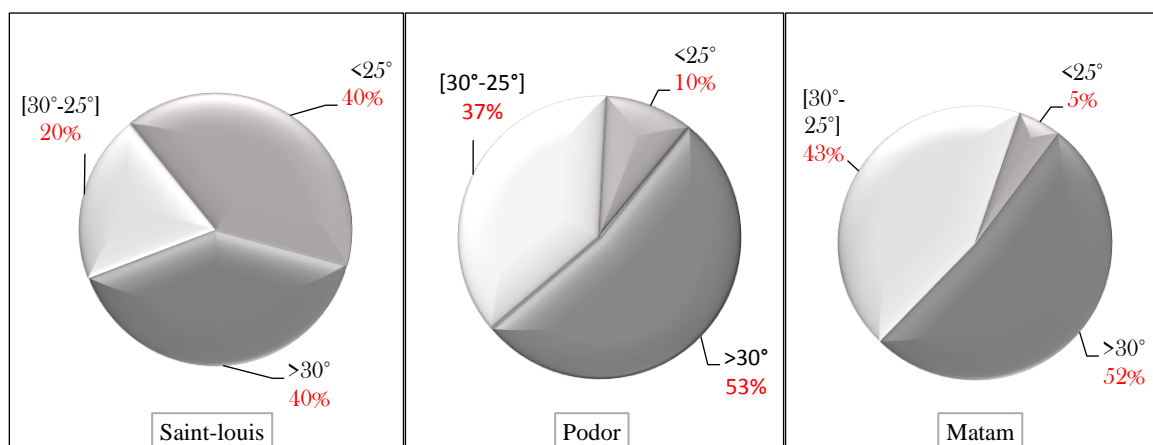
Saint-Louis													
Mois \ Bandes	Janv	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
> 30°	19	24	28	19	15	15	23	30	30	30	30	26	289
[30°-25°]	11	06	02	11	15	15	21	28	29	05	00	04	147
<25°	30	30	30	30	30	30	16	02	01	25	30	30	284
Podor													
> 30°	-	-	02	19	31	31	30	26	28	29	-	-	196
[30°-25°]	07	27	29	12	-	-	01	05	03	02	31	21	138
<25°	24	04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	38
Matam													
> 30°	-	-	16	30	31	31	29	12	08	30	03	-	190
[30°-25°]	30	30	13	01	-	-	02	19	20	02	26	26	155
<25°	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	04	20

L'ensemble des fréquences nous donne les pourcentages de temps par tranche sur la période 1984-2013 (sur 30 ans)

Tableau 8 : Fréquences des observations par tranches de températures aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam

Tranches de Température	Fréquence des observations (en pourcentage)		
	Station de Saint-Louis	Station de Podor	Station de Matam
>30°	40 %	53%	52%
[30°-25°]	20 %	37%	43%
<25°	40 %	10%	5%

Figure 23 : fréquences des observations par tranches de températures aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam



Pour l'analyse de ces fréquences par bande procédons station par station d'autant plus que les réalités ne sont les mêmes suivant que l'on se trouve à l'est, au centre ou à l'ouest du Nord Sénégal.

Pour la station de Saint-Louis, alors que jusqu'à très récemment on remarquait la quasi-inexistence de temps de présence de températures supérieures à 30° (seuls les mois d'octobre atteignaient une moyenne journalière de 30°, GAYE, 2013), la situation actuelle présente un caractère différent. De 1984 à 2013, 40% du temps annuel est marqué par des températures supérieures à 30°C. Mais il importe de noter que 75% de ces 40% sont en dessous de 33°C. Autrement dit finalement à Saint-Louis seuls 10% du temps sont affectés par des températures supérieures ou égales à 33°. 60% du temps annuel restant sont marqués par des températures inférieures à 30°. Et plus de 66 % de ces 60% enregistrent moins de 25°C. Ce qui nous donne donc à Saint-Louis 40% du temps annuel marqué par des températures supérieures à 30°C et 40% du temps annuel enregistrant moins de 25°. Ainsi se dégage la physionomie de la station. Sans être excessivement chaude elle participe à une économie énergétique particulière, limitée entre des valeurs relativement rapprochées. C'est à l'approche de cette station que le climat est plus doux mais ces journées chaudes sont "insupportables".

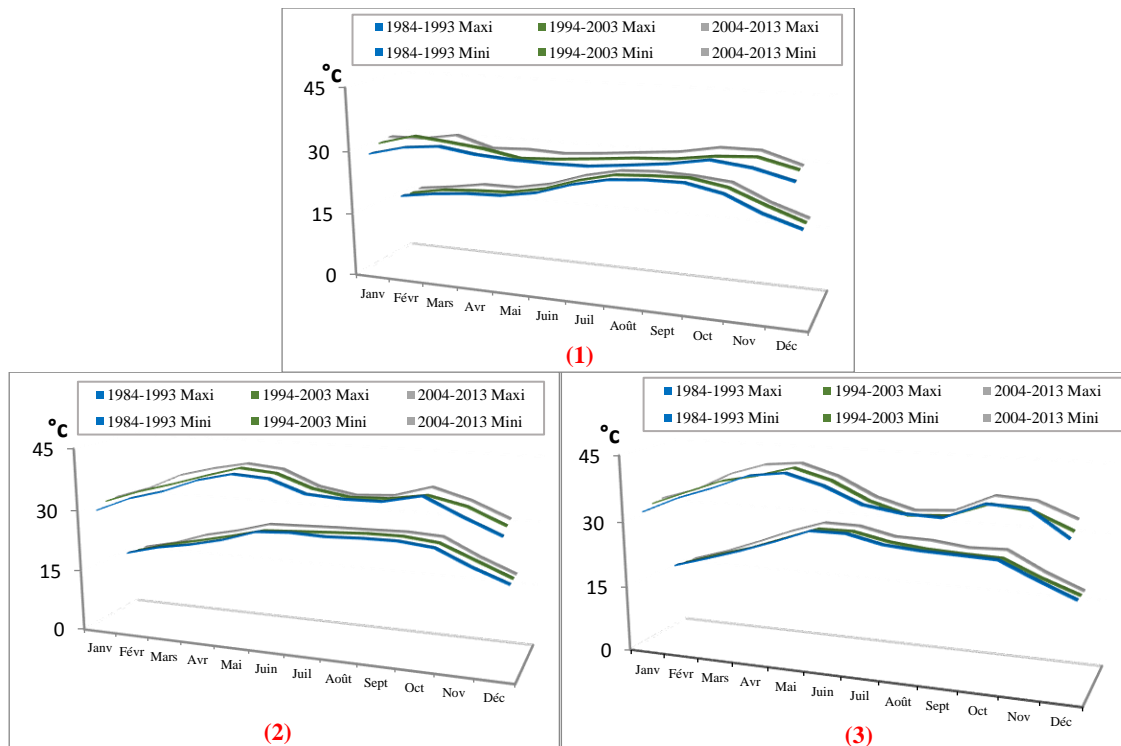
Pour les stations de Podor et de Matam représentatives centrale et orientale du Nord Sénégal, on assiste à une forte présence de températures supérieures à 30°C. De 1984 à 2013, plus de 50% du temps annuel (53% à Podor et 52% à Matam) sont affectés par cette bande. Mais autre chose d'important est à souligner. Pour la station de Podor sur ces 53% du temps annuel enregistrant plus de 30°, 77% sont marqués par des températures de plus de 35°. Autrement dit qu'ici 41% de l'année enregistrent plus de 35°C. Pour la station de Matam la chaleur est plus prononcée, 45%

de l'année enregistrent plus de 35°C. À ces stations centre et est de la zone, la température moyenne journalière descend que très faiblement au-dessous de 25°C. 10% de l'année à Podor et seulement 5% à Matam connaissent des moyennes journalières moins de 25°. Ce qui revient à noter que respectivement aux stations centre et est du Nord Sénégal 90 et 95% du temps annuel sont caractérisés par des températures moyennes journalières supérieures à 25°C. Ce qui témoigne leur caractère chaud et sec mais à noter qu'ici l'hiver (décembre-février) présente une fraîcheur extrême avec souvent des vents asséchant la peau humaine.

L'analyse des fréquences par saison toutes stations confondues nous donne une indication distincte des valeurs des températures par tranche. Si nous considérons les moyennes journalières, on remarque qu'à la station de Saint-Louis environ 80% des fréquences des températures supérieures à 27° sont enregistrées pendant la saison des pluies alors que de décembre à avril seul le mois de mars connaît des températures supérieures à 25°C. Aux stations centre (Podor) et est (Matam), la situation est quasiment la même, à quelques petites exceptions. Ici même si les maxi des maxi et des moyennes journalières sont notés aux mois d'avril-mai-juin, la saison des pluies connaît toujours des températures moyennes journalières jamais au-dessous de 30°C avec des maxi des maxi toujours supérieurs à 35°C. Parallèlement à ces journées de chaleur extrême, aux mois d'hiver (décembre-janvier-février) en pleine saison sèche la température moyenne journalière ne dépasse jamais les 26°C avec des mini des mini toujours au-dessous de 20°C.

Aussi importante qu'elle puisse être, l'analyse des températures ne peut paraître déterminante dans le cadre d'une étude de l'évolution du climat que si elle est entreprise dans le but de suivre sa variabilité d'une période d'années à une autre. Et pour ce faire nous avons découpé notre série en décennies afin de voir si la tendance évolutive de la courbe est changeante d'un temps à un autre.

Figure 24 : évolution décennale des températures aux stations de Saint-Louis (1), Podor (2) et Matam (3) (1984-2013)



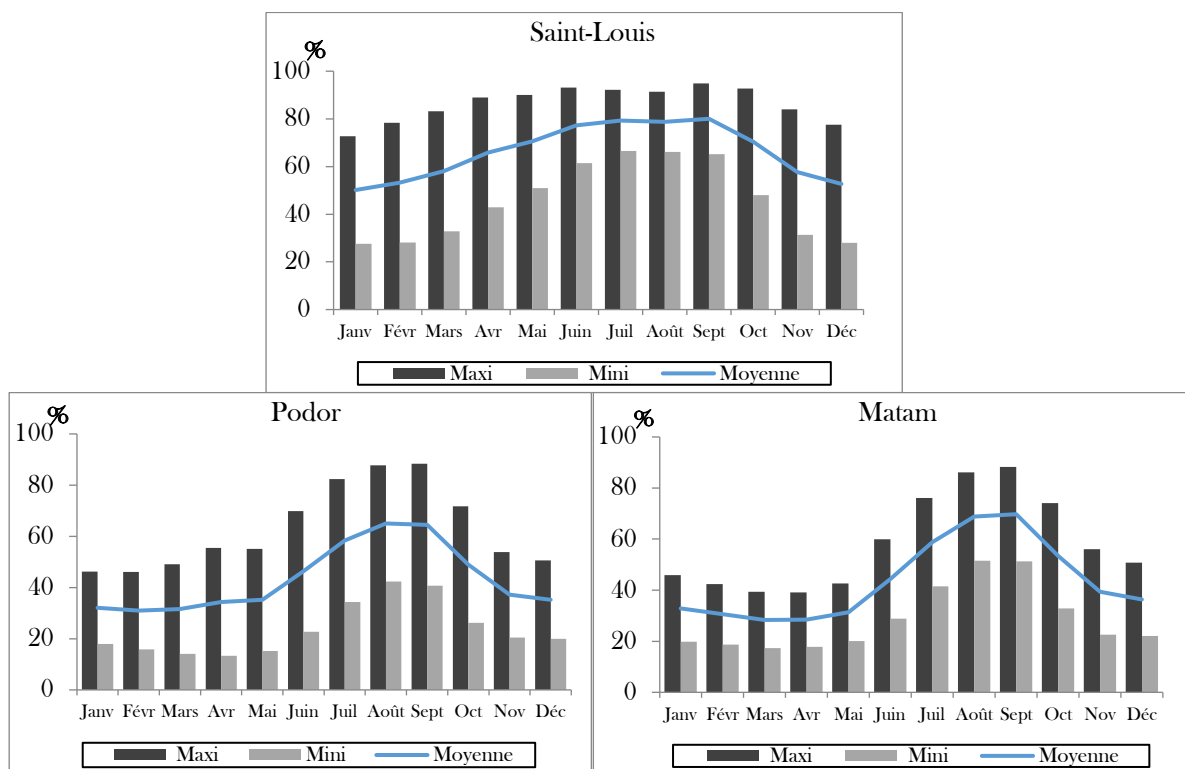
De 1984 à 2013, d’une décennie à une autre nous remarquons une constance dans l’évolution des fréquences à la fois minimales et maximales quel que soit la station considérée. Mais si nous envisageons une description suivant les saisons, on note aussi que quel que soit la station considérée, l’homogénéité est beaucoup plus remarquable aux mois de la saison sèche. Pour la station de Saint-Louis et suivant les décennies, les maxi sont quasiment de 30, 31 et 32°C pour respectivement juillet, août et septembre et les mini tournent presque toujours autour de 25°C. Pour la station centre de l’extrême Nord-Sénégal (Podor), qu’il s’agisse de la décennie 1984-1993, 1994-2003 ou 2004-2013, la température reste quasiment la même quel que soit le mois de la saison des pluies considéré. Pour les maxi, elles sont de 38°C pour juillet et de 37°C pour août et septembre et s’agissant des mini, elles oscillent quasiment autour de 25°C. Concernant, la partie est de la zone (station de Matam), l’homogénéité en saison des pluies y est également remarquable. Ici aussi quel que soit la décennie considérée, le mois de juillet est toujours le plus chaud de la saison et enregistre toujours 37°C, le mois d’août connaît quasiment 2° de moins alors que le mois de septembre reste marqué tout au long des décennies de la série 1984-2013 par une température maxi de 36°C. Pour les mini, elles sont presque toujours de 26° au mois de juillet et de 25° pour les deux autres mois de la saison des pluies (août et septembre).

L'homogénéité quasi parfaite notée en saison des pluies est moins constatable en saison sèche et surtout aux mois d'hiver. Ici non seulement la température varie d'une décennie à une autre mais aussi l'évolution de la courbe n'est souvent pas régulière quel que soit la station considérée même si le mois de janvier est toujours le plus froid. Mais ce constat d'irrégularité apparait plus avec les températures maxi. Cette irrégularité est plus souvent due à des aberrations ou anomalies résultant d'une présence plus marquée de type de vents au cours de cette saison. L'intervention d'autres vents de nature ou de secteurs différents influe très fortement sur la température du site concerné mais puisque cette intervention n'est pas constante dans le temps et son degré pas toujours régulière, il va de soi que la situation thermométrique connaisse parfois des caprices.

2.2. Humidité relative

2.2.1 Fréquence de l'humidité relative

Figure 25 : Taux d'humidité relative aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam



Comme on pourrait s'y attendre, l'humidité relative est naturellement plus forte aux mois pluviaux de l'année. Quel que soit la station considérée, c'est au mois de septembre que l'on retrouve le maxi des maxi et la moyenne journalière maximale. Cependant alors qu'à l'ouest de l'extrême Nord-Sénégal (station de Saint-Louis), c'est en plein hiver (décembre-janvier-février) que nous retrouvons les valeurs les plus faibles de l'humidité relative avec 23% pour les minima et respectivement 53, 50 et 53% de moyenne journalière, au centre (station de Podor) et

à l'extrême est (station de Matam) c'est au cœur du printemps (mars-avril-mai) que l'on enregistre les plus faibles taux de saturation de l'air avec des valeurs minimales ne dépassant jamais 20% (avec 14, 13 et 15% pour Podor et 17, 18 et 20% pour la station de Matam). Autre fait important à souligner est qu'alors à Saint-Louis de mai à octobre les valeurs maximales ne descendent jamais au-dessous de 90%, aux stations de Podor et de Matam, jamais ce taux de saturation n'est atteint même pas aux mois les plus pluviaux de l'année. Toujours sur cette logique de comparaison des taux humidité suivant les stations de notre d'étude, si nous considérons spécifique les moyennes journalières, on note que quel que soit le jour de l'année l'air est toujours saturé au moins à moitié (la moyenne journalière minimale est de 50%). Au centre et à l'est de l'extrême Nord-Sénégal respectivement 9 et 8 mois de l'année connaissent des pourcentages au-dessous de la moitié du taux d'humidité absolue. Ici de novembre à mai mêmes les maxima journaliers n'atteignent jamais 60% d'humidité alors qu'à la station de Saint-Louis ils restent toujours supérieurs à 70%.

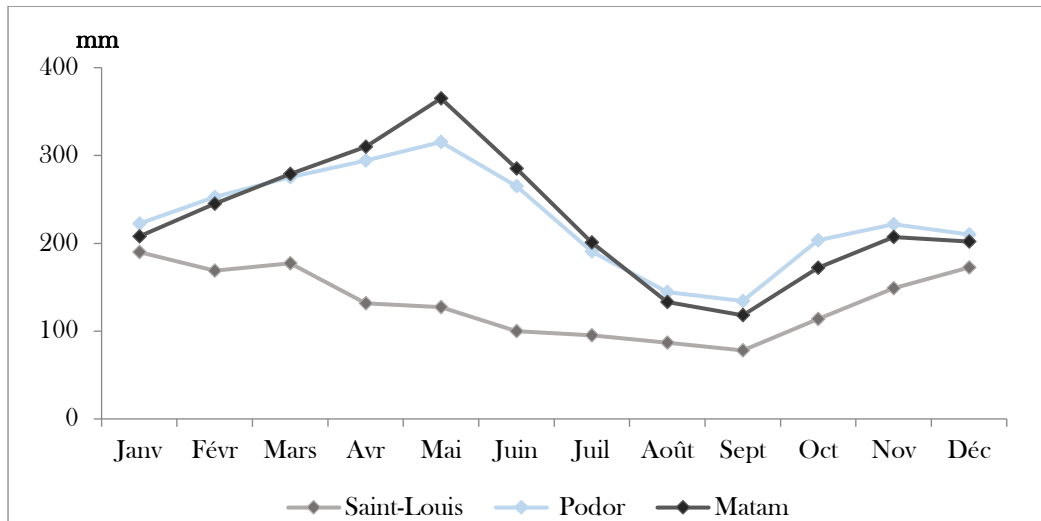
L'aspect commun des différentes stations résiderait dans la manifestation journalière des taux d'humidité en bandes et suivant les mois de l'année. La bande située entre 30 et 60% d'humidité est plus étendue et peut porter sur plusieurs journées entières même de nuit entre novembre et mars. La tranche suivante, entre 60 et 80% encadre les périodes précédentes de la saison sèche, pouvant s'étendre sur un ensemble continu de journées. Cette tranche apparaît plus fréquemment dès le mois d'avril à la station de Saint-Louis et dès le mois de juin aux stations Podor et Matam et s'étend jusqu'au mois d'octobre pour toutes les stations. Enfin notons qu'à de très rares exceptions, c'est de nuit qu'on trouve les fréquences les plus élevées.

En somme, alors que Paris voit ses moyennes diminuées de décembre à juin, l'extrême Nord-Sénégal, toutes stations confondues suit exactement la marche opposée. Au moment où Paris enregistre le maximum d'humidité relative à l'hiver, période froide, et le minimum au printemps et à l'été, aux stations de l'extrême Nord-Sénégal par contre c'est le minimum qui correspond à la période froide et le maximum en saison des pluies.

3. Evaporation et Insolation

3.1. Evaporation

Figure 26 : Evolution des taux d'évaporation moyenne mensuelle aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam



En se référant à la figure ci-dessus on constate qu'à l'extrême Nord-Sénégal, quel que soit la station considérée les taux d'évaporation les plus faibles se notent à la saison des pluies. La valeur minimale est toujours enregistrée au mois de septembre.

À l'extrême ouest (Saint-Louis), le maxima se situe en décembre-janvier, c'est-à-dire au cœur de l'hiver. Mais la décroissance après janvier se fait plus ou moins régulièrement jusqu'au minimum août et septembre avec respectivement 87 et 78 mm, ce qui correspond aussi aux mois les plus pluviaux de l'année. Dès la sortie de la saison des pluies, la croissance des valeurs reprend pour culminer en décembre-janvier.

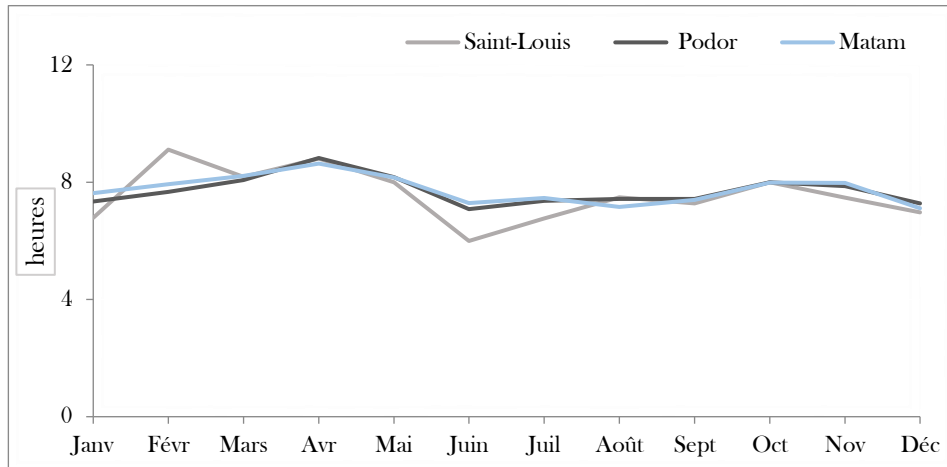
Aux stations centre (Podor) et est (Matam), contrairement à ce qui se passe à l'ouest, c'est en plein printemps (mars-avril-mai) que l'on retrouve les valeurs de l'évaporation les plus faibles. Le mois de mai se trouve toujours au point critique (enregistre toujours le maxima) avec 315mm pour Podor et 365mm pour Matam.

Alors qu'aux stations purement continentales de la zone seuls les mois d'août et septembre connaissent des taux d'évaporation inférieurs à 190mm, cette valeur constitue le maxima mensuel à la station de Saint-Louis qui est plutôt océanique. Ce qui pour conclure que l'évaporation est beaucoup plus forte aux stations centre et est de l'extrême Nord-Sénégal qu'à sa partie ouest.

3.2. L'insolation

Nous abordons ici un paramètre différents de ceux que nous avons vus jusqu'ici. Ici encore, il nous a semblé utile de montrer la variabilité et l'importance du phénomène dans son ensemble.

Figure 27 : variabilité du nombre d'heure d'insolation aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1984-2013)



L'évolution du nombre d'heures de soleil au cours de l'année montre un minima et un maxima principaux et un minima et un maxima secondaires. Le minima principal est enregistré dès fin juin pour s'étaler ensuite sur toute la saison de pluies alors que le maxima principal est noté au mois d'avril, au cœur du printemps avec environ 9 heures d'enseillement. Pour quelques années, ce maxima principal est enregistré en février à la station de Saint-Louis. Pour toutes les stations de la zone, le minima secondaire apparait en décembre-janvier c'est-à-dire en plein hiver et le maxima secondaire est noté juste au sortir de la saison des pluies, dans la deuxième moitié d'octobre.

Nous avons encore ici une division de l'année assez régulière en quatre fractions correspondant à la saison des pluies (même si ici la tendance débute un peu plus tôt) (minima principal), à la période de transition de la saison des pluies à la saison sèche (maxima secondaire), à une partie de la saison sèche (au cœur de l'hiver) (minima secondaire) et en plein printemps (avec le maxi en avril) (maxima principal).

Le maxima principal enregistré en plein printemps s'explique par le fait que l'atmosphère étant très claire, les jours sont plus longs contrairement à l'hiver. Notons cependant qu'en saison des pluies, l'atmosphère peut être très claire essentiellement après les orages mais le couvert nuageux important diminue la durée de l'insolation enregistrable, justifiant ainsi son caractère de minima principal.

4. La pluviométrie

Partant du fait que le mode de précipitation intervient sur le complexe climatique, nous nous efforcerons d'analyser en première partie l'eau condensable. Ce qui nous amènera à étudier successivement la rosée, les bruines, les brouillards, le heug et les pluies d'hivernage. Les pluies sous forme de tornade brusque influent profondément sur le rythme thermique des journées qu'elles affectent, mais selon un mode totalement différent de celui d'une pluie fine et continue. C'est la rosée qui serait responsable d'une renaissance du couvert végétal en période "non pluvieuse". Les brouillards permettent quant à eux une diffusion de germes figurés en suspension dans l'air.

Durant les trois principaux mois de pluie à l'extrême Nord-Sénégal, alors qu'aux stations centre (Podor) et est (Matam) août enregistre plus de temps de précipitations que juillet et septembre, à l'extrême ouest (station de Saint-Louis) c'est plutôt septembre qui connaît la hauteur maximale des précipitations. Le premier constant à faire est le temps relatif des précipitations. Une seconde chose frappante est la variété de leur intensité pouvant aller de 0,3mm à l'heure jusqu'à plus de 30mm à l'heure, soit un rapport de 1 à 85. Cette disparité traduit autre chose que la variation d'un même phénomène. Il y a là plusieurs types de pluie à l'intérieur de la saison. Les pluies les plus faibles sont rarement voire très rarement de faibles intensités (Nicolas, 1959 parlait de 5mm/h à Saint-Louis). Inversement les pluies les plus courtes sont très violentes, du type tropical. Cependant il existe un grand nombre de précipitations de faible intensité et de faible durée traduisant des phénomènes orageux très avortés.

4.1. Les types de précipitations

4.1.1 La Rosée

Elle se localise en saison sèche et influence la température physiologique. Elle dépend de l'état hygrométrique de l'atmosphère et de la différence entre les températures maximales et les températures minimales de l'air ambiant. À l'extrême Nord-Sénégal, même si elle apparaît au centre et à l'est, la rosée est plus notée à l'ouest (station de Saint-Louis) où elle est favorisée par les vents de secteur Nord et Nord-Ouest. Tout au cours de la nuit, et plus particulièrement au minimum thermique de l'aube elle est présente. Alors qu'aux stations centre et est de la zone, la rosée est présente de fin-novembre/décembre à février, à la station ouest de Saint-Louis, elle est notée de novembre à avril. La fréquence mensuelle à la particularité de croître régulièrement tout au long de cette période suivant les stations. L'intensité du phénomène est très variable, et lors des maxima, il est susceptible d'influencer sur le pluviomètre. En février, souvent même en plein

janvier selon que l'on se trouve à l'ouest, au centre ou à l'est et suivant le rythme de l'hiver, l'importance de la rosée est telle que tous les objets laissés à l'air libre la nuit s'imprègnent d'eau où se retrouvent d'une pellicule de gouttelettes souvent assez grosses pour ruisseler.

4.1.2 La Brume

Nous avons encore ici affaire à un phénomène entièrement local et spécifique à la station de Saint-Louis du fait de sa position auprès de l'immense plan d'eau du Sénégal. Le maximum se situe au cœur de la saison sèche, pouvant osciller de décembre à janvier, vient ensuite un minimum relatif entre février et avril, suivi d'un second maximum absolu entre avril et mai. Elle devient nulle en juin ou peut atteindre un minimum en septembre. Il est curieux de constater que nous trouvons quatre parties de l'année, évidemment mal définies, mais dont la succession ne semble pas douteuse. Nous insisterons plus particulièrement sur les maxima des fréquences de saison fraîche de décembre à février. Ce maxima associé à une grande amplitude thermique introduit des journées dangereuses du point de vue pulmonaire (NICOLAS, 1959). La brume de la saison des pluies a une tout autre signification. Elle permet une diffusion des éléments figurés en atmosphère chaude, humide et ventilée.

4.1.3 Le Brouillard

Le véritable brouillard au sol est extrêmement rare à l'extrême Nord-Sénégal, la moyenne n'atteint pas 5 jours par an. C'est pratiquement un phénomène sans importance dans les stations considérées. Ces rares jours de brouillards apparaissent généralement en septembre, parfois ils se répartissent en plein hiver ou juste à la sortie de l'hivernage.

4.1.4 Le heug

Egalement appelé pluie hors saison ou pluie de mangue, le heug a un mécanisme de formation tout à fait différent des pluies enregistrées en été dites « **pluies de mousson** » ou d'hivernage. Selon le Professeur Pascal SAGNA (cité par DIATTA, 2008), « pendant l'hiver de l'hémisphère nord, l'air polaire est advecté le long de thalwegs d'altitude jusque dans nos régions tropicales. Quand cet air froid entre en conflit avec de l'air tropical ou équatorial chaud et humide véhiculé par le Jet Subtropical généralement orienté sud-ouest / nord-est, il se forme des systèmes nuageux denses (à l'étage moyen et supérieur) qui précipitent : ce sont des pluies hors saison ». À l'extrême Nord-Sénégal comme partout dans les basses altitudes ces systèmes nuageux sont des masses compactes d'Altostratus, d'Altostratus, de Cirrostratus, et de Cumulonimbus. Ce sont ces derniers qui engendrent les orages et les fortes précipitations. Cependant, tout le volume d'eau précipité n'atteint pas le sol car il doit traverser une épaisseur de 2 à 3000 m d'air chaud et

sec. Et au cours de cette descente, les précipitations s'évaporent en partie ou en totalité. « Mais si la perturbation est puissante, elles peuvent être abondantes comme c'est le cas les 9 et 10 janvier 2002. Les pluies enregistrées au cours de ces deux jours ont un caractère exceptionnel par leur intensité et par leur étendue » (WADE, 2008).

4.1.5 Les pluies d'Hivernage

Elles constituent l'essentiel des précipitations à l'extrême Nord-Sénégal et se concentrent quasiment sur trois mois (juillet, août et septembre), elles s'étalent exceptionnellement jusqu'au mois d'octobre. Le renforcement de l'alizé de Nord-ouest (durant cette période) pour la partie ouest de la zone et celui de l'alizé continental pour les stations centre et est freinent très souvent la remontée de l'Equateur Météorologique. L'épaisseur de la mousson étant ainsi limitée, ce qui explique dans la plupart des cas les retards observés pour le démarrage de la saison pluvieuse et la faiblesse des pluies en cette partie du Sénégal. La distribution de ces précipitations dans le temps et dans l'espace est étroitement liée à la pénétration de la mousson, au comportement des lignes de grains et par conséquent reste tributaire de l'ensemble du système climatique Ouest Africain. Les précipitations en Afrique occidentale sont liées à trois conditions principales (LEROUX, 1970) :

- le potentiel hygrométrique de la masse d'air (qui est en même temps un potentiel énergétique) ;
- l'intervention d'un facteur déclenchant l'ascendance de la masse d'air ;
- une structure verticale de l'Equateur Météorologique favorable à cette ascendance (absence de cisaillement et de subsidence).

La partie plutôt océanique et/ou océanique et continentale de l'extrême Nord-Sénégal est en grande partie sous la dominance de flux d'alizé issu de l'anticyclone des Açores et le centre et la partie est de la zone est sous règne de flux d'alizé continental issu de la dépression saharienne. Pour les unes comme pour les autres (les différentes stations de la zone), les pluies qui sont reçues pour l'essentiel sont dues aux lignes de grains qui peuvent apporter en moyenne plus de 80% des précipitations dans les régions sahéliennes. Ces précipitations sont de type orageux. D'une manière générale, on peut retenir de deux types de pluies d'hivernage : les orages organisés ou lignes de grains dont le passage se manifeste par une accélération de la vitesse du vent. Ils sont responsables de la plupart des pluies enregistrées au Sahel ; les pluies continues et non orageuses où les conditions dynamiques et énergétiques les plus favorables sont réunies pour que se

développent sans entrave les mouvements ascendants permettant la formation de nuages à grande extension verticale du type cumulonimbus. Mais la densité des formations nuageuses et l'activité pluviogénique dépendent directement de l'intensité des pulsations qui animent les flux.

4.2. Les Fluctuations Pluviométriques

Nous allons développer dans cette partie la variabilité pluviométrique aux pas de temps mensuel, saisonnier, annuel. Nous nous intéresserons aussi à la variabilité du nombre de jours de pluie.

4.2.1. Variabilité des pluies moyennes mensuelles et saisonnières

Le diagnostic de la variabilité pluviométrique à l'échelle mensuelle permet de distinguer trois types de comportements pluvieux qui sont :

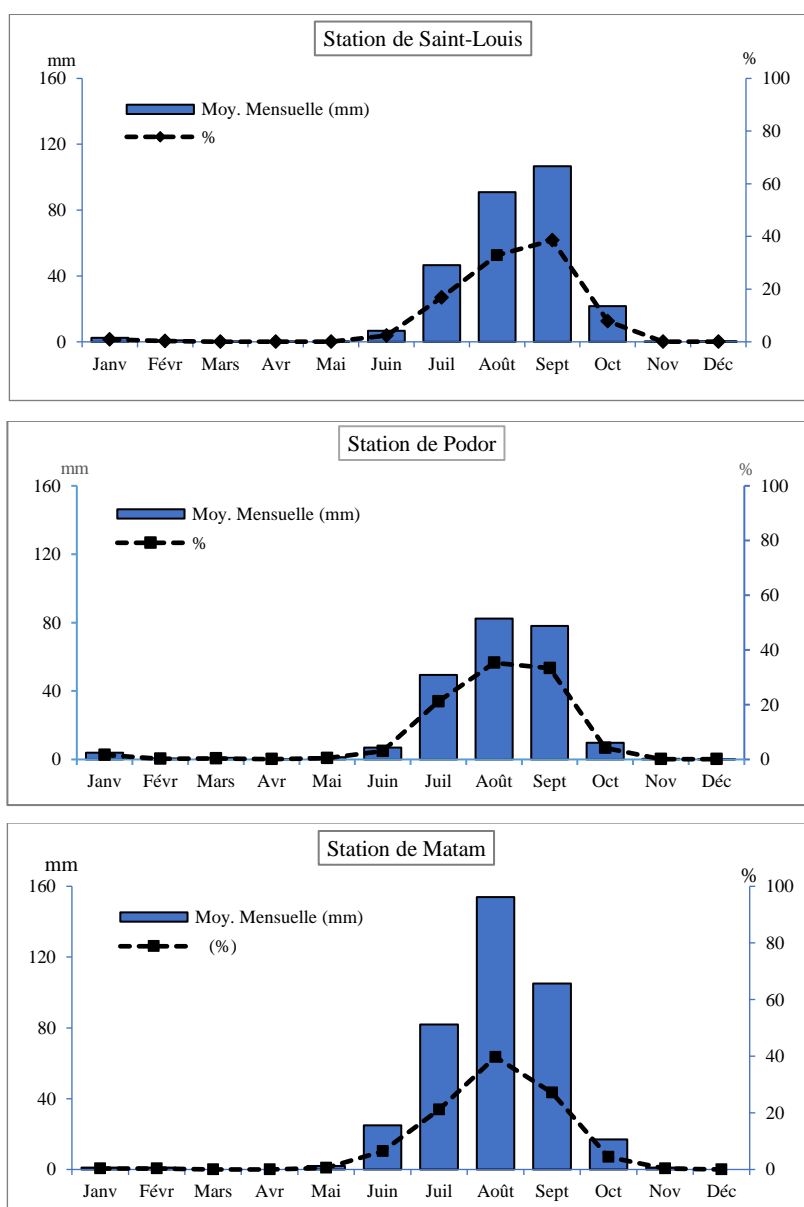
- Les mois à pluviométrie relativement faible ;
- Les mois à pluviométrie intermédiaire ou modérée ;
- Les mois à pluviométrie relativement forte

Le tableau suivant présente les précipitations moyennes mensuelles sur la période allant de 1984 à 2013 aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam.

Tableau 9 : Pluviométrie moyenne mensuelle aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1984-2013)

		Janv	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
Saint-Louis	Moy. Mens. (mm)	2	1	0	0	0	6,7	46,7	90,9	106,6	21,7	0,2	0
	%	0,9	0,3	0,0	0,0	0,1	2,4	16,9	32,9	38,5	7,8	0,1	0,1
Podor	Moy. Mens. (mm)	3,9	0,6	0,9	0,2	1,3	7,0	49,4	82,3	78,0	9,8	0,3	0,1
	%	1,7	0,2	0,4	0,1	0,5	3,0	21,2	35,3	33,4	4,2	0,1	0,1
Matam	Moy. Mens. (mm)	1	1	0	0	2	25	82	154	105	17	1	0
	%	0,3	0,3	0,0	0,0	0,5	6,4	21,1	39,7	27,1	4,4	0,3	0,0

Figure 28 : Pluviométrie moyenne mensuelle aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1984-2013)



4.2.1.1. Mois à pluviométrie faible

Nous devons donc envisager des pluies de saison sèche. Elles n'ont qu'une influence très limitée sur le climat, si ce n'est pas le type de temps dont elles sont la résultante. Il convient de distinguer deux catégories. D'une part les pluies nées d'une dépression septentrionale s'étendant sur l'Atlantique Nord-Oriental et amenant des types de pluies fines et continues analogues au crachin, visibles ici en janvier mais beaucoup plus notable en février, pouvant atteindre jusqu'à plus de 5mm (par exemple : 5.3mm en 1992 et 10mm en 2008 pour Saint-Louis ; 5.2mm en 2005 et 9.4mm en 2008 pour Podor ; 7.4mm en 1983 et 15.4mm en 2005 pour Matam). Sont concernés les mois de novembre, décembre, janvier et février. Ces mois marquent la grande saison sèche à l'extrême Nord-Sénégal comme sur l'ensemble du territoire national. Au cours de cette période

de l'année, les précipitations recueillies aux différentes stations de la zone représentent entre 1 et 3% du total annuel. Proportionnellement aux hauteurs d'eaux précipitées, le nombre de jours de pluie reste faible et n'excède pas 13 jours durant toute cette période tous les mois confondus. Au cours de ces mois, les événements pluviométriques journaliers enregistrés sont également insignifiants. Contrairement à ce que l'on croit usuellement, ces pluies apparaissent dans les moyennes générales : avec un maximum généralement en février. Toutefois, ce petit maximum présente une signification qu'il ne faut pas négliger d'autant plus que les très faibles valeurs des autres mois proviennent en très grande partie de mesures d'eau condensées par rosée. La hauteur journalière maximale pour chacun des mois n'atteint pas 15mm. Toutefois, quelques singularités peuvent être relevées au cours de certaines années où le mois de janvier et/ou février fait exception comme en témoigne janvier 2002 avec 66,2mm à la station de Saint-Louis, 115.8mm à la station de Podor et 30.5mm à la station de Matam. Notons cependant que ce cas de janvier 2002 ne peut en aucun cas être pris en compte dans cette catégorie car ce type de pluie est d'une nature différente. Il s'agit là d'une véritable pluie de mangue appelée aussi heug qui contrairement à ces pluies fines nées d'une dépression septentrionale peut souvent atteindre une hauteur supérieure même à celle des mois de la saison de pluies comme il a d'ailleurs été le cas aux stations de Saint-Louis et de Podor en 2002. En cette année, le mois de janvier avec 66,2mm à Saint-Louis et 115,8mm à Podor dépassait juillet, août et septembre enregistrant respectivement 32mm, 28mm et 35,9mm pour Saint-Louis et 08mm, 26mm et 68.1mm pour Podor. Soulignons qu'à cette année c'est le mois d'octobre qui a enregistré le maxima pluviométrique avec 89mm à la station de Saint-Louis alors qu'à celle de Podor c'est ce mois de Janvier même qui est resté le plus pluvieux de toute l'année. Le second type est une pluie précoce d'avril ou mai beaucoup plus faible. Elle ne peut être qualifiée comme pluie de mangue et se traduit le plus souvent par une très fine averse matinale ne laissant aucune trace, n'ayant pratiquement pas d'influence sur la température, parce que cette dernière est déjà en voie de progression.

4.2.1.2. Mois à pluviométrie intermédiaire ou modérée

Ici seul le mois de juin peut être considéré comme mois intermédiaire à pluviométrie modérée. Il annonce l'arrivée de la grande saison pluvieuse débutant généralement dans la première quinzaine du mois de juillet. En fait ce sont des pluies courtes, peu mouillant, accompagnées de décharges électriques annonçant les pluies importantes. Les précipitations ne sont cependant pas en concordance absolue de phases préparatoires, véritable mise en place des régimes pluviométriques. Au cours de cette période intermédiaire, l'atmosphère se sature et s'agence pour laisser place à l'état nécessaire au développement de dépressions migratoires génératrices de

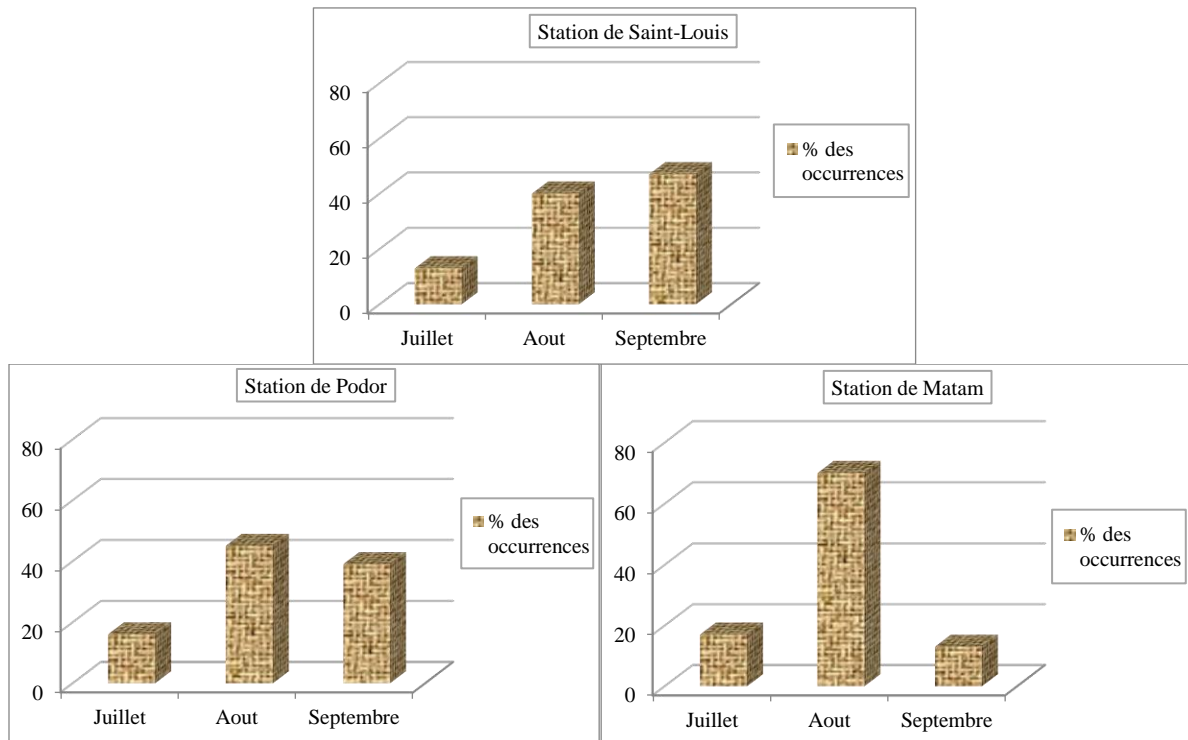
pluies. On remarque une hausse sensible des précipitations sur l'ensemble de l'extrême Nord-Sénégal. Au cours de ces mois, le nombre de jours de pluie connaît également une hausse, comparativement au mois précédent. C'est durant ce mois que l'augmentation du nombre de jours de pluie devient véritablement sensible sur la quasi-totalité de la région. Les événements pluviométriques journaliers commencent également à devenir importants. Les hauteurs pluviométriques journalières au cours de ce mois peuvent dépasser 25mm. En mars ces événements restent principalement localisés au Sud-Ouest du pays.

4.2.1.3. Mois à pluviométrie relativement forte

Les mois de juillet, août et septembre sont les plus pluvieux à l'extrême Nord-Sénégal comme partout dans la partie sahélienne du pays. C'est au mois de juillet que débute la véritable saison des pluies appelé aussi hivernage ou encore saison de mousson. Aux différentes stations de l'extrême Nord-Sénégal elle dure généralement trois mois, de juillet à septembre mais peut parfois se prolonger jusqu'au mois d'octobre. Ce sont des mois de moyenne et forte pluviométrie. Le mois de juillet connaît la valeur pluviométrique la moins forte à l'ouest et au centre de la zone par rapport aux autres mois de l'hivernage, son total y est moins important comparativement au total des mois d'août et septembre, alors qu'à l'est de la zone c'est plutôt le mois de septembre qui connaît une récession pluviométrique. Aux stations de Saint-Louis et de Podor, aout et septembre représentent à eux seuls l'essentiel des abats pluviométriques soit plus de 80% (87% à la station de Saint-Louis et 84% à la station de Podor) sur l'ensemble des observations. A la station de Matam, 87% des abats pluviométriques sont enregistrés seulement de juillet à aout. Notons toutefois que sur ces 87%, 70% sont spécifiquement enregistrés au mois d'aout. Ces mois de la saison de mousson sont aussi caractérisés par un nombre de jours de pluie important, où les valeurs mensuelles dépassent facilement 10 jours de pluie. Pour les occurrences du maximum pluviométrique c'est le mois d'août qui enregistre la valeur la plus élevée au centre et à l'est de l'extrême Nord-Sénégal avec 47% soit 14/30 pour la station de Podor et 70% soit 21/30 pour la station de Matam sur la période allant de 1984 à 2013, alors qu'à la partie ouest de la zone c'est le mois de septembre qui domine les occurrences avec 47% soit 14/30. Parlant de l'écart entre les mois de juillet et aout, le Professeur. Boubou SY notait dans sa thèse d'Etat (2008) que celui-ci est "significatif [...], traduisant le début des pluies dans la deuxième quinzaine de juillet : la distribution de la pluviométrie dans le temps est mauvaise, ce qui accentue la dégradation des bilans hydriques".

La figure ci-dessous présente la répartition mensuelle de ces occurrences

Figure 29 : Répartition mensuelle des occurrences du maximum pluviométrique aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1984-2013)



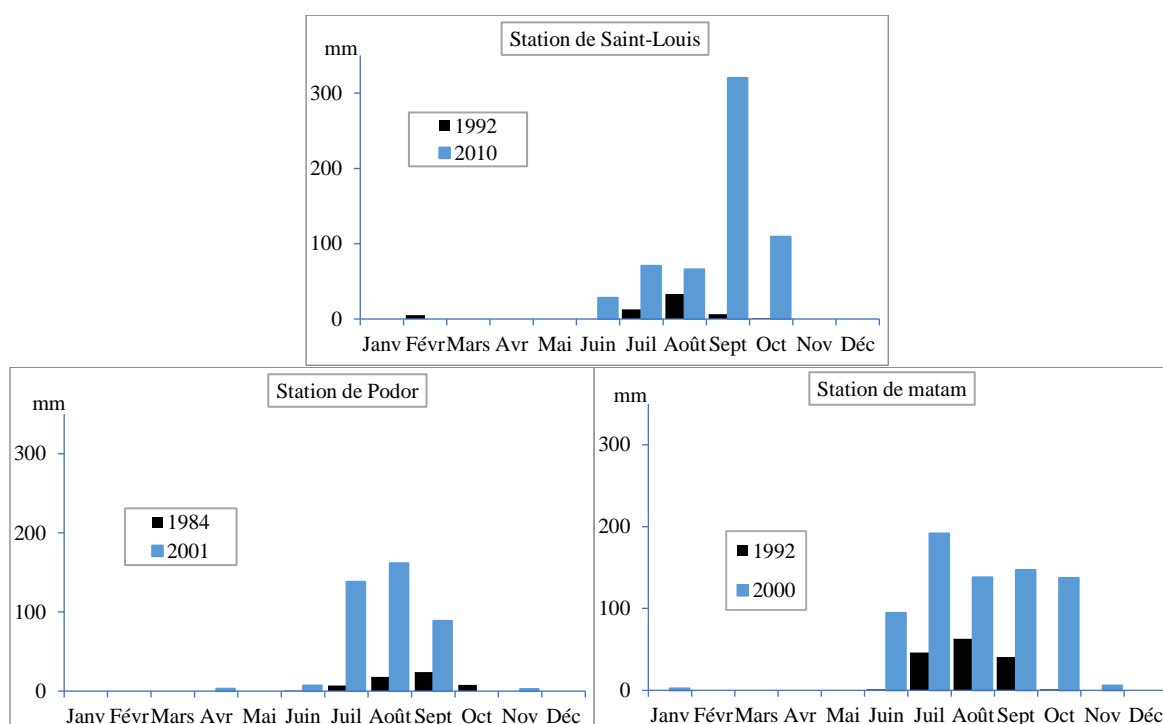
Cependant un fait important mérite d’être souligné, quoique dominant les pourcentages des occurrences au centre et à l’est de l’extrême Nord-Sénégal, le mois d’août n’a jamais atteint les 300mm à la station de Podor et n’atteindrait cette barre que seulement que deux fois (en 2003 et 2007) sur la période allant de 1984 à 2013. Le plus étonnant, seules cinq autres années (1987 avec 235,6mm ; 1989 avec 235.1mm ; 1994 avec 277.2mm ; 1999 avec 219mm ; 2012 avec 207.3mm) sur les trente étudiées à la station de Matam et une seule autre année (1993 avec 201.5mm) sur les trente étudiées à la station de Podor ont atteint la barre des 200mm. À Saint-Louis aussi, quoique dominant les occurrences, le mois de septembre n’a enregistré qu’une seule fois une hauteur d’eau de plus de 300mm (2010 avec 320mm). Là aussi, le plus étonnant est que seulement deux autres années des trente étudiées ont atteint la barre des 200mm (1987 avec 270,3mm et 2003 avec 228,6mm).

Cette variabilité des pluies moyennes mensuelles et saisonnières est aussi étudiée à travers le **tableau 10** et illustré par la **figure 30** qui comparent l’Etat des précipitations mensuelles au cours des années extrêmes.

Tableau 10 : Variations de la pluviométrie mensuelle au cours des années extrêmes de 1984 à 2013 aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam

	Année	Total
Saint-Louis	1992	59
	2010	594
Podor	1984	57.3
	2001	401.7
Matam	1992	152
	2000	717

Figure 30 : Variations de la pluviométrie mensuelle au cours des années extrêmes aux stations de Saint-Louis (1992 et 2010), Podor (1984 et 2001) et Matam (1992 et 2000) de 1984 à 2013.



À travers cette figure, on se rend compte que l'organisation de la saison des pluies subie des perturbations. En effet le début et la fin de la saison des pluies, son intensité tout comme sa durée peuvent varier au cours du temps au point qu'une très forte différence puisse apparaître entre les années jusqu'à témoigner le caractère extrême de certaines d'entre elles. Pour les années de pluviométrie extrêmement faible, trois faits justifient leur caractère : soit elles sont marquées par un début de saison de pluie tardif et une fin précoce, soit les mois pluvieux sont marqués par une hauteur d'eau extrêmement faible, soit les deux à la fin. Les années à pluviométrie extrêmement faible aux différentes stations de l'extrême Nord-Sénégal (1992 à Saint-Louis et Matam et 1984 à Podor) témoignent ces situations. Ici non seulement elles sont marquées par un début tardif (fin juillet) et une fin précoce (fin septembre sauf à Podor en début d'octobre) mais surtout par des hauteurs d'eau extrêmement faibles des mois pluvieux. À Saint-Louis, en 1992 le mois d'août

était le plus pluvieux et n'a enregistré que seulement 33mm, tous les autres mois pluvieux n'ont pas atteint 15mm. À Podor, c'est le mois de septembre qui a été le plus pluvieux en 1984 et n'a enregistré que 24mm seulement, juillet et aout n'ont même pas atteint 20mm. À Matam, de 1984 à 2013, la plus faible hauteur d'eau a été connue en 1992. En cette année, comme d'ordinaire c'est le mois d'aout qui a connu le maxima des précipitations mais avec seulement 63mm, les deux autres mois pluvieux n'y atteindront même pas 50mm. Les années à pluviométrie forte sont marquées non seulement par une durée de saison de pluie plus longue avec un début et fin brusque et à hauteur d'eau assez importante mais aussi la pluie a été régulière tout au long de cette période "anormale" (quand on connaît la règle des trois mois d'hivernage en cette partie du Sénégal). L'ensemble de ces conditions témoignent les fortes hauteurs pluviométriques enregistrées au cours de ces années (594mm en 2010 à la station de Saint-Louis, 401,7mm en 2001 à la station de Podor et 717mm en 2000 à la station de Matam).

Mais aussi importante qu'elle soit, l'étude de la variabilité des pluies moyennes mensuelles et saisonnière ne permet de voir que la répartition de la pluviométrie au cours de l'année et ne saurait permettre en aucun cas sinon qu'à moindre mesure de déterminer l'évolution les tendances pluviométriques au cours d'une période donnée. Pour ce faire nous allons passer à l'étude de la variabilité des totaux et moyennes pluviométriques annuels.

4.2.2. Variabilité des totaux et moyennes pluviométriques annuelles

L'analyse du cumul annuel des précipitations est pertinente pour effectuer une étude de variabilité. La *figure 31* couvrant toute la période d'observation (de 1984 à 2013) met en évidence l'alternance d'excédents et de déficits pluviométriques annuels.

La pluviométrie d'une année est définie par la somme de la hauteur des précipitations mensuelles. La mesure de la variabilité de la pluviométrie sur une période donnée peut être réalisée grâce à la moyenne interannuelle. Celle-ci est une donnée évolutive dans le temps, car elle est fonction des nouvelles observations. Elle schématise l'instabilité des hauteurs annuelles des précipitations. Sans traduire la réalité climatique, elle retient les aspects essentiels des paramètres climatiques. La pluviométrie annuelle est inférieure à la moyenne interannuelle dans le cas des précipitations déficitaires et supérieure à cette moyenne pour des pluies annuelles excédentaires.

En dehors de la moyenne interannuelle, il existe aussi d'autres méthodes qui permettent de montrer la variabilité interannuelle des précipitations. C'est le cas des écarts à la moyenne interannuelle. Cette méthode permet d'évaluer les excédents ou les déficits d'une année quelconque par rapport à la moyenne de la série. Sa formule est la suivante :

EM (valeurs absolues) = **P1** – **Pm** ou **EM** (valeurs relatives) = $\{(P_i - P_m) / P_m\} \times 100$

Avec :

EM = Ecart à la moyenne

Pi = Pluie de l'année i

Pm = Pluie moyenne interannuelle

Cette étude des précipitations annuelles présente l'avantage de décrire et de caractériser leur distribution dans le temps et dans l'espace. Elle permet également d'apprécier l'ampleur des déficits et des excédents.

Le tableau ci-après donne le cumul annuel de la pluviométrie et écarts à la moyenne aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam de 1984 à 2013.

Tableau 11 : Pluviométrie annuelle et écarts à la moyenne aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1984-2013)

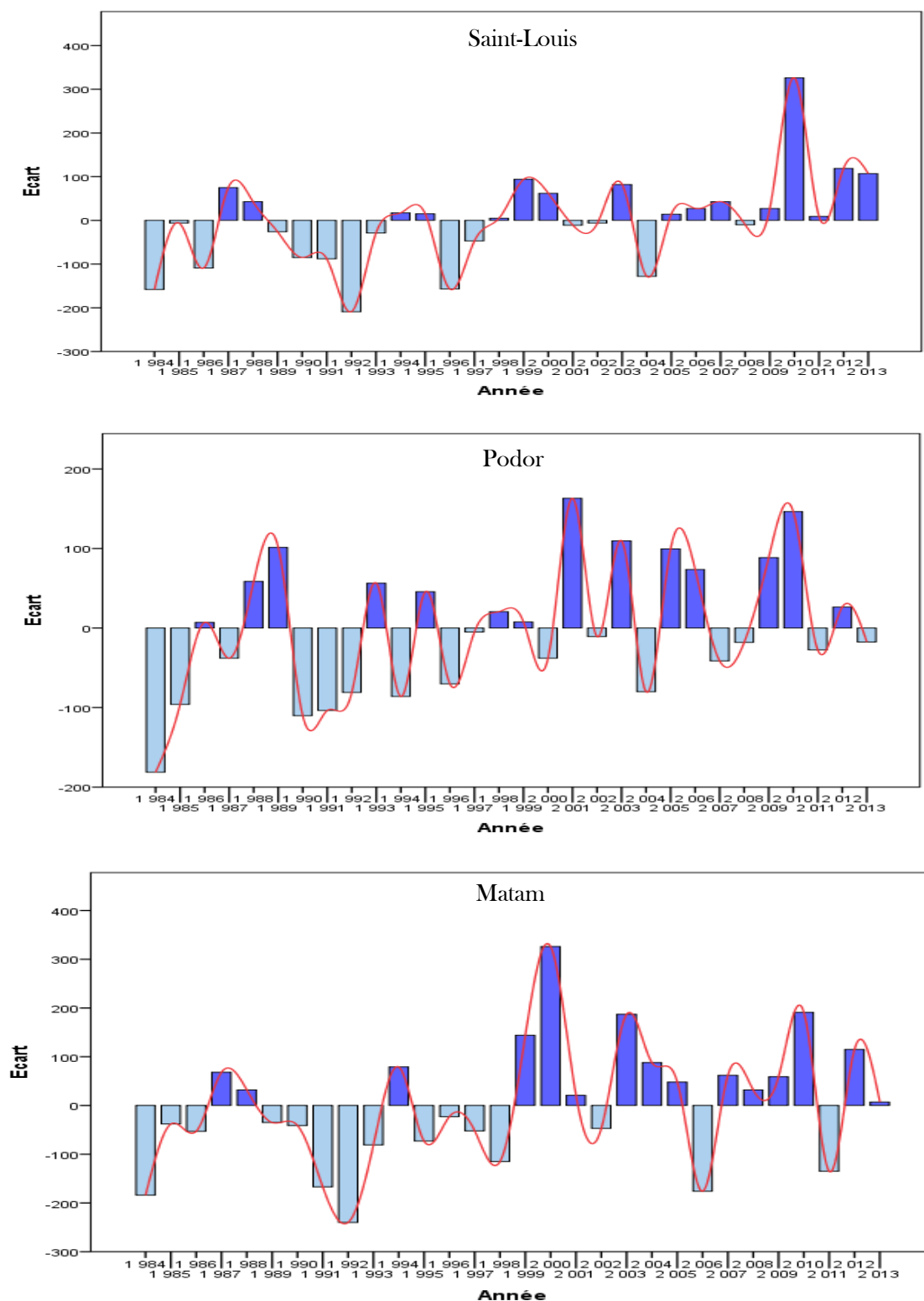
		Station de Saint-Louis									
Année	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	
Cumul Pmm annuelle	109	261	158	343	310	241	182	180	59	239	
Ecart à la Moyenne	-158	-6	-109	75	43	-26	-85	-88	-209	-29	
Année	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
Cumul Pmm annuelle	284	282	111	220	273	362	329	256	262	350	
Ecart à la Moyenne	17	15	-157	-47	5	94	62	-11	-6	82	
Année	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
Cumul Pmm annuelle	140	282	295	311	257	295	594	277	387	375	
Ecart à la Moyenne	-128	14	27	43	-10	27	326	9	119	107	

		Station de Podor									
Année	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	
Cumul Pmm annuelle	57.3	142.6	245.7	200.7	297.2	339.9	128.3	134.9	157.7	295	
Ecart à la Moyenne	-176,1	-90,8	12,3	-32,7	63,8	106,5	-105,1	-98,5	-75,7	61,6	
Année	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
Cumul Pmm annuelle	152.5	284.2	168.4	233.6	259.1	246.3	200.7	401.7	227.9	348.2	
Ecart à la Moyenne	-80,9	50,8	-65,0	0,2	25,7	12,9	-32,7	168,3	-5,5	114,8	
Année	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
Cumul Pmm annuelle	158.5	338.1	312.2	197.3	220.6	327.2	385	211.1	265	221.1	
Ecart à la Moyenne	-74,9	104,7	78,8	-36,1	-12,8	93,8	151,6	-22,3	31,6	-12,3	

		Station de Matam									
Année	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	
Cumul Pmm annuelle	208	354	339	459	423	357	350	225	152	310	
Ecart à la Moyenne	-181	-35	-50	71	35	-32	-38	-164	-237	-79	
Année	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
Cumul Pmm annuelle	470	318	369	340	276	535	717	412	345	579	
Ecart à la Moyenne	82	-71	-20	-49	-112	147	328	24	-44	190	
Année	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
Cumul Pmm annuelle	480	440	215	453	424	451	582	256	507	399	
Ecart à la Moyenne	91	51	-173	65	35	62	194	-133	118	10	

Le **tableau 11** présente respectivement les cumuls annuels et les écarts à la moyenne (valeurs absolues) de la pluviométrie aux différentes stations de l'extrême Nord-Sénégal sur la période 1984-2013. Les données des écarts à la moyenne sont illustrées par la **figure 31** Celle-ci montre que la variation de la pluviométrie d'une année à l'autre est presque une règle.

Figure 31 : Ecart à la moyenne pluviométrique aux stations du Nord Sénégal (1984-2013)

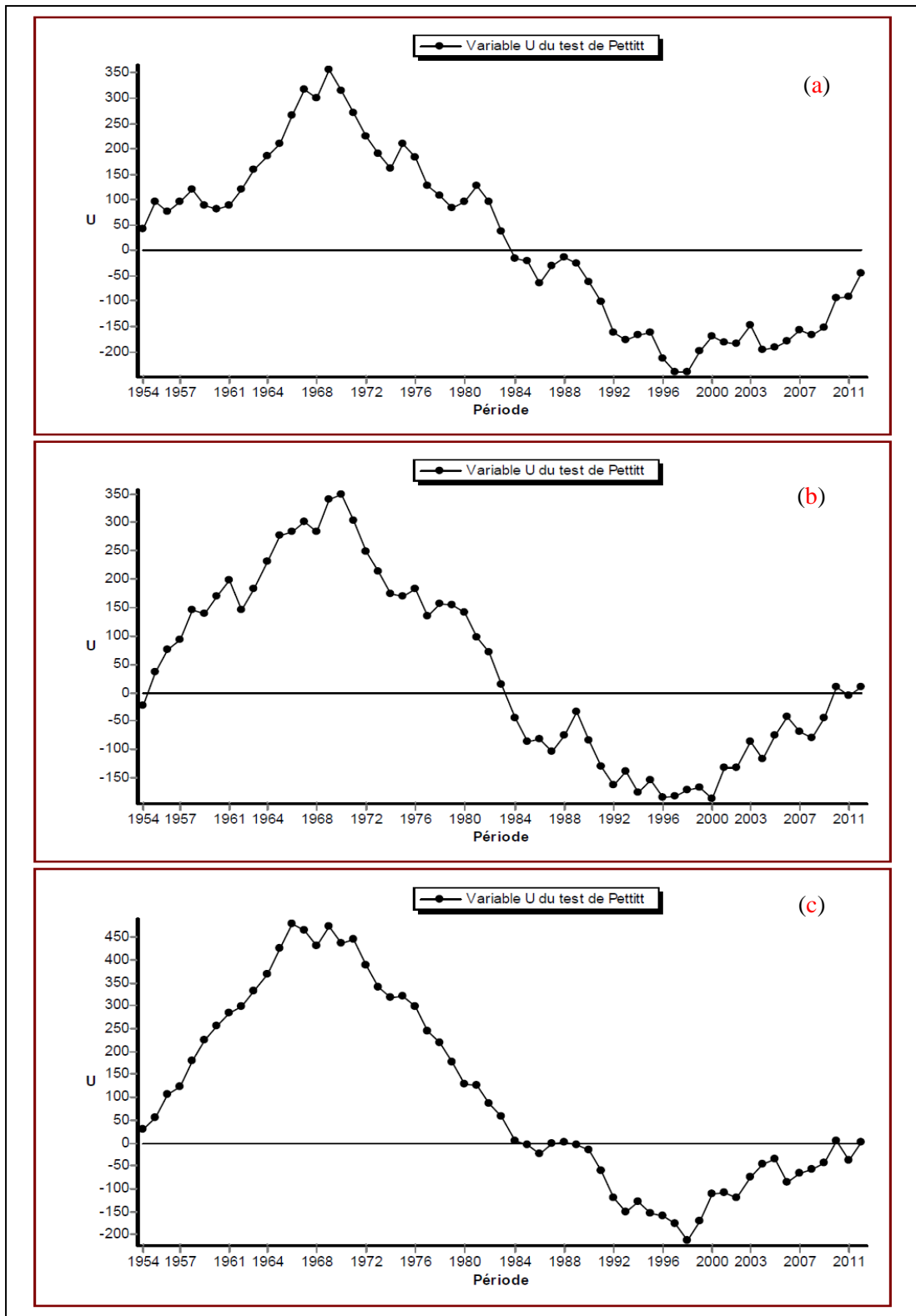


Sur les 30 années d'analyse de la pluviométrie, 14 sont inférieures à la moyenne interannuelle à la station de Saint-Louis (soit 47%), 16 à la station de Podor (soit 53%) et 15 à la station de Matam (soit 50%). La moyenne interannuelle s'élève respectivement à 267mm, 238,6mm et 391mm pour les stations de Saint-Louis, Podor et Matam. Le minimum pluviométrique est intervenu en 1992 pour Saint-Louis et Matam avec respectivement un déficit de -209mm, soit -78,3% et de -237mm soit -60,6%. Pour la station de Podor, le minimum est survenu en 1984 avec un déficit de -176,1mm soit -73,80%. Le maximum, pour sa part est survenu en 2010 pour Saint-Louis, en 2001 pour Podor et en 2000 pour Matam avec un déficit respectif de 326mm (soit 122,1%), de 168,3mm (soit 70,5%) et de 328mm (soit 84%) par rapport à la moyenne interannuelle respectif des stations. Sur notre période d'étude (1984-2013) un constat intéressant s'impose et mérite d'être souligné. De 1984 à 2000 soit sur 17 années, 10 sont déficitaires à la Station de Saint-Louis contre 7 excédentaires, 10 déficitaires à la station de Podor contre 7 excédentaires et 12 déficitaires à la station de Matam contre 5 excédentaires. Ce qui traduit la sécheresse extrême durant cette période toutes stations confondues. Et ce qu'y retient encore l'attention c'est la succession beaucoup plus fréquente des années déficitaires par rapport à celles humides. De nos 30 années d'étude, sur les années sèches qui représentent 47% à la station de Saint-Louis, 1984, 1986, 1992, 1996 et 2004 apparaissent très significativement sèches. À la station de Podor, sur ses années déficitaires (53% de la série), 1984, 1985, 1990, 1991, 1992, 1994 et 2004 ont constitué de sécheresse extrême. Quant à la station de Matam, 1984, 1991, 1992, 1993, 1998, 2006 et 2011 ont été très critiquement sèches par rapport aux années déficitaires.

4.3 Détection du/des point (s) de rupture par l'application du test de PETTITT

À partir des données obtenues pour chaque station de notre zone d'étude (Saint-Louis, Podor et Matam), il est possible de mettre en évidence la non-stationnarité des séries pluviométriques survenues pendant une longue période. Cela revient à dire qu'il est possible d'isoler les périodes d'anomalies pluviométriques (périodes fortement pluvieuses ou de sécheresse). Pour ce faire, le test non-paramétrique de PETTITT (1979), capable d'estimer la position d'un changement de moyenne (point de rupture) dans une série, a été appliqué à chacune des séries de nos différentes stations. Notons que la série que nous avons choisie pour cette étude est 1954-2013. La *figure 32* résulte de l'application du test de PETTITT.

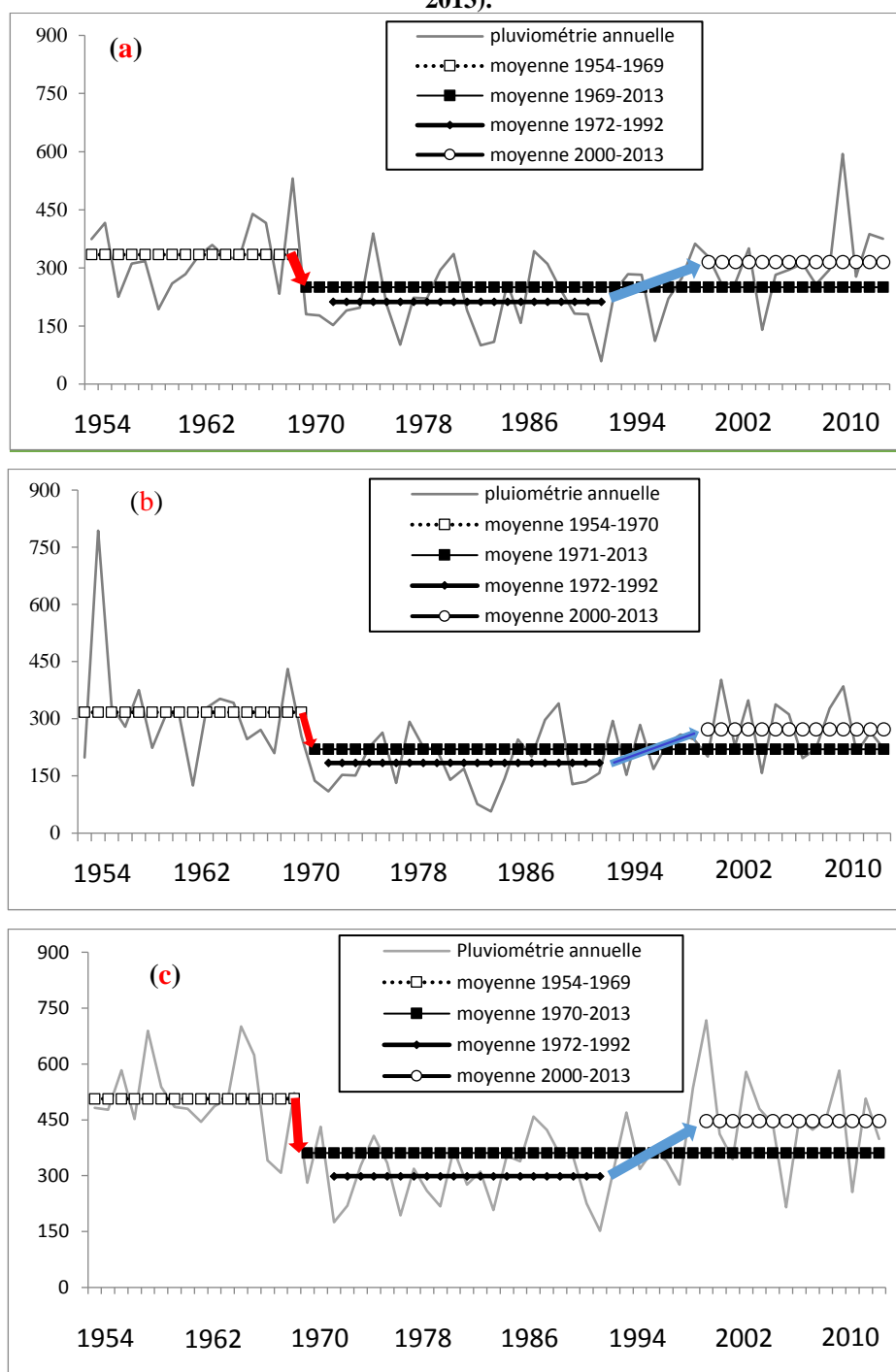
Figure 32 : Evolution des précipitations de 1954 à 2013 aux stations de Saint-Louis (a), Podor (b) et Matam (c) suite à l'application du test de PETTITT



Il ressort de l'application de ce test de PETTITT que pour chaque station considérée, un seul point de rupture est identifié. Contrairement à plusieurs stations sahéliennes où le point de rupture est noté en 1968 c'est-à-dire l'année du début de la grande sécheresse climatique, à l'extrême Nord-Sénégal, ce point de rupture est identifié en 1969 pour les stations de Saint-Louis et Matam et en 1970 pour la station de Podor. Quand on compare les moyennes des sous-séries pluviométriques avant et après le point de rupture, on se rend compte de l'ampleur de la transition brutale qui caractérise la "grande sécheresse" (OZER, 2001) (*figure 33*). Pour la station de Saint-Louis, 84 mm séparent les périodes 1954-1969 et 1970-2013 dont la pluviométrie moyenne est respectivement de 334 et 250 mm. À la station Podor la différence est plus énorme comparée à celle de la station de Saint-Louis puisque près de 100 mm (97 mm) séparent les années avant le point de rupture (1954-1970) et celles après le point de rupture (1971-2013) dont la pluviométrie moyenne est respectivement de 317 et 220 mm. Mais en cette zone extrême Nord-Sénégal, c'est à l'extrême est (la station de Matam) que la différence entre les années avant le point de rupture et celles après ce point bat le record. Ici environ 150 mm, plus précisément 146 mm séparent les périodes 1954-1969 et 1970-2013 dont la pluviométrie est respectivement de 507 et 361 mm. Le fait que l'ampleur de la rupture soit beaucoup plus manifeste à la station de Matam en terme de différence de pluviométrie moyenne est peut-être dû à la position plus au sud de la station comparée aux stations de Saint-Louis et Podor. Selon MOREL (1998), GAUTIER et al. (1998) et PATUREL et al. (1998), la rupture de tendance généralisée s'est progressivement marquée bien plus au sud jusqu'à approximativement 10°N de latitude.

Etudiant cette question de rupture de tendance au Sahel de façon générale, plusieurs auteurs ont corrélié la forte différence de pluviométrie moyenne entre les années avant et après les points de ruptures aux différentes modifications tant du point de vue de répartition diurne des précipitations et de l'évolution du nombre de jours de pluies. Ainsi selon SHINODA et al. (1999) la fréquence diurne maximum des précipitations se produit entre 3 et 6 heures du matin, or que le déficit pluviométrique enregistré en région sahélienne serait dû, en grande partie, à l'importante diminution de la fréquence des précipitations (pouvant atteindre 75%) durant cette période de la journée. D'autres auteurs comme DEMAREE (1990), TARHULE et WOO (1998) se sont penchés sur l'évolution du nombre de jours de pluies et note la modification dramatique de ce paramètre approximativement dès 1968.

Figure 33 : Périodes de rupture et de reprise aux stations de Saint-Louis (a), Podor (b) et Matam (c) (1954-2013).



La flèche rouge indique une diminution de la moyenne pluviométrique entre les périodes avant et après les années de rupture [(-25% à la station de Saint-Louis), (-31% à la station de Podor), (-29% à la station de Matam)] et la flèche bleue indique une augmentation entre la période de sécheresse (1972-1992) et la période actuelle (2000-2013) [(+49% à la station Saint-Louis), (+48% à la station de Podor), (+50% à la station de Matam)].

Au regard de la figure on remarque que la période 1972-1992 a été caractérisée par des années de forts déficits pluviométrique. À l'extrême Nord-Sénégal comme quasiment partout au sahel, elle a constitué une véritable "période de sécheresse". Ce qui a fait la spécificité de cette anomalie c'est sa durée et sa persistance. Cependant il est à constater que depuis les années 2000, une tendance de retour à la "normale" est notée partout à l'extrême Nord-Sénégal comparé à la période sèche des années 1972-1992 (*figure 33*). Quand on compare les moyennes de sous-séries pluviométriques 1972-1992 et 2000-2013, on se rend compte aussi de l'ampleur de cette de tendance de "reprise". Pour la station de Saint-Louis 103 mm séparent ces deux périodes soit près de 50%. À la station centre de Podor un peu moins de 90 mm séparent la période sèche 1972-1992 à celle de 2000-2013 soit une reprise de 48%. Quant à la station est de la zone d'étude (station de Matam) 148 mm séparent la période 1972-1992 et celle amorcée depuis 2000 soit également une reprise de 50%. Ce qui est également intéressant sur cette question de tendance progressif de "retour à la normale" c'est le rapport années excédentaires et années déficitaires aux niveaux des différentes stations de la zone. À la station de Saint-Louis, de 2000 à 2013 seule 2004 a connu une saison de pluie considérablement déficitaire comparée à la moyenne interannuelle (1984-2013) alors qu'à la station de Matam seules 3 des 13 années après 2000 ont été déficitaires. À la station de Podor par contre la situation est plutôt ambiguë. Ici, alors que de 1984 à 2000 la période a été beaucoup plus déficitaire qu'excédentaire ou normale (par rapport à la moyenne interannuelle), sur les 13 années qui s'en suivent on assiste à une alternance d'années excédentaires et déficitaires. Ce qu'y retient le plus notre attention c'est la succession quasi égale de ces années humides et sèches. Néanmoins quand on y compare la période 2000-2013 à la celle des années de rupture (1972-1992), on note véritablement une tendance de retour vers la normale. Ce retour petit à petit à normale dans l'extrême Nord-Sénégal peut s'expliquer par l'éloignement de plus en plus des années de grandes sécheresses climatiques sahéliennes.

Si les années sont jugées excédentaires, normales ou déficitaires, c'est par rapport aux hauteurs d'eau annuelles qu'elles enregistrent. Cependant du fait de la rareté de pluie de forte intensité dans le Sahel et surtout dans sa partie sud comme c'est le cas de l'extrême Nord-Sénégal, les hauteurs annuelles restent très proportionnelles au nombre de jours de pluies. Ce qui témoigne l'importance de considérer ce dernier dans l'analyse de la variabilité pluviométrique.

4.4. Distribution et variabilité du nombre de jours de pluies

Cette analyse sur la période de 1965 à 2014, c'est-à-dire sur une série de 50 ans fait apparaître une inégalité dans la distribution temporelle de la pluviométrie aux stations de Matam, Podor et Saint-Louis. Cette distribution est en grande partie tributaire du balancement de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) et il est impossible de parler de continentalité et d'effets orographiques puisqu'il s'agit d'une distribution temporelle et non spatiale. L'analyse du nombre de jours de pluie nous amènera à remarquer leur corrélation aux hauteurs d'eau précipitées annuellement.

Aux stations de Matam, Podor et Saint-Louis, sur la période 1965-2014 les valeurs du nombre de jours de pluie varient respectivement entre un maxima principal de 53 en 2010, 36 en 1969, 39 en 2008, un maximum secondaire de 48 en 2008, 35 en 1989, 37 en 1995 et un minima principal respectif de 21 jours en 1990, 12 en 1984, 12 en 1972 et 1984, un minima secondaire de 25 en 1982, 15 en 1972, 15 en 1977. La majeure partie des maxi principaux et/ou secondaires du nombre de jours de pluie sont notées dans la période actuelle (2000-2013). Les années enregistrant les minima principaux et secondaires sont caractérisées par un fort à très fort déficits pluviométriques comparées à la moyenne interannuelle et restent toutes connues durant la période de sécheresse (1972-1992).

Si nous partons de l'affirmation de Nicolas (1959), affirmation selon laquelle « *Nous observons qu'il n'existe pas de pluies de type équatorial, violentes et longues. Les pluies les plus longues sont faibles et ne dépassent pas 5 mm/h* », nous comprendrons alors que le nombre de jours de pluie influe de façon non moins importante sur la variabilité des hauteurs d'eau précipitée annuellement, et par conséquent son analyse serait très intéressante dans l'étude comparative des précipitations annuelles. De façon générale le constat semble être normal du moins non surprenant ; les années à fort excédent enregistrent le taux le plus élevé de nombre de jours de pluie alors que celle à très fort déficit connaissent un taux faible à très faible. De 1965 à 2014 les années à pluviométrie supérieure à la moyenne enregistrent une moyenne annuelle de 39 jours de pluie à la station de Matam, 30 à la station de Podor et à la station de Saint-Louis alors que les années à la pluviométrie annuelle inférieure à la moyenne interannuelle connaissent une moyenne annuelle de nombre de jours de pluie de 7 à 10 jours de moins. La corrélation r de Pearson montre un coefficient de corrélation $r = 0.58$ à la station de Saint-Louis, $r = 0.72$ à la station de Podor et $r = 0.59$ à la station de Matam.

Tableau 12 : corrélation r de Pearson hauteur d'eau annuelle/nombre de jours de pluie aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam sur la période 1965-2014

Corrélations 1				Corrélations 2			
		Pluie	Nombre de jours			Pluie	Nombre de jours
Pluie	Corrélation de Pearson	1	,585	Pluie	Corrélation de Pearson	1	,724
	Sig. (bilatérale)		,000		Sig. (bilatérale)		,000
	N	49	49		N	49	49
Nombre de jours	Corrélation de Pearson	,585	1	Nombre de jours	Corrélation de Pearson	,724	1
	Sig. (bilatérale)	,000			Sig. (bilatérale)	,000	
	N	49	49		N	49	49

** La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

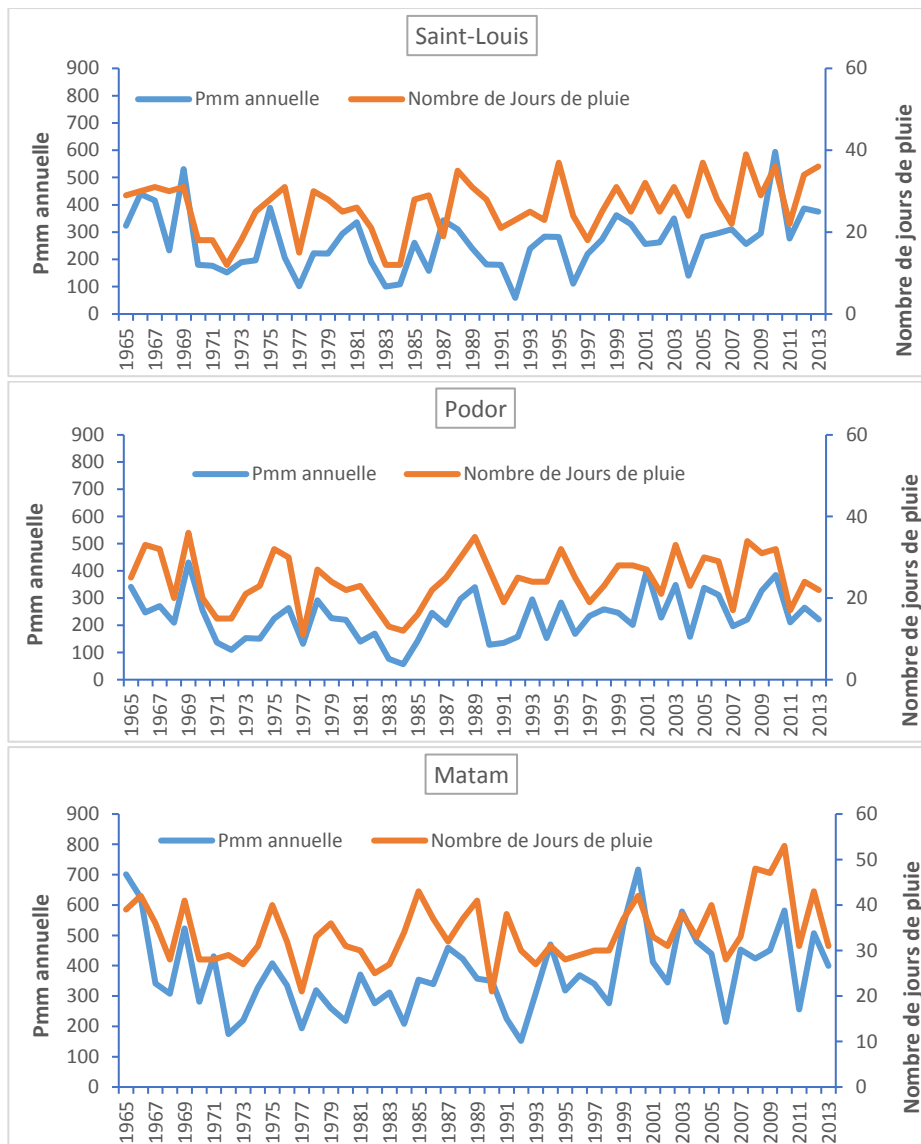
Corrélations 3			
		Pluie	Nombre de jours
Pluie	Corrélation de Pearson	1	,595
	Sig. (bilatérale)		,000
	N	49	49
Nombre de jours	Corrélation de Pearson	,595	1
	Sig. (bilatérale)	,000	
	N	49	49

** La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

À lire : corrélations 1= station de Saint-Louis ; corrélations 2= station de Podor et corrélations 3= station de Matam

Ce qui témoigne une forte voire très forte corrélation entre précipitation annuelle et nombre de jours de pluie. La figure ci-dessous illustre cette corrélation entre nombre de jours de pluie et précipitation moyenne annuelle aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam sur la période 1965-2014.

Figure 34 : Corrélation Nombre de jours de pluies/hauteurs d'eau annuelle aux stations de Matam, Podor et Saint-Louis



Etant arrivé à démontrer l'importance de l'étude du nombre de jours de pluie dans l'analyse de la variabilité pluviométrique, on ne saurait ne pas indiquer la ou les raison (s) de la variabilité du nombre de jour de pluie annuelle en ces stations extrême nord du Sénégal, variabilité que nous montre d'ailleurs la figure ci-dessus. Si le nombre de jours de pluie est remarquablement variable d'une année à une autre, la cause est à recherche du côté de la stabilité de la présence de la Mousson qui est fortement soumise aux influences maritimes et/ou continentales. En effet, les effets de l'Harmattan (Alizé continentale) qui détermine le plus les stations continentales de Matam et de Podor et l'Alizé maritime qui domine fortement la station de Saint-Louis varient d'une année à une autre. Or c'est cette variabilité des effets de ces Alizés qui conditionnent non seulement la montée, la mise en place et le retrait de la Mousson qui est le vent porteur de la quasi-totalité de la pluie à cette partie-là plus sahélienne du pays mais aussi c'est en fonction du

degré d'influence de ces Alizés que la présence de la Mousson est stable ou instable. Ce qui fait que ce sont les effets de ces Alizés qui constitue le principal responsable de cette variabilité du nombre de jour de pluie en ces stations extrême nord du Sénégal. On peut alors tirer la conclusion selon laquelle les années enregistrant un faible taux de jours de pluie sont marquées par une instabilité de la Mousson et qu'à contrario celles qui connaissent un taux « élevé » seraient caractérisées par une stabilité de la Mousson.

5. Analyse intégrée des différents éléments du climat à l'extrême Nord-Sénégal (synthèse climatique)

C'est de par l'analyse combinée de l'ensemble des éléments du climat en corrélation avec la position géographique du site qu'on arrive à comprendre l'évolution des différents paramètres climatiques. À l'extrême Nord-Sénégal l'année est découpée en deux saisons du fait d'une succession à tour de rôle de la circulation d'Alizé et d'une circulation de Mousson :

À l'ouest de l'extrême Nord-Sénégal (station de Saint-Louis), une période qui va de novembre à mai marquée par la domination des rhumbs Nord-Ouest à Nord-Est, avec la suprématie parfaite du secteur Nord. Cependant quelque présence des flux du quadrant Ouest à Nord y est notée avec une dominance en fréquence du secteur Nord-ouest. Au centre (station de Podor) et à l'est (station de Matam), une longue période qui va de novembre à avril est soumise au règne des rhumbs Nord à Est avec prédominance absolue du secteur Est. La période novembre-mai enregistre le maximum secondaire des températures moyennes mensuelles au mois de mars. C'est ici qu'on retrouve les deux minima de l'année, le principal au mois de janvier et le secondaire en avril. Aux stations centre et est, le mini des mini et le mini des maxi se situent au cœur de la période novembre-avril et se retrouvent tous deux au mois de janvier. Partout dans la zone, qu'il s'agisse de la station de Saint-Louis, ou des stations de Podor et de Matam, l'évaporation connaît ses valeurs les plus élevées au cœur de la longue période sèche (novembre-mai) contrairement à l'humidité relative qui y enregistre ses valeurs les plus faibles. Cette période de l'année est marquée par de faibles pluies pour ne pas dire quasi-inexistantes (seul 1,5% du total annuel), c'est la saison non pluvieuse (saison sèche), une forte présence de l'Alizé continental (Harmattan) au centre et à l'est de l'extrême Nord-Sénégal et une forte présence de flux d'Alizé à l'ouest avec des vitesses relativement élevées. Ici à l'ouest (station de Saint-Louis), on y retient trois types d'Alizé, l'Alizé maritime présent pratiquement toute l'année ; l'Alizé maritime faiblement continentalisé de Nord, l'Alizé continental ou Harmattan quoique faiblement présent. Ces variations de flux d'Alizé s'expliquent par la situation littorale de la station, situation qui favorise la présence marquée des d'Alizés issus de l'océan, donc humide, humidité entretenue presque

toute l'année. Cela y favorise un important écran nuageux sur la côte qui réduit la durée de l'insolation.

Une autre période va de juin à octobre. Alors qu'à la station de Saint-Louis, celle-ci est sous contrôle des vents des rhumbs Ouest à Nord-Ouest, aux stations de Podor et de Matam l'hivernage est sous dominance des vents des rhumbs Ouest à Sud-Ouest. À la station de Saint-Louis, cette période a une particularité d'enregistrer à la fois le maximum principal de la température maximale en octobre, le maximum principal de la température minimal en septembre et celui de la température moyenne mensuelle au mois d'octobre également. Aux stations de Podor et de Matam cette période enregistre à la fois le maxi principal des mini au mois de juin, le maxi secondaire des maxi et le maxi secondaire des moyennes mensuelles en octobre. Partout dans la zone, que ce soit à la station de Saint-Louis ou aux stations de Podor et de Matam, les valeurs faibles de l'amplitude diurne y témoignent les faibles écarts entre les températures du jour et celles de la nuit. L'humidité est plus élevée qu'à la première période, à la station de Saint-Louis, l'humidité relative maximale dépasse 90%, celle minimale enregistre plus de 65% tandis que l'humidité moyenne s'y situe à 80%. Aux stations de Podor et de Matam, l'humidité relative maximale avoisine les 90% tandis que celle minimale dépasse respectivement 40 et 50% et l'humidité moyenne y est respectivement de 65 et de 70%. On comprend dès lors qu'il s'agit de la Mousson qui est caractérisée par ce flux chaud et humide. C'est elle qui amène la pluie et son règne absolu durant toute cette période fait que cette dernière reçoit plus de 95% du total des pluies annuelles. C'est la saison des pluies. Ici les valeurs de l'évaporation sont fortement réduites par la chute de ces pluies.

Ces deux périodes se différencient surtout par les totaux des pluies reçues. L'évolution de la pluviométrie montre un début centré en fin juin même si la véritable saison des pluies démarre dans la deuxième quinzaine du mois de juillet. Le maximum est au mois de septembre pour la station de Saint-Louis et au mois d'aout pour les stations de Podor et de Matam. Le début d'octobre marque la fin de la saison même s'il arrive que cette fin connaisse une avance et se situe ainsi en fin septembre. La moyenne interannuelle est respectivement de 267mm, 238,6mm et 391mm pour les stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1984-2013), ce qui montre que l'extrême Nord-Sénégal est bien d'un régime sahélien.

La compréhension du climat d'une région doit aussi passer par la maîtrise des types de temps qui la caractérisent. À l'instar des régions arides et semi-arides, l'extrême Nord-Sénégal reste fréquemment caractérisé par les aérosols désertiques. Le chapitres III décrit en détail ces derniers.

Chapitre III : Aérosols désertiques : *cycle, zones sources et saisonnalité des émissions*

1. Généralité sur les aérosols

1.1. Caractéristiques générales

1.1.1. Les sources et les flux des particules d'aérosols à l'échelle globale

Selon leur origine, les aérosols sont classés en deux familles, les aérosols d'origine naturelle et ceux d'origine anthropique. Dans les deux cas on peut séparer les aérosols primaires formés directement, des aérosols secondaires qui eux se forment dans l'atmosphère à posteriori de l'émission par le biais de processus de transformation de gaz en particules.

Les estimations des émissions des particules d'aérosols en fonction de leur origine (anthropique ou naturelle) ou leur mode de formation (primaire ou secondaire) sont résumées dans le **tableau 13**. Les émissions naturelles représentent 90 à 95% de la masse totale des aérosols émis avec environ 1500 Mt/an d'aérosol désertique et 1300 Mt/an d'aérosol marin, pour un flux total de 3450 Mt/an (ANDREAE, 1995) alors que les émissions anthropiques uniquement 5 à 10%. L'information issue de ces estimations est une faible contribution des activités anthropiques au cycle des aérosols. Pourtant cette vision est trompeuse. En effet, les activités anthropiques sont responsables de 70 à 90% de la concentration en nombre d'aérosols émis dans l'atmosphère (DELMAS et al., 2005).

L'aérosol naturel est composé essentiellement de particules d'origines minérale et marine. Ces particules sont, pour une grande part, les produits de l'action mécanique exercée par le vent sur les surfaces marines et continentales. Les caractéristiques physico-chimiques de cet aérosol résultent de son mode de production. Ce sont des particules majoritairement supermicroniques (taille supérieure à $1\mu\text{m}$) et sa composition chimique est très proche de celle du matériau d'origine.

L'aérosol anthropogénique est généralement concentré autour des régions industrielles. Il est produit soit par combustion, soit par émission directe à l'état liquide ou solide, soit par l'intermédiaire des processus de conversion gaz-particule faisant intervenir des produits gazeux de combustion. Cette dernière catégorie est constituée de particules de taille submicronique

(WHITBY, 1978). Les évaluations récentes pour l'émission de cet aérosol vont environ de 100 Mt/an (ANDREAE, 1995) à 200 Mt/an (WOLF et HIDY, 1997). Les transports, les combustions industrielles et domestiques, la fabrication du ciment, la métallurgie et l'incinération sont parmi les activités industrielles et techniques qui produisent les particules primaires de cet aérosol.

En moyenne globale, plusieurs centaines de millions de tonnes d'aérosols sont émis chaque année par une multiplicité de sources à la fois naturelles (volcaniques, biologiques, désertiques, marines) et humaines (combustions, poussières industrielles, émissions agricoles), ce qui induit une très grande diversité de leurs propriétés.

Dans les deux cas (naturels et anthropiques) on distingue les aérosols primaires et les aérosols secondaires.

Les *aérosols primaires* sont émis directement dans l'atmosphère sous forme solide ou liquide. Ils représentent une fraction importante de ces aérosols d'origine naturelle (*tableau 12*). Les principales sources sont les aérosols désertiques (PROSPERO et al., 2002 ; GINOUX et MIDDLETON, 2001), les sources biogéniques, les embruns marins (DELEEW et al., 2011), les cendres issues de l'activité volcanique (STOHL et al., 2011) et des feux de forêts (ANDREAE, 1991 ; LIOUSSE et al., 2004). Les aérosols primaires sont produits principalement par des processus mécaniques, tels que l'abrasion, l'érosion liée à des phénomènes éoliens ou encore les frottements. L'intensité de ces émissions est donc directement proportionnelle à l'intensité de ce phénomène de frottement. Les aérosols primaires d'origine anthropique tels que le carbone suie, le carbone organique ou les poussières organiques résultent principalement de combustion (industrielle, domestique, feux de biomasse), du transport, ou des chantiers de construction. La taille des aérosols désertiques est généralement supérieure au micron lorsqu'ils sont produits mécaniquement et inférieure au micron lorsqu'ils sont issus de processus de combustion.

Les *aérosols secondaires* inorganiques (sulfates, nitrates, ammonium) ou organiques sont formés à partir de processus de conversion gaz-particules au travers des phénomènes de nucléation, condensation ou adsorption (rétention à la surface d'un solide ou d'un liquide des molécules d'un gaz ou d'une substance en solution ou en suspension) ou par réaction en phase aqueuse par l'intermédiaire des gouttes d'eau nuageuses. Les gaz précurseurs peuvent provenir d'émission par le sol (par suite à l'utilisation d'engrais), par la végétation (Composés Organiques Volatiles biogéniques comme le terpène et l'isoprène), par les écosystèmes océaniques (le diméthyle sulfate émis par les phytoplanctons) ou par les activités humaines (combustions de combustibles fossiles au travers de la production d'énergie, du transport, des activités

industrielles...)¹². Cette conversion gaz-particule peut donner lieu à la formation de nouvelles particules ultrafines (taille inférieure à 1µm), par nucléation, ou par condensation à la surface de particules préexistantes. Ainsi, une bonne partie des sulfates et des nitrates, ainsi que la majorité des particules organiques présentes dans l'atmosphère sont des aérosols secondaires¹³.

Tableau 13 : Estimation des émissions annuelles (en Tg/an) des principaux types d'aérosols

Source	Estimation annuelle (Tg/an)
Aérosols primaires	
Carbone suie	
Issus de combustibles fossiles	2-8
Issus de feux de biomasse	3-14
Carbone organique	
Issus de combustibles fossiles	1-5
Issus de feux de biomasse	16-72
Aérosols désertiques	
Poussières industrielles	
Sels marins	
Aérosols secondaires	
Sulfates	
Issus de SO ₂ anthropiques	60-90
Issus de dimethylsulfide	17-24
Issus des volcans	6-9
Nitrates	
Issus de NO _x anthropiques	10-19
Issus de NO _x Biogéniques	2-8
Carbones organiques	
Issus de COV anthropiques	0.3-1.8
Issus de COV biogéniques	8-40
Pourcentage des sources anthropiques	
Pourcentage des sources naturelles	

Sources : IPCC (2001, 2007). D'après PERE (2010)

Alors que l'aérosol primaire est directement émis dans l'atmosphère via une action mécanique relativement simple (frottement d'un fluide ou d'un solide sur une surface) ou par combustion incomplète (suies), les aérosols secondaires ont pour mode de formation une action mécanique plus complexe, la conversion gaz-particule.

¹² BEGUE N., 2012. *Evolution des propriétés physico-chimiques des aérosols désertiques issus de l'outflow africain*, Thèse de Doctorat Université de LA REUNION, E. D. Sciences, technologie et santé, Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (LACy, UMR 8105), Discipline : Physique, Spécialité : Physique de l'Atmosphère, 255p.

¹³ MICHAUD V., décembre 2009. *Etude des propriétés hygroscopiques des aérosols atmosphériques*, Thèse de Doctorat, Université BLAISE PASCAL, U.F.R. de Recherche Scientifique et Technique, Ecole doctorale des Sciences Fondamentales, (Spécialité Physique et Chimie de l'Atmosphère), N° 627, 305p.

La nucléation homogène a lieu lors d'une sursaturation de la phase gaz. Le rapport de saturation S :

$$S = \frac{P_A}{P_{sat,A}(T)}$$

où P_A est la pression de vapeur du gaz A et $P_{sat,A}(T)$ est la pression de vapeur saturante de A à l'équilibre avec sa phase liquide à une température T, nous indique le degré de sursaturation (MICHAUD¹⁴). Lorsque la sursaturation ($S > 1$) est suffisamment importante, les embryons de A (2 à 4 molécules de A au début) deviennent rapidement assez gros pour que certains d'entre eux atteignent la taille critique, ce qui leur permet de grossir encore plus vite pour former un nouvel aérosol A.

La nucléation hétérogène, quant à elle, nécessite la présence d'un support solide ou liquide favorisant la nucléation (Noyau de Nucléation). La plupart du temps, ce noyau est en réalité une particule déjà formée dans l'atmosphère. Ainsi, la nucléation hétérogène ne contribue pas à créer de nouvelles particules mais plutôt à transformer les particules déjà existantes.

Puisque l'atmosphère abrite déjà des particules, il est logique de penser que les gaz vont avoir tendance à préférentiellement se condenser sur celles-ci (nucléation hétérogène) plutôt que de se condenser sur eux même (nucléation homogène) car les forces nécessaires à ce type de nucléation sont moindres. Ainsi, seules les atmosphères peu chargées en particules, mais avec beaucoup de gaz condensables, seront le terrain propice à la formation de nouvelles particules (canopée boréale, milieu marin).

En moyenne globale, plusieurs centaines de millions de tonnes d'aérosols sont émis chaque année par une multiplicité de sources à la fois naturelles (volcaniques, biologiques, désertiques, marines) et humaines (combustions, poussières industrielles, émissions agricoles), ce qui induit une très grande diversité de leurs propriétés.

La durée de vie des particules de l'aérosol est une fonction complexe de ses caractéristiques physiques et chimiques (taille, propriétés hygroscopiques...), et dépend aussi du lieu où elles sont libérées. La durée de vie des particules d'aérosol submicroniques dans la troposphère est

¹⁴ Op. Cit.

estimée de l'ordre de quelques jours à une semaine. À cause de cette courte durée de vie l'aérosol est fortement variable dans le temps et dans l'espace.

Les particules de l'aérosol de taille $0,1-1 \mu\text{m}$ sont enlevées de l'atmosphère par les précipitations (déposition humide), tandis que pour les particules de taille $1-10 \mu\text{m}$, la gravité de la terre (déposition sèche) est le processus dominant. La concentration des particules de l'aérosol varie considérablement en fonction du temps et de la région. MICHAUD¹⁵ parle de la nature et de la proximité des sources d'émission, mais aussi des transformations qu'ils peuvent subir. Elle est de l'ordre d'une cinquantaine de particules par cm^3 dans un milieu "pur" (en Antarctique, par exemple), à plus de 100 000 particules par cm^3 en milieu "pollué" (lors d'épisodes de pollution urbaine, par exemple). Lors d'une importante tempête de sable, comme en septembre 2009 à Sydney en Australie, les compteurs à particules ont enregistré jusqu'à $15\,400 \mu\text{g}$ de particules par mètre cube d'air en certains points (RAMACHANDRAN, 2009). En temps normal, la concentration en particules n'est que de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. EL AOUDI¹⁶ parle d'une concentration de l'ordre de 10^3cm^{-3} au-dessus des océans, 10^4cm^{-3} au-dessus des régions rurales et 10^5cm^{-3} dans les villes. Le **tableau 14** donne les gammes de concentration en masse et en nombre de l'aérosol dans des environnements typiques, d'après DELMAS et al., 2005.

Tableau 14 : Gammes de concentration en masse et en nombre de l'aérosol dans des environnements typiques

	Concentration massique ($\mu\text{g}.\text{m}^{-3}$)	Concentration en nombre ($\#.\text{cm}^{-3}$)
Atmosphère urbaine	10-100	5 000-1 000 000
Atmosphère rurale	1-10	5 000-40 000
Troposphère libre	0.5-5	100- 10 000
Atmosphère marine	1-100	100- 1 000
Atmosphère polaire	0.1-100	1-10 000

Source : Delmas et al. (2005)

En général, la concentration diminue avec l'altitude (SEINFELD et PANDIS, 1998). À cause de la circulation atmosphérique générale les particules de l'aérosol atmosphérique ne restent pas dans leurs zones de production.

¹⁵ Op. Cit.

¹⁶ AOUDI I. E., 2005. *Estimation de la Quantité de Vapeur d'Eau Précipitable et du Forçage Radiatif de l'Aérosol atmosphérique à partir de la Télédétection passive à Oujda (Maroc)*, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences OUJDA, Laboratoire de Physique de l'Atmosphère, Spécialité : Physique de l'Atmosphère, 164p.

La répartition verticale des aérosols est déterminée par leur taille (les particules fines ayant plus d'aptitude à subsister dans les couches élevées) mais également par leurs sources. Ainsi les aérosols issus de la pollution sont généralement confinés à la *couche limite atmosphérique* (du sol à 2 ou 3 km d'altitude). Les *aérosols troposphériques* sont situés principalement dans les basses couches de la troposphère, jusqu'à 4 ou 5 km d'altitude. Les *aérosols stratosphériques* sont situés à plus haute altitude, entre 12 et 30 km environ.

1.1.2 Composition chimique et mélange des particules d'aérosols

La composition chimique des aérosols dépend à la fois des sources d'émission mais aussi des transformations qu'ils subissent dans l'atmosphère. Les travaux de CLAIN et al. (1995) illustrent bien la difficulté de connaître la composition chimique de l'aérosol puisque des milliers d'espèces peuvent être identifiées, chacune d'entre elles ne représentant qu'une fraction limitée de la masse totale de l'aérosol. Les principales espèces chimiques constitutives de l'aérosol sont le carbone suie, les carbones organiques primaires et secondaires, les sels marins, l'ammonium, les sulfates, les nitrates, l'eau et les poussières.

Le carbone suie (BC) est une substance noirâtre particulièrement riche en carbone peu réactive chimiquement, résultant de processus de combustion (de fuel fossile et de biomasse). Le carbone organique peut être émis directement dans l'atmosphère (OC) par des sources d'origines anthropiques (combustion incomplète des dérivés du pétrole, de bois, d'ordure ménagères...) ou naturelle. Il peut aussi être formé par nucléation ou condensation des produits de dégradation photochimique des composés organiques volatils (COV). On parle d'aérosols organiques secondaires (SOA). Ces COV peuvent provenir de la végétation (terpène, limonène, isoprène...) ou être issus de sources anthropiques (benzène, toluène...).

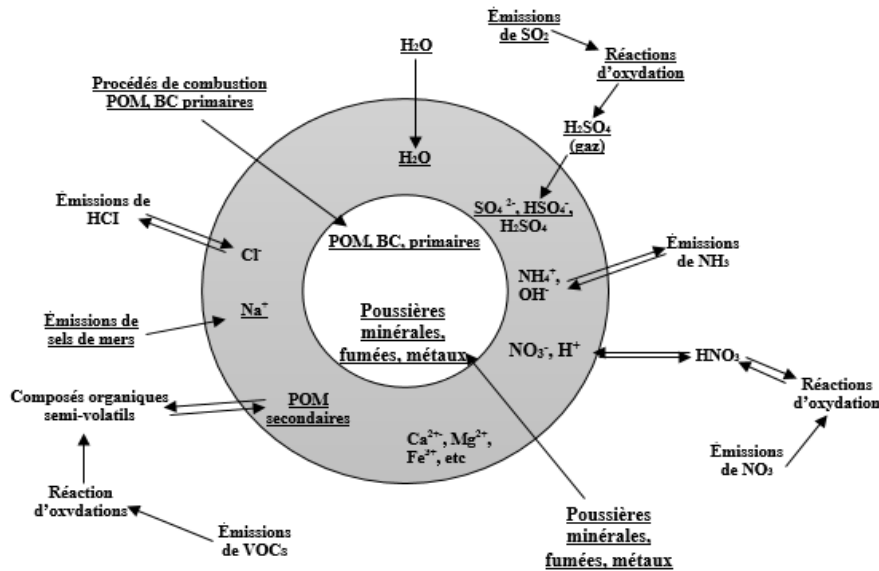
Les poussières peuvent être naturelles (érosion des sols, aérosols désertiques) ou anthropiques (usures des pneus, cimenterie, agriculture...). Les émissions des sels marins sont quant à eux fonction du vent à la surface des océans.

L'ammonium est issu de la condensation de l'ammoniaque émis principalement par les activités agricoles. Les sulfates sont des particules formées essentiellement en phase aqueuse par condensation de l'acide sulfurique émis principalement par les activités industrielles.

Cette espèce peut aussi apparaître sous forme de particule lorsque les gouttelettes s'évaporent sans précipiter. Les nitrates se forment à partir de l'acide nitrique. L'acide nitrique a deux voies de formation privilégiées. D'une part, il apparaît en phase gazeuse et d'autre part en phase

hétérogène sur les particules ou les gouttelettes d'eau nuageuse. La présence d'eau dans la particule dépend de la température ambiante, de l'humidité relative et de la composition chimique des particules. Certains sels comme le nitrate d'ammonium ou le sulfate d'ammonium ont une hygroscopicité élevée et peuvent fixer une quantité d'eau importante.

Figure 35 : Illustration d'un aérosol en mélange interne hétérogène.



Le carbone organique, le carbone-suie et les aérosols minéraux constituent préférentiellement les noyaux des aérosols en mélange interne hétérogène, alors que les espèces comme le sulfate, le nitrate et les sels marins se trouvent préférentiellement à la surface des aérosols (D'après IPCC 2001).

La nature du mélange d'un aérosol représente la manière dont les différents composés formant la particule sont mélangés entre eux. Au cours de leur transport, les aérosols vieillissent et peuvent se retrouver sous forme de mélanges complexes de différents composés chimiques. Près des sources, les études montrent que les espèces chimiques sont généralement séparées les unes des autres, formant un mélange externe (CHOW et al., 2004 ; MALLETT et al., 2004). Au cours de leur transport cette configuration évolue, les particules peuvent interagir entre elles et se mélanger pour former une seule particule, on parle alors de mélange interne (LESINS, 2002 ; PERE et al., 2010). Le mélange interne peut être homogène lorsque les différentes espèces sont bien mélangées entre elles.

Cependant le mélange interne homogène est peu observé dans l'atmosphère. À la différence du mélange interne hétérogène qui correspond à ce qui est le plus fréquemment rencontré dans la réalité, et représente l'inclusion d'une espèce insoluble (noyau) à l'intérieur d'une enveloppe d'espèces condensées (figure 35).

Par exemple, on peut observer des particules formées d'un cœur de carbone suie, d'aérosols désertiques, enrobées de carbone organique, de sulfates ou de nitrates.

1.1.3 Distribution granulométrique et évolution des populations d'aérosols

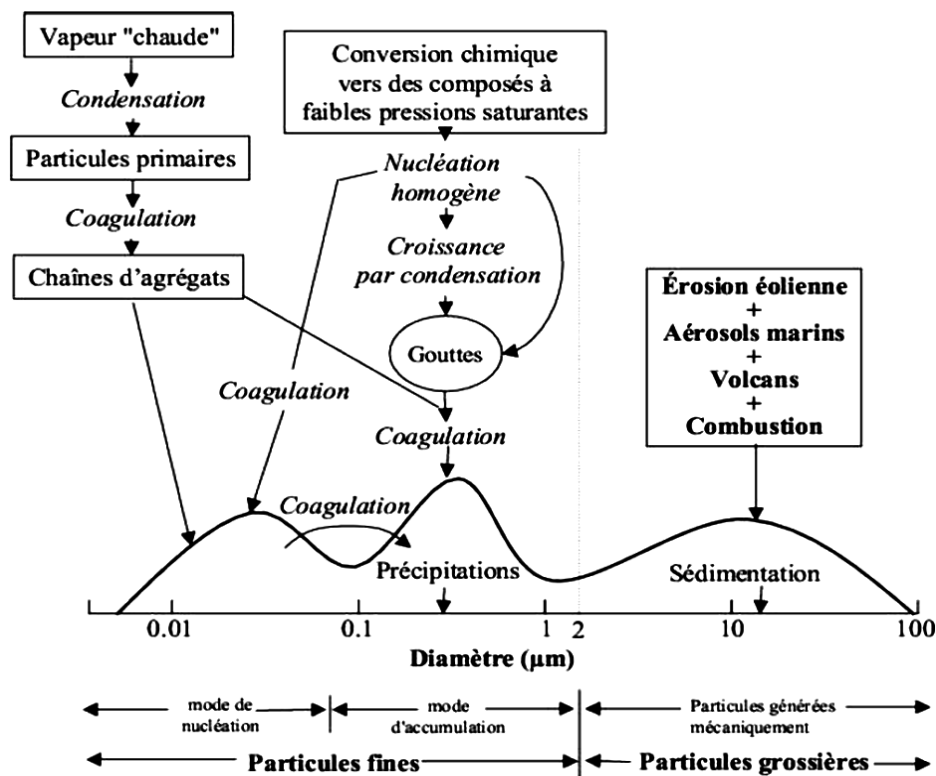
La diversité des sources et des processus mécaniques et chimiques intervenant lors de la production des particules a pour conséquence une multitude de morphologie et de taille d'aérosols. Pour caractériser cette population complexe, on utilise le concept de distribution granulométrique. Celle-ci donne, de façon continue, la concentration en particules d'aérosols en fonction du diamètre, et présente généralement un ou plusieurs maxima, constituant les modes de la distribution. La distribution granulométrique d'une population de particules d'aérosols peut s'exprimer en nombre, en surface ou en masse. Les aérosols atmosphériques consistent à des particules de taille sur une gamme allant de quelques nanomètres jusqu'à quelques centaines de micromètres. Les particules plus petites, inférieures à 2 μm de diamètre sont généralement appelées fines et celles plus grandes de plus de 2 μm grosses. En général, les modes fine et grosse d'aérosols ont des caractéristiques différentes comme : l'origine, la transformation, les mécanismes d'éloignement par l'atmosphère, les techniques de mesure, la composition chimique, les propriétés optiques et les parcours suivis dans le système respiratoire, et pour ces raisons la discrimination entre les deux modes est fondamentale¹⁷. La **figure 36** montre les modes de population d'aérosols fréquemment observés, ainsi que les mécanismes d'évolution des particules auxquelles elles appartiennent. Les populations d'aérosols communément rencontrées se répartissent en mode ultra fin, en mode d'accumulation et en mode grossier.

Le mode ultra fin est constitué de particules d'aérosols dont le diamètre est inférieur à 0.1 μm . Ce mode ultra fin peut se décomposer en deux modes distincts : le mode de nucléation dont le diamètre des aérosols est compris entre 0.001 et 0.01 μm , et le mode d'Aitken correspondant aux aérosols dont le diamètre est compris entre 0.01 et 0.1 μm . Les aérosols de ce mode ultra fin résultent des processus de conversion gaz-particule, tel que la nucléation et la condensation. Dans des conditions thermodynamiques spécifiques de sursaturation, les molécules de gaz subissent un changement de phase. Les embryons ainsi formés dépassant une taille critique deviennent stables et continuent d'évoluer vers des diamètres plus grands. Il est également possible de trouver dans la partie supérieure de ce mode des particules de carbone suie ultra fines directement émises par les processus de combustion. Ce mode domine la distribution en nombre mais leur

¹⁷ TSAMALIS C., 2009. *Variabilité de la distribution verticale de l'ozone et des aérosols troposphériques en région méditerranéenne : processus de transport et impacts radiatifs*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, E. D. des Sciences de l'Environnement d'Ile de France, Spécialité : Physico-chimie de l'atmosphère, 200p.

petite taille ne leur permet d'avoir qu'une contribution massique et optique assez faible. Ces aérosols peuvent croître en s'agglomérant les uns aux autres pour former une nouvelle particule, on parle alors de *coagulation homogène*. Elles peuvent également tendre vers des diamètres plus grands en entrant en contact avec des particules de taille supérieure. Ce dernier processus est appelé *coagulation hétérogène*. Dans certains cas, la nouvelle particule formée par coagulation peut appartenir au mode intermédiaire supérieur, c'est -à-dire le mode d'accumulation. Les particules d'Aitken jouent un rôle important dans la formation des nuages en favorisant la condensation de vapeur d'eau en gouttelettes d'eau et/ou de cristaux de glace

Figure 36 : Description granulométrique d'une population d'aérosols et de leurs processus de formation et de dépôt. Adaptée de WHITBY (1978)

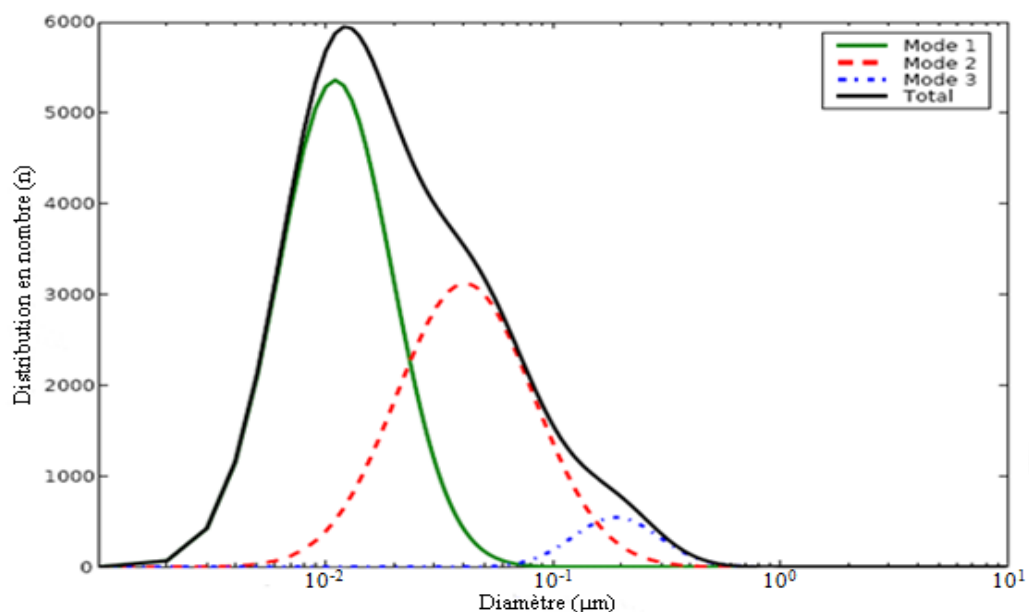


Le mode d'accumulation contient des aérosols dont le diamètre est compris entre 0.1 et 2 µm et en général il contient la plus grande partie de masse d'aérosols. Les sources des aérosols dans le mode d'accumulation sont la coagulation des particules du mode nucléation et la condensation des vapeurs aux surfaces des aérosols existants en causant l'augmentation de leur taille. Le nom de ce mode vient du fait que les mécanismes d'éloignement des aérosols de l'atmosphère ne sont tellement efficaces dans ce mode et comme résultat les particules s'accumulent. Ces fines particules peuvent rester dans l'atmosphère durant des jours ou des semaines. Les dépôts sec et

humide sont les principaux processus par lesquels ces particules sont finalement éliminées de l'atmosphère.

Le mode grossier est composé des aérosols dont le diamètre est supérieur à 2 μm . Ce mode contient essentiellement des aérosols primaires comme les aérosols désertiques, les sels marins. Du fait de leur taille, les aérosols du mode grossier participent de manière importante à la masse totale des aérosols. Par contre ces aérosols sont beaucoup moins nombreux et ne peuvent rester dans l'atmosphère à l'état libre que pour une durée limitée, au voisinage des sources d'émission, dû aux larges vitesses de déposition provoquées par leur taille (SEINFELD and PANDIS, 2006).

Figure 37 : Trois modes de l'aérosol atmosphérique suivant leur distribution en nombre (PUTAUD et al., 2003).



Une population de particules peut donc être décrite par sa distribution en nombre, mais également en surface, en volume ou en masse. L'information relative de la distribution en masse des aérosols est en général plus pertinente pour les considérations relatives à la composition chimique des particules. En revanche, l'impact radiatif ou sanitaire des aérosols est appréhendé à partir d'une distribution en nombre (DELMAS et al., 2005).

Au cours de leur transport, les aérosols subissent de multiples interactions. La distribution granulométrique apporte ainsi des informations importantes sur l'évolution d'une population d'aérosols. La distribution granulométrique des populations d'aérosols constitue donc un paramètre majeur (CHOU et al., 2008 ; PATTERSON, 1981 ; TEGEN et LACIS, 1996).

1.1.4 Transformations physiques, élimination et temps de résidence des aérosols atmosphériques

Une fois dans l'atmosphère, la composition, la taille et le nombre des particules de l'aérosol changent par de nombreux mécanismes physiques dont l'efficacité est fonction de la gamme de taille dans laquelle se trouvent les particules. Après un temps de résidence au voisinage de la surface terrestre qui peut varier de quelques jours à quelques semaines, elles sont éliminées par voie sèche ou humide. Les réactions chimiques, faisant intervenir les phases gazeuses, liquides et solides sont également très nombreuses et contribuent à modifier l'aérosol.

Les caractéristiques de l'aérosol changent d'autant plus qu'on s'éloigne de la source, de sorte que la composition de l'aérosol tend à devenir uniforme. Près de la source, par contre, la composition de l'aérosol est étroitement liée à celle de la source (CHESTER, 1990).

Sans vouloir exposer toute la théorie de la dynamique des particules, FALLY¹⁸ nous fait savoir que le mouvement brownien (mouvement incessant des particules microscopiques résultant de l'agitation thermique des molécules) chez les petites particules est intense et permet à ces dernières de se mouvoir efficacement par diffusion. En l'absence de convection, les particules de diamètre $< 0.1\mu\text{m}$ sont principalement transportées par diffusion brownienne. C'est également par diffusion brownienne que les petites particules entrent en collision et coagulent, sont incorporées dans les précipitations, ou déposées à la surface terrestre. Pour les grosses particules, par contre, la force de gravité prédomine et elles sont facilement entraînées par sédimentation. Entre les deux, c'est-à-dire au sein du mode d'accumulation, aucun de ces mécanismes n'est efficace car ces particules sont trop petites pour sédimenter, être impactées ou interceptées, et trop grosses pour que la diffusion brownienne soit significative.

Les particules du mode d'accumulation ne sont donc éliminées efficacement ni par voie sèche, ni par incorporation dans des pluies, mais peuvent être éliminées de l'atmosphère par incorporation dans les nuages (nucléation).

Le tableau ci-après donne la durée de vie des différents types d'aérosols naturels et anthropogénique dans l'atmosphère.

¹⁸ FALLY S., 2001. *Composition, propriétés et comportement des aérosols atmosphériques, des brouillards, des rosées et des pluies en région bruxelloise*, Thèse de doctorat, Sciences de la Terre et de l'Environnement, Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, 418p.

Tableau 15 : Temps de résidence des différents types d'aérosols

SOURCES	Durée de Vie (journée)
AÉROSOLS NATURELS	
PRIMAIRES	
Aérosol minéral (désertique)	4
Sel marin	1
Poussière volcanique	4
Aérosol organique	4
SECONDAIRE	
Sulfates biogéniques	5
Sulfates de SO ₂ Volcaniques	10
Substances organiques d'hydrocarbures biogéniques	5
AÉROSOLS ANTHROPOGÉNIQUE	
PRIMAIRE	
Aérosol minéral (désertique)	4
Poussière industrielle	4
Carbone suie	7
Carbone organique	6
SECONDAIRE	
Sulfates de SO ₂	5
Aérosols organiques	7

D'après ANDREAE (1995) et actualisé par RAMANATHAN et al. (2001), repris par GAYE (2016)

En conséquence, les particules du mode d'accumulation possèdent le plus long temps de résidence dans l'atmosphère. Ce temps de résidence est de l'ordre de 2-5 jours près du sol et jusque 3 mois près de la tropopause à cause de l'absence de pluie (PREINIG, 1990).

Vu leur taille, les particules du mode grossier ont un faible temps de résidence et sont en général éliminées par sédimentation à proximité de la source émettrice. Elles sont peu réactives avec la phase gazeuse et n'interagissent pas avec les fines particules. Elles peuvent cependant être transportées sur de longues distances et être éliminées par voie humide suite à leur incorporation dans les précipitations.

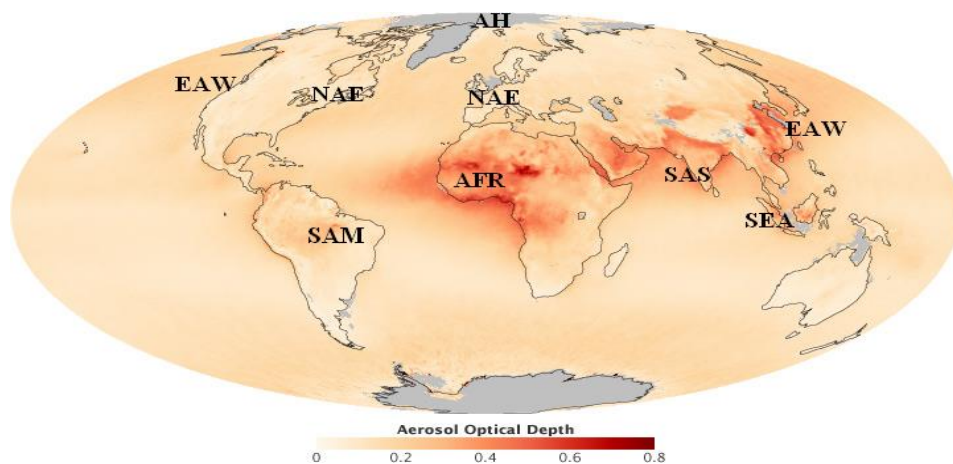
Les plus petites particules ont également un temps de résidence faible à cause de leur coagulation rapide. La composition de l'aérosol à un endroit et un moment donné est finalement le résultat d'une subtile balance entre les processus de production, de transport, de transformation et d'élimination (PREINIG, 1990) et sera fonction de la proximité des sources, du taux d'émission, de l'efficacité des mécanismes d'élimination et de paramètres météorologiques (PRUPPACHER et KLETT, 1978).

1.1.5. Caractérisation optique

L'interaction de la lumière solaire avec les particules d'aérosol affecte la quantité d'énergie arrivant à la surface de la terre, donc le climat à l'échelle global. Les particules interagissent aussi bien avec la lumière visible (diffusion et absorption) que dans l'infrarouge (absorption),

augmentant ainsi le pouvoir diffusant et absorbant de l'atmosphère terrestre. Elles diminuent la quantité d'énergie solaire arrivant à la surface de la Terre et modifient le rayonnement réfléchi vers l'espace par le système surface/atmosphère. Les aérosols exercent donc un effet radiatif sur l'atmosphère terrestre. CRUMEYROLLE¹⁹ nous dit que l'intensité de cet effet est directement proportionnelle à l'épaisseur optique des aérosols (AOD : Aérosol Optical Depth), l'AOD dépendant de la concentration, de la taille et de la nature chimique des aérosols. La **figure 38** représente la distribution globale de l'épaisseur optique des aérosols troposphériques. Cette estimation, toutefois, entacherait d'erreurs car les mesures par satellite sont très dépendantes de la lumière solaire (les 6 mois de l'année sans soleil aux pôles, et la présence de nuages empêchent l'observation des aérosols dans ces régions). Néanmoins elle nous permet d'avoir une idée générale de l'impact radiatif des aérosols sur le climat, la qualité de l'air et les précipitations pour chaque région du globe. Il est à noter que l'AOD atteint des valeurs maximales au-dessus du continent africain et dans le panache, provenant de l'Afrique, au-dessus de l'Atlantique (*Crumeyrolle*)²⁰.

Figure 38 : Distribution de la moyenne de l'épaisseur optique des aérosols (de juin 2000 à Mai 2010), mesurée par Multi-angle Imaging Spectroradiometer (MISR).



Le rouge indique des concentrations élevées, le beige indique de faibles concentrations. AFR : Afrique, SAS : sud de l'Asie, SEA : Asie du sud-est, EAW : Est de l'Asie et le nord-ouest de l'Amérique, NAE : Nord-est de l'Amérique, Atlantique nord et Europe, SAM : Amérique du sud, AH: Brouillard Arctique. (Image de la NASA, notation de GAYE, 2015)

¹⁹ CRUMEYROLLE S., 2008, *Impact des systèmes convectifs sur les propriétés hygroscopiques des aérosols : Analyse de deux cas d'étude durant la campagne AMMA*. Thèse de Doctorat, Spécialité Physique de l'Atmosphère, Université de Toulouse III – PAUL SABATIER, École Doctorale « Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace », 250p.

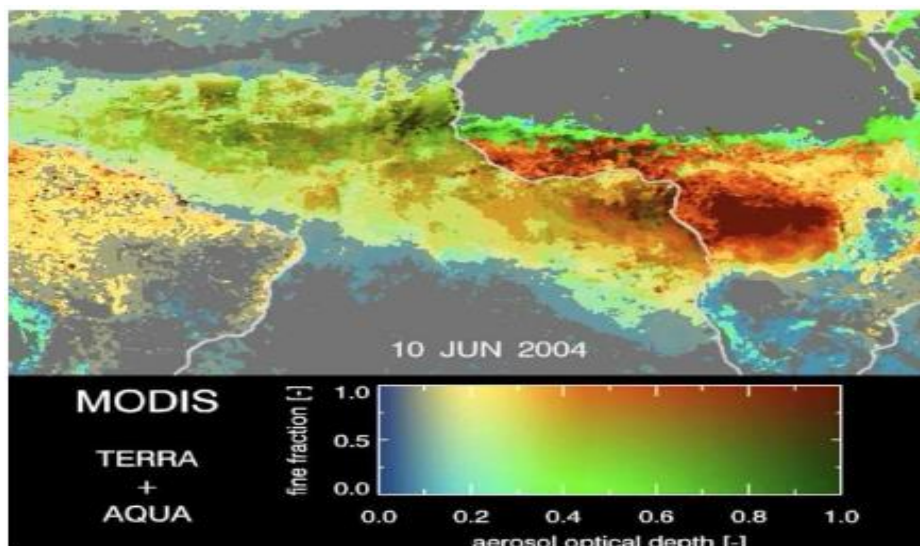
²⁰ Op. cit.

La capacité d'une particule à absorber ou diffuser un rayonnement dépend de ses propriétés physiques et chimiques. Rappelons que les propriétés absorbantes des particules induisent un réchauffement de l'atmosphère, alors que les propriétés diffusantes des particules induisent un refroidissement de l'atmosphère. L'efficacité d'extinction Q_{ext} est définie comme la somme des fractions diffusée (Q_{diff}) et absorbée (Q_{abs}) du rayonnement incident par les particules ($Q_{ext} = Q_{diff} + Q_{abs}$). Pour caractériser les propriétés optiques des aérosols, on a défini un paramètre, l'albédo de simple diffusion (W_o), qui permet d'évaluer la fraction diffusée. L'albédo de simple diffusion est alors défini par :

$$W_o = Q_{diff} / Q_{ext}$$

Chaque type d'aérosol est caractérisé par son propre albédo de simple diffusion. Cependant dans l'atmosphère, les différents types d'aérosols sont mélangés et l'albédo de simple diffusion devient donc un « mélange » pondéré des albédos de tous les aérosols en présence. L'image satellite composée à partir des données du satellite MODIS (*figure 39*), centrée sur l'Afrique, montre l'importance du mélange des aérosols primaires (poussières désertiques, sel marins) avec les aérosols de feux de biomasse. L'effet radiatif des aérosols dans la dynamique de la mousson africaine semble être très important, mais ce sujet commence juste à être exploré (CAMINADE et al., 2006).

Figure 39 : Image du satellite MODIS représentant les aérosols le 10 juin 2004



La fraction fine varie du vert pour une fraction fine nulle jusqu'au rouge représentant une fraction fine égale à 1. Le bleu représente des conditions propres (AOD < 0.1). Le vert correspond à des épaisseurs optiques plus importantes dues aux particules du mode grossier. Donc les poussières désertiques pures sont en vert et les feux de biomasse ou la pollution sont en rouge (Kaufman et al., 2005). Source : CRUMEYROLLE, (2008)

1.1.6 Propriétés hygroscopiques

La formation de gouttelettes d'eau nuageuse dans l'atmosphère peut se faire par nucléation homogène. Ce processus implique une sursaturation satisfaisante pour que la phase gaz puisse se condenser en eau liquide. Néanmoins, les sursaturations requises pour un tel processus dépassent de plusieurs ordres de grandeurs celles observées dans l'atmosphère (PRUPPACHER et KLETT, 1997). En réalité, les gouttelettes qui composent un nuage sont formées grâce à l'intervention de corps étranger comme support de nucléation. Les aérosols sont capables d'offrir à la vapeur d'eau atmosphérique une surface solide pour condenser. Ces aérosols sont alors appelés noyaux de condensation (CCN).

Tous les aérosols ne possèdent pas la même aptitude pour s'activer en gouttelettes, car cela dépend essentiellement des caractéristiques physico-chimiques de l'aérosol. Le paramètre d'hygroscopicité d'un aérosol permet alors de définir le pouvoir de celui-ci à servir de CCN, et à déterminer ainsi son caractère hydrophile ou hydrophobe. Ce processus d'activation est décrit par la théorie de KÖHLER (1936). Cette théorie permet ainsi de décrire la sursaturation S (en %) nécessaire à l'aérosol pour s'activer en CCN, en tenant en compte de l'effet Kelvin et de l'effet de Raoult.

Le premier terme de l'équation de Köhler, représente l'influence de l'effet Kelvin, qui est lié à la tension de surface de la particule. En effet, plus la particule est petite (grande), plus la tension de surface est importante (faible), et plus il faut appliquer une forte (faible) saturation pour condenser la vapeur d'eau. Le deuxième terme de l'équation de Köhler, représente l'influence de l'effet Raoult, qui lui mesure la solubilité des éléments composant la particule. L'effet Raoult permet ainsi de connaître la pression partielle d'équilibre lorsque l'eau n'est pas pure.

Selon BEGUE²¹ il existe un point critique qu'il est nécessaire d'atteindre pour que l'aérosol puisse servir de CCN. En effet, l'aérosol est considéré actif quand son diamètre devient supérieur au diamètre pour lequel la sursaturation est maximale. Ainsi la valeur du maximum de sursaturation est définie comme la sursaturation critique (S_c), et le diamètre-seuil du processus d'activation qui correspond à cette sursaturation critique, s'appelle le diamètre critique (D_c).

BEGUE²² montre également que deux aérosols de même taille et de nature chimique différente n'auront pas le même taux de sursaturation critique (effet Raoult). Pour un même composé chimique ayant des diamètres secs différents, l'aérosol le plus gros nécessitera un taux de sursaturation plus faible pour s'activer (effet Kelvin). L'effet du soluté prédomine lorsque le

²¹ Op.cit.

²² Op.cit.

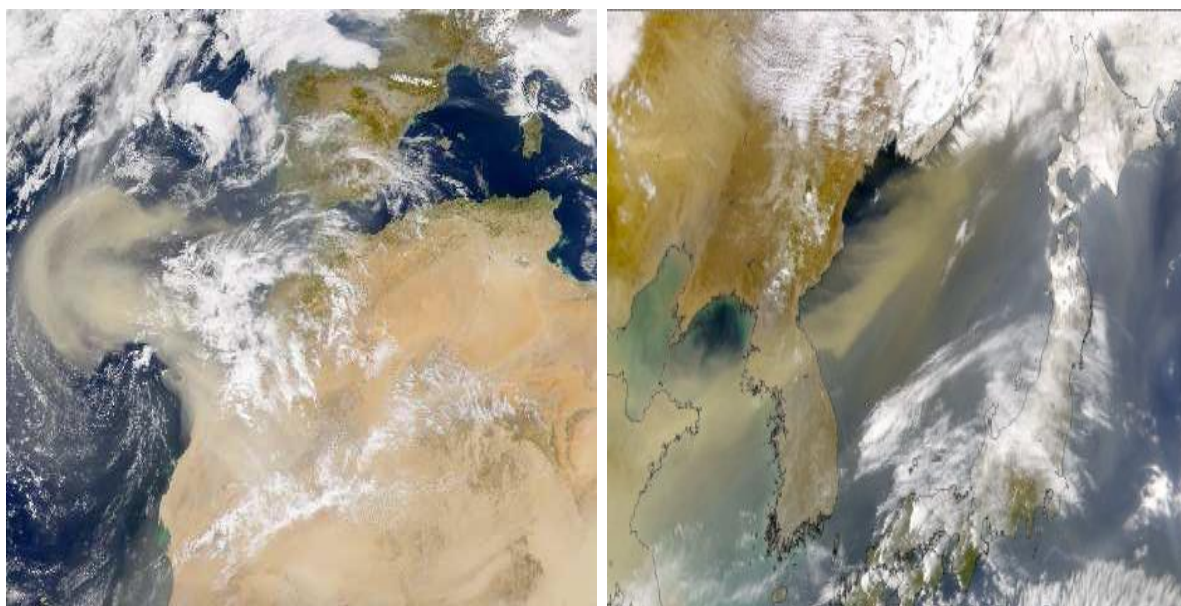
diamètre de l'aérosol est petit, alors que lorsque le diamètre augmente, c'est l'effet Kelvin qui prédomine (SEINFELD et PANDIS, 1998). Ces deux effets (relatifs à la taille et à la composition chimique) constituent les propriétés de l'activation d'un aérosol en CCN, ce sont eux qui déterminent la rapidité avec laquelle seront nucléées les gouttelettes pour une atmosphère donnée, et en quelle quantité.

2. Cas spécifique des aérosols désertiques

Les aérosols désertiques ou poussières minérales encore appelés lithométéores sont des particules mises en suspension par l'action du vent sur les surfaces continentales désertiques ou semi-arides. Ainsi, ces aérosols sont issus pour l'essentiel des régions arides et semi-arides du globe, d'où l'appellation d'aérosols désertiques. Ils sont qualifiés de primaires au même titre que les embruns marins, car ils sont émis directement sous forme de particules sous l'action du vent. Les processus d'émission de ces aérosols résultent d'interactions complexes entre la vitesse du vent et la rugosité du sol (MARTICORENA et BERGAMETTI, 1996 ; MARTICORENA et al., 1997). Parlant de la vitesse seuil d'érosion qui régule les émissions, MARTICORENA et al. (1997) notent qu'elle dépend de la rugosité de la surface, de la taille des grains et de l'humidité des sols. Sous l'action du vent, les particules du sol dont le diamètre médian est relativement élevé (~75µm) se déplacent en **saltation** à la surface du sol. Puis, par bombardement par vents violents des agrégats présents en surface (*sandblasting*) les grains en saltation émettent des particules plus fines sous forme de nuage sec que NOBILEAU²³ appelle "tempêtes de sable" qui peut s'élever jusqu'à 6 km d'altitude. Ces particules sont capables de rester en suspension dans l'atmosphère et d'être transportées verticalement et s'étendre sur des milliers de kilomètres (*figure 40*) constituant ainsi l'aérosol désertique.

²³ NOBILEAU D., 2005. *Caractérisation, détection et quantification des aérosols désertiques à partir des observations satellitaires de la couleur de l'océan*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI (spécialité Méthodes Physiques en Télédétection), Laboratoire d'Océanographie de Villefranche sur Mer (LOV), 286p.

Figure 40 : Image SeaWiFS du 26/02/2000 montrant un panache d'aérosol saharien. NASA/GSFC, image SeaWiFS d'un panache d'aérosols désertiques au-dessus de la mer du Japon



(À gauche) image SeaWiFS , (à droite) reprises par NOBILEAU (2005)

Ces "nuages" d'aérosols désertiques se dissipent quand les particules quittent l'atmosphère par des processus de dépôts secs et humides. La sédimentation par gravité des grandes particules ($>10 \mu\text{m}$) se produit près de la source lors du premier jour de transport. Le dépôt humide se produit irrégulièrement durant les 5 à 10 jours de la vie des particules de plus petite taille.

Les aérosols désertiques représentent la première source mondiale en masse d'aérosol dans l'atmosphère, entre 1000 et 3000 Tg par an, et représentent environ 40% des émissions globales en aérosols troposphériques (IPCC, 2001). Cependant comme l'illustre la grande dispersion des estimations résumées au *tableau 16*, il existe encore des incertitudes sur ces estimations à l'échelle globale. L'estimation du flux annuel global d'aérosols désertiques par les modèles reste aujourd'hui quelque chose de relativement complexe. Ainsi dans le but d'évaluer et d'améliorer les performances des modèles, de nombreuses études sont réalisées en s'appuyant sur des données récoltées lors des campagnes de mesure (BOUET et al., 2007 ; GRINI et al., 2005 ; KINNE et al., 2003 ; TODD et al., 2008 ; ZENDER et al., 2003)

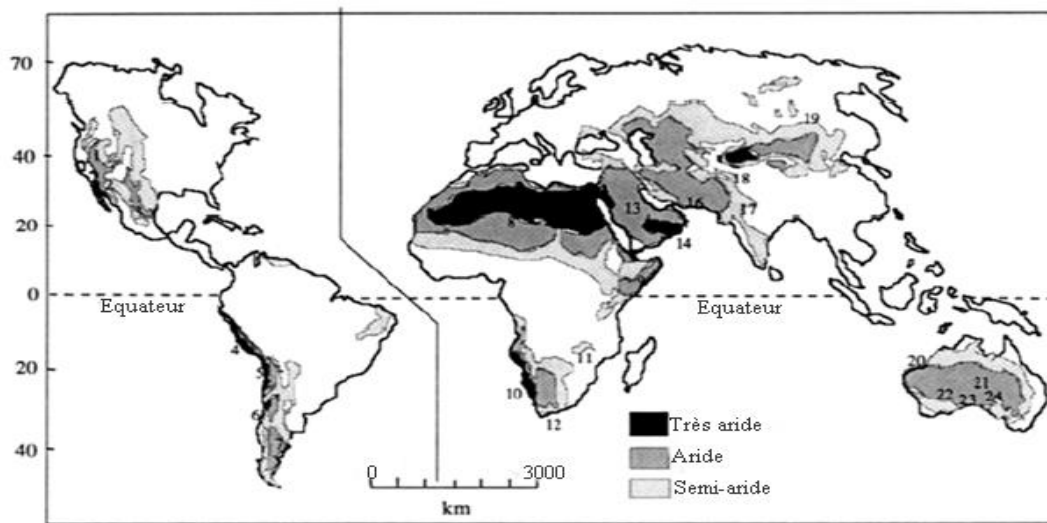
Tableau 16 : Récapitulatif des émissions globales annuelles d'aérosols désertiques (en Tg/an) estimées à partir de différents modèles globaux.

Référence	Emission globale annuelle D'aérosols désertiques (T g/an)
Schütz (1980)	5000
D'Almeida (1986)	1800-2000
Tegen et Fung (1994)	3000
Duce (1995)	1000-2000
Andreae (1996)	1500
Mahowald et al. (1999)	3000
Penner et al. (2001)	2150
Ginoux et al. (2001)	1814
Chin et al. (2002)	1650
Werner et al. (2002)	1060 ± 194
Tegen et al. (2002)	1100
Zender et al (2003)	1490 ± 160
Luo et al. (2003)	1654
Mahowald et Luo (2003)	1654
Ginoux et al. (2004)	2073
Miller et al. (2004)	1018
Tegen et al. (2004)	1921
Jickells et al. (2005)	1790

La compilation est faite à partir des études de MAHOWALD et al. (2005) ; ZENDER et al. (2004) et ENGELSTAEDTER et al. (2006). BEGUE (2012)

Ces aérosols désertiques contribuent beaucoup à la charge en aérosols dans l'atmosphère, spécialement dans les régions subtropicales et tropicales. Les régions sources de poussières sont principalement les déserts, les lits de lacs asséchés (PROSPERO et al., 2002), des régions plus sèches où la végétation a été réduite soit naturellement, soit sous l'effet de l'activité humaine (TEGEN et FUNG, 1995). SEINFELD et al. (1998) ; GOUDIE (2009) parlent de "régions arides et semi-arides du globe dont la surface est la moins protégée de l'érosion éolienne par une couverture végétale presque inexistante et par une humidité du sol très réduite".

Figure 41 : Localisation des zones désertiques et des principaux déserts



NICKLING (1994) et SHAO (2000)

D'une manière générale, les zones semi-arides et arides sont définies en fonction de la quantité de précipitation qu'elles reçoivent. Les régions arides sont caractérisées par un taux annuel de précipitation inférieur à 200 mm (BEGUE, 2012).

Au-delà de l'existence de conditions météorologiques et climatiques propices à l'érosion éolienne, la nature des sols joue un rôle important dans le processus d'émission d'aérosols désertiques. La disponibilité de matériel fin à la surface des sols est un facteur déterminant pour les émissions d'aérosols désertiques (WEBB et al., 2006). Des facteurs géologiques, topologiques, biologiques et climatiques contribuent à la formation de particules fines à la surface des sols faisant intervenir divers processus tels que l'érosion hydrique (ECKARDT et KURING, 2005), l'abrasion éolienne (DIETRICH, 1977), la désagrégation des roches (WELLMAN et WILSON, 1965). La désagrégation des roches est un processus qui se produit particulièrement dans des régions arides et très chaudes où des cristaux de sel se développent dans les interstices de la roche exerçant ainsi des pressions capables de la fissurer. L'impact de particules soulevées par le vent sur une surface est une source potentielle de fines particules, qui redéposées conduisent à la formation de sols fins plus facilement érodables : c'est le processus de l'abrasion éolienne.

Selon l'étude que PROSPERO et al. ont menée en 2002, ces derniers répartissent géographiquement les principales zones sources d'aérosols désertiques à l'échelle du globe suivant 9 régions qui sont : l'Afrique du Nord, l'Afrique du Sud, la péninsule Arabique, l'Asie Centrale, la Chine de l'Est, la Chine de l'Ouest, l'Amérique du Nord, l'Amérique du Sud et

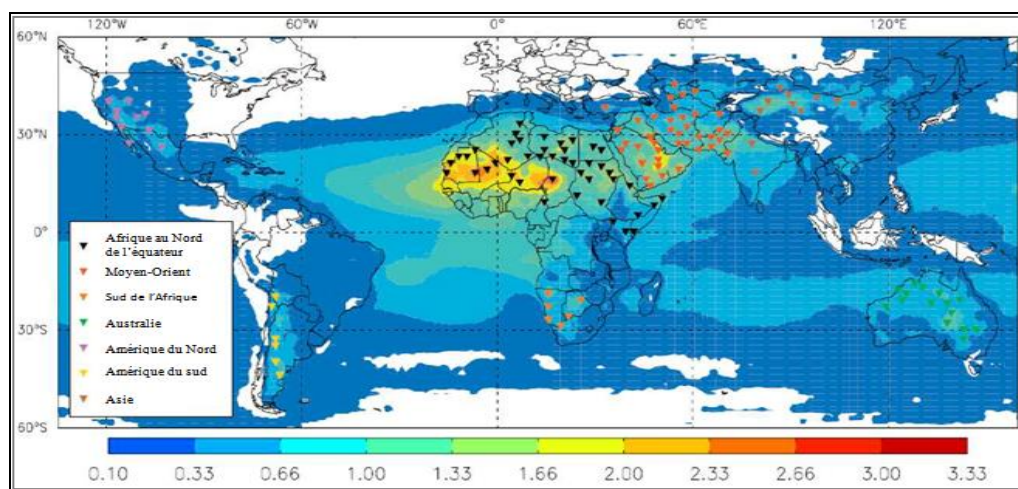
l'Australie (*figure 41*). Plus de 85% de la quantité d'aérosols désertiques présents dans l'atmosphère sont émis depuis l'hémisphère Nord, du fait que la majorité des sources sont localisées au sein de cet hémisphère. Parmi ces régions sources, la région nord-africaine représente la première source mondiale d'aérosols désertiques avec en moyenne une production annuelle égale à la moitié de la quantité globale émise annuellement (~1000 Tg) (ZENDER et al., 2003 ; GINOUX et al., 2004 ; ENGELSTAEDTER et al., 2006 ; CAKMUR et al., 2006).

Au sein de ces régions sources à l'échelle du globe, les émissions les plus importantes se font à partir de zones très localisées et particulièrement actives appelées « hot spot » (HERMAN et al., 1997). Ces « hot spot » possèdent des caractéristiques (dynamiques, topographiques...) bien spécifiques qui favorisent une émission plus importante.

La *figure 42* montre la distribution géographique de 131 « hot spot » identifiés à partir de l'analyse de six années de données issues des observations de TOMS (HERMAN et al., 1997). Cette distribution géographique des « hot spot » montre qu'ils sont majoritairement situés sur le continent africain et asiatique. L'analyse des observations spatiales et des mesures de terrain révèlent l'existence de dépressions topographiques fermées qui peuvent être des sources d'aérosols désertiques particulièrement actives (GINOUX et al., 2001 ; PROSPERO et al., 2002). Ainsi, à titre d'exemple, il peut être cité la dépression de Bodélé (décrit au chapitre VI) qui est située au nord du Tchad, mais également la dépression de Makgadikgadi, qui lui est située au nord-est du Botswana.

Ce sont les caractéristiques de ces « hot spot » qui sont à l'origine des différences du taux d'émission d'aérosols désertiques entre les différentes régions sources à l'échelle du globe.

Figure 42 : Localisation de 131 'hot spots' issus des observations spatiales de TOMS



ENGELSTAEDTER et WASHINGTON, 2007 reprise par BEGUE (2012) et réadapté par GAYE (2016)

Outre la grande diversité des régions sources, l'aérosol désertique est caractérisé par son mode d'apparition. Il est principalement injecté dans l'atmosphère lors d'événements épisodiques mais de forte intensité. Après une élévation rapide dans l'atmosphère, les vents d'altitude le transportent au-dessus de la couche limite sur de grandes distances, loin de sa source d'émission : principalement du désert du Sahara au-dessus de l'océan Atlantique vers les Amériques sous l'effet des alizés, au-dessus de la Méditerranée vers l'Europe, et aussi des déserts chinois au-dessus de l'océan Pacifique Nord (NOBILEAU,²⁴).

De récentes études conduites à partir d'observations satellitaires (KAUFMAN et al., 2005), ont estimé que 230 Tg de poussières désertiques étaient transportées annuellement depuis l'Afrique entre 20°S et 30°N. D'après le modèle de GONG et al. (2003), 252 Tg de poussières seraient émises à partir des déserts asiatiques entre les mois de mars et mai. Les modèles globaux produisent des résultats très différents dans une gamme de 1000-2150 Tg par an pour les simulations des émissions d'aérosols désertiques et dans une gamme de 8-36 Tg pour les estimations de charge en aérosols dans l'atmosphère (émission par jour et temps de résidence) (ZENDER et al., 2004) (quelques exemples sont présentés au *tableau 17*)

Tableau 17 : Les émissions annuelles, le temps de résidence moyen et la charge moyenne en aérosols désertiques dans l'atmosphère

Référence	Émission Tg par an	Temps (Jours)	Masses (Tg)
(Andreae, 1996)	1500	4	8.4
(Ginoux et al., 2001)	1814	7.1	35.9
(Tegen et al., 2003)	1100	7.4	22.2
(Zender et al., 2003)	1490	4.3	17.4
(Luo et al., 2003)	1654	5.1	23

D'après ZENDER et al. (2004)

L'incohérence de ces estimations de l'émission et du temps de résidence moyen des aérosols désertiques vient du fait de l'utilisation, pour les calculer, de différentes méthodes n'ayant pas les mêmes contraintes (transport, processus de dépôt, base de données incorporée, etc.).

De nombreuses études portant sur les aérosols désertiques sont liées à leur contribution au bilan radiatif terrestre et donc à leur influence sur le climat. Les propriétés microphysiques et optiques des poussières minérales sont complexes et variables, y compris dans leur forme et leur composition minéralogique. Le domaine de taille des aérosols désertiques est suffisamment large pour permettre à la fois la rétrodiffusion et l'absorption du rayonnement solaire dans le visible, et l'absorption du rayonnement tellurique dans l'infrarouge (LI et al., 1996 ; SOKOLIK et

²⁴ OP. Cit.

TOON, 1996 ; HAYWOOD et BOUCHER, 2000). Ces aérosols sont par conséquent des acteurs importants du bilan radiatif terrestre.

En raison de changements spatio-temporels rapides dans leur concentration, les aérosols désertiques ne sont pas, à l'heure actuelle, suffisamment bien décrits dans la littérature, en particulier en ce qui concerne la détermination de leur forçage radiatif (SOKOLIK et al., 2001). Celui-ci est défini comme la modification du bilan radiatif terrestre qui résulte de la présence d'aérosols introduits par des activités humaines actuelles, par rapport à la situation de référence de l'année 1750 (NOBILEAU²⁵). Les moyennes globales des estimations du forçage radiatif des aérosols désertiques sont actuellement fortement incertaines, et ce dans l'intensité et même le signe du forçage, entre - 0,6 et + 0,4 Wm⁻² (IPCC, 2001). L'incertitude sur le signe du forçage provient en grande partie de l'incertitude sur la valeur de l'albédo de simple diffusion des aérosols qui contrôle leur capacité à absorber le rayonnement solaire.

La rétrodiffusion du rayonnement solaire vers l'espace par les aérosols induit en moyenne une diminution de la valeur du bilan énergétique au sommet de l'atmosphère et donc un forçage radiatif négatif. Localement, le forçage radiatif direct des aérosols désertiques peut représenter jusqu'à -60 Wm⁻² à la surface (MILLER et TEGEN, 1998). La présence au-dessus de l'océan d'un aérosol absorbant le rayonnement solaire renforce le forçage négatif à la surface et la diminution de l'évaporation. Mais l'absorption du rayonnement par l'aérosol provoque aussi un réchauffement des couches atmosphériques qui le transportent. Le bilan entre ces deux effets est encore incertain.

Les gradients thermiques associés à la distribution verticale des aérosols absorbants sont susceptibles de modifier la stabilité verticale de l'atmosphère et d'affecter la convection (BROOKS et LEGRAND, 2000).

Tandis que la plupart des aérosols atmosphériques interagissent seulement avec le rayonnement visible, les aérosols désertiques présentent également des propriétés absorbantes pour le rayonnement tellurique, provoquant ainsi un réchauffement de l'atmosphère dû à leur absorption dans les grandes longueurs d'onde (SOKOLIK et al., 1998).

Les aérosols désertiques sont initialement hydrophobes ce n'est au cours de leur transport sur de longues distances et suite à diverses actions qu'ils deviennent hydrophiles. Dans ce sens NOBILEAU nous souligne que d'après des études en Méditerranée, LEVIN et GANOR (1996)

²⁵ Op. Cit.

ont montré que les aérosols désertiques, initialement hydrophobes, peuvent se transformer en noyaux de condensation. Cette transformation fait suite au "vieillissement" de l'aérosol lors de son séjour dans l'atmosphère. Pendant leur transport sur de longues distances, ils se modifient à la suite d'interactions avec la pollution (FAN et al., 2004), ou par le dépôt sur leur surface de matériel soluble tel que le sulfate ou le nitrate. De telles modifications les rendent hydrophiles et les transforment en noyaux de condensation pour la vapeur d'eau, entraînant la formation de gouttes de grande taille et donc de précipitations.

Cependant, ROSENFELD et al. (2001) ont observé que l'apport d'aérosol désertique pourrait également supprimer des précipitations.

S'il est admis que les aérosols désertiques exercent des effets certains sur climat, il est aussi à préciser que les changements climatiques sont susceptibles d'influencer fortement les émissions des aérosols désertiques en terme de localisation et d'intensité, ainsi que les conditions de leur transport. En effet, les paramètres météorologiques (vent, pluviométrie) contrôlent les émissions d'aérosols désertiques.

Enfin d'après BIAN et ZENDER, 2003 ; MARTIN et al., 2003, les aérosols désertiques affectent également la variabilité des taux de photolyse et les réactions hétérogènes de l'ozone dans la troposphère par changement de l'intensité des rayonnements UV.

Si aujourd'hui l'on s'intéresse aux aérosols et particulièrement aux aérosols désertiques pour deux raisons principales ; leurs effets radiatifs aux échelles globale et régionale et à leurs impacts sanitaires à l'échelle locale, on doit tout d'abord comprendre que chacun de ces effets est la résultante des propriétés à la fois optiques et physico-chimiques de ces aérosols désertiques.

2.1. Propriétés physico-chimiques et optiques

2.1.1. Distribution en taille des aérosols désertiques

La distribution granulométrique est un paramètre déterminant car elle va influencer les propriétés optiques de la population d'aérosols, et également leur efficacité à interagir avec le rayonnement solaire et tellurique.

Les aérosols désertiques présentent une distribution massique dont le diamètre médian équivalent (correspondant au maximum de concentration) se situe entre 1 et 10 μm . Cette distribution massique atteint son maximum près des sources.

La distribution granulométrique proposée par ALFARO et GOMES (2001) dans ses travaux en soufflerie est très largement utilisée dans de nombreux schéma d'émission et est aujourd'hui implémentée dans de nombreux modèles associant un modèle de *saltation* et un modèle de *sandblasting* (CRUMEYROLLE)²⁶. Cette distribution permet de déterminer un spectre granulométrique de l'aérosol désertique tri-modal centrés sur 1.5 μm , 6.7 μm , et 14.2 μm (rayons médians de 0.75, 3.35 et 7.1 μm) (MALAVELLE²⁷; CRUMEYROLLE, 2008 ; BEGUE, 2012). Les études numériques s'appuyant sur cette distribution montrent que cette distribution représente assez bien le flux massique des émissions d'aérosols désertiques (BOU KARAM et al., 2009 ; CRUMEYROLLE et al., 2010 ; SOW et al., 2011).

La distribution dimensionnelle des particules va dépendre des conditions météorologiques (vitesse du vent) responsables du soulèvement des poussières, du type de sols sources, de la rugosité de la surface et des processus de vieillissement. Ce qui fait qu'il n'est pas évident de définir une distribution universelle (OSBORNE et al., 2008 ; WEINZIERL et al., 2009).

Les mesures de terrain ont montré que la distribution granulométrique des aérosols désertiques nord africains peut présenter un ou plusieurs modes. Il a ainsi été répertorié dans le **tableau 18** quelques exemples de rayons médians caractérisant les distributions granulométriques (en nombre) des aérosols désertiques obtenues par des observations issues de différentes stations nord africaines.

Tableau 18 : Exemple de rayons médians caractérisant les distributions granulométriques (en nombre) des aérosols désertiques obtenues par ajustement lognormale des observations issues de différentes stations nord africaines

Référence	Localisation	Instruments/Méthodes	Rayon Médian (μm)
D'Almeida (1987)	Sénégal/Mali/Niger	Inversion photométrique	0.08/ 1.6/5
Tanré et al., 2001a	Niger	Inversion photométrique	0.3/ 1.5/2
Masmoudi et al., 2003	Tunisie	Inversion photométrique	1.3/ 3.8
Crumeyrolle et al., 2008	Mali/Niger	SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)/ OPC (Optical Particles Counter)	0.03/ 0.1/ 0.3
El-Metwally et al., (2008)	Egypte	Inversion AERONET	1.5/ 4
Kandler et al., (2009)	Maroc	DMPS (Differential Mobility Particle Sizer)/ APS (Aerodynamic Particle Sizer)	0.04/ 0.7/ 15

Source : BEGUE (2012)

²⁶ Op.cit.

²⁷ MALAVELLE F., 2011. *Effets direct et semi-direct des aérosols en Afrique de l'ouest pendant la saison sèche*. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), Discipline ou Spécialité : Physique de l'Atmosphère, E.D. Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E), Unité de Recherche : Laboratoire d'Aérodologie UMR 5560, 205p.

La distribution granulométrique massique des aérosols désertiques s'étend sur une gamme de rayon allant de 0.5 μm à 5 μm . Lors d'évènements particuliers, tels que des soulèvements important de poussière, le diamètre médian des particules d'aérosol du mode grossier atteint même des valeurs proches de 20 μm et seulement 10 % de la masse des poussières se trouve dans la fraction submicronique (TEGEN et al., 2002 ; LUO et al., 2003).

La distribution massique des aérosols désertiques est donc largement dominée par les particules du mode grossier. Cependant, CRUMEYROLLE et al. (2010) ont dernièrement mis en évidence, grâce à l'instrumentation aéroportée utilisée durant la campagne AMMA (*Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine*), la présence d'un mode fin centrée sur 80 nm dominant la distribution en nombre. La présence de ce mode fin peut également être observée dans les résultats des inversions des stations du réseau AERONET (*AEronet RObotic NETwork*) présentes notamment en Afrique depuis une dizaine d'année et fournissant la distribution en taille des particules. Lors encore d'autres campagnes de mesure [SHADE (*SaHAran Dust Experiment*) ; DODO (*Dust Outflow and Deposition to Ocean*), AMMA (*Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine*) ; SAMUM (*SAharan Mineral dUst ExperiMent*)] réalisées en Afrique du Nord, il a pu être observé la présence de ce mode fin dominant la distribution granulométrique en nombre des aérosols désertiques (**tableau 6**). Bien que la masse résultante soit inférieure à la masse des modes plus gros, ce nouveau mode fin de poussières désertiques est à considérer à la fois pour la distribution en nombre et la distribution en masse.

Notons que la distribution granulométrique d'un aérosol désertique différent suivant sa proximité et son éloignement de sa source. Par exemple au-dessus des zones sources, D'ALMEIDA (1987) trouve une distribution granulométrique composée de trois modes centrés sur 0.16 μm 3.19 μm et 10 μm , tandis que HAYWOOD et al (2001) étudient la distribution des aérosols sahariens au-dessus de l'océan atlantique et montrent la présence de trois modes centrés sur 0.12 μm , 2 μm et 5 μm .

Les différences entre ces deux jeux de données montrent que les diamètres du mode grossier et du mode d'accumulation diminuent de façon relativement importante (facteur 2) lors du transport. Les différences dimensionnelles après transport des poussières désertiques sont dues à la durée de vie assez limitée des poussières désertiques dans l'atmosphère, environ quatre à cinq jours (CRUMEYROLLE²⁸). Le transport de ces particules donne lieu à plusieurs mécanismes, comme la coagulation avec d'autres types d'aérosols, la sédimentation, etc. De ce fait, le spectre

²⁸ Op. Cit.

granulométrique des particules évolue vite au cours du transport. Les particules les plus grosses, donc les plus lourdes, sédimentent rapidement (SCHÜTZ, 1980 ; SCHÜTZ et al., 1981), tandis que le diamètre des plus fines peut évoluer par coagulation (SEINFELD et PANDIS, 1998). Les incertitudes des modèles sont relativement importantes, c'est pourquoi il est nécessaire de disposer d'observations fiables pour valider et contraindre les différents modèles.

En somme, la distribution granulométrique est cruciale car elle va piloter le transport des aérosols désertiques et également leurs propriétés optiques. La présence du mode grossier est particulièrement importante en terme de forçage radiatif car c'est le mode le plus absorbant dans le spectre visible (REID et al., 2003 ; McCONNELL et al., 2008). Cependant, l'évaluation in-situ des paramètres qui définissent ce mode reste compliquée. Les estimations pouvant varier selon les méthodes utilisées (REID et al., 2003 ; McCONNELL et al., 2008). Ainsi le mode grossier constitue aujourd'hui encore une source d'incertitude importante dans l'estimation des effets radiatifs des aérosols désertiques.

2.1.2 Composition chimique et hygroscopicité des aérosols désertiques

La composition minérale est le paramètre qui gouverne l'indice de réfraction complexe et qui est donc responsable en partie de la variabilité des propriétés optiques des aérosols minéraux. Les poussières désertiques sont composées d'un mélange de minéraux tel que le quartz, le feldspath, l'argile (illite, kaolinite, polygorskite...) quelques fois associées à de la calcite.

Parmi les minéraux argileux, l'illite est l'élément dominant, présent dans des proportions allant souvent jusqu'à 60% de la masse, parfois plus (GLACCUM et PROSPERO, 1980). Son importante quantité dans les sols désertiques, et donc sa présence dans les aérosols qui en sont issus, s'explique par le fait que l'illite est un produit de l'altération commun à de nombreux silicates (MILLOT, 1964). Cette espèce argileuse se trouve donc être ubiquiste (omniprésent) dans les aérosols minéraux : elle est majoritaire dans plusieurs aérosols sahariens, au sein des zones sources (PAQUET et al., 1984), au niveau de l'Atlantique Nord (COUDE-GAUSSSEN et al., 1987 ; LEINEN et al., 1994) ou dans l'est de la Méditerranée (CHESTER et al., 1977). Mais elle a aussi été déterminé comme majoritaire dans des aérosols prélevés au-dessus du Pacifique, dans les panaches de poussières issus du continent asiatique (GAUDICHET et BUAT-MENARD, 1982 ; BLANK et al., 1985 ; MERRILL et al., 1994), ainsi que les sédiments marins d'origine éolienne (CHESTER, 1990) et dans les glaces du Groenland (DRAB et al., 2002) et de l'Antarctique (GAUDICHET et al., 1986).

La Kaolinite est également une des espèces argileuses majeures des aérosols désertiques, pouvant même dans certains cas se trouver être l'espèce dominante. Sa présence dans l'aérosol sera particulièrement dépendante de la localisation de sa source (LAFON²⁹).

En ce qui concerne les minéraux non argileux, le quartz est souvent le minéral majoritaire et peut représenter entre 10 et 20% de la masse totale d'aérosol (GLACCUM et PROSPERO, 1980). Il est le minéral terrigène le plus résistant aux agents d'altération et il constitue l'essentiel des sols désertiques. Sa présence dans les aérosols qui en sont issus est donc systématique.

Les feldspaths potassiques sont toujours présents mais en quantité relativement faibles.

Diverses études de la minéralogie de poussières désertiques atmosphériques prélevées dans différents lieux sont décrites dans la littérature. Beaucoup d'entre elles ont été réalisées dans le cadre de campagnes océaniques visant à déterminer l'apport éolien aux océans et aux sédiments marins (CHESTER et JOHNSON, 1971), ou encore dans le but d'identifier les sources actuelles ou celles des ères géologiques passés.

La quasi-totalité de ces études est en phase avec les estimations de WARNER (1988). En effet, les minéraux, émis à partir du sol dont la composition moyenne est présentée au *tableau 19* sont majoritairement composés de fer, d'aluminium et de silicium (RAHN, 1976, SCHÜTZ and SEBERT, 1987 ; WARNER et al., 1988). À partir des données collectées en Algérie, GOMES et al., (1990) révèlent également que les aérosols désertiques sont appauvris en silicate mais enrichis en aluminium et en fer par rapport à la composition des sols. De récents travaux réalisés par KLAVAR et al (2011) mettent en évidence une plus grande proportion des oxydes de fer dans les aérosols désertiques issus des sources Sahéliennes que ceux provenant des sources Sahariennes.

²⁹ LAFON S., *Les oxydes de fer dans l'aérosol désertique en relation avec ses propriétés optiques : caractérisations physico-chimiques de poussières minérales générées en soufflerie*, Thèse de Doctorat, Université Paris 12 Val-De-Marne, U.F.R. de Sciences et Technologie, Spécialité : physique dynamique et géochimie de l'atmosphère, 317p.

Tableau 19 : Composition chimique moyenne des sols désertiques,

Éléments	Concentration massique de sols (%)
Silicium (Si)	33
Aluminium (Al)	7.13
Fer (Fe)	3.8
Calcium (Ca)	1.37
Potassium (K)	1.36
Magnésium (Mg)	0.63
Sodium (Na)	0.63
Titane (Ti)	0.46
Manganèse (Mn)	0.085
Chrome (Cr)	0.02
Vanadium (V)	0.01
Cobalt (Co)	0.0008

D'après Warner (1988)

En ce qui concerne l'aspect hygroscopique de l'aérosol désertique, d'après PRUPPACHER et KLETT (1997), la plupart de ces particules ne sont pas capable d'agir en tant que Noyau de Condensation Nuageux (CCN : Cloud Condensation Nuclei). Cependant au cours de leur transport, certains processus peuvent créer autour des aérosols désertiques une pellicule de matière soluble, leur permettant de servir de CCN (LEVIN et al., 1996 ; TROCHKINE et al., 2003 ; YIN et al., 2002). D'après CRUMEYROLLE (2008) plusieurs explications sont émises pour expliquer la présence de cette pellicule hygroscopique :

- La source des poussières désertiques est un lac asséché ou une zone touchée par des pluies contenant du sulfate. Le processus d'évaporation de l'eau laisse sur les particules des composés hydrophiles présents dans l'eau du lac ou dans l'eau de pluie. Ces particules formant alors la couche superficielle des lacs asséchés et des zones de pluies sulfatées sont les premières à être soulevées dans l'atmosphère (FORMENTI et al., 2003).
- La coagulation des particules de sulfates et des particules de poussières désertiques. De telles interactions sont possibles si les concentrations des deux types de particules sont importantes. Cependant l'efficacité de collision et de collage est faible (SEINFELD et PANDIS, 1998).
- Ce dépôt surfacique peut être aussi dû à une oxydation de SO₂ gazeux en SO₄ sur les minéraux contenus dans les poussières désertiques LEVIN et al (1996).

- Les réactions acido-basiques sur des aérosols humides peuvent intervenir et créer des composés solubles. LASKIN et al. (2005) ont montré, par des expériences en laboratoire, la formation d'un composé très hygroscopique ((CaNO₃)₂) par une réaction entre le carbonate de calcium (CaCO₃) et l'acide nitrique (HNO₃).

- La collision des gouttelettes formées à partir de CCN sulfatés ou autres éléments solubles (WURZLER et al., 2000). La plupart des nuages n'étant pas précipitants (PRUPPACHER et KLETT, 1979), les aérosols qui ont été incorporés dans une gouttelette sont rejetés dans l'atmosphère après évaporation, produisant des particules chimiquement modifiées et/ou enrobées d'une pellicule soluble.

Plus récemment LEVIN et al (2005) ont montré que le transport à basse altitude au-dessus de la mer des poussières désertiques peut entraîner la formation d'une pellicule soluble sur une grande partie des poussières désertiques. Cette pellicule de surface influence les propriétés hygroscopiques des aérosols. Dès lors, ces particules peuvent jouer un rôle important comme CCN.

Alors qu'à l'état initial ils sont reconnus hydrophobes, une importante fraction des aérosols désertiques peut rester en tant qu'aérosol interstitiel dans des nuages convectifs et atteindre la troposphère moyenne et supérieure, où ils peuvent agir comme noyau de glace (IFN, Ice Forming Nuclei). En effet, il est admis par le biais d'observations que les aérosols désertiques nord africains peuvent jouer le rôle de IFN bien qu'ils ont un potentiel CCN peu élevé dans l'atmosphère (CHOU et al., 2011 ; DEMOTT et al., 2003 ; KLEIN et al., 2010).

Nous pouvons donc constater que les fractions actives de CCN et de IFN pour les aérosols désertiques nord africains dépendent fortement de leur région source et des processus atmosphérique.

2.1.3. Propriétés optiques des aérosols désertiques

2.1.3.1. L'albédo de simple diffusion (SSA « Single Scattering Albedo »)

C'est un paramètre important en transfert radiatif car il donne la probabilité qu'une onde soit diffusée plutôt qu'absorbée lors de son interaction avec une particule. L'albédo de simple diffusion (SSA) nous donne la fraction du rayonnement absorbée. La valeur de l'albédo de simple diffusion est donc comprise, par définition, entre 0 (particule purement absorbante) et 1 (particule purement diffusante).

On observe dans la littérature une grande variabilité du SSA des aérosols désertiques (*tableau 20*). Par exemple KAUFMAN et al. (2001), en s'appuyant sur des mesures de télédétection, estiment le SSA des aérosols désertiques à 0.97 (550 nm). D'après PERE³⁰, à partir de mesures combinées satellitaires (Landsat TM) et photométriques (AERONET), TANRE et al. (2001) ont obtenu une valeur du SSA pour des poussières sahariennes (0.97 ± 0.02 à 550 nm en moyenne sur la colonne atmosphérique) voisine de celle obtenue par DUBOVIK et al. (2002) pour le golfe Persique (0.93 ± 0.03 à 440 nm). Ces valeurs sont en bon accord avec celles obtenues en surface par ALFARO et al. (2004) (SSA (660 nm) = 0.95–0.97) à partir de mesures directes de diffusion et d'absorption du rayonnement solaire par des particules minérales issues du désert de Gobi, du Sahara et de la région du Sahel.

Au large des côtes sénégalaises, l'étude de HAYWOOD et al. (2003) indique des SSA compris entre 0.95 et 0.99 (550 nm) pour des aérosols observés durant SHADE (*SaHAran Dust Experiment*).

En se basant sur les inversions AERONET (*AERosol RObotic NETwork*), LEVY et al. (2007) ont construit une climatologie de propriétés optiques par type d'aérosols utilisé en entrée de l'algorithme d'inversion du capteur satellitaire MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). La valeur d'albédo de simple diffusion associée aux aérosols désertiques est de 0.953 (à 550 nm). Des valeurs encore plus basses ont également été publiées (0.75-0.76 à 550 nm) illustrant le rôle du mode grossier (OTTO et al., 2007). En effet, selon leur composition minéralogique et leur granulométrie, il est possible que les aérosols désertiques soient particulièrement absorbants dans le visible. McCONNELL et al. (2008) ont montré dans le cadre de la campagne DODO (*Dust Outflow and Deposition to Ocean*) menée principalement au-dessus de l'Atlantique et de la Mauritanie/Algérie que l'ajout d'un mode grossier dans le calcul des propriétés optiques induit un changement significatif de la valeur du SSA passant de 0.98 à 0.90 (à 550 nm).

Actuellement, les valeurs d'albédo de simple diffusion rapportées pour les aérosols au nord du continent africain sont assez disparates. Les raisons principales sont liées à la fois aux différentes méthodes de mesures mises en œuvre (instrumentation, veine de prélèvement, méthodes de correction et distance aux sources) mais également à la grande variabilité dans la composition

³⁰ PERE J-C., 2010. *Simulation de l'impact climatique des aérosols en Europe*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Discipline ou Spécialité : Physique et Chimie de l'Atmosphère, E.D. Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E), Unité de Recherche : Laboratoire d'Aérodologie & Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 178p.

chimique et dimensionnelle des aérosols désertiques décrite juste avant. À titre d'exemple OSBORNE et al. (2008) estiment l'albédo de simple diffusion des aérosols désertiques à 0.98-99 (à 550 nm) à partir des mesures aéroportées réalisées durant DABEX (*Dust And Biomass-Burning EXperiment*) au-dessus du Niger. En juin 2007, l'albédo de simple diffusion déduits des mesures effectuées pendant GERBILS (*Geostationary Earth Radiation Budget Intercomparison of Longwave and Shortwave Radiation*) a été estimé à 0.97 ± 0.02 (à 550 nm) au-dessus du Sahara avec une instrumentation identique à celle de DABEX (JOHNSON et OSBORNE, 2011). Les mesures au sol réalisées au Maroc près des zones sources durant SAMUM 1 (SAMUM = Saharan Mineral Dust Experiment) et utilisant également une instrumentation identique à celle de GERBILS et DABEX, supportent ces résultats avec une estimation du SSA de 0.96 ± 0.02 (à 537 nm) (SCHLADITZ et al. 2009). Durant SAMUM 2, plus loin des sources, MÜLLER et al. (2011) reportent également un SSA moyen de 0.96 (à 550 nm) pour des événements de soulèvement de poussières minérales. Des aérosols désertiques transportés au-dessus de l'atlantique ont été mesurés en Floride et le SSA estimé à 0.97 ± 0.02 (à 550 nm) (CATTRAL et al., 2003). Mais pour un transport aussi lointain, la plupart des aérosols du mode grossier sont supposés avoir sédimenté.

Des valeurs plus absorbantes ont également été reportées. SLINGO et al. (2006) mentionnent des valeurs comprises entre 0.89 et 0.95 (à 500 nm) à partir des observations au sol réalisées pendant la campagne RADAGAST (Radiative Atmospheric Divergence using ARM mobile facility, GERB data and AMMA Stations) à Niamey en 2006. Les inversions des mesures photométriques de la période 1999 à 2002 pour le site du Cap Vert fournissent quant à elles des valeurs de SSA comprises entre 0.93 (à 440 nm) et 0.98 (à 660 nm) (DUBOVİK et al., 2002). MALAVELLE (2011) note que cette estimation a été réalisée avec l'ancienne version de l'algorithme d'inversion (v1) qui n'inclut pas la non sphéricité des particules d'aérosols et affirme que, dans sa nouvelle version (v2), les SSA estimés sont généralement plus absorbants (OSBORNE et al., 2008) comme on peut d'ailleurs le constater sur la climatologie qu'il a réalisée (*tableau 20*).

Tableau 20 : Moyennes saisonnières de l'albédo de simple diffusion dérivées des inversions de niveau 2.0 (algorithme version 2) des mesures photométriques du réseau AERONET/PHOTONS pour les sites en

Afrique de l'Ouest

SSA 440nm (±0,03) <i>level 2, v2</i>	AE < 0,4				AE > 1,0			
	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
Banizoumbou	0,917	0,919	0,911	0,928	0,803			
Ilorin	0,905	0,895	0,923	0,943	0,806		0,885	0,816
Djougou	0,887	0,907	0,925	0,940	0,781			0,801
Niamey	0,911		0,900	0,919				
Agoufou	0,895	0,905	0,893	0,903	0,790			
Ouagadougou	0,896	0,910	0,908	0,921	0,794		0,848	0,788
Tamanrasset	0,928	0,911	0,900	0,922				
Cinzana	0,886	0,910	0,903	0,900	0,782		0,830	0,881
Cape Vert	0,906	0,915	0,919	0,908	0,799			
Dakar	0,878	0,900	0,914	0,906	0,795	0,911		0,827
Maine Soroa	0,867	0,896	0,856	0,886	0,793			0,906
Izana		0,921	0,966	0,893				
moyenne	0,898	0,908	0,910	0,914	0,794	0,911	0,854	0,837

HOLBEN et al. (1998) et MALAVELLE (2011)

Dans cette climatologie, les SSA des aérosols désertiques sont compris entre 0.90 et 0.92 (à 440 nm) en assez bon accord avec les observations faites à Niamey par RAUT et CHAZETTE (2008).

En conclusion, il demeure très difficile d'estimer une valeur universelle de l'albédo de simple diffusion concernant les aérosols désertiques tant les facteurs influents sont nombreux. Le mélange des poussières avec des espèces absorbantes (ALFARO et WAHAB, 2006), la distribution en taille des particules et leur minéralogie ainsi que la diversité des techniques de mesures sont autant de facteurs qui contribuent à l'importante variabilité des valeurs observées. Cependant, une remarque générale que nous pouvons faire est que ces aérosols sont très certainement plus absorbants que ce qu'il était classiquement supposé. En effet, les aérosols désertiques ont été pendant longtemps représentés comme presque purement diffusants dans les modèles numériques, avec des albédos de simple diffusion dans le visible proche de l'unité. À la lecture de la littérature récente, il apparaît que l'albédo de simple diffusion des aérosols désertiques (pour l'ensemble de la distribution) dans le visible (~500-550 nm) doit très certainement se situer autour d'une valeur proche de 0.94-0.95 illustrant un pouvoir relativement absorbant de ce type d'aérosols.

2.1.3.2 Indice de réfraction des aérosols désertiques

L'indice de réfraction est un nombre complexe $m = n + ik$ qui retranscrit les propriétés diélectriques de la matière. Il dépend de la composition chimique des aérosols ainsi que de l'état

de mélange des espèces qui le composent (CHÝLEK et al., 1988 ; PERE et al., 2009) et de la longueur d'onde du rayonnement considéré. La partie réelle n contrôle la vitesse de phase de l'onde électromagnétique qui traverse la particule ce qui détermine les propriétés de diffusion (*loi de Snell-Descartes*) tandis que la partie imaginaire k contrôle l'absorption de l'onde électromagnétique.

La partie imaginaire de l'indice est proche de zéro pour les composés diffusants comme les sulfates, les sels marins ou l'eau mais peut être supérieure à 0.5 (dans le visible) dans le cas d'aérosol absorbant comme le carbone suie (KREKOV, 1993 ; FULLER et al., 1999 ; BOND et BERGSTROM, 2006) ou Poussières désertiques.

Les aérosols désertiques peuvent également absorber le rayonnement du fait principalement de la présence d'oxydes de fer (SOKOLIK et TOON, 1999 ; ALFARO et al., 2004 ; LAFON et al., 2006). Les indices de réfraction complexes des nombreux composés minéralogiques constituant l'aérosol désertique sont bien référencés (OTTO et al., 2009). Cependant, la proportion de ces différents composés au sein de l'aérosol désertique dépend fortement de la composition des sols d'où sont arrachées les particules. Puisque celle-ci varie grandement suivant les régions considérées, l'indice de réfraction complexe des aérosols désertiques est très variable (SOKOLIK and TOON, 1999). De nombreuses études récentes se sont consacrées à améliorer la description de la composition chimique des aérosols désertiques en Afrique permettant d'estimer plus précisément leur indice de réfraction.

Le comportement optique des particules dépend également de leur indice de réfraction complexe ($m = n + ik$). Plus spécifiquement, la partie imaginaire définit le pouvoir absorbant. Il est alors essentiel de bien caractériser ce paramètre pour les aérosols désertiques et carbonés car m va piloter, avec la distribution granulométrique (LAFON et al., 2006) les propriétés optiques des particules.

Les aérosols désertiques sont formés d'un mélange en proportions variables de différents composés minéralogiques tels que des argiles (illite, kaolinite, chlorite), des feldspaths, du quartz, de la calcite et des oxydes de fer (SCHÜTZ et RAHN, 1982 ; REID et al., 2003 ; CHOU et al., 2008 ; KANDLER et al., 2009). Les différents indices de réfraction associés à chaque espèce chimique sont assez bien référencés (OTTO et al., 2009). La principale difficulté dans l'estimation de l'indice de réfraction des aérosols désertiques réside dans le fait que la composition chimique des aérosols varie suivant les sols (différents passés géologiques) d'où ils sont émis. Ajouté à cela, suivant la période de l'année considérée, les processus météorologiques

responsables du soulèvement des aérosols désertiques différent. Ainsi, les sources d'aérosols désertiques ne sont pas activées de manière constante tout au long de l'année (MALAVELLE, 2011).

Ainsi, bien que de nombreux travaux aient déjà montré par le passé l'importance de considérer la minéralogie des aérosols désertiques pour modéliser les propriétés optiques et l'impact radiatif (CLAQUIN et al., 1999 ; SOKOLIK and TOON, 1999), il existait peu de valeurs publiées de l'indice de réfraction caractérisant l'aérosol désertique en Afrique il y a encore une dizaine d'années. Par conséquent, la variabilité et la méconnaissance des propriétés absorbantes des aérosols minéraux constituent l'une des principales sources d'incertitude dans la quantification de leurs impacts radiatifs (BALKANSKI et al., 2007).

Puisque l'indice de réfraction représente une propriété importante dans l'estimation du forçage radiatif direct des aérosols et que les références dans la littérature les plus fréquemment utilisées (VOLZ, 1973; PATTERSON et al., 1977; SHETTLE et FENN, 1979; WMO, 1983; FOUQUART et al., 1987; D'ALMEIDA et al., 1991; HESS et al., 1998) proposent des estimations très différentes de m , en particulier en ce qui concerne sa partie imaginaire ($m \in [0.008, 0.01]j$ à $0.5 \mu\text{m}$), il est clairement nécessaire de pouvoir mieux l'évaluer actuellement (TANRE et al., 2003). De ce fait, l'indice de réfraction des aérosols Sahariens et Sahéliens a été ré-évalué de façon plus systématique au cours des dernières campagnes de terrains (SHADE, DABEX, DODO, SAMUM). Une synthèse des différents indices estimés est donnée au **tableau 20**. Les principaux résultats peuvent être synthétisés ainsi :

- Les oxydes de fer (principaux responsables de l'absorption ALFARO et al. 2004 ; LAFON et al. 2006) sont présents en plus grande proportion dans les aérosols désertiques issus des sources Sahéliennes que dans les aérosols issus des sources Sahariennes (KLAVER et al., 2011).
- McCONNELL et al. (2008) remarquent que la partie imaginaire de l'indice de réfraction est plus grande pour le mode d'accumulation pendant DODO-2 (saison humide) que pendant DODO-1 (saison sèche). Dans la mesure où les distributions en taille sont très similaires, cela semble indiquer que les aérosols du mode d'accumulation échantillonnés sont plus absorbants pendant l'été du fait d'une composition chimique différente (liée à des sources différentes).
- Plusieurs études suggèrent que les concentrations en oxyde de fer au sein des aérosols désertiques sont plus importantes dans le mode grossier que dans le mode fin (LAFON et al.,

2006 ; KANDLER et al., 2009 ; OTTO et al., 2009 ; PETZOLD et al., 2009 ; McCONNELL et al., 2010).

- De manière générale, BALKANSKI et al. (2007) et PETZOLD et al. (2009) notent que la partie imaginaire des indices de réfraction estimée in-situ est moins grande que ce qui était classiquement reporté dans les climatologies (D'ALMEIDA et al., 1991 ; WMO, 1983 ; HESS et al., 1998). La partie imaginaire des indices de réfraction mesurée coïncident plus avec les estimations effectuées par les méthodes d'inversion du réseau AERONET (DUBOVIK et al., 2002). Par exemple, BALKANSKI et al. (2007) estiment que les valeurs de PATTERSON et al. (1977) et VOLZ (1973) conduisent à une surestimation d'un facteur 2 de l'énergie absorbée durant l'été. En effet, les valeurs synthétisées dans le **tableau 21** sont en bon accord avec l'estimation que MALAVELLE (2011) a fait en se basant sur les inversions AERONET/PHOTONS (**tableau 21**).

Tableau 21 : Indices de réfraction ($n + k 10^{-3}i$) des aérosols désertiques nord africains

Localisation	$\lambda_{400-450 \text{ nm}}$	$\lambda_{530-550\text{nm}}$	$\lambda_{650-700\text{nm}}$	Références
Maroc (Tinfou)/sol	1.53 + 5.1i	1.53 + 1.6i	1.53 + 0.45i	Müller et al., 2009
Maroc (Tinfou)/sol	1.57 + 6.6i	1.56 + 3.5i	1.55 + 0.33i	Kandler et al., 2009
Maroc (Tinfou)/sol		1.53 + 4.1i	1.53 + 3.1i	Schlartz et al., 2009
Maroc/avion		n \in [1.51 ; 1.55] k \in [0.8 ; 6.0]		Otto et al., 2009
Sud-est Maroc/ avion	n \in [1.55 ; 1.56] k \in [3.1 ; 5.2]	n \in [1.55 ; 1.56] k \in [3.0 ; 4.0]	n \in [1.55 ; 1.56] k \in [0.8 ; 6.0]	Petzold et al., 2009
Bodélé/sol	1.46 + 2.0i		1.47 + 1.0i	Todd et al., 2008
Cap Vert/sol	1.48 + 2.5i		1.48 + 0.7i	Dubovik et al., 2002
Sénégal/avion		1.53 + 1.5i		Haywood et al., 2003
Niger/avion		1.53 + 1.4i		Osborne et al., 2008
Mauritanie/ Avion		n \in [1.49 ; 1.56] k \in [0.1 ; 4.6]		McConnell et al., 2010
Cap Vert/sol	1.575 + 12.0i	1.577 + 7.0i	1.573 + 0.67i	Kandler et al., 2011
Cap Vert/ Avion	1.550 + 4.0i	1.55 + 3.0i	1.546 + 1.0i	Weinzierl et al., 2011

D'après MALAVELLE, (2011).

En résumé, bien que des améliorations significatives aient été faites en ce qui concerne l'évaluation de l'indice de réfraction des aérosols désertiques, le manque d'information à l'échelle régionale sur la composition chimique de ces aérosols limite encore l'estimation des impacts radiatifs de ces aérosols. Par conséquent, une description à échelle régionale des sources ainsi que de la composition des sols serait idéale (LAFON et al., 2006).

Des zones sources aux zones puits, les aérosols désertiques suit un cycle comportant plusieurs phases.

3. Cycle des aérosols désertiques ; de la formation de la matière érodable au dépôt des particules

Les aérosols désertiques obéissent à un cycle qui comporte trois phases distinctes, au cours desquelles ils sont en interaction avec leur environnement : le soulèvement depuis les zones source, le transport dans l'atmosphère et le dépôt (sec ou humide). Mais l'on doit comprendre que pour qu'il ait ce cycle il faut au préalable la formation du matériel érodable.

Au sortir de la lecture de plusieurs travaux abordant le cycle des aérosols désertiques, BOU KARAM (2008) est l'une des rares pour ne pas dire la seule auteure à avoir mentionné ce point (la formation de la matière érodable) et avoir avancé de façon détaillée les divers processus qui le conditionnent.

Selon elle, au-delà de l'existence de conditions météorologiques propices à l'érosion éolienne (ex. vents forts), la nature des sols joue un rôle important dans le processus de soulèvement d'aérosols désertiques, étant donné que ces particules résultent de l'action mécanique du vent sur le sol érodable.

Ainsi la disponibilité de matériel fin à la surface des sols est un facteur déterminant pour les émissions d'aérosols. Plusieurs facteurs géologiques, topologiques, biologiques et climatiques contribuent à la formation de particules fines à la surface des sols faisant intervenir divers processus (ROGNON et al., 1989) tels que :

- **L'érosion hydrique** (CALLOT, 1987) ; les particules fines issues de l'érosion hydrique sont souvent transportées sur de longues distances par les cours d'eau pour se déposer et s'accumuler dans les lacs et les fonds marins. Par exemple, les lacs asséchés du nord du Sahara résultant en des sols à très forte proportion de dépôts sédimentaires.

- **Les réactions chimiques** (LAURENT, 2005) ; sont prépondérants dans la plupart des régions humides, notamment en zone tropicale. Les processus chimiques impliqués mettent en jeu divers agents d'altération tels que l'eau, l'oxygène, les acides minéraux ou organiques. Il en résulte la formation de particules de plus en plus petites, généralement stables chimiquement par rapport à leur environnement local.

- **Les processus biologiques** (CHAMLEY, 1987), comme l'expansion des racines durant la croissance de la végétation au cours de périodes plus humides qui contribuent à la formation des

particules fines et au remaniement de la structure du sol par fragmentation mécanique des sédiments.

- *L'abrasion éolienne* (DIETRICH, 1977) ; l'impact de particules soulevées par le vent sur une surface est également une source potentielle de fines particules, qui redéposées conduisent à la formation des sols fins plus facilement érodables.

- *La désagrégation des roches* (MILLOT, 1964 ; GOUDIE et al., 1979 ; WELLMAN et WILSON, 1965 ; COOKE et WARREN, 1973), notamment dans les régions désertiques chaudes où des cristaux de sel se développent dans les interstices de la roche exerçant ainsi des pressions capables de la fissurer (GREELEY et IVERSEN, 1985).

Etant donné la nature des roches et minéraux communément présents dans les environnements terrestres, l'ensemble des processus d'altération conduit au final à la production de grains de quartz, de petites particules de mica (comme la muscovite), de minéraux argileux (comme la montmorillonite), de carbonates solubles, et d'oxydes de fer (GREELEY et IVERSEN, 1985 ; Laurent, 2005)

La plupart de ces processus génère des particules fines, de taille micronique, à partir de grains plus grossiers. Les particules fines ainsi formées seront par la suite soumises à différents phénomènes qui entraînent leur agrégation (PETTIJOHN, 1972 ; GREELEY et IVERSEN, 1985 ; RAJOT et al., 2003).

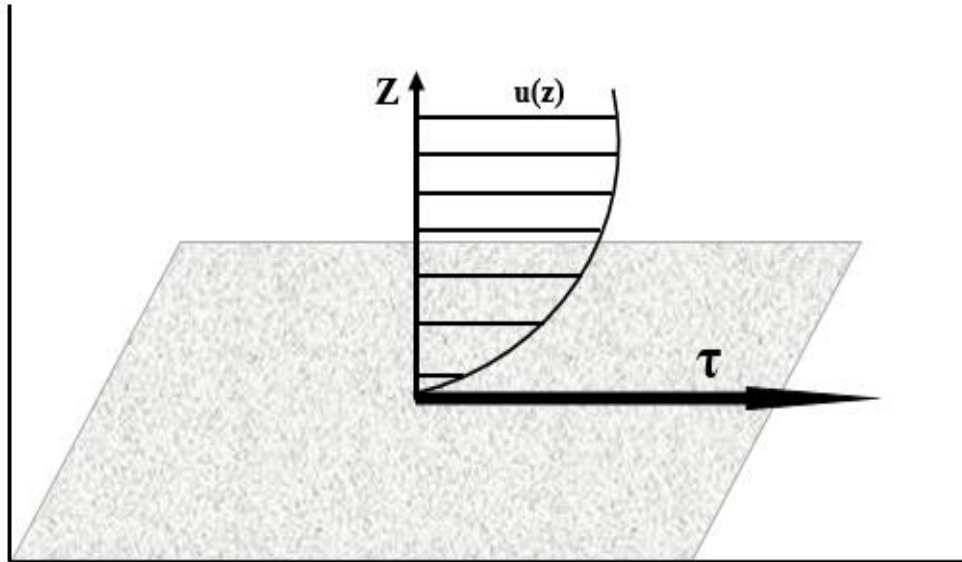
3.1. Mécanismes d'émission des aérosols désertiques

Les aérosols désertiques sont mis en suspension dans l'atmosphère par un processus mécanique d'arrachement au sol sous l'action de la force de frottement du vent. En effet, les régions sources d'aérosols minéraux sont les zones arides et semi-arides dont les sols sont constitués d'agrégats érodables (grains de sable) (PETITJOHN et al., 1972 ; GREELEY et IVERSEN, 1985). Les agrégats sont mis en mouvement sous l'action du vent qui exerce une contrainte de cisaillement à la surface au travers de force de frottement (τ) reliée au gradient de vent par la relation :

$$\tau = \mu_a \left(\frac{\partial U}{\partial Z} \right)$$

U : vitesse du vent, μ_a : coefficient de viscosité dynamique de l'air, Z : hauteur (m) au-dessus du sol

Figure 43 : Représentation de l'effet du sol sur l'écoulement de l'air et de la contrainte tangentielle T exercée par l'écoulement sur le sol (ALFARO, 1997)



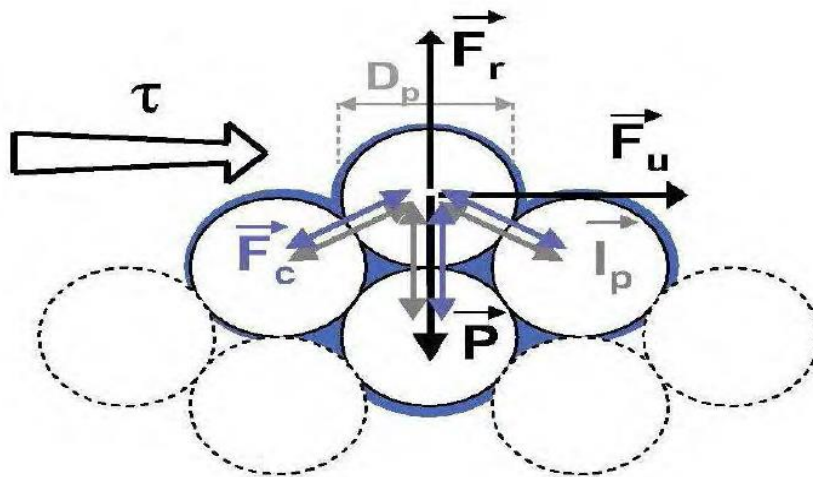
Le profil de vitesse du vent est représenté par différentes $U(z)$, composante horizontale de la vitesse du vent, en fonction de l'altitude z . (MOKHTARI³¹)

Cette force de frottement ($\vec{\tau}$) exercée par le vent tend à mettre en mouvement les grains de sable du sol. Le poids (\vec{P}), les forces de cohésions interparticulaires ($\vec{I}\rho$) (IVERSEN et WHITE, 1982) et les forces de tension capillaires (\vec{F}_{cap}) (McKENNA-NEUMA et NICKLING, 1989 ; FECAN et al., 1999 ; ISHIZUKA et al., 2005), quant à elles, s'opposent à la force de frottement et maintiennent les grains de sable au sol. Le bilan des forces est ainsi égal à :

$$\vec{\tau} = \vec{P} + \vec{I} + \vec{F}_{cap}$$

³¹ MOKHTARI M., 2012, *Amélioration de la prise en compte des aérosols terrigènes dans les modèles atmosphériques à moyenne échelle*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Discipline ou spécialité : Océan Atmosphère, E.D. : Sciences de l'Univers de l'Environnement et de l'Espace, Unité de recherche : CNRM-GAME U.R.A 1357, 185p.

Figure 44 : Bilan des forces auxquelles est soumis un grain de diamètre D_p sous la contrainte de cisaillement (T) :



Force générée par l'action mécanique du vent (F_u), poids de la particule (P), forces interparticulaires (I_p), forces capillaires (F_c), et force résultante (F_r) (LAURENT, 2005), reprise par MOKHTARI (2012)

Pour mettre les grains du sol en mouvement, il faut alors que s'exerce sur le sol, une force supérieure à la somme des forces de gravité, des forces de cohésion interparticulaire et des forces capillaires. Cela signifie que, pour chaque type de sol, il existe une vitesse de friction minimale, dite vitesse de friction seuil du vent qu'il est nécessaire de dépasser afin d'arracher la particule du sol.

Tableau 22 : Vitesse de friction seuil (en m/s) pour différents types de surface sec.

Nature du sol	Vitesse de frottement seuil ($m.s^{-1}$)
Dunes de sable fin à moyen (erg)	5-8
Région sableuse avec de petites zones caillouteuses	10
Matériaux fin, désert plat	10-13
Vallée alluviale et dépression saline croutée (chott)	15-18
Désert de caillou (reg)	20

Lorsque ces valeurs sont dépassées, les poussières s'arrachent du sol. La compilation est faite à partir du travail de BEUCHER et al., (2010), d'après BEGUE (2012)

, suivant la nature du sol (rugosité, granulométrie du sol, humidité), le seuil de vent moyen de surface nécessaire pour soulever les particules n'est pas le même (CHEPIL, 1951 ; GILLETTE et al., 1982). La vitesse seuil de soulèvement des aérosols désertiques est estimée entre 6 et $20m.s^{-1}$ suivant la nature du sol (CHOMETTE et al., 1999).

Les données expérimentales de BAGNOLD (1941) et CHEPIL (1951) indiquent que pour les gros grains, la vitesse de friction seuil du vent augmente quand la taille des agrégats augmente

du fait de la force de gravité. En parallèle, il a aussi été constaté une augmentation de la vitesse de friction seuil du vent quand la taille des grains diminue dans le cas des plus petits agrégats (du fait de la force de cohésion interparticulaire qui renforce le lien entre les agrégats) (IVERSEN et WHITE, 1982). Ces deux effets conduisent à une taille optimum de grain de sable ($\sim 80 \mu\text{m}$) pour laquelle la vitesse de friction seuil est la plus faible.

3.1.1. Les mouvements des particules mobilisées

Les particules arrachées du sol vont présenter différents mouvements, comme illustré sur la *figure 45*. Une fois soulevée, la particule est soumise à deux forces qui sont la force de gravitation et la résultante verticale des forces aérodynamiques. Dans le but de connaître si la particule arrachée du sol continuera son ascension ou retombera, il faut comparer la vitesse limite de chute de la particule dans l'air et la vitesse de friction.

Figure 45 : Mouvements des grains du sol sous l'action du vent (Illustration des phénomènes régissant la mobilisation d'une particule par le vent)

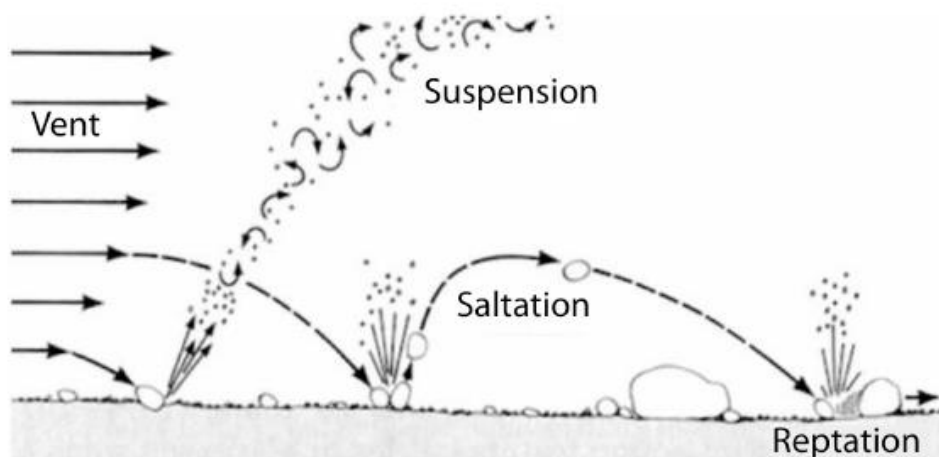


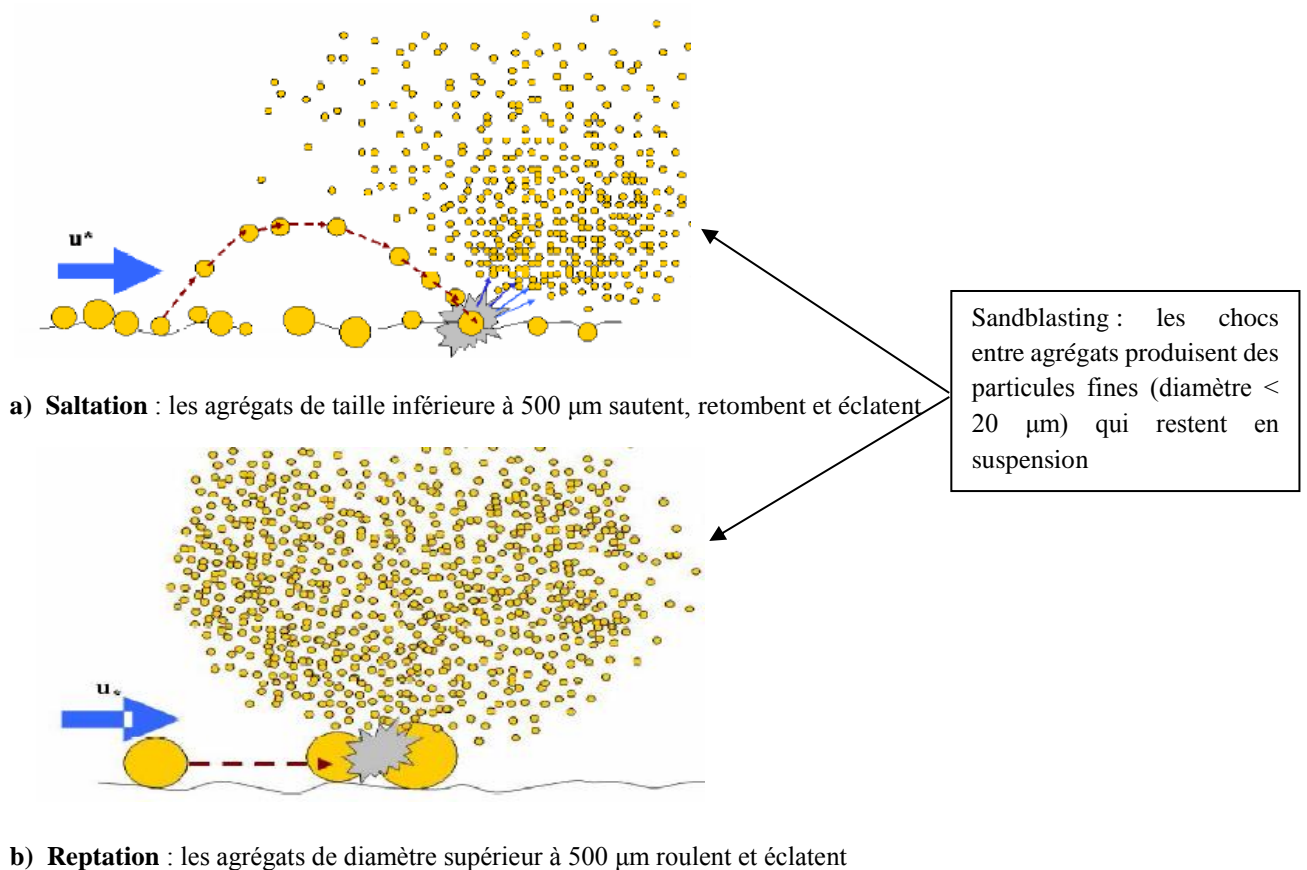
Figure adaptée de Schepanski (2008, d'après PEYRIDIEU (2010))

Dans le cas où la vitesse de friction est supérieure à la vitesse limite de chute de la particule, celle-ci est entraînée dans un mouvement ascendant appelé « suspension » (*figure 45*). Les particules entraînées en suspension sont les particules dont le diamètre est inférieur à $60 \mu\text{m}$ (HAMBLIN et CHRISTIANSEN, 2001). Pour les particules dont le diamètre est compris entre $20 \mu\text{m}$ et $60 \mu\text{m}$, la mise en suspension est relativement brève et les particules retombent assez près des zones sources. Lorsque le diamètre de la particule est inférieur à $20 \mu\text{m}$, le temps où la particule est en suspension, celle-ci pourra être transportée.

Dans le cas où la vitesse limite de chute de la particule est supérieure à la vitesse de friction, la particule est entraînée soit en reptation où soit en saltation (appelé aussi bombardement). Les

particules entraînées en saltation sont les particules dont le diamètre est compris entre 60 μm et 500 μm , alors que la reptation ne concerne que les particules dont le diamètre est supérieur à 500 μm (HAMBLIN et CHRISTIANSEN, 2001 ; SHAO et al., 2000). Ces deux modes de déplacement conduisent à un processus de libération de fines particules connu sous le nom de sandblasting (*figure 46*)

Figure 46 : Illustrations du processus de sandblasting dans le cas où la particule entraînée dans un mouvement de saltation et de reptation



D'après BOUET et al., (2007), reprise par BOU KARAM³² et BEGUE (2012)

Lorsque les particules sont entraînées en saltation, après soulèvement elles sont déplacées à quelques centimètres voire quelques mètres du sol (MARTICORENA et BERGAMETTI, 1995). Les plus grosses particules tombent rapidement, non loin de leur origine. Quand ces dernières frappent la surface, leur énergie cinétique est transférée à la surface. Ces grains de sable sont cassés si l'énergie fournie est supérieure à l'énergie des forces de cohésion qui maintiennent les particules d'aérosols désertiques liées en agrégats et provoque ainsi la libération de particule plus

³² BOU KARAM D. 2008. Mécanismes de soulèvement d'aérosols désertiques en Afrique de l'Ouest, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, E.D. Sciences de l'Environnement en Ile de France, 311p.

fine (*figure 46a*). Dans le cas de la reptation, les particules étant trop massives pour être soulevées roulent et éclatent par collision avec d'autres éléments présents à la surface, provoquant également la libération de particules plus fines (*figure 46b*). L'intensité de production des fines particules dépend du rapport entre le flux d'énergie cinétique transféré par les agrégats et les forces de cohésion des particules formant les agrégats. Du fait de leur faible taille, les fines particules libérées par sandblasting sont directement entraînées en suspension et constituent l'essentiel du flux vertical d'aérosols désertiques.

De nombreux travaux, théoriques et expérimentaux montrent que le flux horizontal de saltation est une fonction qui varie suivant la vitesse de friction du vent (BAGNOLD, 1941 ; CHEPIL, 1951 ; GILLETTE et GOODWIN, 1974). La vitesse de friction du vent est donc le paramètre clef pour la modélisation de l'érosion éolienne et des émissions de particules désertiques puisqu'il contrôle à la fois la fréquence et l'intensité des émissions d'aérosols désertiques. La vitesse de friction du vent est principalement fonction de la texture des sols (composition et la granulométrie des agrégats érodables dans les zones sources) (MARTICORENA et al., 1997 ; CALLOT et al., 2000 ; LAURENT et al., 2008), de la rugosité aérodynamique de l'ensemble de la surface et de la rugosité aérodynamique de la partie érodable de la surface, ainsi que de l'humidité du sol (FECAN et al., 1999).

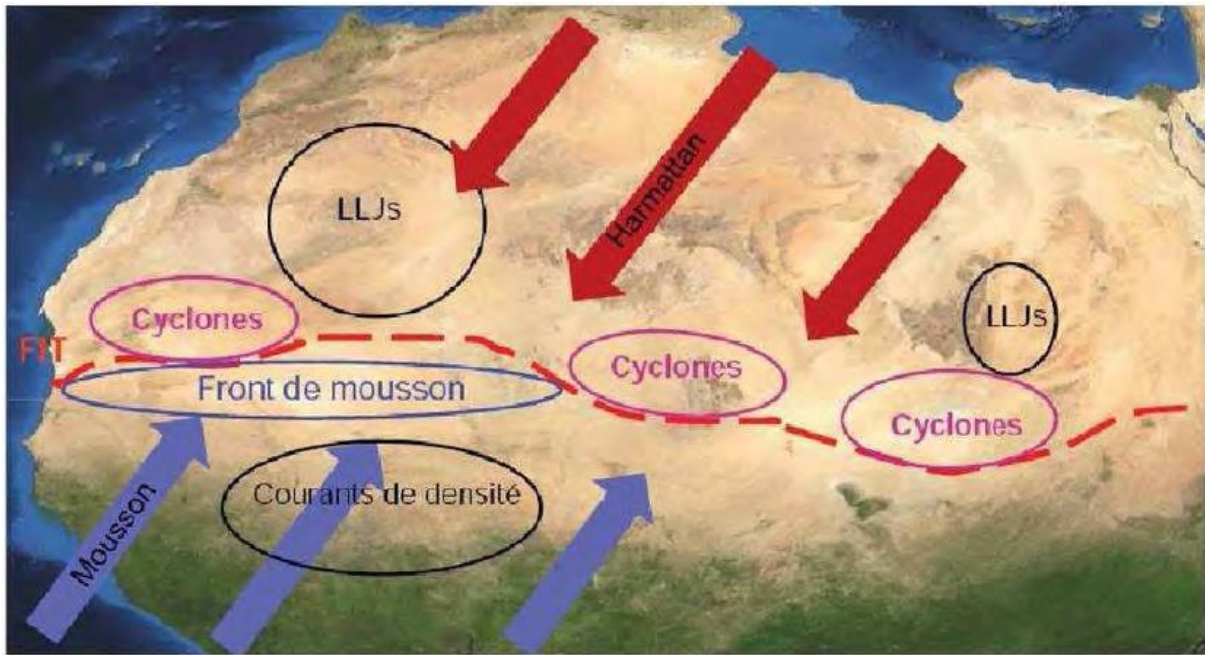
Le continent africain est propice au soulèvement de poussière désertique du fait des conditions favorables réunies : à savoir de nombreuses zones sources (PROSPERO et al., 2002 ; CAQUINEAU et al., 2002 ; WASHINGTON et al., 2003 ; ENGELSTAEDTER et al., 2006 ; SCHEPANSKI et al., 2007), associées à des phénomènes météorologiques et dynamiques qui génèrent les rafales de petites échelles permettant d'atteindre le seuil d'érosion (ENGELSTAEDTER et WASHINGTON, 2007).

3.1.2. Phénomènes dynamiques et Processus météorologiques responsables du soulèvement des poussières désertiques en Afrique de l'Ouest

Les émissions de poussières désertiques en Afrique de l'Ouest sont régies par un certain nombre de processus météorologiques et dynamiques liés à cette région. BEGUE³³ résume ces mécanismes en quatre processus : le contexte dynamique, les jets de basses couches, les activités cycloniques et l'activité convective (courants de densité associés à la convection humide) (*figure 47*).

Figure 47 : Localisation des principaux processus météorologiques entraînant le soulèvement d'aérosols

³³ Op.cit.



(Voir le texte pour les détails). Adapté de BOU KARAM (2008), d'après MOKHTARI (2012)

3.1.2.1. Le contexte dynamique

Les émissions d'aérosols désertiques depuis les zones sources nord africaines sont la conséquence d'un certain nombre de processus météorologiques et dynamiques propres au climat africain. En basses couches, on peut identifier les principaux acteurs responsables du transport des particules d'aérosols :

Durant la saison humide, le flux d'Harmattan (vent sec et très turbulent dans les basses couches, peut aller jusqu'à 5 km d'épaisseur et est très chargé en aérosols désertiques) et le flux de mousson (relativement plus froid que l'Harmattan, plus chargée en humidité par l'océan et d'épaisseur $\leq 2\text{km}$) créent deux couches différentes d'un point de vue thermodynamique qui sont : la couche de mousson et la couche d'air Saharienne (SAL) (CARLSON et PROSPERO, 1972). Lorsque le flux d'Harmattan rencontre le flux de mousson, il est moins dense et passe au-dessus favorisant le transport en altitude des aérosols désertiques qui peuvent être ensuite transportés horizontalement sur de longue distance. De plus, durant cette période, lorsque le flux de mousson s'installe sur les terres, le FIT balaye de nombreuses zones sources d'aérosols désertiques (BOU KARAM et al., 2009 ; PROSPERO et al., 2002 ; SCHPANSKI et al., 2007) ce qui favorise un transport efficace de ces aérosols désertiques au-dessus de la couche limite du fait des forts phénomènes turbulents qui se produisent à proximité du FIT (BOU KARAM, 2008). En saison sèche, les aérosols désertiques sont, durant le transport transatlantique généralement plus bas en altitude (4 km) du fait que la SAL ne chevauche pas le flux mousson, comme c'est le cas en

saison humide (BEGUE, 2012). En parallèle, d'autres processus dynamiques se produisent favorisant le transport des aérosols désertiques.

3.1.2.2. Les jets de basses couches

Les jets de basses couches constituent un mécanisme très efficace pour l'émission d'aérosols désertiques depuis les zones sources nord africaines. En effet, 65% de l'activation des zones sources de l'Afrique du Nord est associé aux jets de basses couches (SHEPANSKI et al., 2009). Les jets de basses couches se présentent ainsi comme le mécanisme de soulèvement dominant de la région nord-africaine (KNIPPERTZ et al., 2008 ; Todd et al., 2008). Ces jets de basses couches sont caractérisés par des maximums de vitesses de vent de surface de l'ordre de 20m.s^{-1} (BANTA et al., 2006 ; BEUCHER et al., 2010). Les jets de basses couches se forment au-dessus de l'Afrique du Nord tout au long de l'année, avec néanmoins une fréquence d'occurrence qui est plus importante en hiver qu'en été. De plus, la fréquence d'occurrence et l'intensité des jets de basses couches sont accentuées par l'orographie, comme c'est le cas au-dessus de la dépression de Bodélé.

Le couplage entre les émissions d'aérosols désertiques et la dynamique des jets de basses couches est bien illustré par les soulèvements d'aérosols dans la région de Bodélé au Tchad (PROSPERO et al., 2002 ; TODD et al., 2008 ; WASHINGTON et al., 2003). La campagne BoDEx (Bodélé Dust Experiment) a permis de mettre en évidence à partir des observations directes que les jets de basses couches constituent les principaux générateurs des vents intenses à la surface, responsables des soulèvements d'aérosols dans cette région. Ainsi les mesures de vent à Chicha (Tchad) ont montré un jet de basse couche à 960 hPa associé à des vents de 16 m.s^{-1} (TODD et al., 2008).

3.1.2.3. Les activités cycloniques

Les différences de températures entre le continent nord-africain et la méditerranée favorise la formation de systèmes cycloniques au-dessus du Sahara (ALPERT et ZIV, 1989 ; TRIGO et al., 2002). Ces cyclones sont connus sous le nom de cyclone Sharav ou encore dépression de Khamsin. La fréquence d'occurrence de ces cyclones Sharav est particulièrement importante à l'est et au sud des montagnes de l'Atlas marocain durant le printemps (BARKAN et al., 2005 ; SHEPANSKI et al., 2009). Ainsi, en plus du rôle du gradient de température, celui de l'orographie est également important dans la formation des cyclones Sharav au printemps. Les cyclones Sharav se déplacent à des vitesses supérieures à 10 m.s^{-1} vers l'est en longeant les côtes de l'Afrique du Nord (ALPERT et ZIV, 1989 ; ALPERT et al., 1990 ; BARKAN et al., 2005).

L'activation des zones sources d'aérosols par la dynamique des cyclones Sharav peut se produire à n'importe quel moment de la journée (THORNCROFT et FLOCAS, 1997 ; ALPERT et ZIV, 1989 ; PREZERAKOS et al., 1990 ; DAYAN et al., 1990). Plus récemment, BOU KARAM et al., (2009) ont notifié la formation de systèmes cycloniques au sud des massifs de l'Hoggar et l'Air au-dessus du Sahel durant la période de mousson. La formation de ces cyclones Sahéliens est due à des effets dynamiques faisant intervenir le cisaillement horizontal caractérisant le FIT renforcé par la présence de jets de basses couches induit par le blocage orographique des masses d'air froides en provenance de la méditerranée. Les forts vents de surface associés à la dynamique de ces cyclones sont capables d'initier de soulèvement d'aérosols au-dessus de la région du Sahel et de favoriser le mélange vertical des aérosols soulevés (BOU KARAM et al., 2009).

3.1.2.4. L'activité convective

Aux environs de la mi-mai, au début de l'été, la ZCIT, jusque-là située en dessous de 10°N, remonte. Les vents changent et soufflent alors de l'océan vers le continent, apportant ainsi un air chargé en humidité au-dessus des terres. Ceci conduit à la formation de systèmes convectifs de méso-échelle (Mesoscale Convective System, MCS), qui se présentent sous forme d'amas nuageux ou de ligne de grain. Les rafales de vent d'air humide et froid associés à la dynamique de ces systèmes convectifs produit au-dessus du Sahel peuvent atteindre des vitesses moyennes de 25 m.s⁻¹. Les courants de densité émanant de ces systèmes convectifs peuvent se propager sur des centaines de kilomètres et atteindre le Sahara (FLAMANT et al., 2009).

Le soulèvement d'aérosols associés à la dynamique de ces systèmes convectifs est connu sous le nom de « Haboob » (FLAMANT et al., 2007). Les haboobs s'observent sur de petites distances (entre 100 et 150 km) mais elles sont très impressionnantes car elles ressemblent à de véritables murs de poussières (*figure 48*). Etant donné que les phénomènes convectifs sont associés à de la forte turbulence, les haboobs peuvent atteindre des épaisseurs de 1500 à 2000 mètres avec des records à 5000 mètres (BEUCHER et al., 2010). L'occurrence des haboobs est liée à la dynamique de la convection humide. Par ailleurs, ces systèmes convectifs humides contribuent très significativement à la mise en suspension d'aérosols désertiques (FLAMANT et al., 2009). De plus, par transport convectif, les aérosols désertiques peuvent être transportés à des altitudes élevées (TULET et al., 2010).

Figure 48 : Images d'un soulèvement d'aérosols désertiques associé à la convection humide (Haboob)



3.2. Transport de particules d'aérosols désertiques

Une fois la particule injectée dans l'atmosphère, les forces auxquelles elle est soumise vont contrôler sa suspension. KOCHA³⁴ affirme quelque chose d'important à cet égard. Il souligne en effet qu'une fois les poussières désertiques soulevées, elles peuvent rester en suspension dans l'atmosphère bien que les vents de surface puissent retomber en dessous de la valeur seuil nécessaire à leur soulèvement.

On admet généralement qu'au vu du bilan des forces, seules les particules ayant un diamètre inférieur à environ 20 μm peuvent être transportées. Ce sont ces fines particules qui constituent l'essentiel du flux vertical d'aérosols désertiques (NICKLING, 1994).

Un flux horizontal de particules est présent dès le début du processus de soulèvement. MOKHTARI³⁵ soutient que si ce flux présente un caractère laminaire, les particules forment une couche de poussière localisée près de la surface. Si elles sont soumises à l'action de mécanismes turbulents, les particules fines issues de la corrasion (sandblasting), plus légères, sont plus efficacement élevées dans les couches supérieures de l'atmosphère et peuvent être transportées sur de longues distances. Il note que ces mécanismes peuvent être d'origine thermique

³⁴ KOCHA C., 2011. *Interactions entre poussières désertiques et convection profonde en Afrique de l'Ouest : observation et modélisation à échelle convective*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Ecole doctorale : S.D.U.2, Unité de recherche : CNRM-GAME (URA 1357) CNRS/Météo-France, 204p.

³⁵ Op. Cit.

(mouvements convectifs) ou d'origine dynamique (liés aux conditions météorologiques ou aux influences orographiques) et affirme que le transport des aérosols désertiques émis depuis la région saharienne dépend évidemment de la circulation atmosphérique et notamment des hautes pressions tropicales, comme l'anticyclone des Açores, et de la zone de convergence intertropicale (ZCIT).

Le transport des particules par les vents se produit en fonction donc des conditions météorologiques. En cet effet TEGEN et LACIS (1996), MAHOWALD et al. (1999), GINOUX et al. (2001) soutiennent que dans la couche limite, le transport des particules est géré par la turbulence, les brises thermiques, les limites frontales, etc. Ainsi, les aérosols peuvent être transportés dans l'atmosphère sur de grandes distances pendant quelques heures jusqu'à une dizaine de jours suivant les phénomènes météorologiques qu'ils rencontrent.

Les aérosols désertiques émis depuis les sources nord africaines sont principalement transportés vers trois régions : *la région Transatlantique, la région Méditerranéenne-Européenne et la région du Moyen Orient*. (Voire la partie *Principales trajectoires du transport d'aérosol désertique*)

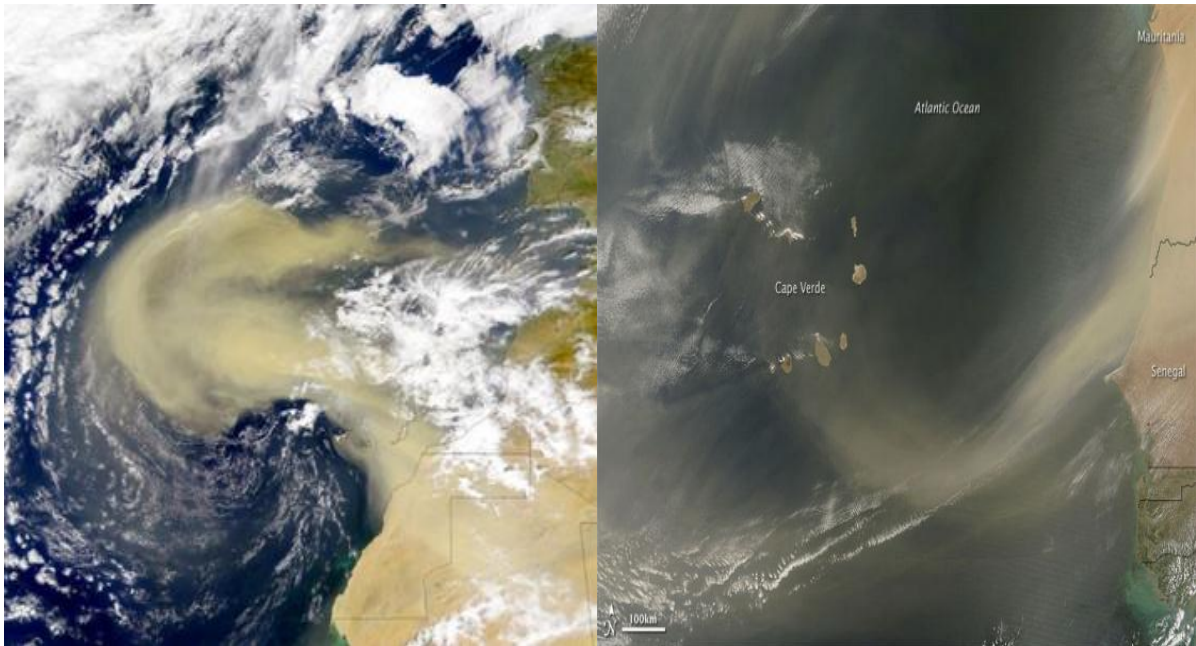
3.2.1. Transport longue distance de l'aérosol désertique nord-africain

D'après LAFON³⁶, de très longue date, le transport à longue distance des poussières terrigènes dans l'atmosphère a fait l'objet de diverses observations scientifiques. Le premier exemple qu'elle donne est celui de DOBSON qui a mentionné en 1781 la baisse de visibilité due aux poussières apportées par l'Harmattan dans la région du Cap-Vert. Le second est de DARWIN qui, de même en 1846 constate la présence de poussières d'une couleur brun rougeâtre dans l'atmosphère au large de la côte ouest de l'Afrique. Depuis nous dit-elle, les processus ont été étudiés de manière plus approfondie, en particulier du point de vue de la contribution des poussières transportées (puis déposées) aux grands cycles géochimiques de divers éléments ainsi qu'au système climatique global. PROSPERO et NEES (1977) ont pu mettre en évidence et quantifier, grâce à une étude sur quinze années, l'apport des aérosols africains à la Barbade (concentration maximum, en moyenne mensuelle de 15 à 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), montrant ainsi que ces poussières sont susceptibles de traverser tout l'océan Atlantique. Cet apport a également été constaté dans d'autres stations, notamment par PROSPERO et al. (1981) à Cayenne, à des concentrations maximales (en moyennes mensuelles) de 23 à 29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

³⁶ Op.cit.

Les tempêtes de poussières transportent donc les particules sur des milliers de kilomètres. Il est possible d'observer des panaches de 500 à 600 km de large sur 2 500 km de long (PEWE, 1981). Les observations par satellites permettent de visualiser très nettement ces panaches, en particulier au-dessus des océans, comme sur l'image SeaWIFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) de l'Atlantique au large de l'Afrique du 26 février 2000.

Figure 49 : Panaches de poussière au large de l'Afrique



(À gauche) : Image satellite SeaWIFS, datant du 26 février 2000

(<http://seawifs.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS.html>), (à droite) : image de la NASA du 22 juin 2009

Pour plus de détail sur ce transport longue distance, voire la partie *Principales trajectoires du transport de particules*.

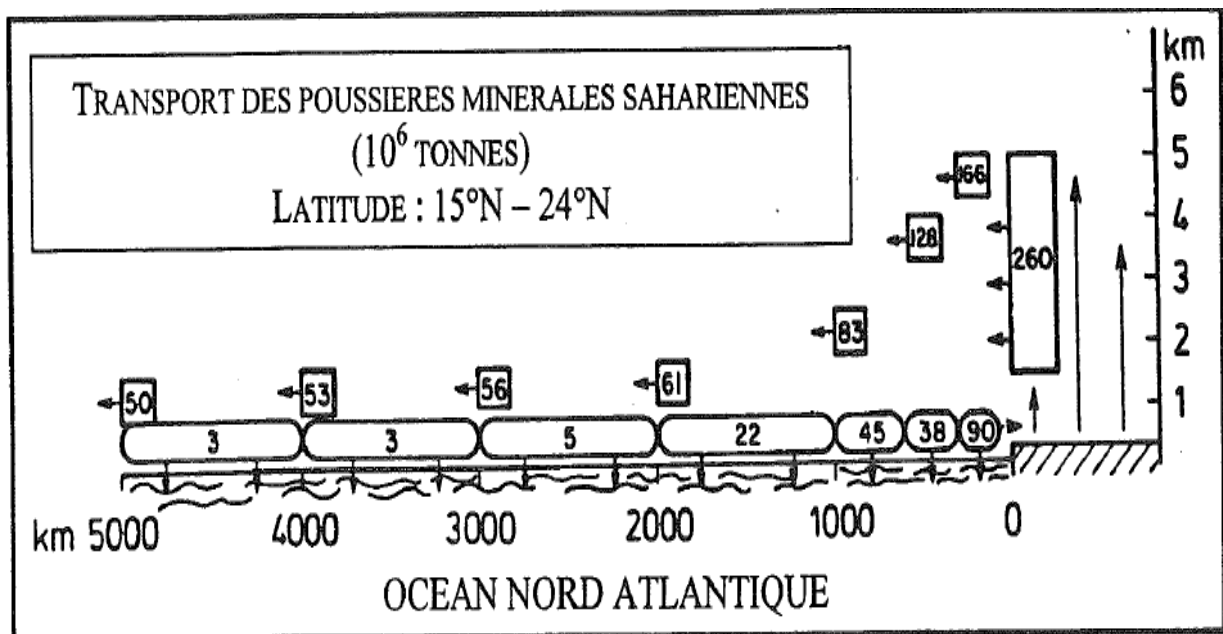
3.2.2. Evolution physico-chimique des aérosols désertiques au cours du transport

Au cours de leur séjour dans l'atmosphère, les poussières minérales sont soumises à divers processus physiques et chimiques, ce qui peut impliquer l'évolution des propriétés des aérosols.

En premier lieu, les phénomènes de sédimentation sont responsables, en plus de la diminution des concentrations en aérosols au cours du transport, d'une évolution de leurs propriétés physico-chimiques. En effets, ce phénomène granulo-sélectif implique que les plus grosses particules sédimentent plus rapidement que les fines, ce qui amène tout d'abord à une variation des distributions granulométriques (JUNGE, 1979 ; SCHÜTZ, 1980). SCHUETZ (1989) constate que la masse ainsi que la taille des particules d'un aérosol minéral transporté à 1 000-2 000 km de sa source sont radicalement différentes de celles de départ. La plupart des particules de taille

supérieure à 5 ou 10 μm ne se trouvent alors plus dans l'atmosphère. GLACCUM et PROSPERO (1980) constatent également une évolution du diamètre des particules constituant le mode fin qui peut diminuer de 6 à 2 μm entre le Cap-Vert, situé à 500 km des sources, et la Barbade, située à 5 000 km des sources. OZER³⁷ nous apprend que sur base des résultats obtenus par les différentes recherches et d'observations personnelles, JAENICKE (1979) et SCHÜTZ et al. (1981) ont élaboré un modèle estimant le transport de particules minérales des côtes de l'Afrique de l'Ouest vers les Antilles. Les auteurs estiment à 260 10^6 tonnes la production annuelle de poussières. La majeure partie des particules ($\approx 70\%$) sédimentent dans les mille premiers kilomètres. Au-delà de cette distance, les variations sont légères. Approximativement 50 10^6 tonnes atteignent la Barbade. La *figure 50* constitue ce modèle élaboré par JAENICKE (1979) et SCHÜTZ et al. (1981) et permet de visualiser la diminution de la masse au cours du transport.

Figure 50 : Budget annuel de poussières transportées depuis les côtes de l'Afrique de l'Ouest (0 km) vers les Barbade (4500 km)



D'après SCHÜTZ et al. (1981) cité par OZER (2001)

En ce qui concerne l'évolution de la taille des particules, LAFON (2004) remarque que près des sources (« poussières au-dessus du désert »), la répartition massique des poussières atmosphériques en fonction de leur taille est similaire à celle du sable saharien, et que, plus on s'éloigne de la source, plus cette répartition se déplace vers les petites tailles. Cependant relativise

³⁷ OZER P., 2001. *Les Lithométéores en région sahélienne, un indicateur climatique de la désertification*, GEO-ECO-TROP, Revue internationale d'Ecologie et de Géographie tropicales, vol. 24, 327p.

LAFON, certains auteurs mentionnent la présence de grosses particules même après un transport longue distance.

La composition des aérosols est également amenée à changer au cours de leur transport, à la suite de leur mise en contact avec les autres composantes de l'atmosphère. Parmi les divers processus impliqués dans ces transformations on peut mentionner ceux qui résultent de l'interaction avec les autres espèces d'aérosols. ANDREAE et al. (1986) mentionnent la formation d'agglomérats de petites particules avec des sels marins (ce qui influence non seulement leur composition chimique mais aussi leur taille et donc le flux vertical de dépôt). Sous le même registre TROCHKINE et al. (2003) déterminent que 40 à 50% des particules minérales se mélangent de manière interne avec des sulfates au cours de leur trajet troposphérique entre la Chine et le Japon.

Par ailleurs, LAFON (2004) affirme que peuvent avoir lieu des transformations chimiques liées à l'intégration des particules aux gouttelettes nuageuses, qu'elles aient servi de noyaux de condensation ou qu'elles aient été capturées par les gouttelettes. En cet effet ANDERSON et al. (1996) soutiennent que certains composés minéraux peuvent alors être dissous dans les eaux atmosphériques et reprécipiter en un film continu en surface des particules au gré des cycles d'évapo-condensation des nuages, ou bien encore réagir en phase liquide avec les autres espèces atmosphériques aqueuses.

Enfin, des réactions chimiques hétérogènes ont lieu avec les gaz atmosphériques qui peuvent aussi être adsorbés en surface des particules et y constituer un enrobage (une enveloppe). PARUNGO et al. (1993) constatent par exemple que dans des masses d'air issues du nord de la Russie, chargées en poussières minérales, la moitié de ces particules sont enrobées de sulfates.

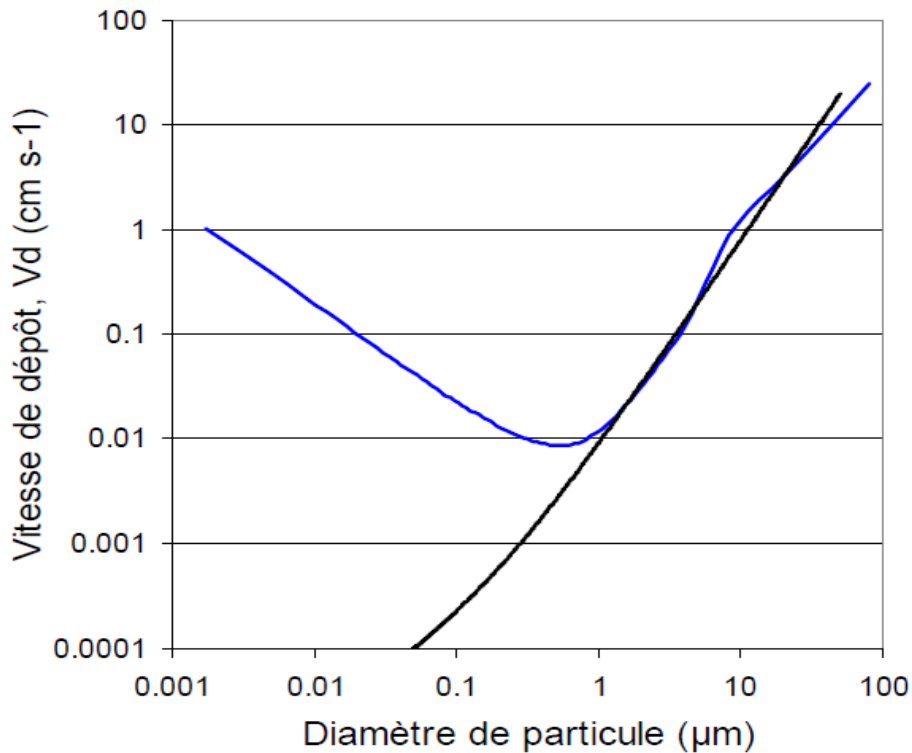
3.3. Phases de dépôt de particules d'aérosols désertiques

Le cycle de l'aérosol désertique s'achève par le dépôt des particules au niveau des continents ou des surfaces océaniques, en conditions d'atmosphère sèche ou humide. Au bout d'un certain temps passé dans l'atmosphère, l'aérosol désertique est ramené au sol par l'un des mécanismes de dépôt (sec ou humide) et peut ainsi intervenir dans l'écosystème des zones de dépôt appelées *zones puits*.

- *Le dépôt sec* est le processus qui aboutit aux retombées des aérosols au sol par sédimentation ou impaction. Ce processus de dépôt sec se réalise sous l'action de la gravitation ou par capture sur les reliefs et la végétation. La vitesse de sédimentation dépend de la densité et de la taille de

la particule et de la viscosité de l'air. VINCENT³⁸ ajoute à ceux-là la hauteur de la couche de mélange. La **figure 51** présente la vitesse de dépôt (V_d) des aérosols de diamètre compris entre 0,001 et 100 μm .

Figure 51 : Vitesse de dépôt sec calculée en fonction de la taille de particules (courbe bleue) selon le modèle de Slinn et Slinn (1981) comparée à la vitesse de sédimentation (courbe noire)

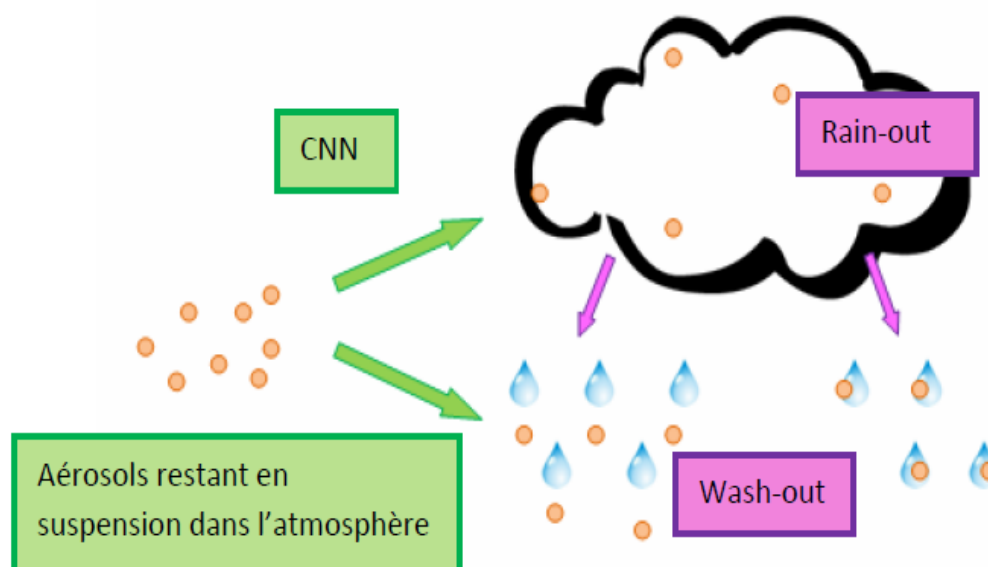


Source : VINCENT (2012)

- **Le dépôt humide** apparaît quand les masses d'air poussiéreuses se mélangent par convection avec les masses d'air humides ou nuageuses. Deux phénomènes peuvent intervenir : le premier est si elles ont été incorporées aux gouttelettes nuageuses (en leur servant de noyaux de condensation ou en entrant en contact avec elles), les particules sont ramées à la surface au moment de la précipitation de ces gouttelettes (phénomène de « rain-out ») ; le second est que les particules peuvent être directement entraînées par la pluie par lessivage quand elles se trouvent sur le passage des gouttelettes précipitantes (phénomène de « wash-out »). La vitesse de dépôt humide dépend du taux de précipitations, de la vitesse de chute des gouttelettes, etc. Les processus de dépôt humide sont schématisés à la **figure 52**.

³⁸ VINCENT J., 2012. *Evaluation du dépôt atmosphérique de poussières sahariennes en Méditerranée occidentale : approche expérimentale et modélisation*, Rapport de Stage, Master Sciences et Génie de l'Environnement, Spécialité Atmosphères et Qualité de l'Air (AQA), Laboratoire Inter-universitaire des Systèmes Atmosphériques, 37p.

Figure 52 : Schéma des processus de dépôt humide : « Rain-out » et « Wash-out »



Selon leur taille, les particules ayant un diamètre entre $0.1 \mu\text{m}$ et $1 \mu\text{m}$ ont les vitesses de dépôt par sédimentation les plus faibles, et elles seront donc majoritairement déposées par voie humide. Au-delà de $1 \mu\text{m}$, les vitesses de sédimentation deviennent importantes, donc ces particules seront déposées par voie sèche. Les plus grosses particules, de diamètre supérieur à $20 \mu\text{m}$ se déposent rapidement après leur émission par sédimentation, à proximité des zones sources.

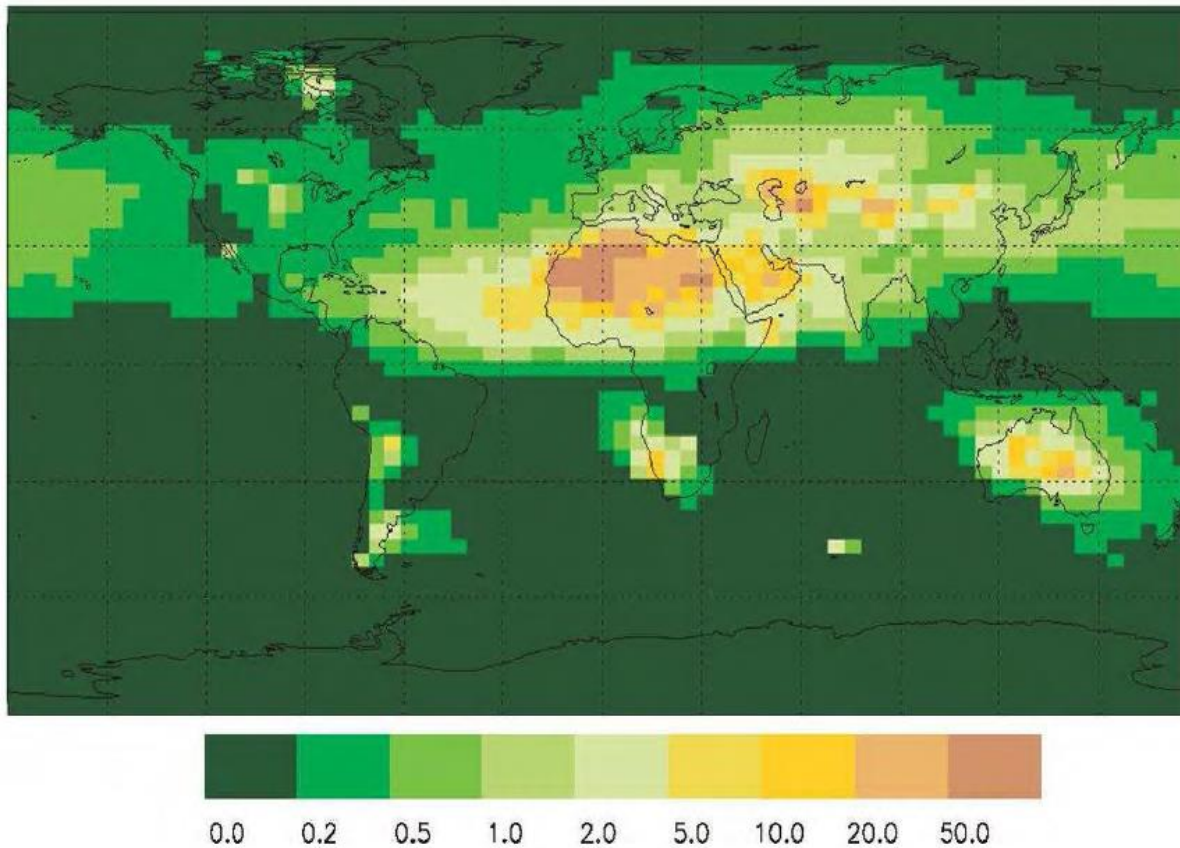
Les zones puits de particules minérales sont difficiles à cerner précisément, car le processus de dépôt intéresse une aire très vaste, si on tient compte du temps, de la distance et de la direction du transport, extrêmement variables. Cette variabilité est fonction des caractéristiques des particules (dimensions, nature physico-chimique), des conditions atmosphériques, de la situation météorologique et de l'environnement orographique. Néanmoins PEYRIDIEU³⁹ retient comme régions de dépôt préférentiel le voisinage des zones sources pour le dépôt des grosses particules, les forêts équatoriales, les zones de mousson pour le dépôt humide et les océans.

D'après SCHEPANSKI et al. (2009) ; LUO et al. (2003) ; GINOUX et al. (2001) des modèles globaux permettent d'estimer le taux de dépôt des particules. Différentes études estiment ce taux entre 180 et 260 millions de tonnes par an, pour le bassin Atlantique Nord (MAHOWALD et al., 2005). À partir d'observations spatiales, KAUFMAN et al. (2005) ont identifié les principaux

³⁹ PEYRIDIEU S., 2010. *Établissement d'une climatologie des propriétés des aérosols de poussières à partir d'observations hyperspectrales dans l'infrarouge. Application aux instruments AIRS et IASI*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, UFR 132 Terre, Environnement, Biodiversité, E.D. des Sciences de l'Environnement d'Ile de France, Spécialité : Méthodes Physiques en Tédétection, 240p.

puits de poussières provenant du Sahara et quantifié les flux en fonction de leur zone de dépôt : sur les 240 ± 80 Tg [Tg : Téra-gramme ($\text{Téra} = 10^{12}$)] de poussières émises annuellement depuis l'Afrique (entre 20°S et 30°N), 20 ± 10 Tg reviennent vers l'Afrique ou l'Europe, 140 ± 40 Tg sont déposées dans l'océan Atlantique, 50 ± 15 Tg sont déposées dans le bassin Amazonien et 50 ± 25 Tg arrivent aux Caraïbes. La **figure 53** montre les moyennes annuelles du flux de dépôt des poussières désertiques simulées par TEGEN et al., (2002).

Figure 53 : Moyenne annuelle du flux de dépôt ($\text{g}/\text{m}^2/\text{an}$) pour la période 1987-1990

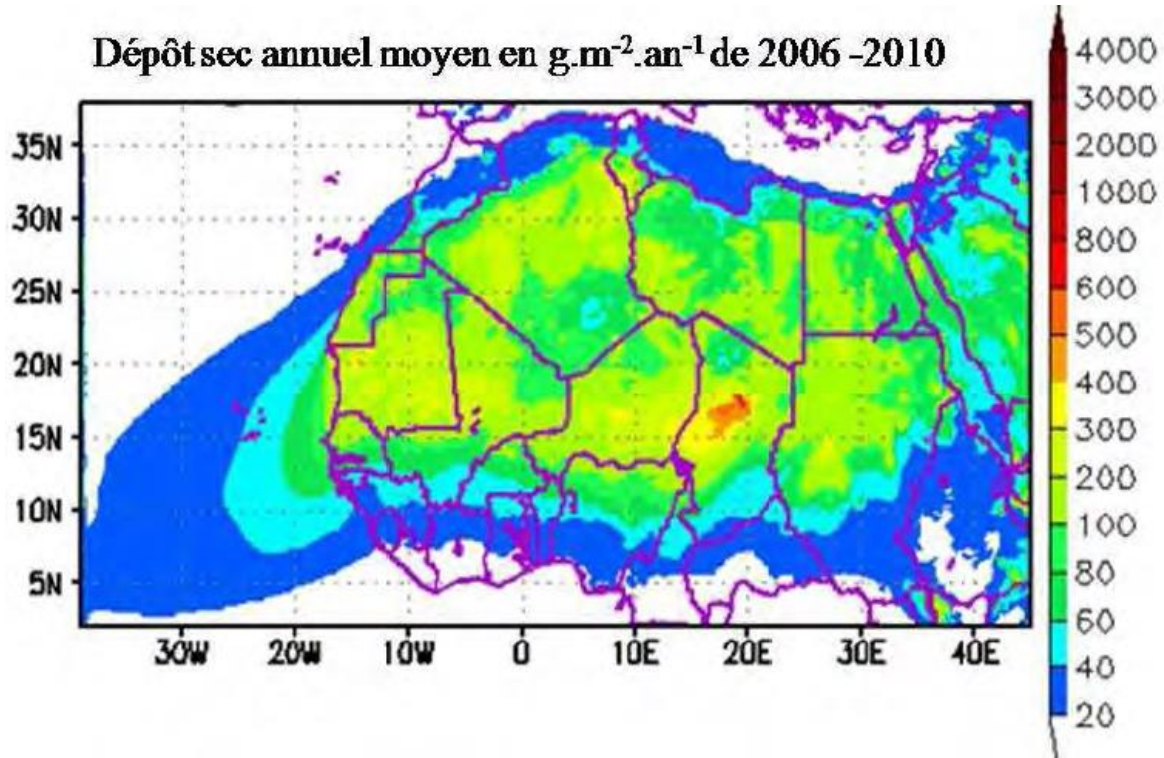


Source : (TEGEN et al., 2002)

Plus récemment MOKHTARI (2012) a calculé le dépôt sec annuel des poussières désertiques pour l'Afrique au nord de l'Equateur (**figure 54**). Il constate que les zones de dépôt sec des poussières désertiques sont localisées près des régions sources d'émissions, car l'essentiel de la masse émise est situé dans le mode grossier qui sédimente rapidement. À titre d'exemple la région de Bodélé où les dépôts secs massiques sont les plus intenses ($400\text{-}800 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$), soit la moitié des émissions annuelles de cette région. Suivent des zones dont le dépôt varie entre $100\text{-}300 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ les Ergs situés au centre de la Mauritanie, du Mali, du Niger, le grand Erg occidental et oriental en Algérie, le centre ouest du Soudan, le sud-ouest de l'Égypte et en Libye.

Il note aussi l'extension des zones de dépôt sec vers le sud jusqu'au Golfe de Guinée, vers l'ouest sur l'Océan Atlantique et vers le nord en Méditerranée.

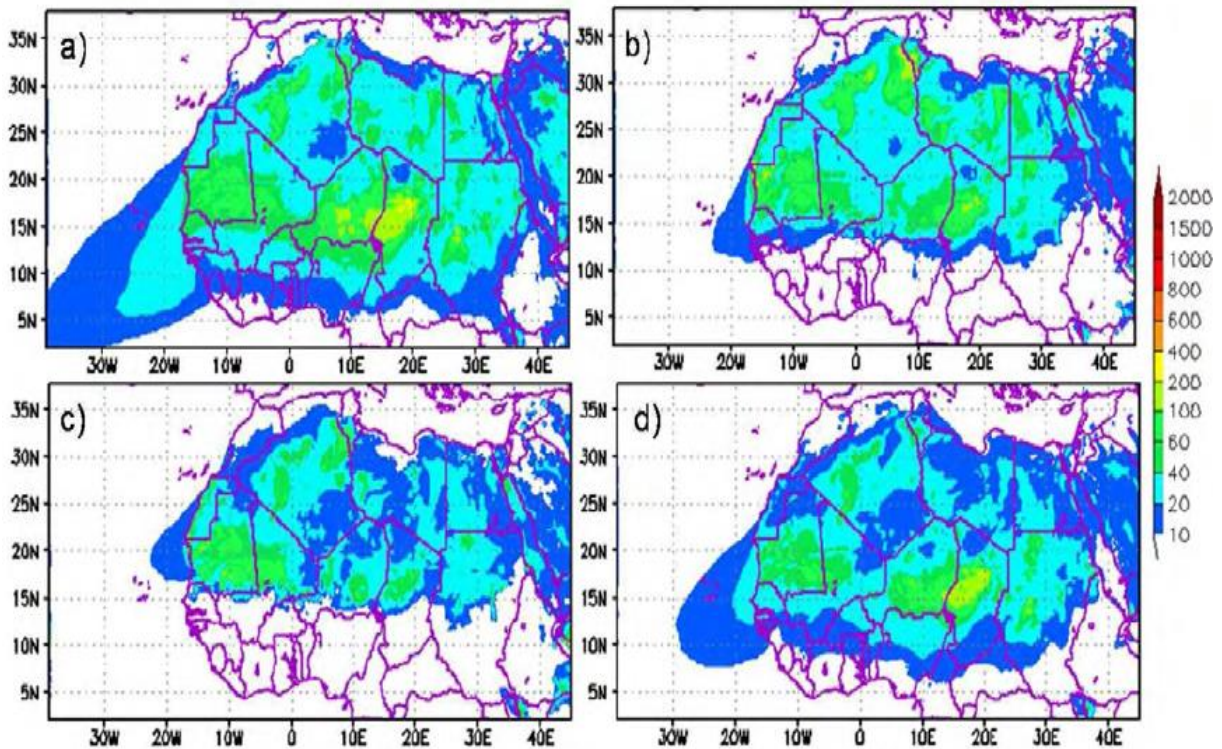
Figure 54 : Dépôt sec annuel des poussières désertiques simulé par ALADIN ($\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) moyenné sur la période 2006-2010 sur l'Afrique au Nord de l'Equateur



Source : MOKHTARI (2012)

Il a ensuite calculé le dépôt sec saisonnier des poussières désertiques (*figure 55*). En termes d'extension, il remarque qu'en hiver (*figure 55a*), l'étendue de la zone de dépôt sec est très importante. Plus de $10 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ est simulé depuis 5°N jusqu'à 35°N de latitude nord et vers l'ouest, jusqu'aux côtes sénégalaises et mauritaniennes, direction privilégiée du transport des poussières en cette saison. En été (*Figure 55c*), il observe que la limite sud de la zone de dépôt sec supérieur à $10 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ est située plus au nord (15°N), en lien avec la mise en place de la mousson (*Figure 55b*). En effet, au sud, en raison de lessivage associé aux systèmes convectifs en cette période, note MOKHTARI (2012), les poussières désertiques ont peu de chance à dépasser ces limites. En automne (*Figure 55d*) conclut-il, avec le recul progressif de FIT vers le sud et l'atténuation des précipitations, les poussières désertiques déposées par voie sèche ont tendance à poursuivre ce mécanisme.

Figure 55 : Dépôt sec saisonnier des poussières désertiques simulé par ALADIN ($\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) moyenné sur la période 2006-2010 sur l'Afrique au nord de l'Equateur

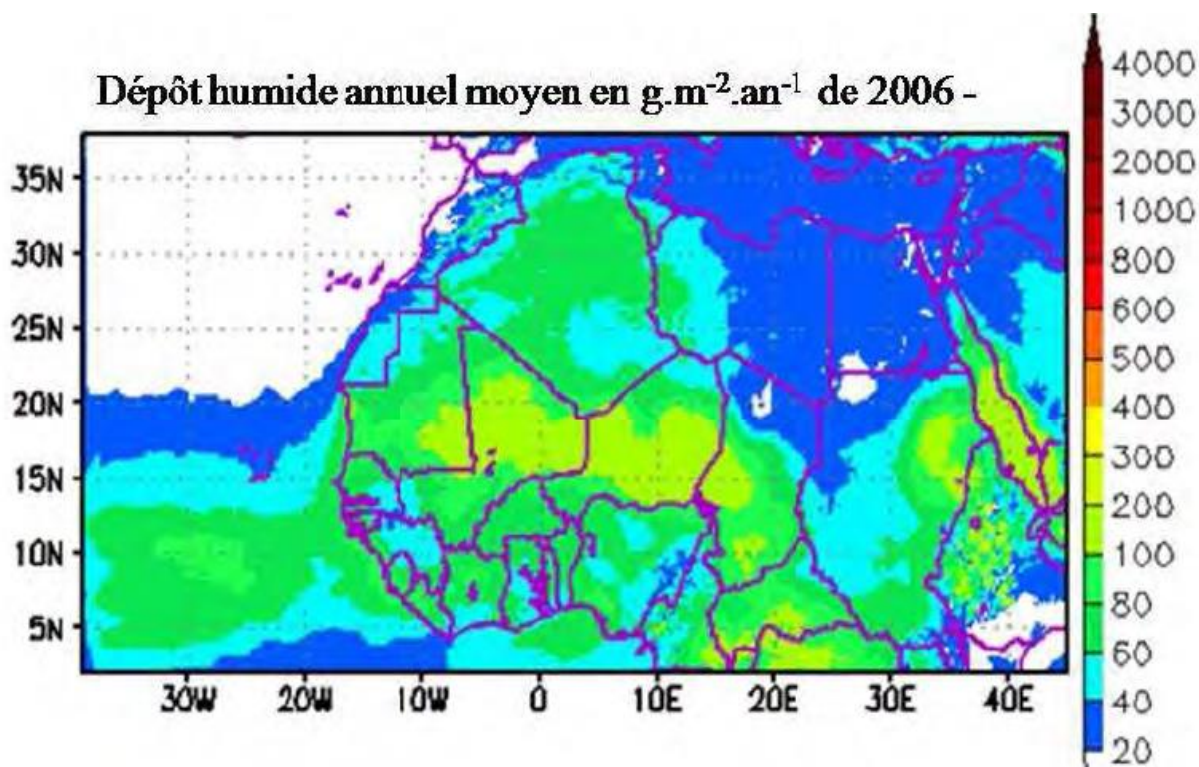


a) janvier-février-mars, b) avril-mai-juin, c) juillet-aout-septembre, d) octobre-novembre-décembre.

D'après MOKHTARI (2012)

Pour le dépôt humide des poussières désertiques en Afrique au nord de l'Equateur, MOKHTARI (2012) l'a évalué de la même manière (*figure 56*) et note en premier que la répartition des zones de dépôt humide dépend essentiellement de la répartition des précipitations stratiformes et convectives. Il observe les zones de dépôt humide supérieures à $20\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ essentiellement au sud de 20°N avec un maximum situé au centre du Niger et du Mali, et en République centrafricain, avec un flux annuel moyen de $200\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ et souligne que les champs de dépôt humide ont une extension plus large, vers l'Océan Atlantique, au sud vers le centre de l'Afrique et au nord vers la Méditerranée. Par ailleurs, l'auteur remarque que les principales zones de dépôt humide correspondent aux régions de précipitations convectives. D'après plusieurs études (FLAMANT et al., 2007 ; TULET et al., 2010), ces systèmes déposent efficacement les poussières désertiques par rapport aux précipitations stratiformes.

Figure 56 : Dépôt humide des poussières désertiques, pour le mois de janvier, simulé par ALADIN (en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$) moyenné sur la période 2006-2010 sur l'Afrique au nord de l'Equateur



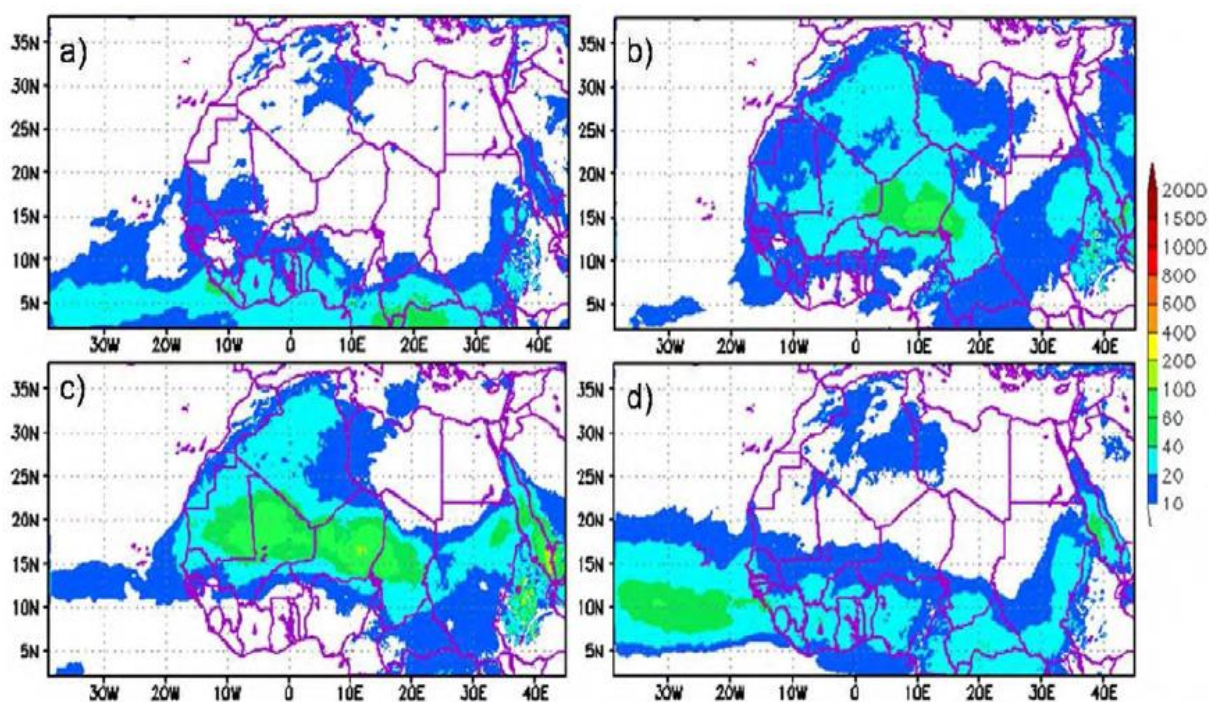
D'après MOKHTARI (2012)

Pour le dépôt humide saisonnier, MOKHTARI d'alerter que l'évolution de la localisation des zones de dépôt humide est contrôlée, à la fois, par l'évolution saisonnière des directions privilégiés des panaches de poussières, et par l'évolution des précipitations. Voilà ce qu'il nous apprend du dépôt humide saisonnier en Afrique au nord de l'Equateur :

En hiver (*figure 56a*), les zones de dépôts humides supérieurs à $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ sont localisées principalement au sud des zones sources. En cette période, les poussières désertiques sont transportées par un flux d'Harmattan sec au-dessus du flux de mousson. Au niveau du FIT apparait une zone privilégiée de dépôt humide qui s'étend jusqu'au Golfe de Guinée et sur l'Océan Atlantique (TULET et al. 2010 ; KOCHA et al., 2011 ; BOU KARAM et al., 2008). Au printemps (*figure 56b*), qui correspond à la période transitoire de la saison de la mousson Africaine, les aérosols désertiques sont lessivés plus au nord par la remontée progressive du Front InterTropical. En conséquence, durant cette période, on retrouve les zones de dépôt humide localisées près des régions source, avec quelques faibles flux résiduels vers le sud. En été (*figure 56c*), c'est l'installation de la saison humide avec l'arrivée de la mousson ouest Africaine, caractérisée par la manifestation de gros systèmes convectifs sur les régions Sahéliennes. Ces systèmes jouent un rôle capital dans le dépôt humide des poussières désertiques. D'autant que

ces systèmes produisent aussi des aérosols dans le front de rafale et qu'ils en lessivent une bonne partie ensuite (TULET et al., 2010). Les zones de dépôt humide les plus importantes sont localisées sur la bande 15°N-20°N au sud du Tchad, du Niger, du Mali et de la Mauritanie avec des valeurs moyennes de 40-100 g.m⁻².an⁻¹. On simule aussi des zones de dépôt humide marquées jusqu'au nord-ouest du domaine, sur l'Atlas Marocain (20-40 g.m⁻².an⁻¹). En automne (*figure 56d*), le dépôt humide est plus important au-dessus de l'Océan Atlantique du fait du transport privilégié des aérosols désertiques dans cette région.

Figure 57 : Dépôt humide saisonnier des poussières désertiques simulé par ALADIN (en g.m⁻².an⁻¹) moyenné sur la période 2006-2010 sur l'Afrique au nord de l'Equateur



a) janvier-février-mars, b) avril-mai-juin, c) juillet-aout-septembre, d) octobre-novembre-décembre.

D'après MOKHTARI (2012)

Le dépôt des poussières minérales est aussi considéré comme une source extérieure importante de fertilisation pour les écosystèmes terrestres dans certaines régions. Les dépôts éoliens peuvent modifier la microphysique du sol (texture, capacité de rétention d'eau, apport en éléments minéraux nutritifs, capacité à résister à l'acidification) et modifient ainsi son intérêt agricole (SIMONSON, 1995). YAALON et GANOR (1973) soulignent l'importance de ces apports dans les régions péri-sahariennes. Ces apports peuvent représenter de 4 à 66% du matériel total de sol, selon les sources, le climat et l'âge du sol (HERRMANN et al., 1996), et interviennent dans le budget nutritionnel des sols en amenant des micronutriments tels que Calcium, Potassium, Magnésium ou Phosphore (HERRMANN et al., 1994). À plus grande distance, les poussières

sont également susceptibles d'amener des éléments nutritifs dans des régions du globe où leur faible présence en fait des facteurs limitant de la production matière organique. Par exemple, une partie non négligeable des phosphates nécessaires à la croissance de la forêt amazonienne viendrait du dépôt des poussières sahariennes, ce qui permettrait même de corrélérer les cycles d'extension et de régression de l'Amazonie à ceux du Sahara (SWAP, 1992).

Le dépôt des poussières minérales sur les océans est également d'une importance majeure pour les écosystèmes marins. La présence d'éléments traces dans les régions océaniques peut être contrôlée par ces apports (DUCE et al., 1991). En particulier, les aérosols issus des dépôts sec ou humide sont la principale source de fer de certaines eaux de surface océaniques (ZHUANG et al., 1990 ; DUCE et TINDALE, 1991 ; JICKELLS et SPOKES, 2001). D'ailleurs, note LAFON (2004) comme il constitue un micronutriment essentiel à la croissance du phytoplancton et qu'il fait souvent défaut dans les régions éloignées des continents, une variation des apports atmosphériques de fer aux océans entraînent une limitation de la production primaire. Les quantités de carbone séquestrées par l'océan s'en trouve ainsi diminuées, ce qui affecte le cycle du carbone et le système climatique global (MARTIN et al., 1994 ; WELLS et al., 1995 ; BOYD et al., 2002). Enfin, le transfert éolien des éléments du continent vers les océans constitue des sédiments marins (CHESTER et al., 1979).

En conclusion de cette section du chapitre III, il est à noter que les aérosols désertiques suivent un cycle comportant principalement trois phases : phase d'émission et suspension dans l'air, phase de transport, phase de dépôt. La mise en place de ce cycle est au préalable conditionnée par la disponibilité du matériel mobilisable aux zones sources. Les principales zones sources africaines du nord de l'Equateur sont étudiées au 4^e point de ce chapitre.

4. zones sources africaines du nord de l'Equateur et saisonnalité des émissions

4.1. Principales Zones Sources en Afrique au Nord de l'Equateur

Au cours de ces dix dernières années, l'accroissement des moyens d'observation satellitaires ainsi qu'un nombre important de campagnes expérimentales mises en œuvre au nord du continent africain (exemple : *SHADE = SaHArAn Dust Experiment*, TANRE et al. 2003 ; *AMMA = Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine*, REDELSPERGER et al. 2006 ; *SAMUM (Saharan Mineral Dust Experiment) 1 & 2*, Ansmann et al. 2011 ; *GERBILS = Geostationary Earth Radiation Budget Intercomparison of Longwave and Shortwave Radiation*, HAYWOOD et al.,

2011) ont fourni des informations essentielles pour la validation et/ou la contrainte des modèles numériques et également à la compréhension de phénomène.

Les zones sources en Afrique au Nord de l'Equateur sont localisées dans les régions Sahariennes et Sahéliennes. La région Saharienne est la partie de l'Afrique du Nord située au-delà de 17°N, avec un couvert végétal quasi inexistant, et un taux de précipitation moyen annuel inférieur à 200 mm. La région semi-aride Sahélienne est une région de transition entre le climat aride du Sahara au nord et le climat plutôt humide des savanes du sud. Le relief présent dans l'ensemble de ces régions est principalement composé d'une succession de cuvettes et de chaîne de montagnes tels que l'Atlas, Hoggar-Haïr, le Tibesti, l'Ennedi (BEGUE, 2012).

En plus de ces massifs montagneux, CALLOT et al. (2000) ont inventorié des « ergs », des « regs », des « hamadas », des plaines et des dépressions, parmi les paysages qui caractérisent la région du Sahara et du Sahel. Les ergs sont des étendues de dunes sableuses. Les principaux ergs sont situés en Algérie, au Niger et en Libye. Les regs et les hamadas sont, du point de vue des états de surface, comparables. En effet, ce sont tous les deux des surfaces couvertes par de petits rochers et cailloux. Les plaines, et particulièrement les dépressions, constituent des zones de dépôts argileux ou salées. Ces dépôts proviennent d'anciens lacs ou de cours d'eau qui se sont asséchés suite à des modifications du climat de l'Afrique du Nord. Ces dépressions sont généralement de faibles étendues spatiales, mais en raison d'une forte teneur en matériel fin, elles constituent des zones à fort potentiel d'émission d'aérosols désertiques.

La zone Sahara-Sahel représente la première source mondiale de poussières désertiques avec une production annuelle d'aérosols estimée à 400-700 Mt (SCHUTZ et al., 1987 ; D'ALMEIDA, 1987 ; SWAP et al., 1992, LAURENT, 2008).

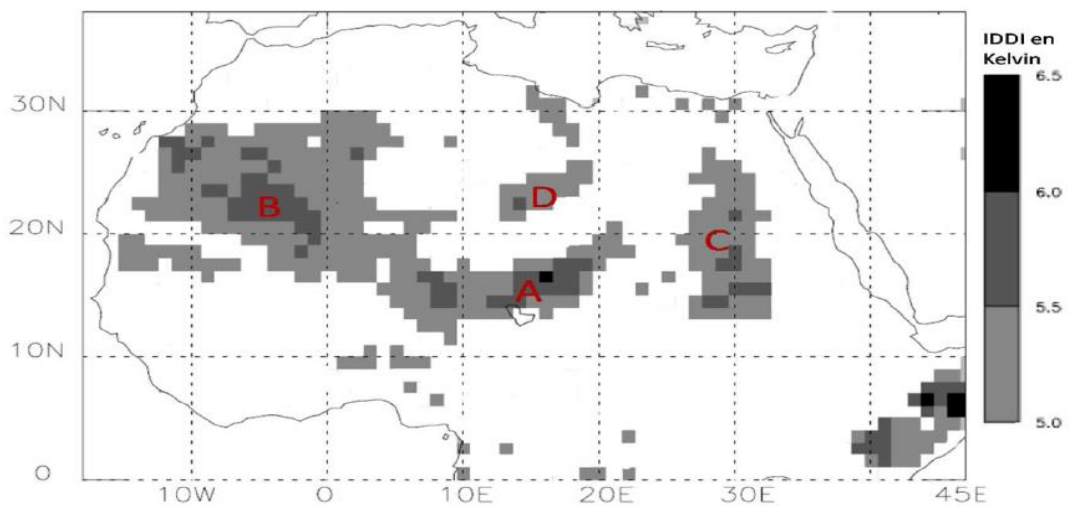
BOU KARAM⁴⁰ attribue le statut des zones sources du Sahara-Sahel au résultat de deux facteurs principaux : la présence abondante de sédiments dans ces régions sous l'effet de l'érosion fluviale, et l'occurrence fréquente de forts vents de surface associées à la présence de jets de basses couches dont la fréquence et l'intensité sont renforcées par la présence d'orographie.

En 2000, à partir de l'Infrarouge Difference Dust Index (IDDI) issu de l'imageur infrarouge de METEOSAT, BROOKS et LEGRAND ont localisé quatre principales zones sources saharo-sahéliennes (*figure 58*). Douze années plus tard, SCHEPANSKI et al. ont localisé les mêmes

⁴⁰ Op. Cit.

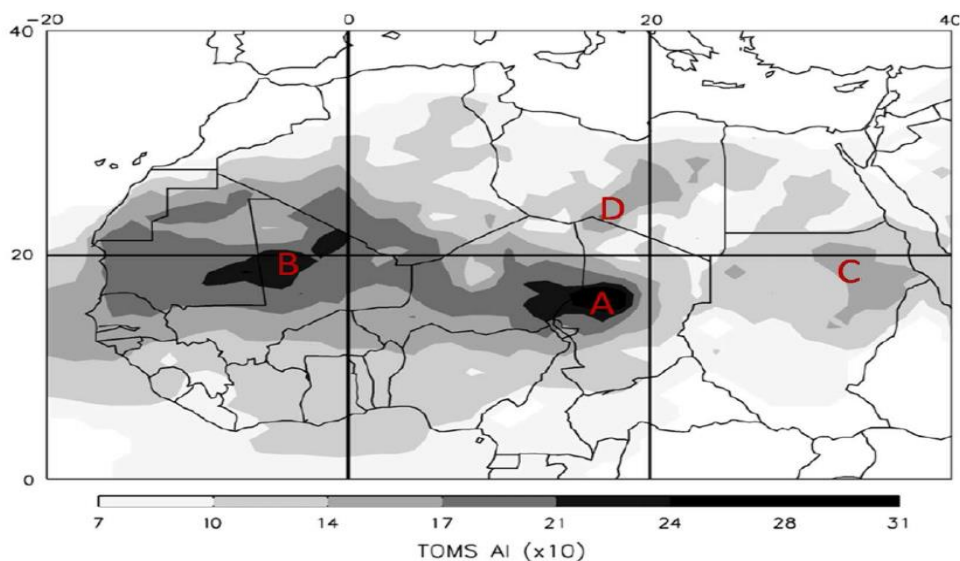
quatre zones sources cette fois à partir d'une analyse basée sur les valeurs de l'indices aérosols (AI) issues de l'imageur Ozone Monitoring Instrument (OMI, LEVELT et al., 2000). Ces quatre zones sources sont respectivement situées au Tchad (A), en Afrique de l'Ouest (B), en Libye (C) et au Soudan (D) (*figure 60*). Cette distribution des principales zones sources en Afrique du Nord est conforme à celle fournit par l'étude de ENGELSTAEDTER et al., (2006) six années après BROOKS et LEGRAND et six années avant SCHEPANSKI et al. et basée sur les valeurs de AI de TOMS (*figure 59*).

Figure 58 : Moyenne annuelle de l'IDDI de METEOSAT-IR sur la période 1984-1993 indiquant la localisation des principales zones sources d'aérosols désertiques en Afrique au Nord de l'Equateur



Source : BROOKS et LEGRAND (2000)

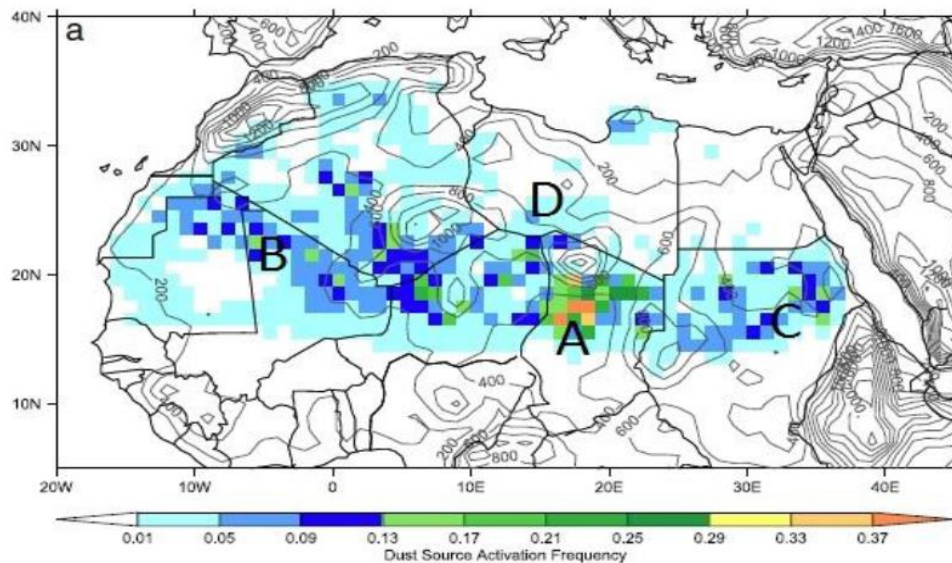
Figure 59 : Moyenne mensuelle sur la période 1980-1992 de l'AI de TOMS ($\times 10$) illustrant les principales zones sources de l'Afrique au Nord de l'Equateur



(A) Bodélé ; (B) Afrique de l'Ouest ; (c) désert Nubien et (D) désert Libyen d'après ENGELSTAEDTER et al., (2006), cités par BOU KARAM (2008)

Les observations spatiales révèlent que les zones sources du Tchad et de l’Afrique de l’Ouest sont des sources significativement plus actives que les sources des régions Libyennes et Soudanaises (*figure 60*). Cette disparité s’explique par des conditions topographiques plus favorables à l’érosion au-dessus du Tchad et de l’Afrique de l’Ouest (ENGELSTAEDTER et al., 2006 ; SCHEPANSKI et al., 2012, 2009, 2007).

Figure 60 : La fréquence d’activation des zones sources en Afrique du Nord calculée à partir des Aerosol Index (AI) issus des observations spatiales de l’imageur OMI durant la période 2006-2010



(D’après SCHEPANSKI et al, 2012). Les lettres situent les principales régions sources de l’Afrique du Nord : (A) le Tchad, (B) l’Afrique de l’Ouest, (C) le Soudan et (D) la Libye.

4.1.1. Bodélé, principale source de poussières désertiques

Au Sahara les poussières proviennent de sédiments et dépôts alluviaux que l’on trouve dans les dépressions, les bassins sédimentaires et les anciennes vallées. Le sol du Sahara est dépourvu de végétation, le vent, assez fort au niveau de la surface, fait rouler et parfois soulève légèrement les particules qui retombent sous l’effet de leur poids et rebondissent. Les plus grosses particules se désagrègent progressivement et augmentent ainsi l’érosion. Les fines poussières sont injectées dans l’atmosphère en formant le plus souvent des brumes sèches et des tourbillons de poussière dont la dimension peut atteindre quelques décimètres de diamètre et plusieurs centaines de mètres de hauteur (COUDE-GAUSSSEN et ROGNON, 1983) (*figure 61*). COUDE-GAUSSSEN (1991) nous dit que depuis qu’il est désert, le Sahara est le plus grand producteur de poussières minérales du globe. Il contribuerait approximativement à la moitié de la production annuelle globale de poussières minérales (COUDE-GAUSSSEN et ROGNON, 1983 ; SCHLESINGER et al., 1990 ; GOUDIE, 1996). OZER (2001) parle d’une injection de 60 à 710 10⁶ tonnes/an de poussières minérales dans l’atmosphère suivant les auteurs et les périodes d’analyse.

Figure 61 : Tempêtes de sable saharien-phénomènes de différentes intensités, soulevant des quantités variables de sable à des hauteurs différentes



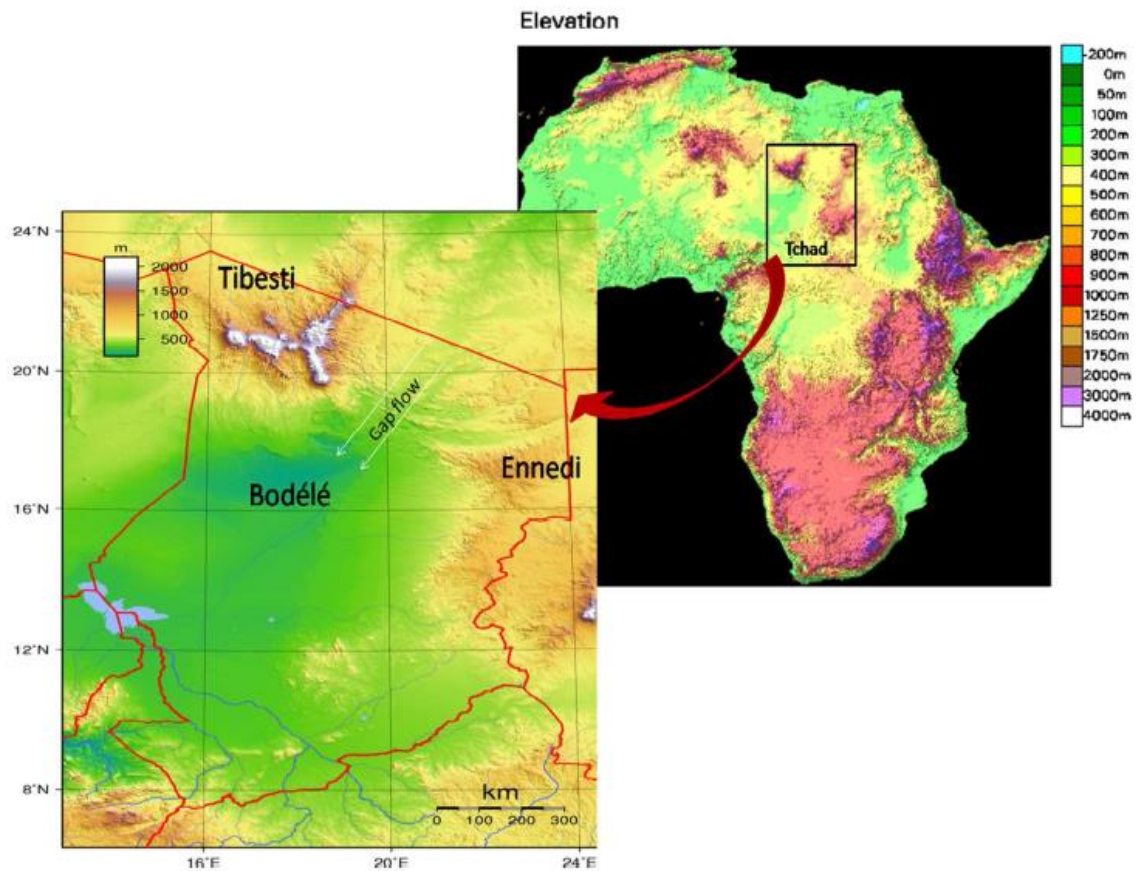
Mais de tout ce sable qui provient du Sahara, il y en a environ la moitié qui vient d'un tout petit endroit du Tchad qui se nomme la *dépression de Bodélé*. D'après KOREN et al. (2006), elle contribue même à plus que la moitié des émissions annuelles d'aérosols minéraux depuis l'Afrique au Nord de l'Equateur de façon générale.

Cette zone source d'aérosols minéraux jouit de plusieurs particularités qui permettent d'expliquer son activité importante en termes d'émissions. BOU KARAM (2008) est parmi les rares auteurs à nous d'écrire les facteurs qui distinguent la dépression de Bodélé des autres zones sources Africaines. Le premier facteur qu'elle retient est la position géographique d'un site qui se situe à la sortie du couloir formé par les massifs du Tibesti (point culminant à 3425 m) et de l'Ennedi (point culminant à 1450 m) (*figure 62*). Cette position dit-elle la rend soumise en permanence aux conséquences d'une circulation de 'gap flow' (forte activité de masses d'air).

Ainsi, la région de Bodélé serait assujettie à un jet de basse couche (Low Level Jet, LLJ) situé vers 925 hPa, récemment mis en évidence par GOUDIE et al. (2003) et WASHINGTON et TODD (2005). Ce vent a même été baptisé : le courant-jet à basse altitude de Bodélé (traduction de *Bodele Low Level Jet*). Ce LLJ en provenance du nord-est, est lié à des effets dynamiques faisant intervenir les massifs de l'Ennedi et du Tibesti en conditions de flux synoptique de nord-est sous l'influence de l'anticyclone de Libye. Les vents intenses en altitude associés au LLJ sont

ramenés à la surface par le mélange turbulent déclenché au lever du soleil, provoquant ainsi des soulèvements intenses d'aérosols minéraux (TODD et al., 2007)

Figure 62 : les reliefs et la position géographique de la dépression de Bodélé au Tchad



Source : BOU KARAM (2008)

Une autre particularité de la dépression de Bodélé est le fait qu'elle soit une source active tout le long de l'année bien qu'elle présente un cycle saisonnier bien marqué avec un maximum d'émissions en hiver (au mois de février) et un minimum en été (au mois de juillet).

La nature du sol dans cette zone de Bodélé serait l'une des causes majeures de cet énorme potentiel en termes d'émissions de poussières désertiques. En effet la dépression de Bodélé contiendrait les traces du lac Méga-Tchad, qui est un ancien lac asséché il y a environ 1000 ans et est donc de sédiments qui selon Bou Karam sont majoritairement des diatomées (Algues brunes unicellulaires dont la membrane est entourée d'une coque siliceuse) (figure 63). Comparant cette région aux lac Owens en Californie, lac Eyre en Australie et lac Etosha en Namibie (GILL, 1996), elle conclue que ce type de région est connu comme étant une source potentielle d'aérosols minéraux (BOUET, 2007).

Figure 63 : Une image satellite et une photo prise durant la campagne BoDex 2005 montrant l'aspect du sol dans la dépression de Bodélé au Tchad



Source : Bou Karam (2008)

Ce qui fait la spécificité de Bodélé c'est sa capacité de production par rapport à l'étroitesse de son étendue. En effet, la dépression de Bodélé ne représente que 0,2% de la superficie du Sahara ou encore 0,5% de la superficie de l'Amazonie. GAYE⁴¹ notait qu'il est extraordinaire qu'une si petite région soit à l'origine de l'alimentation en nutriments d'une aussi grande superficie que l'Amazonie : 200 fois plus grande qu'elle ! Chaque année, environ 100 millions de tonnes par an, de poussières sont transportées par le vent, de cette dépression vers l'Amazonie, en Amérique du Sud.

Les plus grandes tempêtes de poussières peuvent apporter en une seule fois 500 000 tonnes de sables. L'hiver, ce sont quelque 700 000 tonnes de poussières qui sont produits chaque jour par la minéralogie très spéciale du Bodélé. Les méthodes d'identification et de détection (tels le spectromètre TOMS et les mesures de METEOSAT) ont permis de mettre en évidence cette zone source et certains auteurs n'hésitent pas de la designer comme étant la source la plus importante

⁴¹ Gaye D., 2013. *Étude de l'évolution du climat à Saint-Louis ; analyse de la variabilité des aérosols : le cas des brumes sèches*, Mémoire de Master, Université Gaston Berger de Saint-Louis, Section de Géographie, Parcours : Ecosystème et Environnement, 186p.

au monde de particules de poussière en suspension dans l'atmosphère. Selon CRUMEYROLLE (2008) l'importance de la région de Bodélé avait déjà été montrée par KALU (1979) et HERMANN et al. (1999). Son caractère spécifique est donc d'associer un terrain riche en fines particules (1 μm ou moins) et fréquemment de fortes vitesses de vents en surface.

4.1.2. Autres zones sources récemment identifiées

Aux côtés de cette dépression de Bodélé, l'apparition de nouvelles zones sources saharo-sahéliennes est mise en évidence. Il s'agit entre autres **du sud mauritanien, la haute boucle du Niger**. COUDE-GAUSSEN (1990) a montré que la région sud mauritanien, tout comme la région des hauts plateaux algériens, est située dans une zone dont les sols sont constitués de substrats argileux et salins, potentiellement favorables à la mobilisation par les vents. Le croisement que l'auteur réalise à partir des informations fournies par la carte d'aptitude potentielle des substrats avec celle de fréquence des vents de sable de DUBIEF (1953), lui a permis d'identifier ces régions comme des régions source de poussière.

L'hypothèse de l'apparition d'une nouvelle source d'aérosols sur la haute boucle du Niger est renforcée par l'évolution des fréquences de vents forts dans la région. Etudiant l'action du vent sur la région du Bandiagara, au cours des années 1950, DAVEAU (1959) a conclu que, malgré la présence d'immenses étendues très favorables à la déflation, affleurant à nu pendant plus de six mois de sécheresse, l'érosion éolienne sur la plus grande partie du Mali est nulle ou négligeable. Une confirmation de ce résultat est donnée par BERTRAND (1977) qui a obtenu un pouvoir de déflation moyen, entre 1969 et 1970, de 1,63 à Tombouctou, 26 fois plus faible que celui obtenu dans la zone source de Bilma au cours de cette même période. Or d'après IROPLO (1987), au cours de ces dernières années, la situation a considérablement évolué. Le pouvoir de déflation dans la région est en augmentation depuis 1970. À Gao, par exemple il est passé de 7 en 1968 à 30 en 1984, soit 4 fois plus. Par ailleurs, NICKLING ET AL. (1991), dans leur essai d'estimation des surfaces érodables au Mali, ont montré l'importance des phénomènes de déflation dans la région. Cette augmentation de la fréquence des vents forts et la présence de surfaces favorables aux phénomènes de déflation expliquent l'apparition de cette source.

N'TCHA YIMBOUROU⁴² soutient que l'apport nouveau en provenance de la haute boucle du Niger est à l'origine des augmentations observées dans les stations de Bob o Dioulasso, Bouaké,

⁴² N'TCHAYI MBOUROU G., juillet 1992, *Les aérosols sahariens et sahéliens en Afrique au Nord de l'Equateur : Répartition spatiale et temporelle, influence de la pluviosité sur l'évolution*, Thèse de Doctorat 3ème Cycle, Option : Physique, Spécialité : Géophysique externe, l'Université Nationale de Côte d'Ivoire, N° d'ordre:172, 124p.

Abidjan malgré la réduction de la contribution en provenance de la région de Bilma au nord-est du Niger.

Selon BOU KARAM⁴³, la zone source couvrant l'ouest du Niger, le nord du Mali et le sud de l'Algérie a été rajoutée à la carte des zones sources suites aux travaux de SCHEPANSKI ET AL. (2007) qui ont montré que cette zone est potentiellement active durant les mois d'été ce qui n'a pas été notifié par les études ultérieures.

4.2. Variabilités temporelles d'émissions de particules désertiques

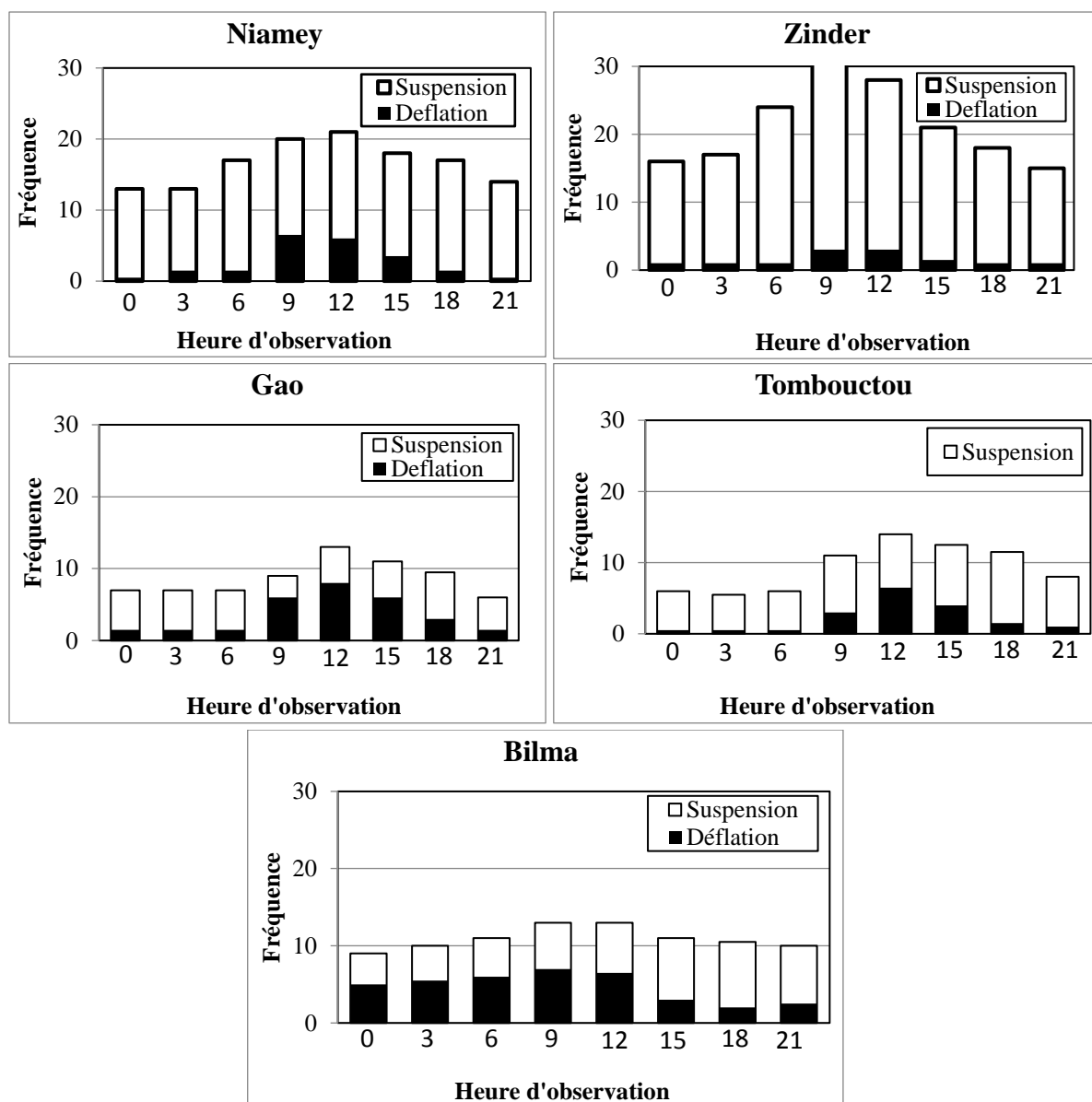
L'émission des aérosols désertiques en Afrique au nord de l'Equateur se produit de temps à autre et d'une manière irrégulière, ceci du fait que ce phénomène est régi par le degré de la vitesse du vent et le niveau d'érodibilité de la surface des sols considérés. En effet comme nous l'avons déjà vu, l'émission est un phénomène seuil où les fréquences et les intensités des émissions sont fortement contrôlées par les variations des régimes de vent. Tout ceci conduit selon à ce que les émissions d'aérosols désertiques présentent souvent un cycle diurne ou saisonnier très marquée.

À notre connaissance OZER (2001) est le seul, sinon le premier à avoir réalisé en 2001 une étude du **cycle diurne** des aérosols désertiques en régions sahéliennes. En effet l'auteur a établi une répartition tri-horaire moyenne des lithométéores calculée sur la période 1947-1997 pour cinq stations différentes (Niamey, Zinder, Gao, Tombouctou et Bilma) dans le but de présenter leur répartition diurne en fonction de leur type et de leur visibilité. La *figure 64* présente les résultats de cette étude.

Ces résultats montrent que l'occurrence d'épisode d'émission présente un maximum durant la journée entre 09 et 15 heures alors que le minimum est localisé au milieu de la nuit (entre 21 et 3 heures. BOU KARAM (2008) soutient que ceci est en accord avec des récentes études (TODD et al., 2007 ; KNIPPERTZ, 2008), impliquant un rôle déterminant des jets de basses couches (LLJs) et de la variation diurne de la convection dans la couche limite atmosphérique dans le cycle diurne des émissions. Rappelons que d'après OZER, DUBIEF avait noté en 1952 " Nous avons vu les transports de sable durant la nuit comme tout à fait négligeables. Nous sommes donc en accord avec une opinion assez répandue au Sahara qui veut que le vent de sable se lève avec le soleil et se couche avec lui".

⁴³ Op.cit.

Figure 64 : Fréquence moyenne (%) tri-horaire de la visibilité réduite par les lithométéores à moins de 500 dam durant la saison sèche (novembre à mars)



Les données utilisées pour ces calculs couvrent la période 1947-1997. D'après OZER (2001), figure reprise par GAYE (2016).

À noter : Suspension = Brume sèche et Brume de poussière ; Déflation = Chasse-sable et Tempête de sable

Néanmoins ce cycle diurne présentant un maximum durant la journée et un minimum au milieu de la nuit est vrai durant la saison sèche en Afrique au nord de l'Equateur où la majorité de la région est dominée par l'Harmattan renforcé par les jets de basses couches, mais ce n'est pas le cas durant la saison de mousson d'après BOU KARAM (2008). En effet durant cette période de l'année la moitié sud de l'Afrique au nord de l'Equateur est envahie par le flux de mousson qui

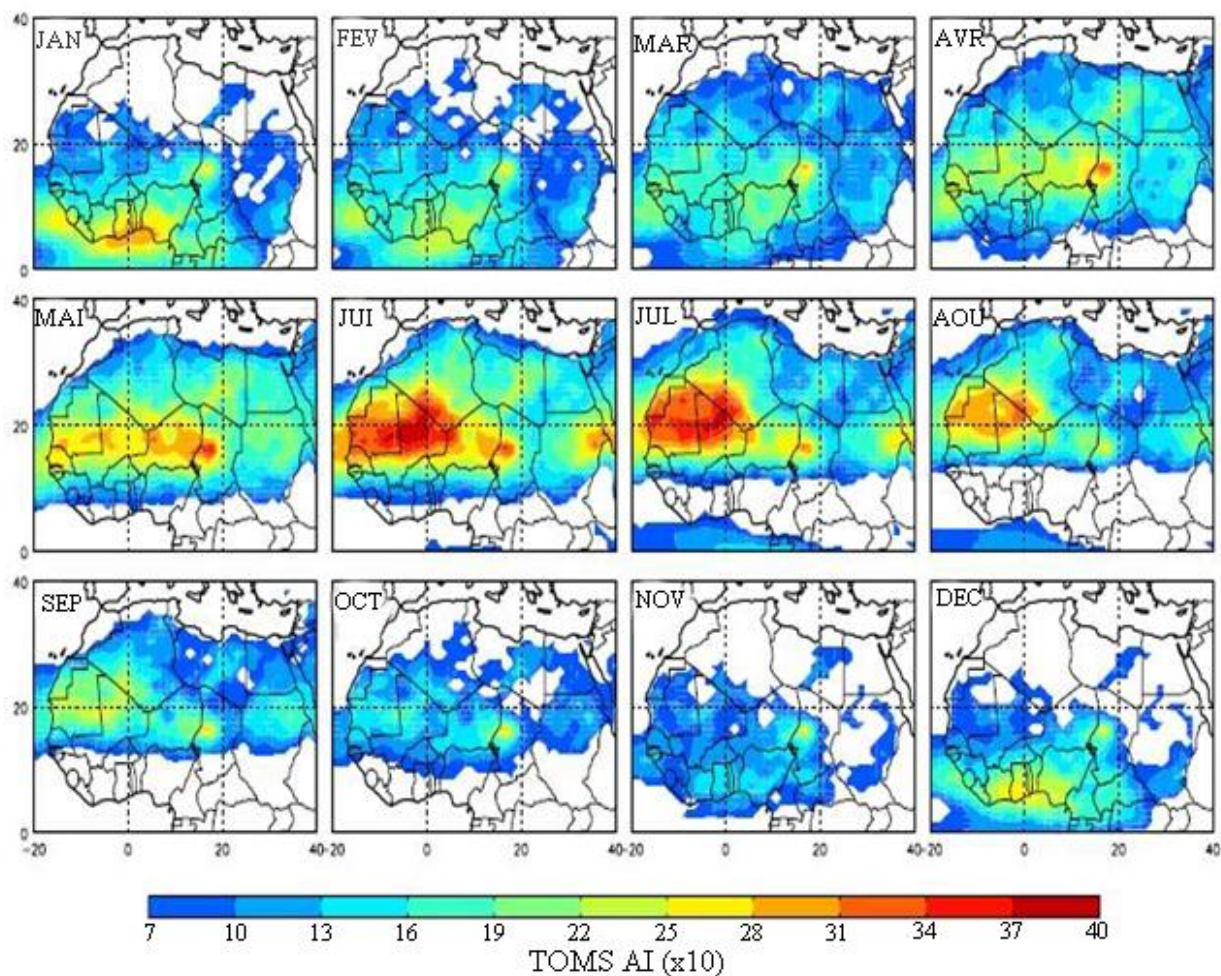
durant la nuit agit comme un courant de densité et provoque des soulèvements intenses d'aérosols désertiques au sud du Sahel dans la région du Front Inter Tropical. De plus, durant la saison de mousson, les courants de densité, émanant des systèmes convectifs organisés et se propageant durant plusieurs jours à travers l'Afrique, provoquent d'importants soulèvements des aérosols au-dessus du Sahel de jour comme de nuit (BEGUE, 2012 ; BOU KARAM, 2008 ; FLAMANT et al., 2007).

Le mécanisme de ce cycle diurne des émissions d'aérosols en Afrique au nord de l'Equateur est bien synthétisé par BOU KARAM qui conclut qu'il semble donc obéir à un cycle saisonnier ; en hiver c'est le cycle diurne des jets de basses couches (LLJs) et de la dynamique de la couche limite qui modulent la variation diurne des émissions, alors qu'en été se rajoute à cela la dynamique de la mousson et des systèmes convectifs. Ainsi, dans la partie du continent située au nord du FIT, ce sont les LLJs qui continuent à jouer leurs rôles alors qu'au sud du FIT le contrôle du cycle diurne des émissions d'aérosols désertiques est pris par la dynamique de la mousson (y compris les MCSs).

Outre leur cycle diurne bien marqué, les émissions des aérosols désertiques en Afrique au nord de l'Equateur présentent un **cycle annuel** très manifeste. Plusieurs études et campagnes d'observations ont été menées dans le but d'identifier ces émissions suivant les saisons et les différentes zones de cette partie du continent.

Dans une étude menée en 2006, ENGELSTAEDTER et al. ont analysé les AI (Aérosol Index) de TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) en Afrique au nord de l'Equateur pour la période de 1980 à 1992 et ils ont constaté la présence d'un cycle annuel très marqué des aérosols désertiques. Ce cycle est très marqué aussi bien en intensité d'émission qu'en occurrence de soulèvement (LAURENT et al., 2008). Selon cette étude, la plupart des sources africaines au nord de l'Equateur présentent un minimum d'activité entre Octobre et Novembre, et un maximum entre Avril et Août (*figure 65*). Dans l'Ouest et le nord-ouest de l'Afrique, les émissions augmentent à partir du mois d'Avril et sont maximales durant la saison de mousson (Juin/Juillet) avant de décroître en Septembre. Le maximum d'émission depuis les zones sources Libyennes est observé entre Avril et Juin alors que depuis les zones sources Soudanaises le maximum d'émission est observé entre Avril et Août. La région de Bodélé au Tchad semble maintenir une activité élevée pratiquement tout au long de l'année, avec un minimum d'émission observé entre Novembre et Décembre et un maximum entre Janvier et Mars.

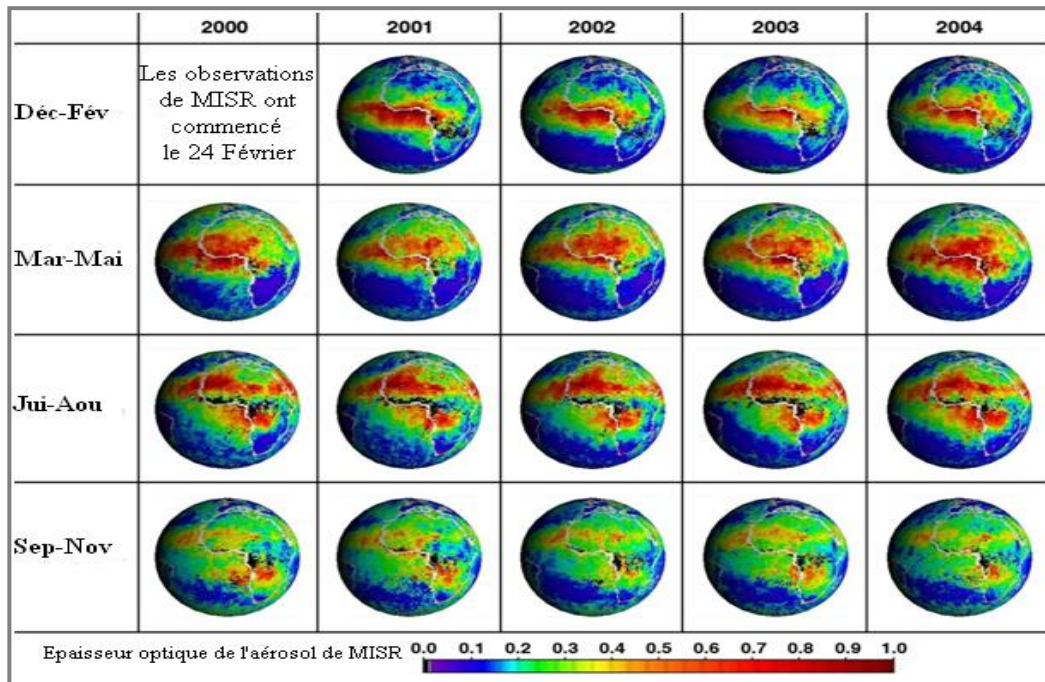
Figure 65 : Le cycle annuel des émissions d'aérosols désertiques depuis les sources nord africaines obtenu à partir des valeurs de AI de TOMS (x10) sur la période de 1980 à 1992



Source : ENGELSTAEDTER et al. (2006)

Pour marquer son cinquième anniversaire depuis qu'elle a commencé à prendre des données scientifiques à la date du 24 février 2000, la mission MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiomètre) de la NASA, sur le satellite Terra a publié les données d'aérosols disponible en cartes mondiales (*figure 66*). Les 19 globes ci-après montrent comment l'emplacement et le taux de concentration des aérosols à travers l'Afrique et l'océan Atlantique changent de saison à une autre entre Mars 2000 et Novembre 2004. Ces mesures des concentrations appelées "profondeur optique" se réalise dans une colonne d'atmosphère entre le capteur aéroporté et le sol et sont basées sur la façon dont la lumière peut passer à travers la colonne et arriver à la surface du sol. L'échelle de couleur indique la gamme de profondeurs optiques allant du bleu pour un ciel relativement clair au rouge pour un ciel de concentrations élevées. Une profondeur optique de 1.0 (comme c'est le cas indiqué à la *figure 65* pour Afrique au nord de l'Equateur de Mars à Aout) signifie que seulement environ 37% de la lumière au sommet de l'atmosphère se rend au sol, le reste étant absorbé, reflété ou diffusé par les panaches d'aérosol.

Figure 66 : Concentrations saisonnières des aérosols en Afrique et en océan Atlantique entre Mars 2000 et Novembre 2005-MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiomètre) de la NASA.



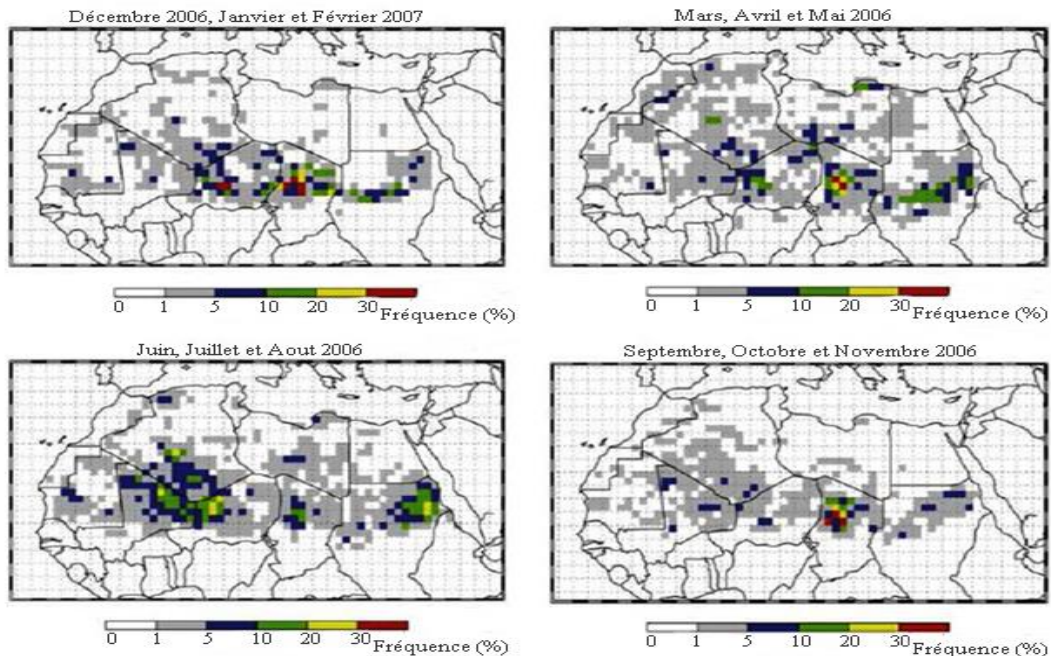
À travers ces 19 globes, on constate que les tendances saisonnières sont remarquablement semblables d'année en année. Entre Décembre et Février, les cieux de l'Afrique du nord sont relativement clairs, tandis que les niveaux de concentrations élevées se trouvent dans les régions tropicales humides d'Afrique occidentales et centrale et le golfe de Guinée. De Mars à Mai, des aérosols très épais s'étendent vers le nord à travers les déserts Mali, au Niger et au Tchad et au cours de Juin à Août les concentrations d'aérosols très épais connaissent leur maximum et s'étendent à la fois au nord-nord-ouest de la Mauritanie, le Sahara occidental et l'Algérie, et un peu plus au sud. Entre Septembre et Novembre la région africaine au nord de l'Equateur présente un ciel quasiment dégagé, enregistrant ainsi la fréquence minimale de concentrations avec toutefois une épaisseur modérément élevée (couleurs verte et jaune) s'étendant un peu plus à l'ouest sur l'Atlantique.

Ces résultats viennent confirmer ce cycle annuel des aérosols désertiques présenté par les travaux mentionnés précédemment soulignant un maximum en été et un minimum en automne.

Encore plus récemment, l'étude de SCHEPANSKI et al. (2007) montre que durant l'année 2006 ce cycle a été bien présent (*figure 67*) où la variabilité des fréquences d'émissions d'aérosols désertiques en Afrique de l'Ouest, identifiée à partir des observations spatiales SEVIRI-MSG (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager-Meteosat Second Generation) dans

l'infrarouge, était maximale en Juin-juillet-Août 2006 et minimale en Septembre-Octobre-Novembre 2006.

Figure 67 : Fréquence saisonnière de l'activation des sources d'aérosols désertiques dérivée des images SEVIRI-MSG dans l'infrarouge



D'après SCHEPANSKI et al. (2007,) réadapté par GAYE (2016)

D'après BOU KARAM (2008), ayant consacré une étude par modélisation à ce cycle saisonnier sur la période 1996-2001, LAURANT et al. (2008) ont montré que ce dernier présente pour les zones sources situées plus à l'Ouest un maximum en été (Juin-Juillet), alors que pour celles situées plus à l'Est le maximum est simulé au printemps (mars-Avril).

Il ressort alors de toutes ces études un accord commun sur le fait que le cycle saisonnier des émissions d'aérosols désertiques en Afrique au Nord de l'Equateur présente un maximum en été durant la saison de mousson en coïncidence avec le déplacement annuel vers le nord du Front Intertropical. Cette coïncidence temporelle suggère que la convergence des vents forts en direction du FIT offre des processus, tels que la convection sèche et la convection humide, qui favorisent les émissions d'aérosols minéraux en augmentant les phénomènes de turbulence (OZER parle de nombreux cas de déflation c'est-à-dire des chasses-sable et tempêtes de sables) dans les basses couches. La fréquence minimum des aérosols désertiques en Afrique au nord de l'Equateur qui s'observe en automne correspond non seulement à une accalmie anémométrique (le FIT se retirant rapidement et l'Harmattan ne s'installant que progressivement) mais aussi au maximum de végétation (protégeant le sol) en octobre qui se dégrade ensuite progressivement (OZER, 2001 ; JUSTICE et al., 1985 ; JUSTICE et HIERNAUX 1986).

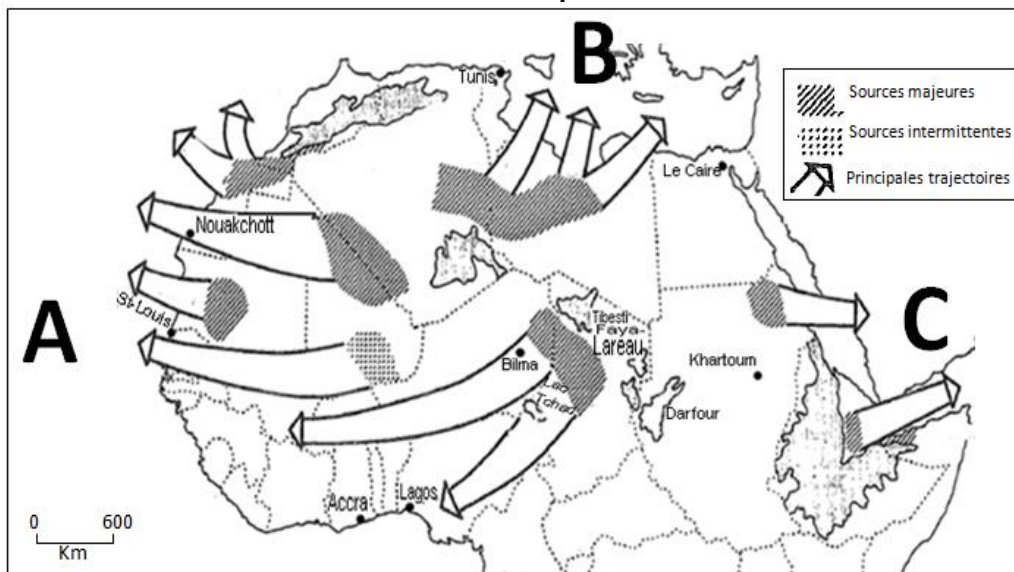
On peut donc conclure que les fréquences maximum et minimum des aérosols désertiques en Afrique au nord de l'Equateur en particulier sont fortement liées aux caractéristiques climatiques saisonnières de la région.

Les émissions depuis les sources nord africaines sont également contrôlées par des facteurs climatiques comme par exemple les sécheresses, engendrant ainsi une variabilité d'une année à l'autre (ENGESTAEDETER and WASHINGTON, 2007b ; MOULIN et al., 1997). Depuis le milieu des années 1960, une augmentation de la fréquence des tempêtes de sable coïncidant avec des périodes de sécheresse a été observée dans la zone sahélienne (GOUDIE and MIDDLETON, 2001 ; MOULIN et CHIAPELLO et al., 2004). La variabilité interannuelle des émissions depuis les zones sources de l'Afrique de l'Est et de l'Ouest a été étudiée par LAURENT et al. en 2008. Les résultats montrent que cette variabilité s'élève à 60% pour les zones sources de l'Afrique de l'Est alors qu'elle ne s'élève qu'à 20% pour les émissions depuis les zones sources de l'Afrique. En ce qui concerne la variabilité interannuelle des émissions de la région de Bodélé au Tchad, celle-ci est principalement contrôlée par la variabilité des jets de basses couches (WASHINGTON and TODD, 2005).

4.3. Principales trajectoires du transport des aérosols désertiques

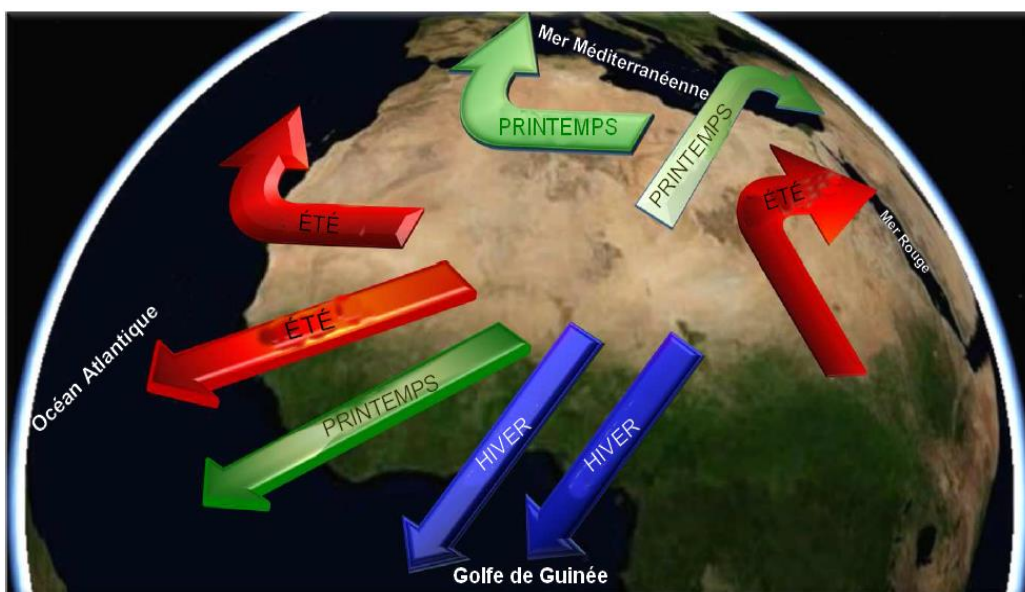
Les mécanismes de soulèvement contribuent à l'émission des aérosols désertiques, mais constituent également un moyen efficace pour la distribution verticale des aérosols désertiques, leur donnant ainsi le potentiel d'atteindre des altitudes élevées et de devenir disponibles au transport à grandes distance. Les courants à haute altitude (Saharan Air Layer) permettent la distribution verticale des poussières jusqu'à 5-6 km. Ainsi suivant la circulation atmosphérique, les aérosols désertiques de l'Afrique au nord de l'Equateur sont transportés dans toutes les directions et sur plusieurs milliers de kilomètres. Cependant trois régions sont retenues comme étant les principales trajectoires de ces poussières désertiques Saharo-Sahéliennes. Il s'agit (*figure 68*) : (A) la région Transatlantique (BARKAN et al., 2004 ; CARLSON and PROSPERO, 1972 ; NOWOTTNICK et al., 2011 ; PERRY et al., 1997), (B) la région Méditerranéenne-Européenne (BARKAN et al., 2005 ; BOBELY-KISS et al., 2004 ; COLLAUD COEN et al., 2004) et (C) la région du Moyen Orient (ISRAELEVICH et al., 2002, 2003 ; TANAKA and CHIBA, 2006). D'ALMEIDA (1986) affirme en cet effet que 60% des aérosols désertiques nord africains sont transportés vers le golfe de Guinée, 28 % vers l'Atlantique et 12 % vers l'Europe.

Figure 68 : Principales trajectoires du transport des aérosols désertiques émis depuis les sources Africaines au nord de l'Equateur



(A) Transatlantique ; (B) Méditerranéenne- Européenne et (C) Moyen Orient. Inspiré de OZER (2001)

Figure 69: Principales trajectoires de transport des panaches d'aérosols désertiques depuis l'Afrique au nord de l'Equateur suivant les différentes saisons, inspiré de l'étude de MIDDLETON (1986)

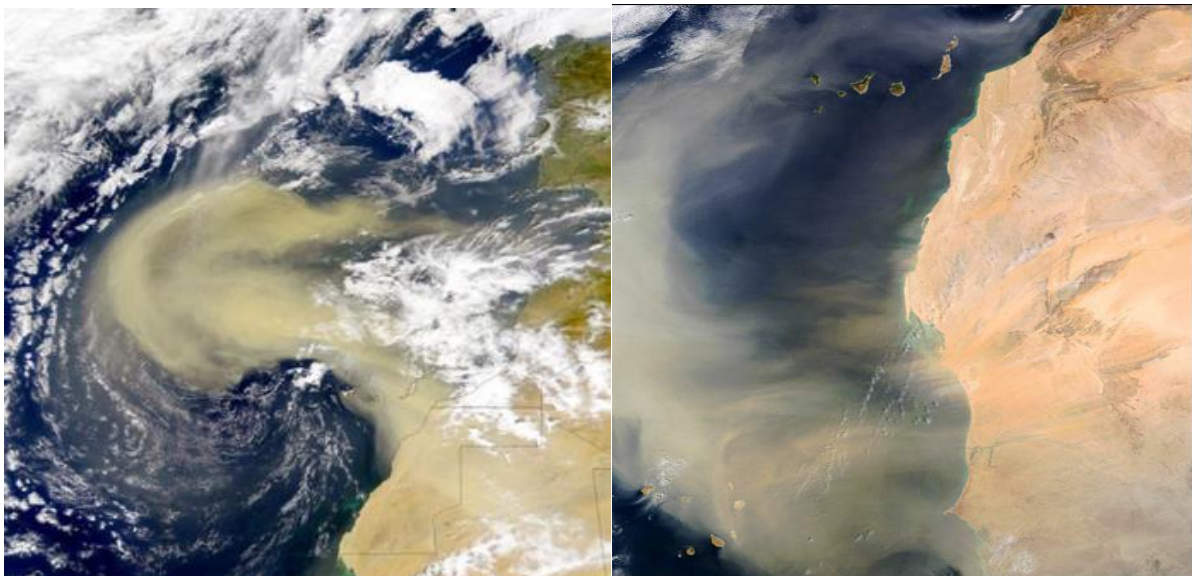


- *Transport transatlantique* : Le transport transatlantique constitue la trajectoire majoritairement empruntée par les panaches d'aérosols désertiques des sources de l'Afrique au nord de l'Equateur. Le flux d'Harmattan est un des principaux éléments gouvernant le transport des poussières désertiques vers l'Afrique de l'Ouest (SWAP et al. 1992, PERRY et al. 1997, PROSPERO and LAMB 2003). Mais la direction des panaches de ces poussières désertiques varie suivant les saisons (*figure 69*). Selon JONES et al. (2003, 2004), durant l'été le transport transatlantique est essentiellement modulé par l'activité des ondes d'Est africaines qui se

propagent d'est en ouest. En cette période les panaches se dirigent plus à l'ouest (12% des poussières annuelles sont transportées vers l'Atlantique suivant cette direction (D'ALMEIDA 1986)). Ces aérosols atteignent même les Antilles en cette période d'été et suivant cette direction. OZER (2001) affirme à cet effet que dès les années septante des chercheurs ont prouvé que les poussières sahariennes atteignaient, à une vitesse moyenne de 15 nœuds (1 nœud = 1 mille à l'heure), la Barbade en six jours et les côtes de la Floride en dix jours. Déjà en 1977 PROSPERO et CARLSON soulignaient que le transport de poussières africaines (faisant évidemment allusion aux sources Saharo-sahélienne) atteignant la Barbade est estimé à plus de 100 10⁶ tonnes en 1974. Montrant toujours l'importance de la quantité de poussière désertique arrivant à Barbade, JAENICKE (1979) et SCHUTZ et al. (1981) sur base des résultats obtenus par les différentes recherches estiment que sur les 260 10⁶ tonnes produit annuelle par les sources africaines au nord de l'Equateur, 50 10⁶ tonnes atteignent la Barbade. Sous ce même angle, PETIT et al. (2005) affirment que durant l'été, les maximums de concentration en aérosols désertiques pouvant atteindre les Antilles sont mesuré au Barbade. En hiver les panaches se dirigent vers le Sud. D'ALMEIDA (1986) souligne que 60% des poussières Sahariennes annuelles sont transportées vers le golfe de Guinée. Cette trajectoire reste alors la direction la plus importante des aérosols désertiques des sources Africaines. Elle est fortement influencée par l'Harmattan qui, en direction du sud-ouest domine la partie continentale de l'Afrique de l'Ouest en cette période de l'année. Il transporte ainsi de grandes quantités de poussières depuis, par exemple, le nord du Sahel nigérien vers le Burkina Faso et le sud du Mali (MAINGUET et al., 1983 ; OZER, 1993 ; FODE et al., 1994) atteignant les côtes sénégalaises (BOILIL et TOURE, 1989) ou depuis les zones désertiques du Niger et du Tchad (*Ergde Bilma-Faya Largeau*) vers le Nigeria (HAMILTON et ARCHBOLD, 1945 ; KALU, 1979 ; MCTAINSH et WALKER, 1982 ; ADEDOKUN et al., 1989). Ces panaches de direction sud atteignent même l'Amérique du sud. En cet effet, PROSPERO et al. (1981) ont mesuré la concentration en aérosols à Cayenne (Guinée française). Il ressort de leurs analyses que les faibles concentrations en poussières sahélo-sahariennes enregistrées en Barbade en hiver ne sont pas dues à une diminution saisonnière de l'injection de poussières dans l'atmosphère mais plutôt à une déviation des vents traversant l'Océan Atlantique. Le transport vers les côtes américaines est en réalité dévié de 10° de latitude plus au sud (soit de 0 à 15° N) et intéresse plus particulièrement le nord de l'Amérique du sud durant l'hiver (OZER, 2001). Ces panaches d'aérosols désertiques des sources Saharo-sahéliennes empruntant la trajectoire sud-transatlantique sont reconnus comme étant à l'origine de l'alimentation en nutriments du bassin de l'Amazonie. La région de Bodélé est plus

précisément identifiée comme étant la zone source de ces lithométéores. GAYE⁴⁴ notait qu'il est extraordinaire qu'une si petite région que Bodélé soit à l'origine de l'alimentation en nutriments d'une aussi grande superficie que l'Amazonie, 200 fois plus grande qu'elle. Chaque année, environ 100 millions de tonnes par an, de poussières seraient transportées par le vent, de cette dépression vers l'Amazonie, en Amérique du Sud). SWAP et al. (1992) donne un taux plus élevé et estime à approximativement $13 \cdot 10^6$ tonnes an^{-1} le transport de poussières africaines atteignant le bassin amazonien. La **figure 70** illustre le transport transatlantique suivant la direction de la Barbade et du sud-est de l'Amérique du nord et la direction du nord de l'Amérique du sud.

Figure 70 : panaches de poussière au large de l'Atlantique



(À gauche) panaches de poussières se dirigent vers le sud-est de l'Amérique du nord, Image satellite SeaWiFS, datant du 26 février 2000. (À droite) Panaches de poussière s'étendent à travers les côtes de Mauritanie et du Sénégal jusqu'aux îles du Cap-Vert en direction du nord de l'Amérique du sud, 2 mars, 2003 (Photo : NASA Earth observatory)

- **Transport Méditerranéenne-Européenne** : la région méditerranéenne et l'Europe constituent une direction non négligeable des poussières en provenance des sources Saharo-sahéliennes. En effet entre Mars et Aout, les basses pressions au-dessus de la Méditerranée et l'activité cyclonique sur la côte nord de l'Afrique entraînent un flux considérable (12% (D'ALMEIDA 1986)) de poussières désertiques vers la Méditerranée (GANOR et MAMANE, 1982 ; MOULIN et al., 1998 ; BORBELY-KISS et al., 2004).

Ces panaches en direction de la Méditerranéen (**figure 71**) atteignent l'Europe (ANSMANN

⁴⁴ Op.cit.

Figure 71 : Sortie de poussières désertiques sur l'Ouest de la Méditerranée (image SeaWiFS du 18/7/2000.

NASA/GSFC



et al., 2003, VUKMIROVIC et al., 2003, LYAMANI et al., 2005) et même la Scandinavie (FRANZEN et al., 1994) et l'Angleterre (RYALL et al., 2002). Dans le but de montrer la quantité non-négligeable des aérosols désertiques des sources africaines empruntant cette direction, LOÏE-PILOT et al. (1986) estiment que le taux de sédimentation des particules sahariennes est de l'ordre de 3.9 millions de tonnes par an dans le bassin nord-occidental de la Méditerranéen. Parlant de ce qui est du transport vers l'Europe, D'ALMEIDA (1986) l'estime entre 10 et 16 millions par an. Afin de mettre en évidence la fréquence évolutive des quantités de poussières arrivant en Europe en provenance des sources africaines, BÜCHER notait en 1994 que la période 1980-1989 avait connu les valeurs les plus importantes depuis 1960 alors que DE ANGELIS et GAUDICHET (1991), étudiant la quantité de matériel saharien précipité sur le Mont Blanc (Alpes française) de 1955 à 1985, ont remarqué une augmentation de cette quantité depuis les années septante. Alors que la région saharienne était identifiée jusqu'à récemment comme étant exclusivement la source des poussières africaines arrivant en Méditerranéen et en Europe, des origines sahéliennes sont de plus en plus soutenues. En cet effet, analysant des poussières atteignant l'Europe occidentale de l'Espagne aux Pays-Bas, REIFF et al. (1986) parlent d'un transport via les Iles canaries et individualisent le sud-Mauritanien comme zone source. TULLET (1978) identifie la région de la Boucle du Niger (faisant certainement allusion à la région de Bodélé) comme la provenance des poussières africaines en Grande Bretagne. OZER (2001) y ajoute qu'un transport de six jours, via les Iles Canaries, avait été nécessaire avant que le nuage de poussière ne précipite sur l'Irlande et l'Ecosse.

Concluant sur l'identité sahélienne des poussières arrivant en Méditerranée et en Europe, LITTMANN (1991) émet l'hypothèse d'une origine sahélienne de plusieurs retombées classées d'origine saharienne et souligne pour se justifier que la confusion proviendrait du fait que les lithométéores ont été rechargés durant leur transport par des poussières sahariennes.

- *Le transport vers le Moyen Orient* : d'après BOU KARAM (2008), les observations satellitaires et les mesures directes montrent que le transport vers la péninsule Arabique, le Proche et le Moyen Orient se fait essentiellement par des panaches issus du Sahara Oriental (Libye, Egypte et Soudan, (ALPERT et GANOR, 2001 ; KUBILAY et al., 2005)). Le transport suivant cette trajectoire est significatif durant trois périodes de l'année (ISRAELEVICH et al., 2003) : au printemps (Mars-Mai), en été (Juillet-Aout) et en automne (Septembre-Novembre). À cet effet TANAKA et al. (2005) y ajoute que ces panaches issus du Sahara Oriental et transportés vers la péninsule Arabique atteignent parfois le Japon et l'Asie du Sud.

En conclusion de cette section, il ressort de l'étude des principales zones sources en Afrique au nord de l'Equateur que celles-ci se localisent en région saharienne et sahélienne. Ces sources saharo-sahéliennes sont d'ailleurs la première source mondiale de poussières désertiques. Parmi toutes celles-ci, la région de Bodélé se distingue de par son activité toute l'année et de par des quantités importantes de poussières qu'elle émet. Le sud mauritanien et la haute boucle du Niger sont récemment identifiés comme sources importantes. Principalement la région Transatlantique, la région Méditerranéenne-Européenne et la région du Moyen Orient sont retenues comme principales trajectoires des poussières émises en zones sources saharo-sahéliennes. Ces émissions restent cependant très variables et justifient ainsi l'évolution de la fréquence des lithométéores en zones puits. Le chapitre IV étudie cette évolution des fréquences des aérosols désertiques aux stations de l'extrême Nord-Sénégal et évalue leurs impacts radiatifs.

Chapitre IV : Analyse de l'évolution des fréquences de lithométéores et étude de leurs effets radiatifs dans l'extrême Nord-Sénégal

1. Evolution et répartition de la fréquence du nombre de jours de lithométéores dans l'extrême Nord-Sénégal

1.1. Répartition diurne des lithométéores

"...le vent de sable se lève avec le soleil et se couche avec lui"

Dubief (1952, pp. 151-152)

Comme il est le cas dans toutes les stations sahariennes et sahéliennes, la fréquence des lithométéores est maximum au cœur de la journée, généralement entre 09 heures et 15 heures et celle minimum est quasiment enregistrée en pleine nuit, le plus souvent entre 21 heures et 03 heures. Si rien de particulier n'est à signaler par rapport à cette règle à la station de Saint-Louis, il n'est par contre pas rare de constater aux stations de Matam et Podor une très forte présence de phénomènes de poussière désertique un peu plus tôt dans la journée (à 08 heures). Ces lithométéores peuvent être extrêmement importants en terme de concentration et de leur impact sur la visibilité. Le jeudi 08 Janvier 2015, lors d'un séjour à Woudourou (à une vingtaine de kilomètre de Matam), nous avons vu les élèves revenir quelques minutes après l'heure de démarrage des cours (08 heures). À la question du pourquoi, la réponse était que les forts événements de poussières qui s'y manifestaient dès ces premières heures de la journée les empêchaient de voir les tableaux de leurs salles de classe respectives. Cette situation est notée dans quasiment toutes les localités de la station de Matam. Est-il nécessaire alors de souligner que la visibilité était fortement réduite à moins de 10 mètres du fait des concentrations élevées.

Pour les fréquences minimums, elles restent localiser au milieu de la nuit aussi bien à la station de Saint-Louis qu'aux stations de Podor et de Matam. Cependant, lors des jours enregistrant des pluies ou des orages la nuit, il arrive que le maximum de la fréquence lithométéorique journalière soit connue à cette partie de la journée du fait que le plus souvent ces orages et événements pluviaux sont respectivement accompagnés et précédés des "haboobs" ou mur de poussières de forte concentration et de forte intensité. Notons que ces phénomènes sont moins connus à la

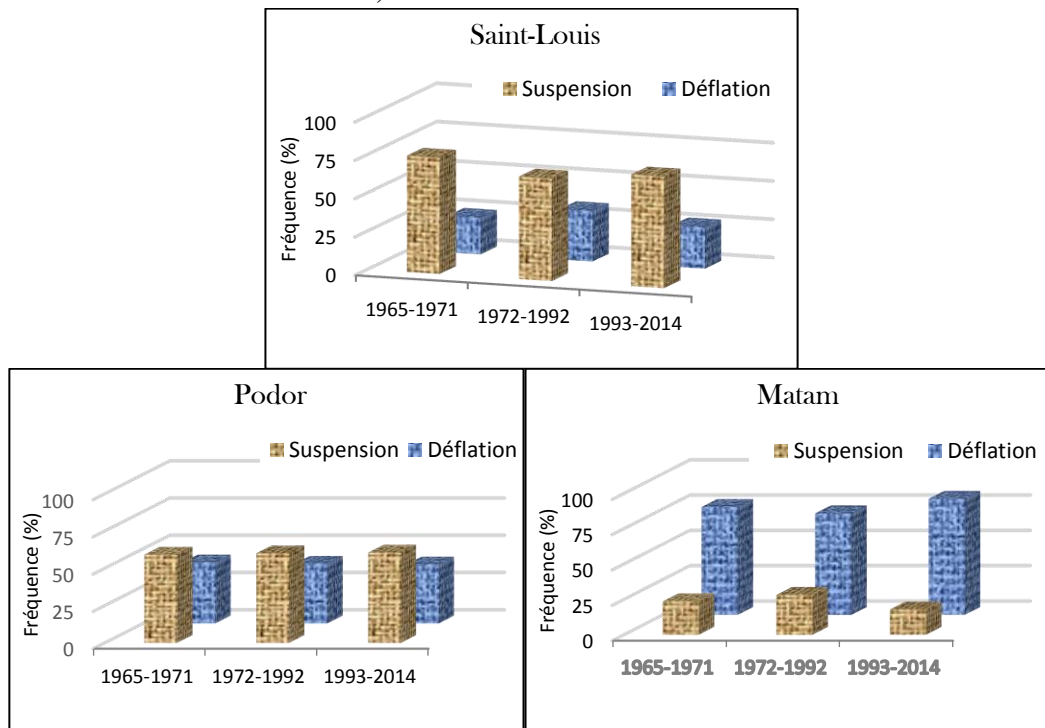
station de Saint-Louis par rapport aux stations centre et est de l'extrême Nord-Sénégal où ils sont très manifestes.

Cette répartition diurne des lithométéores aux Stations de Saint-Louis, de Podor et de Matam est tout à fait identique à celle notée dans quasiment toutes les stations sahéniennes. Etudiant cette répartition diurne au niveau de quelques stations sahéniennes, OZER⁴⁵ remarquait qu'« il est souvent ancré dans les esprits que les lithométéores se produisent essentiellement durant le jour et disparaissent ou s'atténuent durant la nuit ».

Cette répartition diurne est non seulement identique aux différentes stations de l'extrême Nord-Sénégal et sahéniennes mais elle reste également identique quel que soit la phase climatique considérée depuis les années cinquante (date où remonteraient les premières études sur les aérosols désertiques au Sahel et au Sahara).

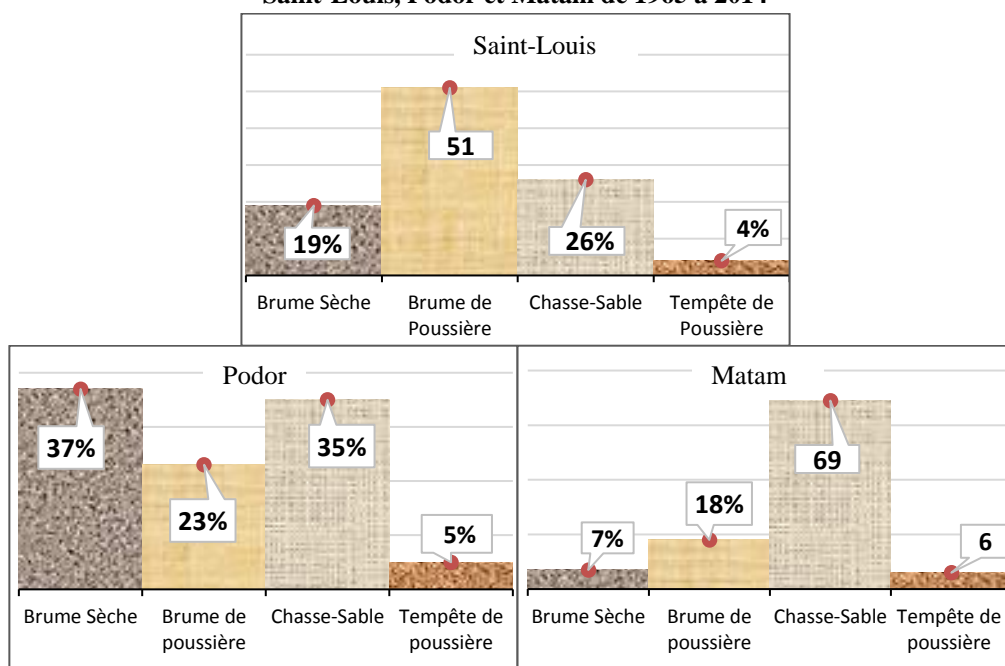
Si nous entreprenons à présent l'étude de l'évolution diurne des lithométéores en fonction de leur type (selon qu'ils résultent d'une suspension de particules ou qu'ils relèvent directement d'une déflation), nous constatons des modifications au cours des phases climatiques.

Figure 72 : Evolution des fréquences journalières suivant le type de lithométéore aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam de 1965 à 2014



⁴⁵ Op.cit.

Figure 73 : Répartition moyenne journalière des fréquences suivant le type de lithométéore aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam de 1965 à 2014



L'analyse suivant le type de lithométéore et par station nous montre qu'à Saint-Louis (*figure 72*) de 1965 à 1971, 76% des fréquences journalières étaient composées par des brumes sèches et des brumes de poussières c'est-à-dire par des poussières en suspension contre seulement 24% de chasse-sable et de tempêtes de poussière, autrement des cas de déflation. Cette période a été suivie par une longue période de sécheresse (1972-1992). Lors de cette dernière, les manifestations journalières des cas de déflation connurent une augmentation de 10% et composeront ainsi 1/3 des fréquences diurnes lithométéoriques tous types confondus. Cependant de 1993 à 2014, les cas de déflation connaissent une chute de fréquence de 6% comparée à la période sèche, mais reste à +3% comparée à la période avant la sécheresse. Que l'on soit en présence de poussières en suspension (brume sèche ou brume de poussière) ou des cas de déflation (chasse-sable ou tempête de poussière), le maximum est toujours enregistré durant le jour et le minimum au cœur de la nuit. L'augmentation des fréquences des cas de déflation entre la période sèche et celle la précédant est majoritairement notée entre les premières heures de la journée et 15 heures. Ce qui impacte donc sur le rapport maxi/mini ($R_{M/m}$). Globalement sur notre période d'étude (1965-2014), 1/2 les manifestations journalières des lithométéores sont composées par les brumes de poussière à la station de Saint-Louis. Le reste des fréquences est ainsi réparti : brume sèche (19%), chasse-sable (26%) et tempête de poussière (4%) (*figure 73*).

À la station centre de la zone d'étude (Podor), sur la période 1965-1972, 60% des fréquences journalières des lithométéores étaient composées par des poussières en suspension (brumes

sèches et brumes de poussières) contre 40% de cas de déflation (chasse-sable et tempête de poussière). Même si une augmentation de 20% des fréquences de lithométéores est notée durant la période sèche (1972-1992), le rapport entre phénomènes de poussières en suspension et celui des cas de déflation reste le même (*figure 72*). Cette forte fréquence journalière aussi de poussière en suspension que de cas de déflation s'explique par la position géographique de la station. Sa septentrionalité fait qu'elle bénéficie de l'arrivée massive de poussières provenant des sources saharo-sahéliennes (poussière en suspension) et sa situation proche de la source sud-ouest mauritanienne lui procure d'énormes chasse-sable (cas de déflation). Certes, comparées à la période sèche, les fréquences journalières ont connu une baisse remarquable à la période actuelle, mais l'évolution de cette fréquence suivant le type de lithométéore garde quasiment le même pourcentage (le rapport est de 1.1). Qu'il s'agisse de brume sèche, de brume de poussière, de chasse-sable ou de tempête de poussière, le maximum est toujours connu au cœur de la journée (entre 08-09heures et 15 heures) et le minimum durant la nuit. Le regard généralisé sur la répartition journalière des lithométéores à la station de Podor nous montre que de 1965 à 2014 la fréquence moyenne est largement dominée à plus de 70% par les brumes sèches et les chasse-sable (respectivement de 37% et 35%) (*figure 73*).

S'agissant de la station de Matam, seuls 24% des lithométéores étaient composés par des poussières en suspension contre 76% par de chasse-sable et de tempêtes de poussière. Même si durant la période sèche (1972-1992), la fréquence journalière des brumes sèches et brumes de poussière y a connu une augmentation de 4% comparée à la période précédente (*figure 72*), les cas de déflation constituent néanmoins plus de 3/4 des manifestations lithométéoriques. Il faut noter que cette hausse des particules en suspension ne coïncide pas avec une baisse des cas de déflation mais s'explique plutôt par une émission plus massive des sources sahéennes en cette période de sécheresse et donc à plus forte arrivée de panaches de poussière en cette station comme c'est le cas quasiment dans toutes les stations du sahel méridional. Cela est d'autant plus évident qu'à la période post-sécheresse actuelle, 4/5 des manifestations journalières sont composés par des cas de déflation (chasse-sable et tempête de poussière). Ici également la répartition diurne est toujours la même. L'accroissement des fréquences, qu'il s'agisse des poussières en suspension lors de la période de sécheresse ou des cas de déflation à la période actuelle est fortement concentré durant le jour, ce qui modifie constamment le rapport ($R_{M/m}$). Quand on considère notre période d'étude (1965-2014) et on envisage une analyse des fréquences journalières des lithométéores de façon générale et non suivant les phases climatiques, on constate qu'environ

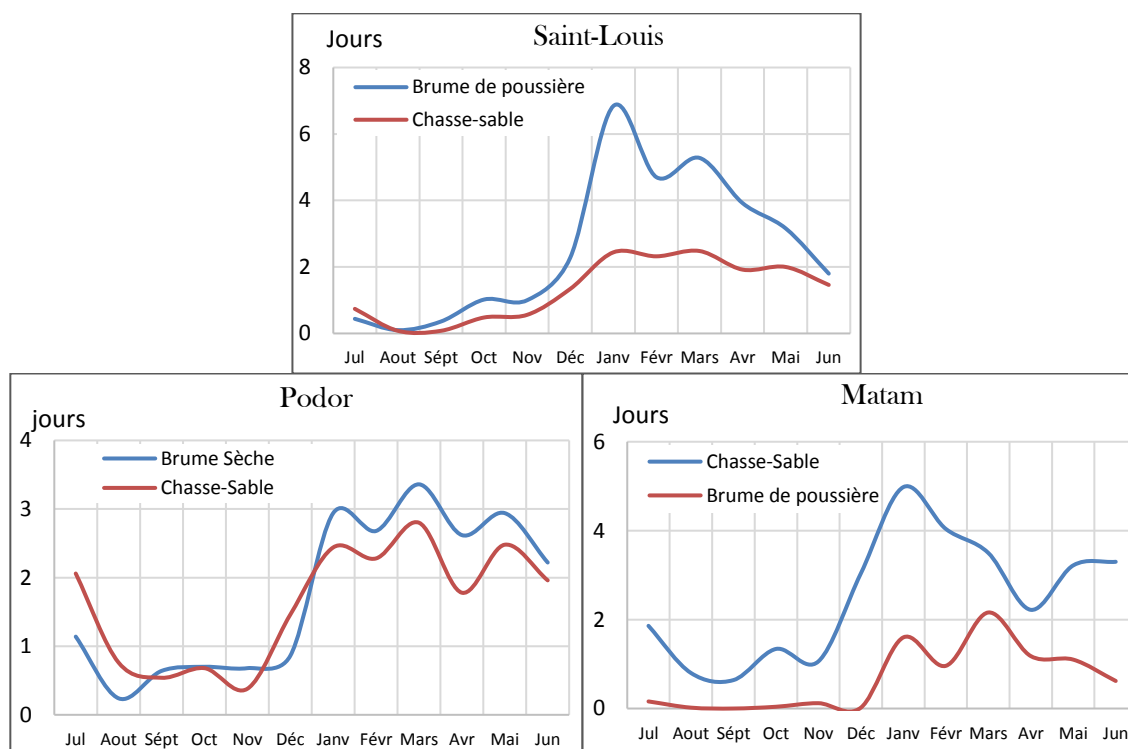
70% des manifestations sont constituées par des chasse-sable contre 20% environ par des brumes de poussières (*figure 73*).

1.2. Répartition mensuelle et saisonnières des lithométéores

Le diagnostic de la répartition mensuelle et saisonnière des fréquences lithométéoriques nous permet de détecter le maximum et le minimum des manifestations de ces poussières désertiques au niveau de chaque station suivant les mois et les saisons de l'année.

Dans les stations septentrionales du Sénégal, le maximum des fréquences des lithométéores s'observe de janvier à mai, soit au cœur de la saison sèche alors que le minimum des fréquences est enregistré de juillet à septembre, autrement durant la saison des pluies.

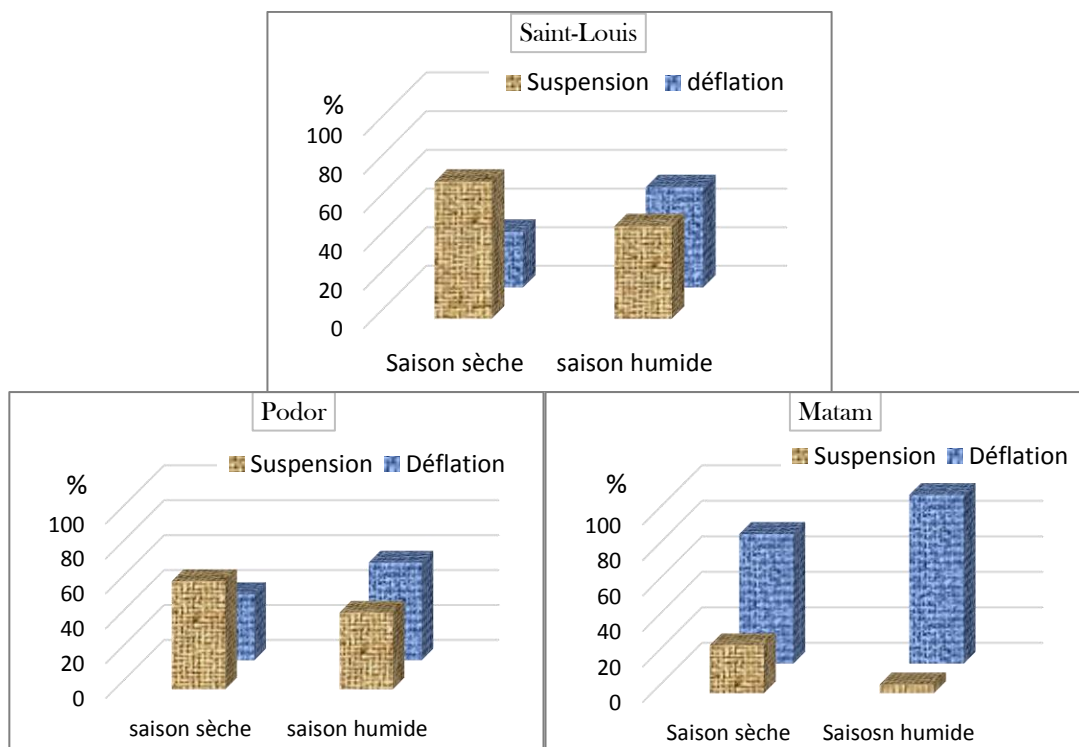
Figure 74 : Répartition mensuelle et saisonnière des deux types de lithométéores les plus fréquents aux niveaux des stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1965-2014)



Le maximum des fréquences au cœur de la saison sèche est à corrélérer avec les perturbations en zones sources et la position du FIT. En effet c'est durant cette période de l'année que les sources sahariennes et sahéliennes sont plus actives et présentent un maximum de déflation. Ceci ajouté au fait que le FIT occupe sa position la plus basse en latitude à cette période de l'année, les vents d'harmattan opposés aux conditions pédologiques, lithologiques et météorologiques qui lui sont très favorables en cette saison sèche transportent des quantités importantes de particules de poussières vers le sud dont une valeur très considérable reste en suspension. La *figure 75* atteste

parfaitement cet état de fait aux stations de Saint-Louis et Podor où de janvier à mai les lithométéores sont composés respectivement de 71 et 62% par des poussières en suspension (brumes de poussière et brumes sèches). À la station de Matam, la situation est tout autre, ici même en cette saison sèche, les fréquences restent largement dominées par les cas de déflation.

Figure 75 : fréquence des types de lithométéor suivant en saisons sèche et humide aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1965-2014)



Ceci ne veut en aucun cas dire que la station n'est pas fortement fournie en poussière en suspension en provenance des sources Saharo-sahéliennes qui sont au maximum d'émission en saison sèche, mais cela se justifie plutôt par la forte présence de chasse-sable à la station en cette période en corrélation avec son voisinage proche avec la source sud-ouest mauritanienne qui exerce de forts cas de déflation. Cette proximité associée à l'absence de forts obstacles qui conditionneraient le soulèvement des particules à des hauteurs élevées, font que ces lithométéores qui y arrivent gardent les mêmes caractères de déflation.

En outre, s'agissant de la fréquence minimum des lithométéores, elle est enregistrée de juillet à septembre, aux mois pluviaux de l'année partout à l'extrême Nord-Sénégal. Si à la station de Saint-Louis et à celle de Podor, les poussières en suspension dominaient manifestement les fréquences en saison sèche, en cette période d'hivernage, ce sont les cas de déflation (chasse-sable et tempête de poussière) qui constituent la majorité des lithométéores quelque soit la station considérée. À l'extrême ouest et au centre de la zone d'étude, ils constituent

respectivement 52 et 56% des fréquences, alors qu'à la station est la quasi-totalité (95%) des lithométéores est composée par ces phénomènes de déflation (avec en grande majorité de chasse-sable). Ce minimum de fréquence noté en cette partie de l'année est dû en partie au fait que la plupart des sources sahéliennes sont sous contrôle des pluies d'hivernage, ce qui diminue leur émission. Ceci diminue fortement l'arrivée des poussières en suspension. D'autre part, le reste des poussières en suspension qui proviennent des sources sahariennes et la zone source de Bodélé (est-il intéressant de rappeler que la zone source de Bodélé reste active toute l'année) est soumis à la remontée du FIT qui ne permet plus sinon réduite fortement le déplacement de ces poussières en suspension vers le sud-ouest. Le fait que la majorité des lithométéores soit composée par des cas de déflation se justifie par le fait que cette période de l'année connaît fréquemment des "haboobs" qui sont des murs de sable ou de poussière associés à de vents violents qui accompagnent et précèdent respectivement les orages et la pluie favorisant ainsi les cas de déflation. Ces phénomènes de "haboobs" sont plus manifestes à la station de Matam et de Podor.

L'on pourrait être tenté de supposer que la sécheresse qui, se marquant par la réduction de la longueur de la saison des pluies, puisse impacter sur la répartition des fréquences au point de changer la position de la fréquence maximum et minimum. Si OZER⁴⁶ a noté que la fréquence maximum des lithométéores a été postposée d'un mois ou deux dans les stations de Tombouctou, Gao et Boutilimit en rapport avec la sécheresse, dans les stations de Saint-Louis, Podor et Matam, aucun changement de position, aussi bien pour la fréquence maximum que celle minimum n'a été constaté durant les différentes phases climatiques.

En conclusion de cette section, au vu de tout ce qui a été développé jusqu'ici, on comprend que les fréquences maximum et minimum des lithométéores sont fortement liées aux caractéristiques climatiques de la région. D'abord l'Harmattan qui favorise l'arrivée massive des poussières en suspension en saison sèche et ensuite la pluie qui diminue l'activité des zones sources, le FIT qui réduit le déplacement des poussières en suspension vers le sud-ouest et les phénomènes de "haboobs" qui justifient la majorité des cas de déflation à la saison humide. D'autre part, il apparaît que les modifications survenues aux cours des différentes phases climatiques n'ont pas impacté sur la position des fréquences maximum et minimum dans les stations de notre zone d'étude.

⁴⁶ Op.cit.

1.3. Evolution annuelle des lithométéores de 1965 à 2014

L'analyse du cumul annuel d'un paramètre climatique au cours d'une période est pertinente pour l'étude de sa variabilité. Celle du nombre de jours avec lithométéores met en évidence l'alternance d'années excédentaires et déficitaires par rapport à la moyenne interannuelles. Les *tableaux 23, 24 et 25* présentent les totaux annuels de jours de lithométéores aux stations de Saint-Louis, de Podor et de Matam sur la période 1965-2014, c'est-à-dire une série de 50 ans.

Tableau 23 : Fréquences annuelles de jours de lithométéores dans la station de Saint-Louis (1965-2014)

Saint-Louis	Années	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
	Total	80	45	46	83	55	75	61	66	59	61
	Années	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984
	Total	51	86	80	52	45	61	60	60	68	89
	Années	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
	Total	91	100	124	153	137	164	73	68	108	26
	Années	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
	Total	119	64	26	53	24	40	17	30	41	23
	Années	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
	Total	40	23	22	16	16	23	25	42	17	45

Tableau 24 : Fréquences annuelles de jours de lithométéores dans la station de Podor (1965-2014)

Podor	Années	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
	Total	132	38	63	91	74	24	62	65	59	53
	Années	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984
	Total	46	78	79	39	42	52	56	57	266	257
	Années	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
	Total	222	80	134	68	45	51	41	56	34	16
	Années	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
	Total	10	04	21	28	08	05	17	30	38	23
	Années	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
	Total	40	23	13	13	13	15	24	53	17	49

Tableau 25 : Fréquences annuelles de jours de lithométéores dans la station de Matam (1965-2014)

Matam	Années	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
	Total	73	82	39	37	21	39	52	51	50	45
	Années	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984
	Total	41	63	65	34	36	44	43	52	125	80
	Années	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
	Total	78	156	108	73	45	48	34	27	66	32
	Années	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
	Total	23	07	30	24	23	11	09	09	16	20
	Années	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
	Total	29	20	19	13	22	18	20	30	36	51

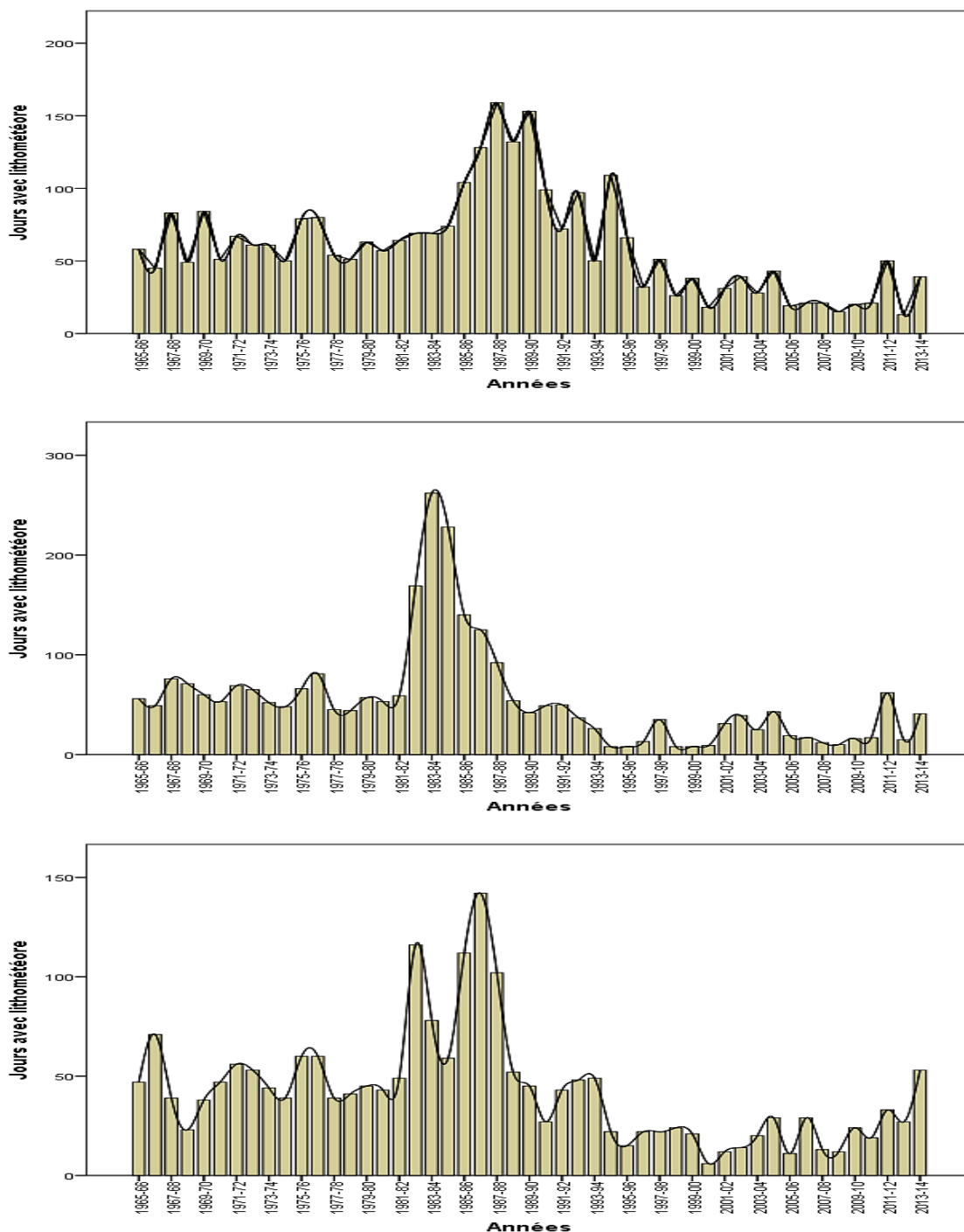
Cependant pour l'étude de l'évolution des lithométéores nous n'allons pas considérer l'année calendrier c'est-à-dire celle qui va de janvier à décembre. Nous choisirons plutôt l'année saisonnière c'est-à-dire l'année 19XX comme couvrant la période qui s'étend de juin 19XX à mai 19XX+1. La raison qui explique que nous avons choisi le mois juin est due au fait qu'il nous paraît plus intéressant de considérer une année saisonnière à partir de la saison des pluies d'autant plus qu'il arrive qu'il existe une relation de cause à effet entre la pluviométrie d'une saison et le comportement lithométéorique de la saison sèche qui la suit, d'autre part, en cette partie du Sénégal, l'hivernage peut débuter dès la fin du mois de juin. Le fait donc de choisir l'année saisonnière nous permettra de considérer la saison des pluies et la saison sèche qui lui succède alors que si nous mettions l'accent sur l'année calendrier, nous serions amenés à couvrir la saison des pluies de l'année considérée et deux moitiés de saisons sèches.

Analysant l'évolution annuelle des lithométéores dans quelques stations sahéliennes de 1951 à 1997 ; OZER⁴⁷ notait que "*couper la saison sèche en deux parties n'a dès lors aucun sens et a donc pour effet de reporter d'un an les conséquences qu'un événement climatique exceptionnel pourrait avoir sur l'amplification du 'phénomène lithométéore'*".

La **figure 76** présente l'évolution annuelle (années saisonnières, juin-mai) du nombre de jours de lithométéores dans l'extrême Nord-Sénégal sur 50 ans d'observation (1965-2014).

⁴⁷ Op.cit.

Figure 76 : Evolution annuelle (juin-mai) du nombre de jours de lithométéores aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam de 1965 à 2014



À lire de haut en bas : Saint-Louis ; Podor ; Matam

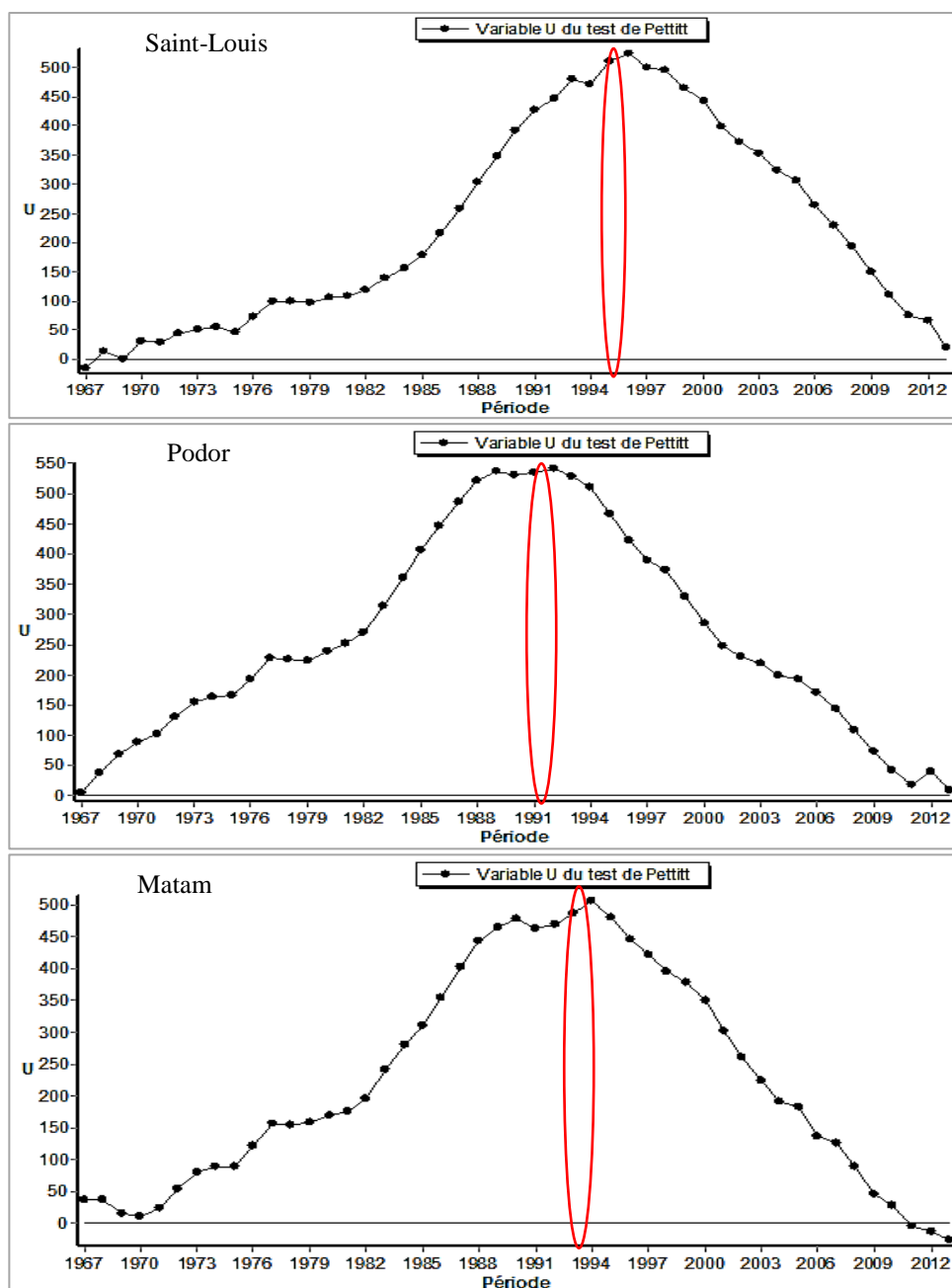
Si les événements de lithométéores ont été considérés comme étant relativement faibles dans les années cinquante et dans la première moitié des années soixante, la **figure 76** nous révèle que la fréquence de jours avec lithométéores a connu une augmentation considérable dès la fin des années soixante jusqu'à la fin des années septante où les valeurs oscillent entre 40 et 80 jours aux stations de Saint-Louis et Podor et entre 40 et 60 jours à la station de Matam. Cette hausse du

nombre de jours avec lithométéores connaîtra une explosion dès le début des années quatre-vingt coïncidant avec la deuxième vague de sécheresse climatique. La station de Saint-Louis connaîtra toute une décennie (1983-1993) de fréquences élevées où 7 de ces 10 années ont enregistré un total annuel supérieur ou égal à 100 jours de poussières. L'année saisonnière 1987-1988 y constitue le maximum de la fréquence annuelle où 159 jours, soit 2 jours/5 étaient marqués par des événements de lithométéores. Aux stations de Podor et Matam, la forte augmentation de la fréquence annuelle a été amorcée une année plutôt (1982) qu'à la station de Saint-Louis et s'étendra jusqu'à 1988. À ces stations respectives 5 et 4 de ces 6 années (1982-1988) connaissent un total annuel de plus de 100 jours de lithométéores. Au centre (station de Podor), le maximum de la fréquence annuelle est connu durant l'année saisonnière 1983-1984 où 262 jours, soit plus de 2 jours/3 étaient marqués par des phénomènes lithométéores. À l'extrême ouest (station de Matam), c'est l'année 1986-1987 qui enregistre le maximum de la fréquence de jours avec lithométéores. Durant cette année 142 jours soit 2 jours/5 ont été affectés par des poussières désertiques.

On comprend alors qu'en terme de conséquences lithométéoriques, c'est la deuxième vague de sécheresse sahélienne qui a été la plus manifeste. Cela ne devrait en aucun cas nous surprendre d'autant plus que cette période constitue le prolongement d'un environnement déjà asséché (par la sécheresse des années 70) et l'accentuation de l'état sec de ses paramètres litho-pédologiques. La production de poussières en toute l'Afrique de l'ouest a augmenté durant cette période aussi bien en saison sèche qu'en saison de pluie. MIDDLETON (1985) notait une augmentation très importante, d'un facteur 6 en Mauritanie et d'un facteur 5 au Soudan, OZER (1998) observé une augmentation atteignant un facteur 5 dans les 8 stations synoptiques nigériennes qu'il étudiait. Faisant allusion aux conséquences de ces années 80, VALENTINE et HERBES (1999) parlent d'une dénudation intégrale des sols, ce qui d'après eux favorise alors tous les types d'érosion parmi lesquels la déflation éolienne.

Après ces années de forte fréquence de nombre de jours de lithométéores, une baisse remarquable est connue durant la période post-sécheresse. Toutes les stations seront marquées par une fréquence modérée voir faible durant cette période actuelle. L'application du test de PETTITT (1979) (*figure 77*) à nos séries annuelles montre une très nette rupture de tendance à la baisse dans les stations de l'extrême Nord-Sénégal. Les dates de début de rupture correspondent aux années saisonnières 1995-1996 à la station de Saint-Louis, 1991-1992 à la station de Podor et 1993-1994 à la station de Matam.

Figure 77 : Evolution de la fréquence annuelle (juin-mai) d'après le test de PETTITT et mise en évidence des points de rupture aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1965-2014)

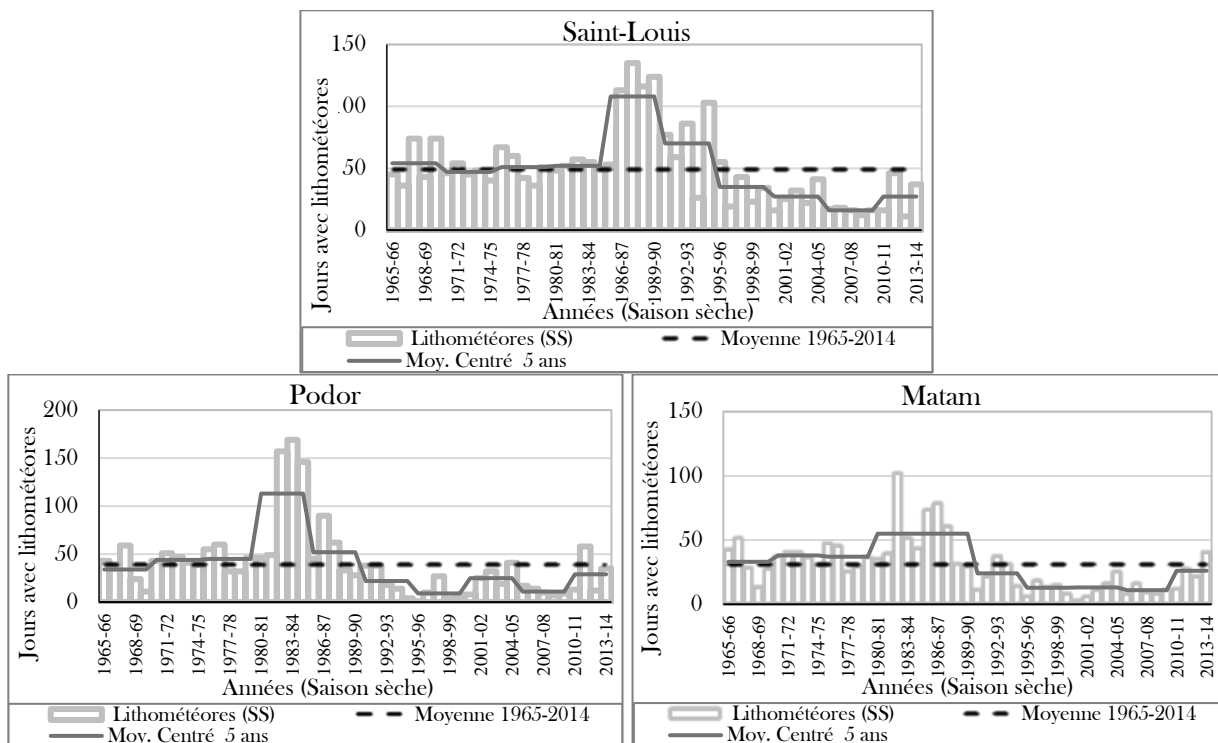


La fréquence faible à modérée de la période actuelle (1993-2014) est nettement manifeste. Lorsque l'on compare la période de sécheresse (couvrant la sécheresse des années 70 et celle des années 80-90) à la période actuelle (1993-2014), on constate un écart important dans toutes les stations de notre zone d'étude. Aux stations de Saint-Louis et Podor, une diminution de 60% de la fréquence du nombre de jours de lithométéores est notée durant la période 1993-2014 comparée à la période sèche (1972-1992) alors qu'un écart de 45% est constable à la station de Matam entre ces deux périodes. Cependant loin d'être négligeable, la fréquence du nombre de jours de lithométéores reste manifeste au cours de la période actuelle. Quand on évalue la

question depuis le début des années de rupture qui affiche une tendance à la baisse par rapport aux années de sécheresse, on se rend compte que malgré que l'on s'éloigne petit à petit des influences de ces années de sécheresse, la moyenne interannuelle aux stations de Matam, Podor et Saint-Louis reste considérable et est respectivement de 22, 23 et 29 jours de poussières désertiques. Mieux encore, quand on considère seulement les cinq dernières années, on note que la moyenne connaît une hausse surtout au centre et à l'est (respectivement 31 et 30 jours) comparée au reste de la période actuelle. Est-il nécessaire de souligner la corrélation entre cette hausse et le "retour à la normale" pluviométrique amorcé depuis le début des années 2000.

Du fait que l'un des traits les plus marquants de la sécheresse est la réduction de la longueur de la saison des pluies et que par conséquent l'essentiel de ses impacts lithométéoriques (augmentation ou diminution, changement de position du maximum de la fréquence) s'observe en saison sèche, il nous paraît intéressant, dans cette étude de l'évolution annuelle du nombre de jours de lithométéore, de mettre l'accent spécifiquement sur la saison sèche afin de détecter éventuellement des changements dans l'évolution de la fréquence.

Figure 78 : Evolution du nombre de jours de lithométéores (saison sèche) au cours des années saisonnières aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam de 1965 à 2014



Quand on fait allusion à l'évolution de la fréquence en saison sèche entre les différentes phases climatiques, (avant sécheresse, période de sécheresse et post-sécheresse), on retrouve une

évolution identique à celle de la fréquence annuelle du nombre de jours de lithométéores. Le maximum se situe au cœur de la seconde vague tandis que la fréquence au cours de la période actuelle est au-dessous de la moyenne.

L'application du test de PETTITT nous révèle quelque chose d'intéressant. Si aux stations de Saint-Louis et Podor, les années de rupture restent les mêmes que celles détectées en analysant l'évolution annuelles toutes saisons confondues (respectivement 1995-1996 et 1991-1992), à la station de Matam par contre l'application du test de PETTITT nous révèle que la rupture y est amorcée 3 année avant (1990-1991) celle détectée par le même test lorsque l'on considère l'évolution annuelle tenant en compte les deux saisons (1993-1994). Ce sont les forts cas de déflation en saisons de pluies qui, comme nous l'avons souligné auparavant ont connu une augmentation de 10% de fréquence à la période actuelle comparée à la période 1972-1992 qui témoignent cette postposition de la date de rupture lorsque l'on considère les cumuls annuels toutes saisons confondues.

La courbe d'évolution de la moyenne centrée sur 5 ans nous montre que quand nous nous focalisons uniquement sur la période actuelle (depuis l'année de rupture), la moyenne de la fréquence des 5 dernières années (2010-2014) aux stations de Matam et Podor est plus élevée que les restants de la période. Il nous paraît cependant prématuré de penser à l'amorcement d'une nouvelle tendance à la hausse.

Il est à retenir de façon conclusive sur la fréquence de jours de lithométéore aux stations du Nord-Sénégal que :

Le maximum de la fréquence journalière se situe au cœur de la journée, généralement entre 09 et 15 heures et le minimum est à retrouver au milieu de la nuit, globalement entre 21 et 03 heures même s'il n'est pas rare de noter des événements de poussières importants en terme de concentration déjà un peu plus tôt aux stations de Podor et Matam.

L'étude de l'évolution diurne en fonction du type de lithométéore nous révèle une variation de la fréquence suivant les différentes phases climatiques même si le maximum journalier se situe toujours au cœur de la journée, entre 09 et 15 heures quel que soit la période considérée.

Le diagnostic de la répartition saisonnière nous montre que le maximum s'observe toujours en pleine saison sèche, soit de janvier à mai alors que le minimum se retrouve durant la saison des pluies, c'est-à-dire de juillet à septembre.

Sauf à la station de Matam où les cas de déflation dominent toujours la fréquence des lithométéores quelques soit la saison considérée, le reste de l'extrême Nord-Sénégal est soumis aux poussières en suspension en saison sèche alors que les cas de déflation y constituent la majorité des lithométéores en saison humide.

L'analyse de l'évolution annuelle (années saisonnières) indique que la fréquence du nombre de jours de lithométéores qui fut faible dans les années cinquante et au début des années soixante a connu une augmentation importante dès la fin des années soixante et reste modérée (40 à 80 jours aux stations de Saint-Louis et Podor et 40 à 60 jours à la station de Matam) tout au long des années septante. La deuxième vague de sécheresse des années quatre-vingt marque une explosion de la fréquence où les années enregistrant le maximum à l'ouest, au centre et à l'est de la zone d'étude connaissent respectivement 2/5, 2/3 et 2/5 de jours avec lithométéore.

L'application du test de PETTITT nous indique une rupture marquant de début de la tendance actuelle à la baisse dès 1995-1996 à la station de Saint-Louis, en 1991-1992 à la station de Podor et dès 1993-1994 à la station de Matam. Cependant, l'application de ce même test de PETTITT seulement à la fréquence du nombre de jours de lithométéore en saison sèche au cours de ces années nous apprend que cette rupture de tendance a été dès 1990 à la station de Matam. Est-il nécessaire de rappeler que ce sont les forts cas de déflation qui ont connu une augmentation au cours de la période post-sécheresse qui influent sur l'évolution de la fréquence et explique cette postposition du point de rupture quand on tient en compte l'année, toutes saisons confondues.

2. Étude des concentrations en particules de lithométéores à l'extrême Nord-Sénégal

L'impact environnemental direct des aérosols désertiques est la réduction de la visibilité horizontale. C'est d'ailleurs pourquoi en météorologie, la visibilité est l'un des paramètres utilisés pour identifier les caractéristiques des masses d'air (OZER⁴⁸). En effet, sur mesure de la visibilité horizontale réduite par les lithométéores, les niveaux de concentrations en particules de poussières désertiques peuvent être estimés en se servant de relations développées dans ce sens et disponibles dans la littérature.

Dans un de ses articles, réalisé en 2005, OZER nous liste les quelques études menées en Afrique de l'Ouest sur la relation entre visibilité horizontale et concentration en PST (particules en

⁴⁸ OZER P., 2005« Utilisation de la visibilité horizontale pour l'estimation de la qualité de l'air à Niamey (Niger)" », *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 44, 2004, 105-114, 10p.

suspension totale). Il s'agit entre autres, de l'étude de BERTRAND⁴⁹ qui se fondait sur trois années de données (1973 à 1975) durant la saison de l'Harmattan à Niamey, en utilisant les visibilité horizontales s'étalant de 1.5 à 12 kilomètres pour établir cette relation. La deuxième étude est celle que BEN MOHAMED⁵⁰ et son équipe ont réalisée au Niger en utilisant les données de sept stations synoptiques durant 17 mois. Ici les visibilité horizontales considérées sont beaucoup plus larges que celles de BERTRAND puisqu'elles vont de 100 mètres à 20 kilomètres. Avant cet article d'OZER, ces deux études sont les seuls à notre connaissance à avoir établi une relation entre visibilité horizontale et concentrations en PST et constituent les relations sur lesquelles se basent tous les auteurs ayant mené des études d'estimations des concentrations de poussières en PST en utilisant des données de visibilité horizontale des stations synoptiques de leur étude. Notons d'ailleurs qu'OZER lui-même a fait ses estimations de la concentration en PST à Niamey en 2003 en se basant sur ces relations établies par BERTRAND et BEN MOHAMED et al.

Pour ce qui est cette fois de la concentration en particules de poussières respirables, à savoir celles dont la taille est inférieure à 10 μm (PM_{10}), D'ALMEIDA⁵¹ serait le seul à avoir établi une relation la liant à la visibilité horizontale dans un de ses travaux intitulé « *A model for Saharan dust transport* » publié dans *J Climate Appl Meteor* en 1986. Cette étude de D'ALMEIDA se fonde sur les données recueillies en 1981 et 1982 dans onze stations synoptiques essentiellement réparties au sud du Sahara. Cette relation que l'auteur a établie repose sur plus de 200 observations de visibilité horizontale variant de 200 mètres et kilomètres (OZER⁵²). Cette dernière constitue jusqu'à ici la référence de toute étude menée dans le but d'estimer la concentration en PM_{10} à partir des données de visibilité horizontale.

Sur la base des mesures de visibilité horizontale réduite par les poussières minérales dans l'air, nous allons estimer les niveaux de concentration en PST et en PM_{10} aux stations synoptiques de Saint-Louis, Podor et Matam retenues dans le cadre de cette thèse pour étudier les fréquences des aérosols désertiques dans l'extrême Nord-Sénégal. Ces estimations des niveaux de concentration sont faites en utilisant les relations de BERTRAND et BEN MOHAMED et al. pour ce qui concerne les PST et la relation de D'ALMEIDA pour ce qui s'agit des PM_{10} . Sur la base de ces

⁴⁹ BERTRAND J. (1976), « *Visibilité et brume sèche en Afrique* ». *La météorologie* ; 6 : 201-11.

⁵⁰ BEN MOHAMED et al., *Spatial and temporal variations of atmospheric turbidity and related parameters in Niger*. *J Appl Meteorol* 1992 ; 31 : 1286-94.

⁵¹ D'ALMEIDA GA. *A model for Saharan dust transport*. *J Climate Appl Meteor* 1986 ; 25 : 903-16.

⁵² Op.cit.

relations (*tableau 26*), nous avons transformé les données de visibilité minimale de nos stations en concentrations de poussière en PST et en concentrations de poussière en PM₁₀. L'étude couvre la longue période 1965-2014 et concerne seulement les visibilités horizontales réduites par les lithométéores à moins de 10 kilomètres car au-delà l'air est supposé "pur".

Tableau 26 : Relation entre la visibilité horizontale (VV en Km) et la concentration en PST ou PM₁₀ (C en µg.m⁻³)

Relation	Concentration concernée	Auteurs
$C = 1\,897\, VV^{-0,91}$	PST	Bertrand (1976)
$C = 1\,339,84\, VV^{-0,67}$	PST	Ben Mohamed et al. (1992)
$C = 914,06\, VV^{-0,73} + 19,03$	PM ₁₀	D'Almeida (1986)

Les résultats ainsi obtenus de cette transformation des données de visibilité horizontale de nos stations étudiées en concentrations en PST et PM₁₀ sont présentés aux pas de temps quotidien, mensuel et annuel.

2.1. Concentration journalière en PST et en PM₁₀

2.1.1 Concentration journalière en PST

Les *tableaux 27 ; 28 ; 29* et *figure 79* présentent la distribution de la fréquence des concentrations journalières en PST à nos différentes stations d'étude de 1965 à 2014.

Tableau 27 : Fréquence des concentrations journalières en PST à station de Saint-Louis de 1965 à 2014

Saint-Louis	D'après la relation de Bertrand (1976)					
	Concentrations journalières en PST (µg.m ⁻³)	<300	300-500	500-750	750-1000	>1000
	Fréquences (%)	20,1	43,0	18,8	0,8	17,3
	D'après la relation de Ben Mohamed et al. (1992)					
	Concentrations journalières en PST (µg.m ⁻³)	<300	300-500	500-750	750-1000	>1000
	Fréquences (%)	1,0	63,8	18,4	1,7	15,2

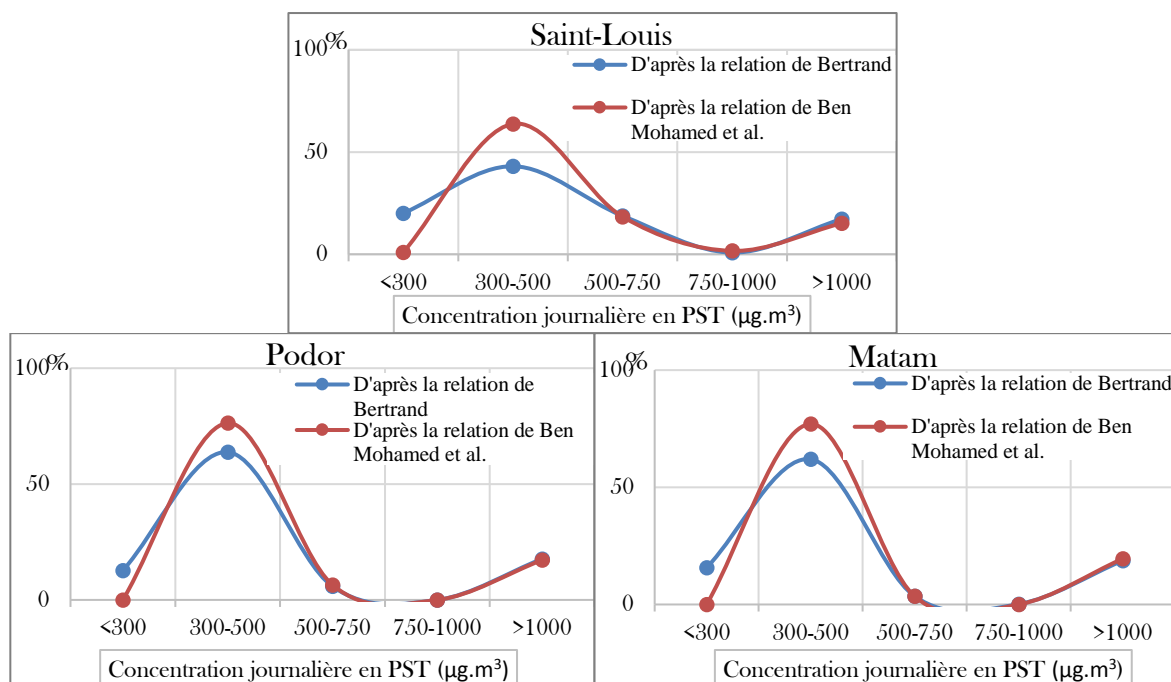
Tableau 28 ; : Fréquence des concentrations journalières en PST à la station de Podor de 1965 à 2014

Podor	D'après la relation de Bertrand (1976)					
	Concentrations journalières en PST (µg.m ⁻³)	<300	300-500	500-750	750-1000	>1000
	Fréquences (%)	12,7	63,8	5,8	00	17,7
	D'après la relation de Ben Mohamed et al. (1992)					
	Concentrations journalières en PST (µg.m ⁻³)	<300	300-500	500-750	750-1000	>1000
	Fréquences (%)	00	76,3	6,5	00	17,2

Tableau 29 : Fréquence des concentrations journalières en PST à la station de Matam de 1965 à 2014

Matam	D'après la relation de Bertrand (1976)					
	Concentrations journalières en PST (µg.m ⁻³)	<300	300-500	500-750	750-1000	>1000
	Fréquences (%)	15,7	61,9	3,5	0,2	18,7
	D'après la relation de Ben Mohamed et al. (1992)					
	Concentrations journalières en PST (µg.m ⁻³)	<300	300-500	500-750	750-1000	>1000
	Fréquences (%)	00	77	3,5	00	19,5

Figure 79 : Distribution de la fréquence des concentrations journalières en PST aux stations de l'extrême Nord-Sénégal (1965-2014)



La **figure 79** nous révèle la fréquence des niveaux de concentrations de poussières en PST aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam obtenue par transformation des données de visibilité horizontale grâce aux relations de BERTRAND et BEN MOHAMED et al. Comparé au seuil retenu par les différentes directives nationales sur la qualité de l'air qui est habituellement une concentration journalière en PST de $300 \mu\text{g.m}^{-3}$ ne pouvant être dépassée qu'un certain nombre de jours par an, les valeurs quotidiennes lors d'épisodes de lithométéores réduisant la visibilité horizontale à moins de 10 kilomètres sont très préoccupantes à nos différentes stations étudiées. À l'ouest de l'extrême Nord-Sénégal représenté ici par la station de Saint-Louis 79,5 à 99% des jours à visibilité horizontale inférieure à 10 kilomètres sont marqués par des niveaux de concentrations largement au-dessus du seuil retenu. Au centre et à l'extrême est de la zone d'étude représentés respectivement par les stations de Podor et de Matam, les valeurs sont également très inquiétantes. Ici aussi le seuil retenu est largement dépassé et quand on considère uniquement l'équation de BERTRAND environ 85% des jours affectés par les lithométéores sont caractérisés par des niveaux de concentrations largement au-dessus du seuil retenu pour les PST. Mieux encore l'application de l'équation de BEN MOHAMED ET al. révèle des concentrations toujours supérieures à $300 \mu\text{g.m}^{-3}$ à chaque fois que les panaches de poussières réduisent la visibilité horizontale à moins de 10 kilomètres. Ce qui est aussi important à souligner est la fréquence non négligeable d'épisodes critiques du point de vue de l'intensité qui réduisent la visibilité à moins de 1000 mètres et qui sont marqués par des niveaux de concentrations de

poussières en PST de plus de 1000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Cette valeur est plus qu'inquiétante puisque à 500 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ c'est-à-dire à $\frac{1}{2}$ de cette valeur la qualité de l'air est déjà jugée dangereuse. À l'extrême ouest de la zone étudiée, 15 à 17 des jours affectés par une visibilité horizontale inférieurs à 10 kilomètres connaissent des niveaux de concentrations supérieures à 1000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Au centre et à l'extrême est, ce niveau de concentrations de poussières en PST est enregistré respectivement jusqu'à plus 17% et de plus de 19% des jours avec présence de lithométéores réduisant la visibilité à moins de 10 kilomètres.

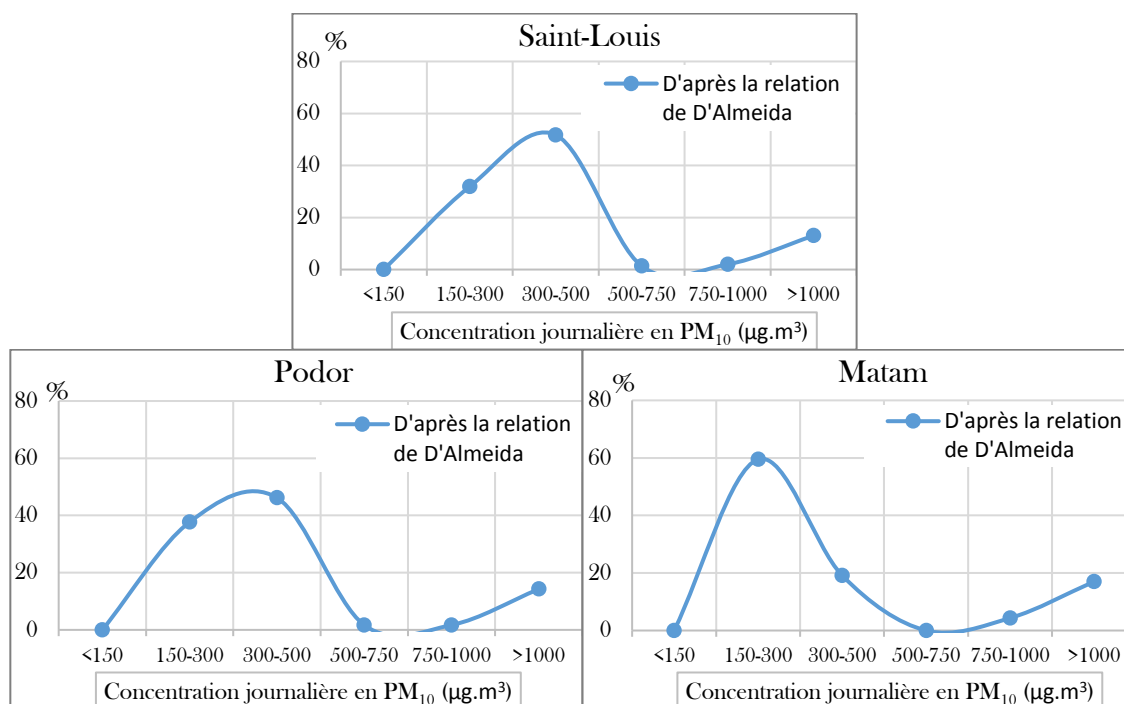
2.1.2 Concentration journalière en PM₁₀

Le *tableau 30* et *figure 80* présentent la distribution de la fréquence des concentrations journalières en PM₁₀ à nos différentes stations d'étude de 1965 à 2014.

Tableau 30 : Fréquence des concentrations journalières en PM₁₀ aux stations de l'extrême Nord-Sénégal de 1965 à 2014

		D'après la relation de D'Almeida (1986)					
Conc. journalières en PM ₁₀ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)		<150	150-300	300-500	500-750	750-1000	>1000
Fréquences (%)	Station de Saint-Louis	00	31,9	51,8	1,3	2,0	13,0
	Station de Podor	0	37,7	46,2	1,7	1,7	14,3
	Station de Matam	0	59,5	19,2	0	4,3	17,0

Figure 80 : Distribution de la fréquence des concentrations journalières en PM₁₀ aux stations de l'extrême Nord-Sénégal (1965-2014)

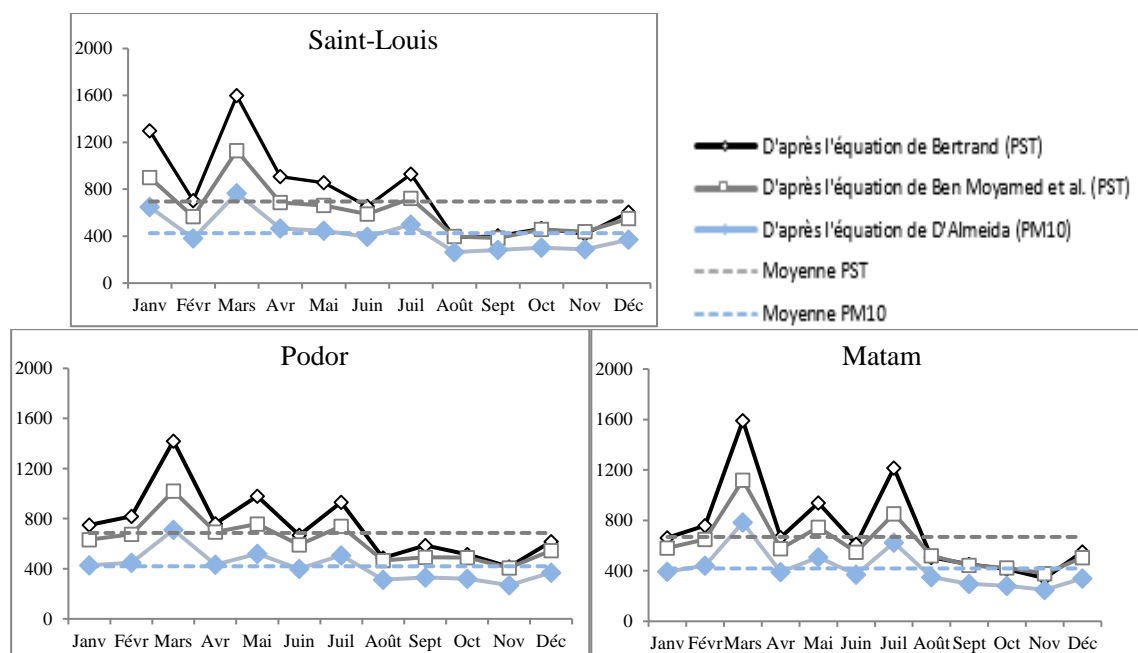


La *figure 80* nous révèle la fréquence des niveaux de concentrations de poussières en PM_{10} aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam obtenue par transformation des données de visibilité horizontale grâce à la relation de D'ALMEIDA. Comparées au seuil retenu par les différentes réglementations nationales sur la qualité de l'air qui varie de 50 à $150 \mu g.m^{-3}$ pour la concentration journalière en PM_{10} , les valeurs quotidiennes lors d'épisodes de lithométéores réduisant la visibilité horizontale à moins de 10 kilomètres sont très préoccupantes à nos différentes stations étudiées. Que ce soit à l'ouest, au centre ou à l'est de l'extrême Nord-Sénégal, la concentration en PM_{10} est toujours au-dessus du seuil à chaque fois que la visibilité horizontale est réduite à moins de 10 kilomètres. Quel que soit la station considérée, 80 à environ 85% des jours dont la visibilité horizontale est inférieure à 10 kilomètres pour cause de lithométéores connaissent des niveaux de concentrations en particules fines de 150 à $500 \mu g.m^{-3}$. Alors que juste au-dessus de $150 \mu g.m^{-3}$, la qualité de l'air est jugée malsaine et que si la concentration en PM_{10} dépasse $500 \mu g.m^{-3}$, elle est qualifiée de dangereuse pouvant entraîner des maladies respiratoires et cardiaques chez les personnes sensibles. Ces niveaux de concentrations sont d'autant plus inquiétants que respectivement 12, 13 et 17% des jours affectés par les poussières désertiques réduisant la visibilité au-dessous de 10 km aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam sont marqués par des niveaux de concentrations supérieurs à $1000 \mu g.m^{-3}$. Les impacts de tels niveaux de concentrations sur la santé seront largement détaillés dans la section réservée aux impacts sanitaires des poussières désertiques sur les populations du Nord Sénégal.

2.2. Concentration mensuelle en PST et PM_{10}

Les valeurs de concentrations mensuelles en PST et PM_{10} obtenues à nos différentes stations suite à la transformation des données de la visibilité horizontale grâce aux relations de BERTRAND, BEN MOHAMED et al. et à celle de D'ALMEIDA sont présentés à la *figure 81*.

Figure 81 : Distribution de la fréquence des concentrations mensuelles en PST et PM₁₀ aux stations du Nord-Sénégal (1965-2014)



Au regard de cette figure on constate que les concentrations mensuelles en PST et en PM₁₀ varient fortement suivant les saisons sèche et de pluies. Quelles que soient la station considérée et l'équation utilisée, le premier maximum est atteint au mois de mars avec un niveau de concentration extrêmement élevés. Pour les PM₁₀, les valeurs en ce mois avoisinent 800 µg.m⁻³ alors que pour ce qui concerne les PST, l'application de l'Equation de BEN MOHAMED et al. révèle des niveaux qui dépassent 1000 µg.m⁻³ tandis que celle de BERTRAND nous donne des valeurs supérieures à 1500 µg.m⁻³ qu'il s'agisse de la station de Matam, de Podor et celle de Saint-Louis. Cela ne devrait pas nous surprendre puisque nous sommes là au plein cœur de la saison sèche où les différentes zones sources sont très actives du fait que le sol étant plus asséché en cette période, le potentiel particulaire mobilisable y est donc plus disponible. Ceci associé aux vents extrêmes à la fois pour l'arrachement de ces particules mais aussi pour leur transport à longue distance, justifient de tels niveaux de concentration en cet instant précis de l'année. Notons aussi qu'en ce temps non seulement les conditions météorologiques locales en zones de puits (zones de dépôt) sont favorables au maintien de ces particules dans l'air mais aussi à l'érosion éolienne qui est un fait en ces zones de puits et en cette période constitue un apport quantitatif à ces panaches venant des zones sources.

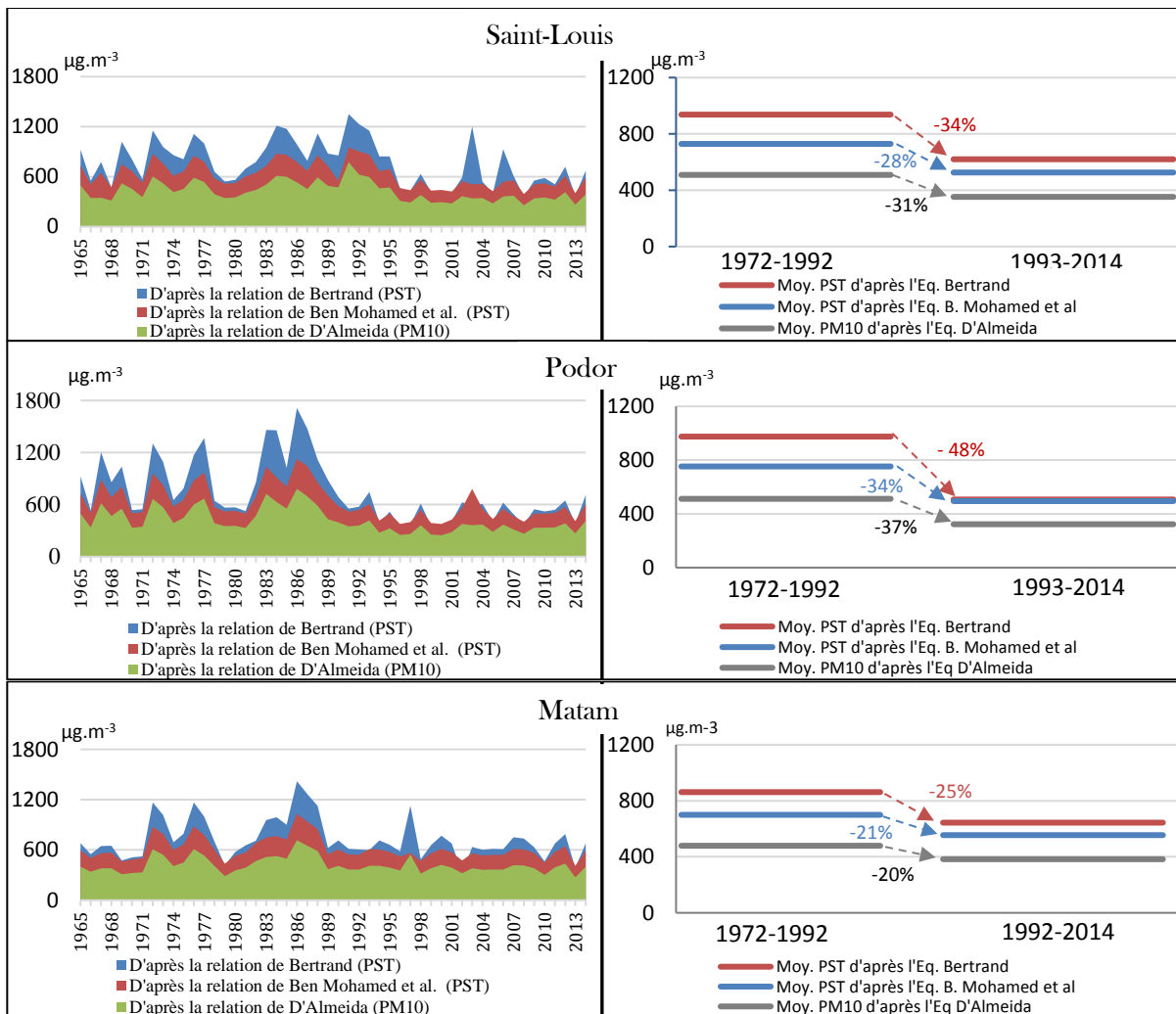
Après cette période de forte concentration, une baisse s'opère à partir du mois d'avril jusqu'en fin juin avant de connaître un pic secondaire au début du mois de juillet qui correspond depuis quelques années au commencement de la saison de pluies en cette partie du pays. Cet état de fait

ne devrait pas nous surprendre non plus quand on sait que nous sommes en zone sahélienne du pays où le début de cette saison de pluies est fortement marqué par la fréquence des "haboobs" qui ressemblent à de véritables murs de poussières d'épaisseurs de 1500 à 2000 mètres avec des records à 5000 mètres. Il s'agit de vents extrêmement intenses en terme de capacités d'arrachement de matériel mobilisable et de contribution très significativement à la mise en suspension des particules de poussières, pouvant réduire très fortement la visibilité jusqu'à moins de 100 mètres. Après ce second pic une baisse très marquée est notée tout au long de la saison des pluies et s'étend jusqu'au début du mois de Novembre. Deux faits justifient ces faibles niveaux de concentrations en ces mois de l'hivernage. Le premier fait explicatif est que les sources sahéliennes sont beaucoup moins actives en cette période de l'année du fait qu'elles sont elles aussi sous contrôle de la mousson et dont la pluviométrie crée des conditions d'humidité des sols empêchant ou réduisant très fortement leur érodabilité. Ce qui fait que seules les sources sahariennes restent les potentielles pourvoyeuses d'aérosols désertiques, ce qui diminue donc les quantités transportables de toutes sources confondues. La seconde explication de ces faibles concentrations de poussières est liée à l'influence de paramètres météorologiques (la direction du vent et la saison) donc aux mouvements du FIT qui freinent la progression des panaches de poussières transportés vers le sud. Quand le FIT atteint sa position la plus haute, les vents de mousson s'opposent à la pénétration de la poussière au sud du Sahara. De plus la présence de la pluie entraîne une élimination de la poussière par lessivage de l'atmosphère. En novembre une nouvelle hausse s'amorce. En fait, il ne s'agit pas d'une nouvelle étape du cycle mais c'est plutôt le début de la tendance de fortes concentrations qui atteindra son maximum au mois de mars.

2.3. Concentration annuelle en PST et PM₁₀

La concentration annuelle moyenne en PST et en PM₁₀ reste fortement influencée par les conditions climatiques. En effet, les années de sécheresse ainsi que les années suivantes sont fortement marquées par des niveaux de concentration en PST et en PM₁₀. Suite à l'obtention des niveaux de concentration de poussières par transformation des données de visibilité grâce aux relations précédemment évoquées, nous avons calculé les moyennes annuelles de 1965 à 2014 afin d'observer la tendance sur notre série dans le but de voir le comportement suivant les sous périodes en fonction des caractéristiques climatiques qui les témoignent.

Figure 82 : Concentration annuelle en PST et en PM₁₀ (à gauche) et différence de niveaux de concentration entre les périodes 1972-1992 et 1993-2014 (à droite) aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam



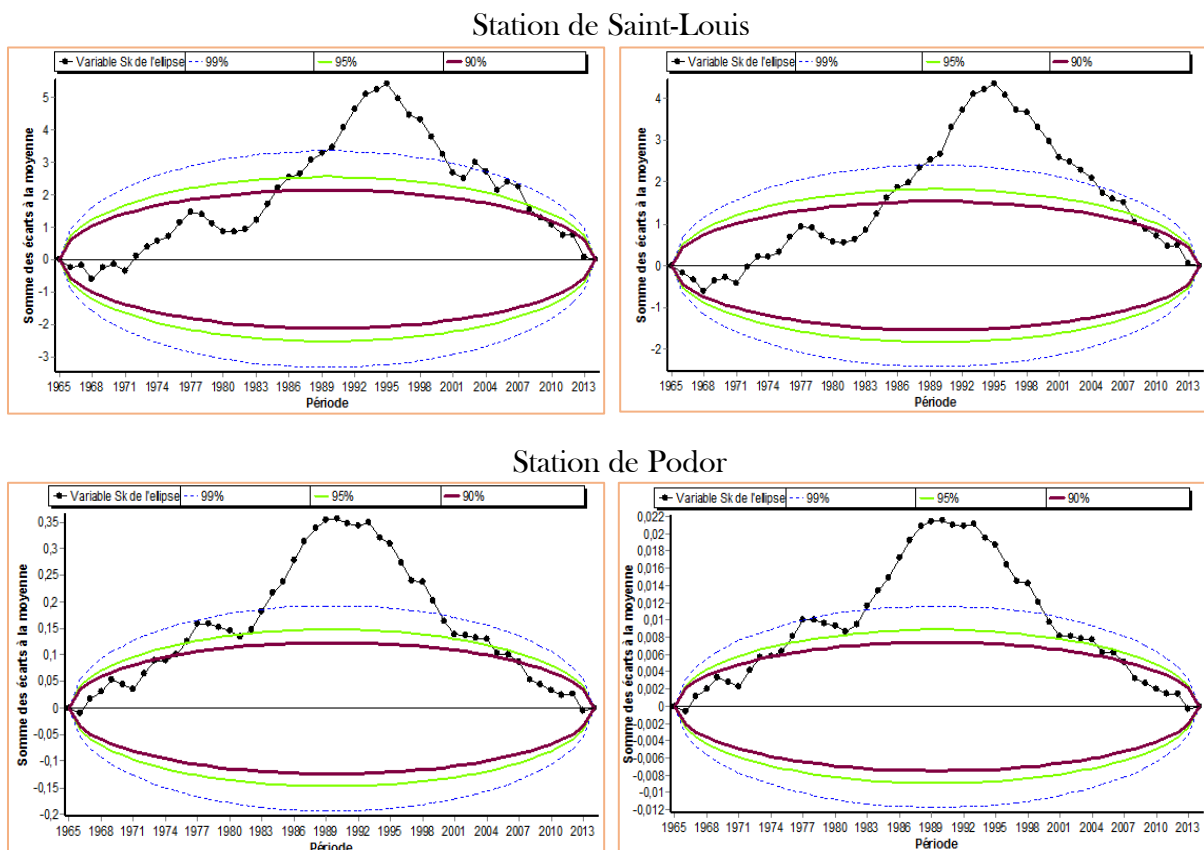
Ce qu'il est à noter à priori est que sur notre série les valeurs de concentration moyenne annuelle restent très préoccupantes puisque dépassant de loin la concentration annuelle de guide de 60-90 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour les PST produite par l'Organisation Mondiale de Santé dans ses directives sur la qualité de l'air et de 40 à 60 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour les PM₁₀ définie par les différentes réglementations nationales sur la qualité de l'air. Et ces niveaux de concentrations sont beaucoup plus élevés durant les années de sécheresse ainsi que les années suivantes (*figure 82*). Par exemple quand on considère la double décennie 1972-1992, qui a constitué une véritable période sèche en ces stations de l'extrême Nord-Sénégal, les moyennes interannuelles en PST varient respectivement de 730 à 940 $\mu\text{g.m}^{-3}$, de 750 à 980 $\mu\text{g.m}^{-3}$ et de 700 à 950 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour les stations de Saint-Louis, Podor et Matam. Pour les PM₁₀, les moyennes interannuelles y sont respectivement de 510, de 512 et de 480 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Et pour les particules en suspension totale et pour celles dont la taille est inférieure à 10 μm , une différence très remarquable de niveaux de concentration est notée entre

la période sèche (1972-1992) et celle allant de 1993 à 2014 (nous la nommons "période actuelles") (*figure 82*). En ce qui concerne les PST, cette différence est de 28 à 34% à la station de Saint-Louis, de 34 à 48% à la station de Podor et 21 à 25% à la station de Matam. Quant aux PM_{10} , l'écart entre les deux périodes est de 31% à la station de Saint-Louis, de 37% à la station de Podor et de 20% à la station de Matam.

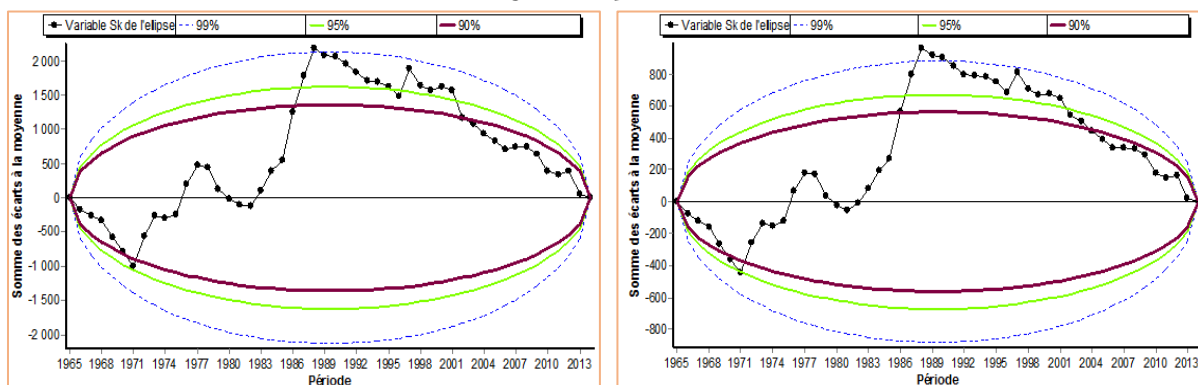
L'application du test de PETTITT sur les concentrations annuelles en particules de poussières (PST et PM_{10}) nous révèle une rupture qui marque le début de la tendance actuelle à la baisse aux stations de Saint-Louis et Podor. Que ce soit avec les données obtenues suite à l'utilisation de l'Equation de BERTRAND, de celle de BEN MOHAMED et al. (pour les PST) ou de celle de D'ALMEIDA (pour les PM_{10}), le test de PETTITT indique le point de rupture en 1995 à la station de Saint-Louis et en 1990 à la station de Podor. S'agissant de la station de Matam, aucune rupture montrant une tendance en baisse n'a été détectée sur la série (1965-2014), ce qui supposerait une certaine régularité de la station.

L'application du **test de BUISHAND** témoigne non seulement de l'existence ou non d'une rupture mais révèle également la stationnarité (régularité) ou non de la station considérée.

Figure 83 : Résultats du test de BUISHAND appliqué aux concentrations en particules (PST à gauche) et (PM_{10} à droite) dans les stations de Saint-Louis, Podor et Matam de 1965 à 2014



Station de Matam



L'allure de la variable S_k (somme des écarts à la moyenne) de l'ellipse de bois des séries de concentrations en particules des stations de Saint-Louis et Podor confirme non seulement les années de rupture respectives (1995 et 1990) mais nous révèle aussi, du fait que plusieurs points correspondant à la somme des écarts cumulés à la moyenne sortent des intervalles de confiance, qui sont respectivement de 99%, 95% et 90%, la non-stationnarité des variables dans ces deux stations. Par contre l'ellipse de bois des séries de concentrations en particules (PST et PM_{10}) de la station de Matam nous permet de confirmer l'absence de rupture constatée par le test de PETTITT. Le fait que quasiment tous les points restent dans l'intervalle de confiance 99% atteste la stationnarité des variables dans la station. Cette régularité des niveaux de concentration à la station de Matam ne devrait en aucun cas nous surprendre car, est-il nécessaire de rappeler que quelle que soit la période considérée (période post-sécheresse, années de sécheresse et période actuelle), les cas de déflation constituent plus de 70% des lithométéores, or lorsque l'on compare ces périodes, on constate que la différence entre les moyennes des cas de déflation est négligeable. Du début de notre série jusqu'à la fin, la station de Matam reste majoritairement fournie en chasse-sables aussi bien en saison de pluies qu'en saison sèche. Serait-il utile de souligner à nouveau l'importance de sa proximité avec la source sud-ouest mauritanienne qui, restant dynamique quasiment toute l'année en terme de potentiel mobilisable et en terme de facteurs nécessaires à l'arrachage, au soulèvement et au transport des particules y entraîne chaque année d'importants cas de déflation. Contrairement aux stations de Podor et Saint-Louis qui justifient l'irrégularité de leur niveau de concentration du fait que la majeure partie des lithométéores qui les affectent sont composés par des poussières en suspension en provenance des sources saharo-sahéliennes dont la quasi-totalité présente une irrégularité dans la production. Ceci ajouté au fait que les quantités de particules en provenance de ces zones sources et devant constituées des poussières en suspension dans ces deux stations sont transportées par l'Harmattan, or celui-ci ne présente pas les mêmes caractéristiques au cours des années et ces influences varient même d'une année à une autre.

Certes les niveaux de concentration sont largement plus élevés durant la période sèche de 1972-1992 mais les valeurs restent jusqu'aujourd'hui très inquiétantes comparées aux seuils retenus. Pour en attester, si nous reconsidérons la double décennie 1993-2014 les résultats confirment très clairement cet état de fait. Partout aux stations de l'extrême Nord-Sénégal, jamais la concentration moyenne annuelle n'a été de moins de $300 \mu\text{g.m}^{-3}$ en PST et est toujours au-dessus de $250 \mu\text{g.m}^{-3}$ en PM_{10} . De 1993 à 2014, les niveaux de concentration annuelle en PST sont de 3 à 20 fois supérieures au seuil retenu par l'OMS et ceux en PM_{10} sont de 4 à 10 fois supérieures aux niveaux de concentrations définis par les différentes réglementations nationales sur la qualité de l'air.

Pour conclure ce point, on retiendra que les concentrations en particules de poussières (PST et PM_{10}) restent donc largement au-dessus des normes en vigueur. L'analyse à pas de temps journaliers, mensuels et annuels nous révèle des valeurs préoccupantes quand on sait que si le seuil est dépassé, des risques sanitaires qui en découlent sont évidents. Les résultats des tendances saisonnières nous montrent qu'aucun mois de l'année ne présente des taux négligeables même si le pic principal se situe au mois de mars quelle que soit la station considérée. Quant aux niveaux de concentrations annuelles, même si depuis 1993 les tendances sont moins élevées comparées à celles connues durant la période sèche de 1972 à 1992, les concentrations en PST et en PM_{10} restent largement au-dessus des seuils retenus par l'OMM ainsi que par les différentes réglementations nationales sur la qualité de l'air. Ce qui constitue une véritable question surtout du point de vue sanitaire des populations. Mais en dehors de conséquences sanitaires, les poussières désertiques sont aussi reconnues pour leurs effets radiatifs.

3. Effets radiatifs des poussières désertiques dans l'extrême Nord-Sénégal

Si aux échelles locales, les aérosols désertiques sont étudiés le plus souvent pour leurs répercussions nocives sur la santé humaine, aux échelles globales et régionales, la question sur ces poussières désertiques est abordée pour leur influences sur le climat. En effet, les aérosols désertiques ont une importance capitale sur le bilan radiatif de la Terre à cause à la fois de leur pouvoir à augmenter la diffusion et l'absorption des radiations solaires et telluriques ainsi que leur impact sur la dynamique microphysique des nuages. L'aérosol désertique est en interaction avec le rayonnement solaire dans le domaine des courtes longueurs d'onde et son interaction avec le rayonnement tellurique se produit dans le domaine de l'infrarouge thermique. Mais même si l'aspect climatique des poussières désertiques est le plus souvent étudié sous un angle global ou

régional, les résultants assortis des différentes interactions avec les rayonnements solaires et telluriques ainsi que leur action sur la formation et/ou le maintien des nuages influent fortement sur la thermodynamique atmosphérique de la zone considérée. Dès lors, avant d'analyser en détail comment les lithométéores exerceraient-ils leurs influences sur la dynamique atmosphérique à l'extrême septentrional du pays, première partie sahélienne du Sénégal en contact direct avec les influences du Sahel et du Sahara, nous nous proposons d'abord de rappeler de façon globale les différents effets radiatifs des aérosols désertiques, ensuite souligner brièvement leurs impacts thermodynamiques atmosphériques sur l'Afrique de l'Ouest.

3.1. Généralité sur les effets radiatifs des aérosols désertiques

Les particules des aérosols modifient le bilan radiatif de la Terre. Leurs effets radiatifs et les rétroactions associées peuvent se traduire, selon les configurations considérées par un refroidissement ou un réchauffement du système climatique (MALAVELLE⁵³). Mais pour comprendre et estimer leurs effets radiatifs, il faudra tenir en compte plusieurs paramètres notamment la région considérée (type d'aérosol présent et climat local).

Pour ce qui concerne les aérosols désertiques, ils sont actuellement reconnus pour agir sur le climat de trois manières distinctes. En interagissant avec le rayonnement électromagnétique solaire et tellurique (effets radiatifs directs), ils modifient le bilan radiatif, les échanges d'énergie et la thermodynamique atmosphérique, ce qui influe sur la formation et/ou le maintien des nuages (effets radiatifs semi-directs). Enfin leur rôle précurseur dans les processus de nucléation des gouttelettes de vapeur d'eau conditionne les propriétés microphysiques et macrophysiques des nuages (effets radiatifs indirects).

3.1.1. Effets radiatifs directs

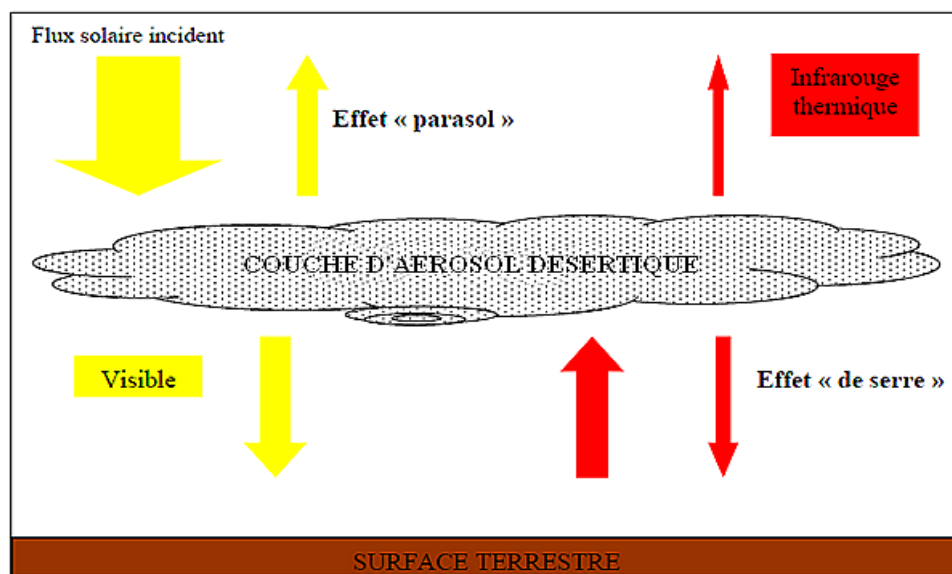
Il correspond à l'interaction (diffusion et absorption) des particules d'aérosols désertiques avec le rayonnement solaire (ultraviolet-visible-proche infrarouge) et tellurique (infrarouge thermique) qui va entraîner une modification de l'albédo apparent de la planète. L'amplitude de l'effet radiatif direct d'un panache de poussières en un lieu donné est fortement déterminée par le niveau de concentration (l'abondance) mais aussi la nature de la surface au-dessus de laquelle se trouve cet aérosol. Certaines études suggèrent que les poussières désertiques exercent un effet radiatif direct important en local et en global. Par leur effet de diffusion, ils provoquent le refroidissement de la surface. En effet la rétrodiffusion du rayonnement vers l'espace (« effet

⁵³ Op.cit.

parasol » *figure 84*) entraîne une diminution nette de l'énergie incidente à la surface en moyenne globale et conduit à un forçage radiatif négatif qui se traduit par un refroidissement à la surface de la Terre (LEMAITRE⁵⁴). IPCC dans son rapport de 2007 indique que ce refroidissement induit par cet effet radiatif direct peut atteindre 25 à 50%. Mais ceci ne prend pas en compte le côté absorbant pour lequel la diffusion est un processus qui dépend des capacités d'absorption de l'aérosol désertique mais aussi de l'albédo planétaire (fraction de rayonnement solaire directement renvoyée vers l'espace par réflexion ou par diffusion par la surface de la terre ou par l'atmosphère via les nuages, les molécules gazeuses et les particules).

Les poussières désertiques présentent également des propriétés absorbantes pour le rayonnement tellurique. Ainsi leur interaction avec ce dernier provoque un réchauffement de l'atmosphère dans les grandes longueurs d'ondes (infrarouge thermique). En absorbant ce rayonnement infrarouge, une partie est réémise à la surface et une autre reste piégée (« effet de serre » *figure 84*), ce qui conduit au réchauffement de la couche de l'atmosphère.

Figure 84 : schéma de l'impact d'une couche d'aérosol désertique sur le rayonnement solaire et tellurique



Source : VERGÉ-DÉPRÉ (2007), réadapté par GAYE (2016)

L'absorption des radiations thermiques telluriques a pour particularité de diminuer l'albédo d'autant plus que l'absorption permet à une plus grande partie du rayonnement solaire d'atteindre la surface terrestre, contrairement au phénomène de réflexion qui, du fait de la réduction de la quantité d'énergie solaire entrant, augmente l'albédo. En présence d'une surface de réflectivité importante [notamment au-dessus des surfaces sèches comme à l'extrême Nord-Sénégal], l'effet

⁵⁴ Op.cit.

d'absorption peut dominer l'effet de réflexion et le forçage induit est alors positif (HAYWOOD et BOUCHER, 2000) c'est-à-dire à un réchauffement.

En plus de leur effet sur l'équilibre radiatif au sommet de l'atmosphère (TOA *pour Top Of Atmosphere*), les aérosols désertiques peuvent avoir un impact important sur le bilan radiatif de la couche atmosphérique où ils se trouvent et sur les couches situées au-dessous c'est-à-dire à la surface (SFR). C'est pourquoi le forçage radiatif direct est quantifié aux niveaux de ces différentes ondes.

3.1.1.1. Forçage radiatif direct dans les ondes courtes

L'effet direct est maximal à ces longueurs d'onde avec lesquelles les particules de poussières peuvent intervenir efficacement.

Si en surface, les effets d'absorption et de diffusion sont additifs, au sommet de l'atmosphère ils sont plutôt soustractifs (COLLINS et al., 2005). Contrairement à ce qui se passerait s'il s'agissait d'aérosols purement diffusants comme les sulfates ou les nitrates pour qui le forçage radiatif direct au sommet de l'atmosphère et à la surface sont similaires du fait que les radiations ne réchauffent pas l'atmosphère à cause de la réflexion totale du rayonnement qu'ils interceptent, le cas avec les aérosols désertiques est tout autre. Les lithométéores eux, reconnus pour leur caractère absorbant, transfèrent l'énergie absorbée par un échauffement diabatique de leur environnement (forçage radiatif atmosphérique positif). Ce transfert d'énergie suite à l'absorption du rayonnement solaire additionné à l'absorption et réémission du rayonnement tellurique au niveau de l'infrarouge thermique fait qu'au sommet de l'atmosphère le forçage radiatif sera deux à trois fois moins élevé que celui qui résultera à la surface (WILD, 1999 ; SATHEESH and RAMANATHAN, 2000). De manière générale, le forçage radiatif direct au sommet de l'atmosphère dépend essentiellement de l'albédo de surface ou des couches atmosphériques (présence de nuages ou d'aérosols réfléchissants) au-dessus de laquelle un panache de poussières désertiques se situe. En d'autres termes, la présence de particules de lithométéores (absorbants) au-dessus de surface très réfléchissante comme c'est le cas à l'extrême Nord-Sénégal où la nature sèche du sol justifie le caractère réfléchissant de la surface, induit un forçage direct positif au sommet de l'atmosphère. JOHNSON et al. (2004) concluent que ce forçage radiatif au sommet de l'atmosphère est jusqu'à trois fois plus fort si cet aérosol désertique est présent au-dessus de nuages de types stratocumulus. Tout ceci illustre l'importance de la stratification verticale des poussières désertiques dans l'estimation de leur forçage radiatif au sommet de l'atmosphère mais également dans l'infrarouge.

3.1.1.2. Forçage radiatif direct dans l'infrarouge

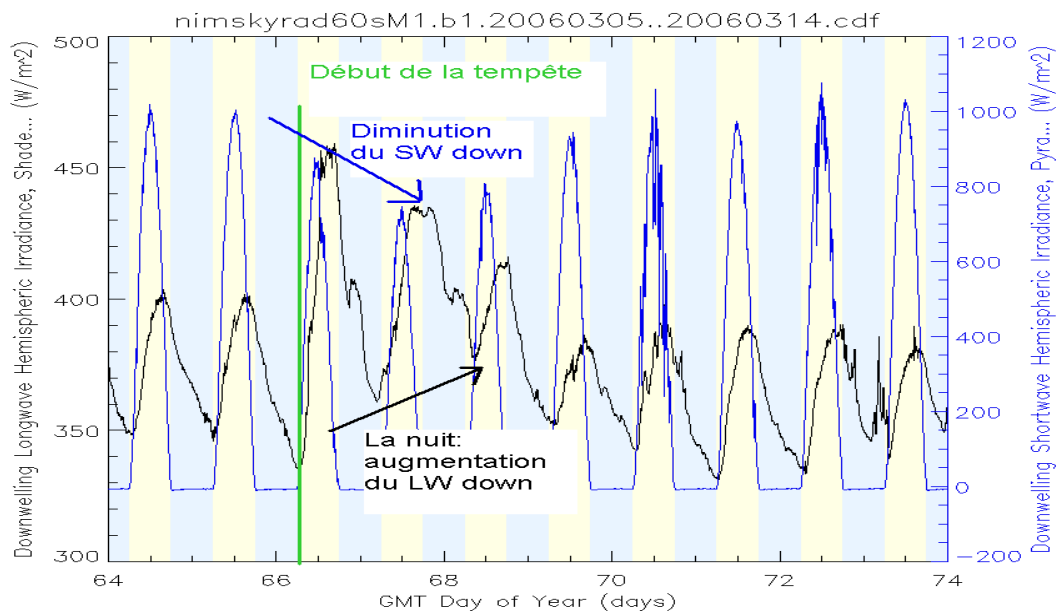
Certes l'interaction avec le rayonnement solaire visible est le principal forçage radiatif direct des aérosols désertiques. De ce fait, c'est ce forçage qui est généralement pris en compte dans les modèles numériques atmosphériques. Pourtant les distributions en taille des poussières désertiques comportent un mode grossier, c'est-à-dire de diamètre supérieur au micromètre capable d'interagir efficacement avec les longueurs d'onde caractéristiques du rayonnement infrarouge tellurique. Pour de telles particules, le forçage radiatif direct dans l'infrarouge peut devenir important et même comparable au forçage exercé par les gaz à effet de serre (VOGELMANN et al., 2003). Plusieurs études ont récemment montré que le forçage radiatif infrarouge pouvait être significatif. À titre d'exemple, BHARMAL et al. (2009) qui ont simulé les flux radiatifs à Niamey pour l'année 2006 montrent que l'effet direct dans l'infrarouge des aérosols désertiques en surface est souvent supérieur à $+20\text{W/m}^2$ et que pour la journée du 9 mars 2006 (à 05^h30) pendant une forte tempête de sable, la valeur instantanée du forçage est de $+99\text{W/m}^2$. Durant cette même tempête, STANELLE et al. (2010) ont estimé un forçage radiatif direct à 12^h00 de $+70\text{W/m}^2$ dans l'infrarouge.

En outre, le fait que le rayonnement tellurique soit absorbé puis réémis à la surface conduit à une augmentation du rayonnement en surface par les effets radiatifs directs. Ceci correspond à un mécanisme d'effet de serre. Ce mécanisme d'absorption-réémission bloquant cette énergie tellurique dans l'infrarouge entraîne par conséquent une diminution de la perte de rayonnement thermique sortant (OLR Outgoing Longwave Radiation) au sommet de l'atmosphère. MARKOWICZ et al. (2003) souligne toutefois qu'une exception s'opère lors des cas de forte inversion thermique pour lesquels la température de la couche d'aérosols est plus élevée que la température en surface. Ainsi le forçage radiatif direct dans l'infrarouge compense en partie le forçage radiatif direct aux ondes courtes. De plus, était-il utile que SLINGO et al. (2006) soulignent que le forçage radiatif direct infrarouge est généralement plus fort à la surface qu'au sommet de l'atmosphère, ce qui conduit dans le cas général à une divergence négative des flux radiatifs infrarouge (refroidissement) au sein de l'atmosphère.

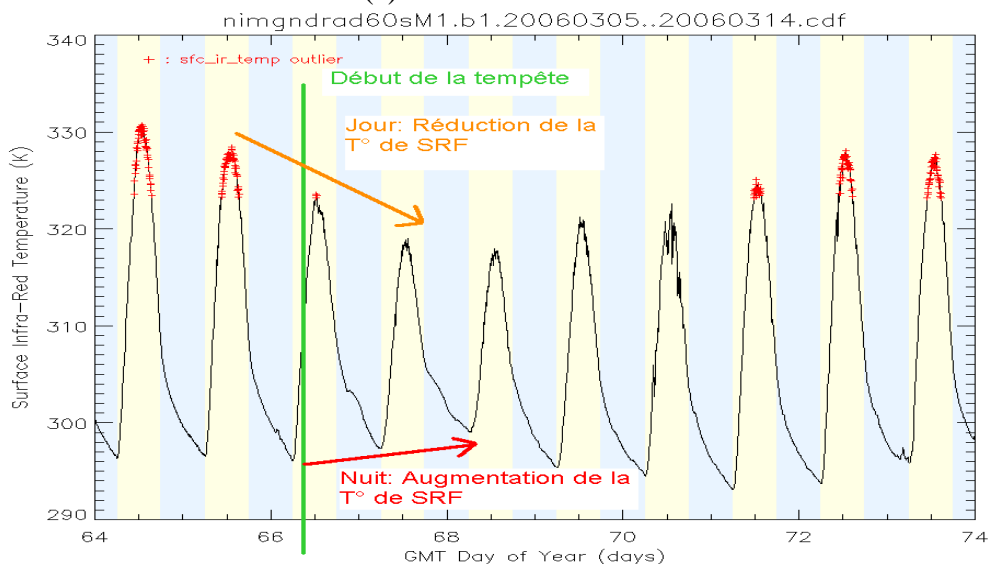
Intégré à l'échelle de la journée, l'effet de serre généré par le forçage radiatif direct dans l'infrarouge a tendance à contrebalancer l'effet parasol des aérosols sur le rayonnement visible. Toutefois, pendant la journée la diminution du rayonnement visible incident en surface par les

aérosols domine dans le forçage radiatif total, ce qui entraîne généralement une diminution de la température de surface. Le rayonnement thermique réémis par la surface est alors moins important et réduit l'intensité de l'effet de serre. En revanche, la nuit le seul effet direct possible de ces poussières désertiques est l'effet de serre. On peut alors observer une augmentation de la température de surface la nuit du fait de l'augmentation de flux infrarouge réémis par les aérosols vers la surface (*figure 85*).

Figure 85 : (a) Flux radiatif descendant solaire (bleu) et infrarouge (noir) et (b) Température du sol mesurées au sol à Niamey pendant la tempête de sable de mars 2006 durant l'expérience RADAGAST



(a)



(b)

Source : SLINGO et al., 2009

Le forçage n'est donc pas à négliger. L'étude de PANICKER et al. (2008) montre qu'environ 25% du refroidissement en surface dû aux effets radiatifs dans le visible est compensé par l'augmentation du rayonnement infrarouge du fait de l'absorption par les poussières désertiques. MALAVELLE (2011) nous apprend que HAYWOOD et al. (2005) ont suggéré que les poussières minérales peuvent exercer dans l'infrarouge un forçage radiatif de l'ordre de $+50\text{W/m}^2$ en moyenne mensuelle à 12^h00 UTC dans les régions sans nuages. Tous ces résultats mettent en avant l'importance du forçage radiatif des aérosols désertiques dans l'infrarouge. SATHEESH et LUBIN (2003) concluent que ces études montrent que négliger ces effets peut avoir sur des échelles de temps suffisamment longues un impact sur les résultats de simulations numériques.

Pour résumer, il est à retenir qu'en déséquilibrant le flux radiatif, l'effet direct des aérosols peut avoir de nombreuses conséquences :

- ▶ La réduction (dimming) du rayonnement en surface provoque des variations de la température de surface au-dessus des terres mais aussi au-dessus des océans qui pilotent la variabilité de la mousson en Afrique (MYHRE et al., 2003 ; LAU et KIM, 2007 ; FOLTZ et McPHADEN, 2008 ; AVELLANEDA et al., 2010)
- ▶ Ces changements modifient les échanges surface-atmosphère de flux de chaleur sensible et latente (KOREN et al., 2004 ; ZHANG et al., 2008) pouvant modifier la dynamique de la couche limite atmosphérique (YU et al., 2002 ; HEINOLD et al., 2008)
- ▶ Tout cela pouvant avoir des conséquences sur le développement des nuages (ACKERMAN et al., 2000 ; RAMANATHAN et al., 2007 ; DAVIDI et al., 2009)
- ▶ L'échauffement de l'atmosphère peut également changer les profils de température et impacter sur la dynamique des nuages (effet semi-direct) (HANSEN et al., 1997 ; JOHNSON et al., 2004 ; HILL et DOBBIE, 2008)
- ▶ Les circulations atmosphériques locales et régionales sont également modifiées (LI et al., 2007 ; KONARE et al., 2008 ; KOCHA, 2011). Ces effets pouvant alors avoir des impacts sur le cycle de l'eau à l'échelle locale mais aussi régionale (MENON et al., 2002 ; ZHANG et al., 2008 ; ZHAO et al., 2011).

En gros, il ressort de cette analyse des effets radiatifs directs qu'il est impératif de considérer la situation aux différentes longueurs d'onde, autrement dit du sommet de l'atmosphère à la surface de la terre. Mais cette section développée sur ces influences climatiques des aérosols désertiques ne prend en compte que l'action directe de ces derniers. Or il est de toute évidence que l'absorption

des rayonnements solaires, en réchauffant les couches atmosphériques où se trouvent les aérosols, donc en changeant les profils des températures, impacte sur les éléments de l'atmosphère sans que les conséquences radiatives ne soient donc directes. Cette situation est plus identifiée à travers l'impact de ces changements de températures sur la dynamique des nuages. Cet effet est qualifié de semi-direct et sa compréhension et sa prise en compte constituent une importance capitale dans l'estimation globale du forçage radiatif des aérosols désertiques.

3.1.2. Effets radiatifs semi-directs

Les poussières désertiques sont susceptibles d'entraîner un effet radiatif semi-direct sur le climat. En effet l'absorption des rayonnements solaires par les aérosols désertiques provoque un réchauffement des couches atmosphériques qui les contiennent, ce qui modifie le profil de température et d'humidité, impactant donc sur l'équilibre vertical de la basse et moyenne troposphère. Cet échauffement peut ainsi être à l'origine de l'évaporation des nuages éventuellement présents. D'après MALAVELLE⁵⁵, une série d'expériences avec un modèle simple de climat global a montré que l'absorption du rayonnement solaire visible, en réduisant l'humidité relative dans l'atmosphère, provoque une diminution de la couverture nuageuse en basses couches (Cloud burning, ACKERMAN et al., 2000). L'influence de cet effet semi-direct est alors un réchauffement du climat (forçage positif), car les nuages bas (ex : stratocumulus et cumulus de couche limite) ont un albédo visible élevé, mais ne réduisent pas sensiblement le rayonnement thermique sortant. Cet effet peut augmenter la quantité d'énergie solaire qui atteint la surface terrestre et celle absorbée dans l'atmosphère, conduisant à un réchauffement supplémentaire par les aérosols et une baisse accrue de la nébulosité (rétroaction positive) comme décrit par JACOBSON (2002).

Dans leur étude, HANSEN et al. (1997) ont évalué l'impact climatique des aérosols en considérant une distribution globale uniforme en aérosol. Dans une simulation où le couvert nuageux est fixe, le forçage radiatif direct au sommet de l'atmosphère est estimé à $-0,82\text{W/m}^2$ en moyenne globale annuelle associé à une diminution de la température de surface de $0,41\text{K}$. En revanche quand la réponse des nuages est incluse, une augmentation de $0,17\text{K}$ est observée du fait de la diminution du couvert nuageux en basses couches. Ainsi, en présence de poussières désertiques, le forçage radiatif direct est un indicateur insuffisant de la réponse de la température de surface.

⁵⁵ Op.cit.

Dans une étude basée sur un modèle de climat plus complexe, COOK et HIGHWOOD (2004) ont rapporté un résultat similaire. Dans ces travaux, une diminution des nuages convectifs dans les tropiques a aussi été observée. Les lithométéores conduisent à un réchauffement dans la troposphère mais ce réchauffement est plus important dans la basse troposphère. Ainsi la stabilité verticale de l'atmosphère est accrue, favorisant la diminution de la couverture nuageuse et de l'activité convective.

Selon MALAVELLE, l'un des résultats majeurs d'INDOEX est l'important taux d'échauffement atmosphérique (0,3-1K/j) dans la basse troposphère (0-3km) associé aux poussières désertiques. ACKERMAN et al. (2000) ont trouvé que ces particules absorbantes réduisent l'humidité relative dans la couche limite et diminuent la fraction nuageuse du cumulus. Le taux d'échauffement est maximal au sommet de la couche limite où la fraction nuageuse est maximale. Cela a pour effet de stabiliser la couche limite et de tendre à réduire l'apport de flux turbulent et d'humidité dans la couche limite, supprimant ainsi la convection. La réduction de la couverture nuageuse par ces aérosols absorbants mesurée pendant INDOEX a été estimée à 25% en 1998 et à 40% en 1999.

Cependant de nombreuses études plus récentes décrivent des mécanismes supplémentaires selon lesquels les aérosols peuvent réduire ou augmenter le couvert nuageux. Il peut donc y avoir de multiples effets semi-directs. Les travaux de JOHNSON et al. (2004), BRIOUDE et al. 2009) et PERLWITZ et MILLER (2010) font partie de ces récentes études qui suggèrent que l'effet semi-direct des aérosols désertiques ne résulte pas toujours en un forçage radiatif positif.

Une étude menée par YU et al. (2002) suggère que les aérosols absorbants notamment les poussières désertiques peuvent accroître ou décroître la couverture nuageuse dans la couche limite. Cela nous paraît tout à fait logique puisqu'il faudra prendre en compte la localisation de ces poussières désertiques (en dessus ou en dessous de l'inversion thermique). Or comme le soutiennent d'ailleurs ces auteurs, lorsqu'ils se trouvent dans la couche limite, ces poussières assèchent la couche limite réduisant le flux d'humidité de surface, conduisant à une probabilité plus faible de formation de nuage. À contrario, lorsque les aérosols sont situés au-dessus de la couche limite, ils accentuent l'inversion thermique, conduisant à une diminution du taux d'entraînement d'air sec troposphérique et une humidification de la couche limite, augmentant alors la probabilité de formation de nuage. Ces résultats ont été confirmés pour le cas de stratocumulus par JOHNSON et al. (2004) qui montrent que la présence d'aérosols absorbants au-dessus d'un stratocumulus, augmente son contenu en eau. Les auteurs notent que les modèles

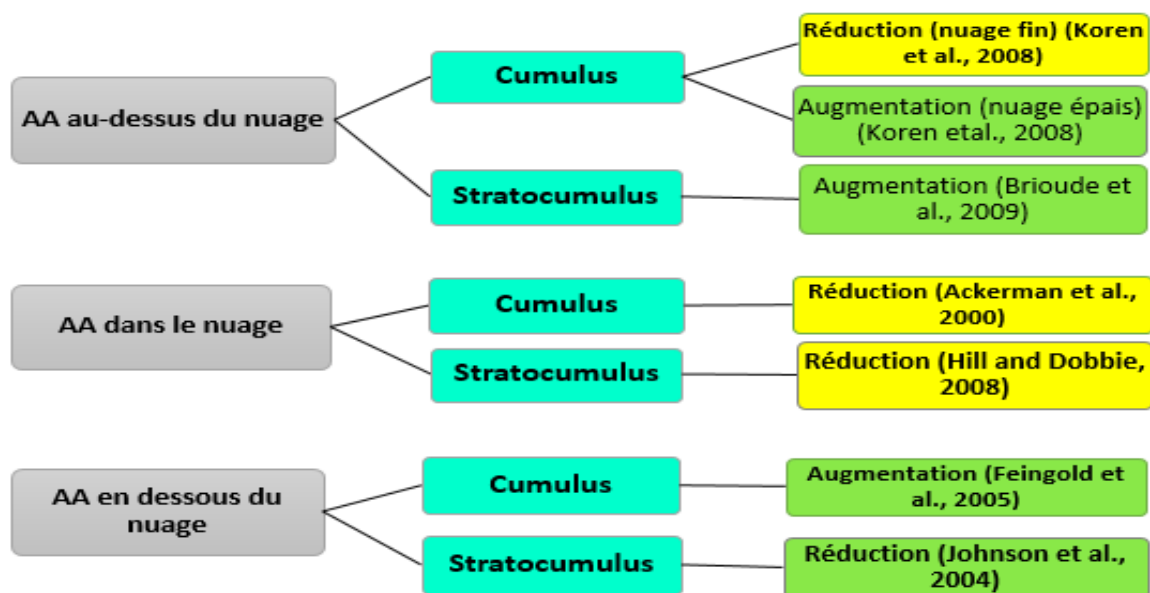
globaux ne représentent pas correctement ces nuages et ne sont pas capables par conséquent de simuler correctement l'effet semi-direct.

Dans ce cadre, KOCH et GENIO (2010) ont récemment proposé une revue complète de cet effet radiatif semi-direct en distinguant l'augmentation ou la réduction du couvert nuageux en fonction du type de nuage considéré (cumulus ou stratocumulus) et de l'altitude de la couche d'aérosols par rapport à l'altitude du nuage (*figure 86*).

▀ Lorsque l'absorption du rayonnement solaire par les poussières se produit à l'intérieur du nuage, l'échauffement au sein de ce nuage favorise la diminution de l'humidité relative et du contenu en eau. Dans cette configuration, le couvert nuageux formé par les cumulus et les stratocumulus est ainsi réduit (ACKERMAN et al., 2000 ; HILL et Dobbie, 2008)

Lorsque l'aérosol en question se localise en dessous du nuage et que l'absorption se fait à ce niveau, l'échauffement produit sous ce nuage renforce les mouvements convectifs de la condensation de l'eau. Ces conditions sont favorables au développement de nuages cumuliformes et stratiformes (FEINGOLD et al., 2005 ; JOHNSON et al., 2004).

Figure 86 : Forçage radiatif semi-direct en fonction du type de nuage (cumulus ou stratocumulus) et de sa position par rapport à la couche d'aérosol



(AA : Absorption du rayonnement solaire par la couche d'aérosol)

Source : PERE (2010) réadapté par GAYE (2016)

■ Dans le cas où la couche d'aérosols est située au-dessus du nuage, les conséquences de l'échauffement produit par l'absorption du rayonnement solaire ne sont pas les mêmes selon la nature du nuage.

Lorsque le nuage considéré est un stratocumulus, l'échauffement au-dessus du nuage tend à augmenter le gradient de température au-dessus de l'inversion et à stabiliser la couche limite. Cette stabilisation se traduit par une diminution du flux d'entraînement d'air sec ayant pour effet d'humidifier la couche limite et d'augmenter le contenu en eau liquide, favorisant le maintien et/ou le développement du couvert nuageux (JOHNSON et al., 2004 ; BRIOUDE et al., 2009).

Lorsque le nuage est un cumulus et que son épaisseur est importante, l'échauffement au sommet du nuage dû à l'absorption du rayonnement par les aérosols peut favoriser la convection profonde. Le renforcement du flux convectif au sommet du nuage crée un flux convergent en basses couches alimentant la base du nuage en air humide et favorisant par là son développement. Dans l'autre sens, autrement dit lorsque l'épaisseur du cumulus est faible, l'échauffement au sommet de ce dernier tend plutôt à inhiber son développement (KOREN et al., 2008).

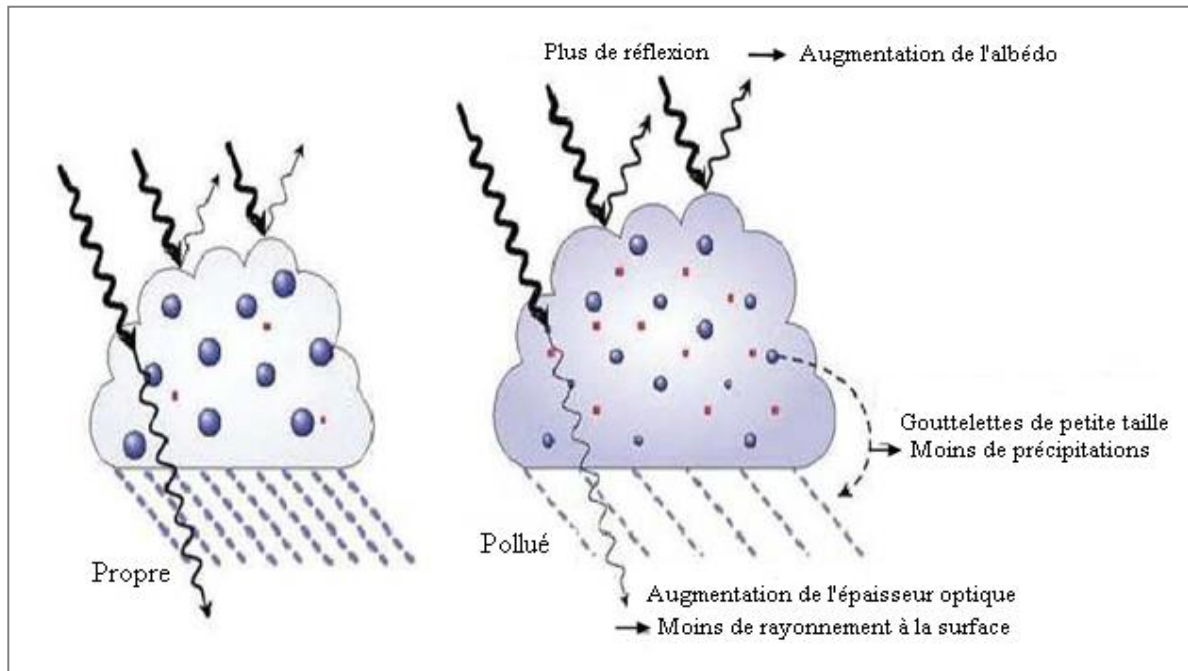
En conclusion, il est donc à retenir que la réduction ou l'augmentation de la couverture nuageuse de basse et moyenne altitude a un forçage positif ou négatif sur le climat et peut donc provoquer un réchauffement ou un refroidissement. Comprendre les effets semi-directs des poussières désertiques sur les nuages est capital. En effet, les changements de températures associés à la réponse des nuages en présence d'aérosols absorbant sont très élevés et potentiellement bien plus importants que ceux dus aux effets radiatifs directs. KOREN et al. (2008) proposent un modèle simplifié de l'effet semi-direct et des effets indirects (décrits dans la section suivante). Leur modèle suggère que les effets semi-directs peuvent être les effets dominants dans le forçage radiatif des poussières désertiques.

3.1.3. Effets radiatifs indirects

L'effet indirect des aérosols désertiques est défini comme étant le processus par lequel les aérosols perturbent l'équilibre radiatif Terre-Atmosphère par la modification de l'albédo des nuages et de leur couverture (IPCC, 2001). Cet effet est qualifié d'indirect car il désigne l'effet d'aérosols sur les propriétés nuageuses qui affectent à leur tour le climat. En effet, aux sursaturations rencontrées dans l'atmosphère, pour que la vapeur condense et forme des gouttelettes d'eau nuageuses, la présence d'un substrat de condensation permettant la nucléation hétérogène de la vapeur d'eau est obligatoire (PRUPPACHER et KLETT, 1997). C'est ce rôle d'intermédiaire de noyaux de condensation nuageuse (CCN) que jouent les particules de poussières dans la formation des nuages. Ainsi la formation et le cycle de vie des nuages peuvent

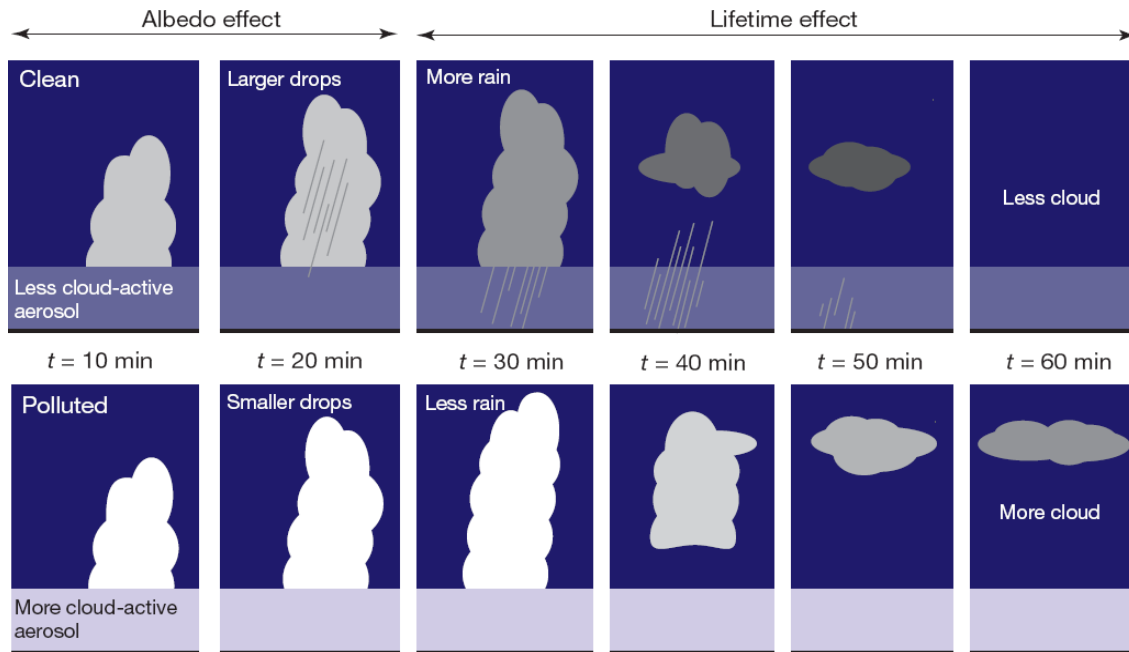
être modifiés suivant les concentrations et les propriétés des aérosols désertiques. En effet une augmentation de la concentration en poussières dans l'atmosphère induit une augmentation de la concentration en CCN et donc du nombre de gouttelettes dans le nuage.

Figure 87 : Schématisation de l'augmentation de la concentration en particules de poussières conduisant à l'augmentation du nombre de gouttelettes et la diminution de leur taille



Ceci entraîne ainsi une diminution de la taille de ces dernières et par conséquent occasionne l'augmentation de l'albédo des nuages (cet effet est qualifié de 1^{er} effet indirect ou effet Twomey). Ce 1^e effet entraîne ainsi l'augmentation du rayonnement réfléchi vers l'espace et le refroidissement du système climatique. Mais un 2nd effet indirect appelé aussi effet Albrecht découle de ce 1^{er} effet. En effet en 1989 ALBRECHT avance que l'augmentation de la concentration en gouttelettes nuageuses, entraînant la diminution de leur taille réduit l'efficacité du nuage à former des précipitations et modifie ainsi indirectement la dynamique du système nuageuse. PINCUS et BAKER (1994) soutiennent même une possible suppression des précipitations. Moins de précipitations impliquerait une durée de vie moyenne du nuage augmentée (voir *figure 88* pour l'illustration de ces mécanismes).

Figure 88 : Schématisation de l'effet d'albédo (1^{er} effet indirect) et d'augmentation du temps de vie (2nd effet indirect) des nuages



D'après TWOMEY, 1977 et Albrecht, 1989 (adapté de STEVENS et FEINGOLD, 2009). La situation du haut correspond à des conditions sans aérosols tandis que les conditions polluées (forte concentration en aérosols) sont représentées en bas de figure.

Pour conclure sur les différents effets radiatifs des aérosols désertiques, on peut retenir que ces derniers peuvent modifier directement l'intensité des flux incidents solaires (soit perturber le réchauffement naturel). Ils peuvent aussi agir indirectement en modifiant les propriétés des nuages (TWOMEY, 1977 ; ALBRETCH, 1989) ou encore intervenir de manière semi-direct favorisant l'évaporation des nuages. Nous sommes alors conduits à résumer les quatre effets radiatifs de poussières désertiques :

- L'effet direct où les aérosols désertiques interceptent le rayonnement selon leurs propriétés optiques (capacité d'extinction) et conduisent à des réchauffements ou des refroidissements
- Le 1^{er} effet indirect où par leurs propriétés physico-chimiques, les poussières désertiques modifient le spectre des gouttelettes nuageuses provoquant une augmentation du nombre de gouttes de tailles plus petites. Par conséquent, par l'intermédiaire de ces aérosols, l'albédo des nuages augmente et cela conduit à un refroidissement de l'atmosphère.
- Le second effet indirect fait suite au 1^{er}. Il est traduit par une augmentation du contenu en eau liquide et une diminution des précipitations car la taille des gouttelettes nuageuses est devenue plus petite. Par conséquent, la couverture nuageuse et la durée de vie des nuages sont augmentées. Cet effet peut avoir une incidence sur le cycle hydrologique.

- L'effet semi-direct correspond à la modification du champ nuageux par l'absorption du rayonnement par les aérosols désertiques qui crée un réchauffement au sommet des nuages bas. Celui-ci modifie les profils de température et d'humidité et par suite le champ nuageux. Cet effet conduirait à une évaporation des nuages bas et donc à une diminution du couvert de ceux-ci.

L'effet semi-direct se distingue de l'effet indirect puisqu'ici les aérosols affectent le couvert nuageux par leurs propriétés optiques (de manière directe) et non par leurs propriétés microphysique comme c'est le cas dans l'effet indirect. Notons que dans les deux cas, le forçage résultant est celui des nuages influencés par les aérosols désertiques mais dont les effets sont opposés puisque l'effet indirect provoque une augmentation du couvert nuageux alors que l'effet semi-direct conduirait plutôt à une diminution du couvert nuageux.

3.2. Impact des poussières désertiques sur la dynamique atmosphérique à l'extrême Nord-Sénégal

Comme c'est le cas sur l'ensemble de la région ouest-africaine, l'extrême Nord-Sénégal est fortement affecté par un réchauffement global dans la journée sur l'ensemble de la colonne atmosphérique entre 0 et 6 km d'altitude résultant des interactions onde-matière dans le domaine des courtes longueurs d'onde (SW : short wave) et un refroidissement à haute altitude. Le réchauffement observé est colocalisé aux aérosols notamment les poussières désertiques. De nuit, l'effet principal est un refroidissement au niveau du panache d'aérosol entre 2 et 5 km d'altitude et un réchauffement en dessous, lié aux interactions onde-matière dans le domaine des grandes longueurs d'onde (LW : long wave).

Le point sur le forçage radiatif suivant les différents effets (direct, semi-direct et indirect) dont le caractère conduit au changement des profils de températures au sommet de l'atmosphère, dans la couche de l'atmosphère mais aussi et surtout à la surface, en tenant en compte un certain nombre de paramètres (voir *généralité sur les effets radiatifs des aérosols désertiques*), nous permet, quand on place notre zone d'étude dans ce grand contexte d'y comprendre l'influence climatique des poussières désertiques. Mais en dehors du réchauffement/refroidissement de la température par interaction avec les rayonnements solaire et tellurique, l'impact des aérosols désertiques doit aussi être analysé en ce qu'ils agissent sur les principaux moteurs de la dynamique atmosphérique. Or, outre la température, ces principaux moteurs sont constitués par la dynamique des précipitations (donc de la mousson) et le vent thermique. Contrairement au vent thermique où l'étude ne concernera que la situation spécifiquement au niveau local, l'analyse des impacts sur la dynamique des précipitations nous amènera à reconsidérer le grand

domaine climatique qui englobe notre zone d'étude (l'extrême Nord-Sénégal) du fait du caractère régional des flux de Mousson et voir les répercussions spécifiques qui la caractérisent.

3.2.1. Influence sur les précipitations

Bien que les raisons expliquant les anomalies pluviométriques au Sahel entre les "périodes normales et les périodes de sécheresse" ne soient qu'encore partiellement comprises, certains auteurs ont aussi pointé du doigt le rôle des aérosols plus particulièrement ceux désertiques. Après NICHOLSON (2000), PROSPERO et LAMB (2003) ont constaté que les concentrations en aérosols désertiques étaient nettement moins importantes pendant la majorité du 20^e siècle jusqu'au début des années 1970 quand les précipitations étaient dans "la normale climatique". Nous avons suivi l'évolution des fréquences des lithométéores aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam en termes de nombre de jours de présence et du niveau de concentrations, les résultats sont parfaitement en phase avec ces constats. Une hausse de fréquences s'est amorcée depuis les années 1972 coïncidant fortement avec le début des anomalies pluviométriques. Si certains se posent la question de savoir si ce ne sont pas les déficits pluviométriques qui ont entraîné cette hausse de fréquence de poussières désertiques, NICHOLSON (2000) lui, ainsi que PROSPERO et LAMB (2003) ont plutôt émis l'hypothèse que ce sont les aérosols désertiques qui joueraient un rôle significatif sur cet état déficitaire de la pluviométrie en modulant le climat de la région. Cette hypothèse a conduit MILLER et al. en 2004 à examiner l'impact climatique des aérosols désertiques avec un modèle de climat et ils ont en effet observé une réduction des précipitations sur l'atlantique tropical et les régions avoisinantes couvrant les stations de l'extrême Nord-Sénégal. Abordant cette question de causalité poussières désertiques-anomalies pluviométriques, YOSHIOKA et al. (2007) estiment que le forçage radiatif des aérosols désertiques pourrait expliquer 30% de la réduction des précipitations observées au Sahel entre les périodes normales et les périodes de sécheresse. Or la hausse des fréquences et en terme nombre de jours de présence et en terme du niveau de concentrations des poussières désertiques entre ces deux périodes est beaucoup plus manifeste aux stations sud de Sahel (y compris donc les stations de l'extrême-Nord-Sénégal). Dans ce sens, si YOSHIOKA et al. estiment ces 30% en terme de moyenne de la région, on pourrait alors s'attendre de façon spécifique à ce que le taux de réduction soit largement plus élevé en ces stations de l'extrême-nord de Sénégal. Parmi les nombreuses études qui ont fait état d'une diminution des précipitations au Sahel en rapport avec les aérosols désertiques, nous avons MILLER et al. (2004), YOSHIOKA et al. (2007), KONARE et al. (2008), SOLMON et al. (2008), SUD et al. (2009). KONARE et al. (2008) ont par exemple utilisé le modèle de climat régional RegCM pour étudier le rôle des aérosols désertiques sur la mousson

ouest africaine. Les auteurs constatent que la prise en compte du forçage radiatif dans le visible mène à une réduction des précipitations au Sahel. Cette réponse est liée au refroidissement à la surface du fait d'une diminution du rayonnement solaire disponible associée à l'échauffement des couches atmosphériques où sont localisées les poussières désertiques. On comprend alors que cette action dépend de l'intensité de la dynamique des échanges entre "chaleur du haut" et "fraicheur du bas". Or, quand on analyse la situation à l'extrême-Nord-Sénégal, on se rend compte que ces échanges sont très marqués du fait de la proximité des couches atmosphériques qui hébergent les panaches de lithométéores par rapport à la surface. Toujours sous ce même registre de corrélation poussières désertiques-réduction de précipitations à l'extrême Nord-Sénégal, nous avons remarqué une situation extrêmement manifeste qui témoignerait cette relation de cause à effet. En effet en cette zone extrême septentrionale du pays, surtout dans les parties centre et est (les stations de Podor et Matam), les saisons de pluies sont, depuis les années de sécheresse, fortement marquées par des "haboobs" qui sont de véritables murs de poussières de très fortes épaisseurs dont la formation et la mise en place sont le plus souvent associées à un temps marqué par une présence des cumulo-nimbus à grand développement vertical (de véritables nuages annonceurs de pluies). Le constat que nous avons fait est qu'à chaque fois que ces haboobs se présentent lors des orages accompagnant les nuages cumulo-nimbus, nous avons soit une pluie de faible intensité, soit une suppression totale des précipitations. Les populations locales ont même une expression pour désigner cette suppression de précipitations suite au passage des phénomènes de "haboobs" « yíwondé Sayndé⁵⁶ ». Toutes les pluies intenses en terme de durée et de quantité sont enregistrées pour la majeure partie en temps calmes (le plus souvent la nuit). Ces remarques sont en parfaite phase avec les études soutenant que les aérosols désertiques sont responsables d'une énorme réduction de précipitations dans les stations sahéliennes surtout celles plus au sud y compris donc la partie de l'extrême Nord-Sénégal.

Outre ce fait, une autre explication justificative de cet état de cause à effet nous a été faite par YOSHIOKA et al. (2007). En considérant les effets radiatifs directs des aérosols désertiques, ces derniers ont observé une diminution du flux de mousson, un déplacement vers le sud du jet d'est africain et un jet d'est tropical plus faible. Les auteurs attribuent ainsi la diminution des précipitations en Afrique au Nord de l'Equateur au refroidissement de la troposphère due au forçage radiatif négatif au sommet de l'atmosphère exercé par les aérosols désertiques. Le gradient d'énergie statique humide au-dessus des terres est ainsi réduit. Or, comme partout dans

⁵⁶ Par défaut de langage lire Djiwondé sayndé

la région de l'Afrique de l'Ouest, ce sont les flux de mousson qui contrôlent la pluviométrie à l'extrême Nord-Sénégal. Il est tout à fait évident qu'une diminution de ces dernières comme soulignée par YOSHIOKA et al. (2007) y entraîne une réduction des précipitations.

SOLMON et al. (2008) ont rapporté une réponse similaire à l'étude de LOU et al. (2009) de la mousson ouest africaine au travers de simulation avec un modèle régional de climat. Comme leurs successeurs, les auteurs observent bien deux effets en compétition pouvant influencer l'intensité des précipitations. Tout d'abord, une réduction de l'intensité de la mousson du fait du refroidissement en surface par l'effet de « dimming » (diminution des rayonnements solaires) des aérosols désertiques conduisant à une diminution des précipitations. À cette réduction des précipitations s'oppose l'effet d'« elevated heat pump » (le réchauffement de la moyenne troposphère par l'absorption des rayonnements solaires par les particules et qui entraîne l'élévation de l'air réchauffé) dans la haute troposphère conduisant lui à une augmentation des précipitations. Dans la configuration standard du modèle, l'effet net de ces deux mécanismes conduit à une réduction des précipitations au-dessus de la région sahélienne exceptée au Nord du Sahel/Sud du Sahara, autrement dit une réduction des précipitations du centre jusqu'au sud sahélien. Avons-nous encore besoin de rappeler le caractère plus au sud des phénomènes de poussières désertiques aux stations sahéliennes.

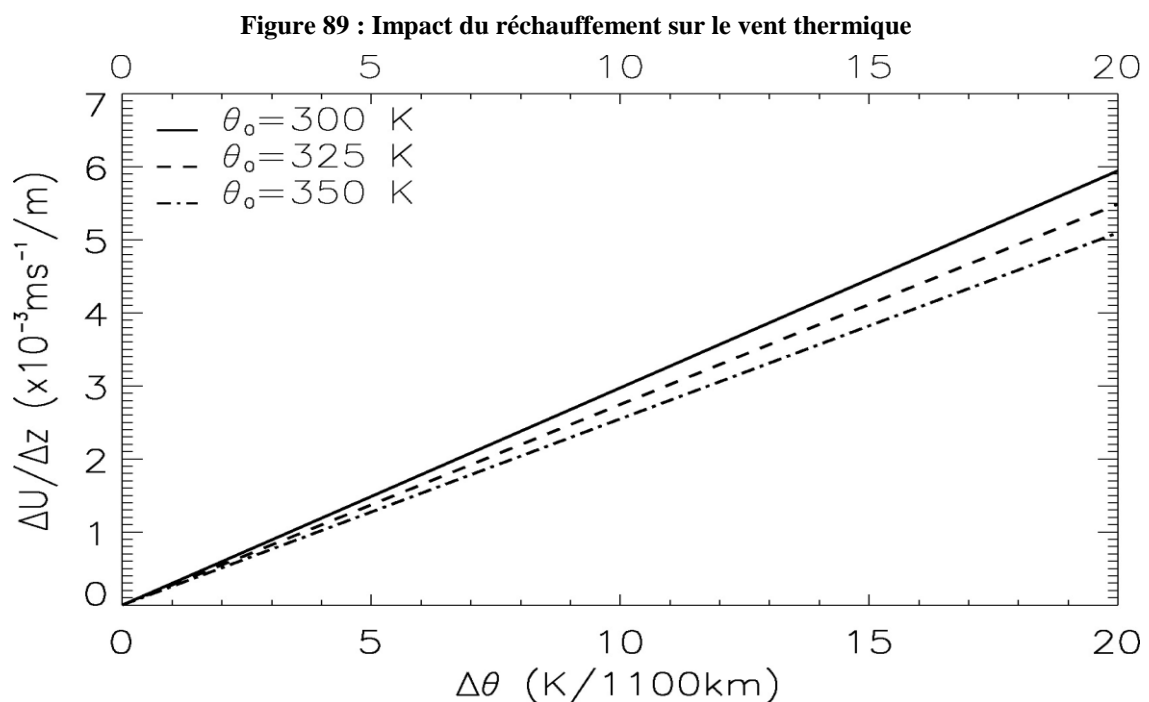
Toujours sur le même lancer explicatif des impacts des poussières désertiques sur les précipitations à l'extrême Nord-Sénégal, il semble qu'en plus de modifier les précipitations totales à l'échelle saisonnière, l'effet des aérosols aurait un impact sur le cycle des précipitations (KIM et al., 2010 ; ZHAO et al., 2011). En effet, le refroidissement de la surface par la présence de lithométéore provoque de jour une diminution des précipitations convectives en fin d'après-midi. En revanche, la nuit, le forçage positif en surface du fait de la ré-émission d'onde infrarouge par les aérosols désertiques favorise l'instabilité thermique et entraîne plus de précipitations nocturnes et matinales. Ainsi, l'amplitude du cycle diurne des précipitations est également modifiée par la présence de panache de poussières. ZHAO et al. (2011) notent que la compétition entre l'impact la nuit et le jour dépend des propriétés absorbantes des aérosols désertiques. Or, l'importante présence du mode grossier dans l'aérosol désertique extrême nord-sénégalais témoigne son aspect fortement absorbant.

En somme, il est à remarquer que même s'il n'y a pas encore de consensus définitif pour admettre que l'effet des poussières désertiques conduit à une diminution des précipitations et que d'après YOSHIOKA et al. (2007) il expliquerait 30% des réductions en moyenne des hauteurs d'eau

annuelles au Sahel, les arguments pour valider les impacts des aérosols désertiques sur les précipitations à l'extrême Nord-Sénégal comme d'ailleurs dans toute la région sahélienne et de l'Afrique de l'Ouest à travers leur effet radiatif sont aussi justificatifs que pertinents. Mais, outre ces impacts sur les précipitations, plusieurs auteurs ont tenté de ressortir une possible action de la présence de panaches de poussières désertiques sur le vent thermique, ceci dans le but de mieux comprendre l'effet de ces aérosols absorbants sur la dynamique atmosphérique.

3.2.2. Impact sur le vent thermique

Comme nous le savons, le vent thermique résulte de l'équilibre horizontal entre force de pression et force de Coriolis. Cet équilibre dit géostrophique établit un lien entre champs de vent et champ de température. Au travers cet équilibre, toute modification du champ de température conduit à une modification du champ de vent. LEMAÎTRE ⁵⁷ fait partie des auteurs qui ont tenté de démontrer l'action du forçage radiatif sur le vent thermique. Elle s'est intéressée à l'impact d'un réchauffement sur la composante longitudinale du vent thermique. Elle a simulé cette composante pour trois températures potentielles différentes (300-325-350 K) et pour des réchauffements compris entre 0 et 20 K (pour une distance de 1100 km soit 10°)



D'après LEMAÎTRE (2011)

⁵⁷ Op.cit.

On constate à travers la *figure 89* que toute variation de 5 K sur 10° en altitude conduit une augmentation du vent thermique de l'ordre de 1.25 à 1.5 m/s sur une distance verticale de 1 km. À l'extrême Nord-Sénégal où les échauffements de la couche atmosphérique pour cause de présence de poussière désertique seraient de l'ordre de 3 à 6 K jour⁻¹ comme c'est souvent le cas en Afrique de l'Ouest de jour, une augmentation importante du vent thermique entre 0.5 et 1.75 m/s sur une distance verticale de 1 km devrait résulter de cette modification de champ de température. Ce qui témoigne en partie les impacts considérables de ces aérosols absorbants sur la dynamique atmosphérique en cette partie sahélienne du Sénégal.

En conclusion de cette partie, on peut noter que la grande capacité absorbante des aérosols nord-sénégalais conduit à un échauffement de l'atmosphère. La prise en compte de l'effet semi-direct nous permet de mieux comprendre le résultat de l'interaction entre panaches de poussières de lithométéores et rayonnements solaire et tellurique. Pour estimer le forçage radiatif de ces poussières, l'on doit considérer plusieurs paramètres à savoir la localisation de la couche limite qui héberge les aérosols par rapport à la surface nous permettant d'évaluer les effets au sommet de l'atmosphère, dans la couche atmosphérique et à la surface ; la présence de nuage ainsi que la localisation du panache de poussières par rapport à ce dernier, élément déterminant dans l'estimation de l'effet radiatif ; le taux de concentration en particules, socle de l'effet indirect ; le moment considéré de la journée (jour ou nuit)...En outre, l'analyse de l'impact de la présence des poussières désertiques sur la dynamique atmosphérique aux stations de l'extrême Nord-Sénégal, nous a permis d'estimer leur influence sur les précipitations et le vent thermique qui constituent avec la températures, les éléments principaux de la climatologie de la région.

Si le taux de concentration en particules reste parmi les paramètres à considérer pour l'estimation du forçage radiatif des poussières, il est aussi le déterminant du degré de réduction de la visibilité horizontale par les lithométéores. Cette action des lithométéores sur la visibilité horizontale ainsi que les conséquences socio-économiques qui en découlent aux stations de l'extrême Nord-Sénégal sont analysées au chapitre V à la fin duquel sont étudiés les impacts sanitaires de ces poussières désertiques dans cette région.

Chapitre V : Poussières désertiques dans l'extrême Nord-Sénégal : action sur la visibilité horizontale, conséquences socio- économiques et impacts sanitaires

1. Actions des poussières lithométéoriques sur la visibilité horizontale aux stations de l'extrême Nord-Sénégal

L'impact environnemental direct des poussières désertiques est la réduction de la visibilité horizontale. Jusqu'ici la qualité de la visibilité constitue l'élément le plus déterminant dans la mise en évidence de la présence de lithométéores et dans l'estimation des niveaux de concentrations en particules de poussières. Elle est directement liée au pouvoir rétrodiffusant des poussières et est directement proportionnelle à la quantité de particules présentes dans l'atmosphère. Inversement, il apparaît dès lors que la réduction de la visibilité est sans doute le premier indicateur de la présence de ces aérosols désertiques.

L'OMM (1966) définit la visibilité comme "la plus grande distance à laquelle un objet noir de dimensions appropriées ne peut être vu et identifié sur le ciel à l'horizon ou, quand il s'agit d'observation de nuit, pourrait être vu et identifié si l'illumination générale était augmentée jusqu'à atteindre l'intensité normale de la lumière du jour"

Dans les Tableaux Climatologiques Mensuels (TCM) et dans les carnets d'observations, la visibilité reportée est celle horizontale. L'OMM (1966) définit celle-ci comme étant la "distance maximale à laquelle un observateur peut voir et identifier un objet situé à proximité du plan horizontal où il se trouve lui-même". La visibilité chiffrée dans les messages synoptiques est la visibilité horizontale minimale observée quel que soit le secteur d'observation.

Dans le code SYNOP la visibilité est chiffrée sous la forme "VV"

Du fait de l'inhomogénéité des concentrations d'aérosols dans l'extrême Nord-Sénégal, la détérioration de la visibilité est très variable dans le temps.

Cette étude se fonde spécifiquement sur les visibilités réduites à moins de 10 km pour deux raisons. D'abord parce que au-delà de 10 km la qualité de l'air est jugée bonne et ensuite parce qu'en zone tropicale sèche, les visibilités relevées en l'absence d'aérosols désertiques sont, en général de l'ordre de 15 km et plus.

La corrélation visibilité horizontale/répartition de la fréquence de lithométéores nous permettra de déterminer le maximum et le minimum de réduction de visibilité aux échelles journalière et saisonnière, alors que la mise en relation visibilité horizontale/concentrations en particules de lithométéores nous révélera les distances auxquelles la visibilité est réduite en fonction des niveaux de concentrations.

Pour conduire cette étude sur les conséquences des lithométéores sur la visibilité horizontale, nous allons retenir deux limites : la visibilité réduite à moins de 10 km et à moins de 5 km. Ces limites ne sont pas absolues mais nous permettent de caractériser les poussières désertiques. La première limite (< 10 km) nous renseigne sur la présence de poussière en suspension dans l'atmosphère car comme nous venons de le souligner un peu plus haut, en zone tropicale sèche, les visibilités relevées en l'absence d'aérosols désertiques sont, en générale, de l'ordre de 15 km et plus. La seconde limite (< 5 km) rend compte d'une densité de poussières importante.

1.1. Répartition diurne de la visibilité réduite par la présence de lithométéore

Aux stations de l'extrême Nord-Sénégal, la réduction de la visibilité en raison de la présence de poussières désertiques est maximale au cœur de la journée, aux heures de fréquence maximum de lithométéore c'est-à-dire généralement entre 09 heures et 15 heures et le minima de cette réduction de visibilité est enregistré au milieu de la nuit, aux heures de fréquence minimum de lithométéore, généralement entre 21 heures et 03 heures. Au centre et à l'est de la zone, une très forte réduction de la visibilité horizontale pour cause de poussières désertiques peut être constatée un plus tôt, dès les premières heures de la journée du fait qu'il arrive qu'à ces heures il se présente des événements de lithométéores de fortes concentrations en particules. Est-il nécessaire de reprendre l'exemple du jeudi 08 Janvier 2015 où les cours étaient suspendus dans beaucoup d'établissements du "*Dandé Mayo*" (localités de la rive gauche du fleuve Sénégal, à la frontière avec la Mauritanie) quelques minutes après l'heure du démarrage des cours (08 heures) du fait d'événements poussiéreux de fortes concentrations en particules et qui réduisaient la visibilité à seulement quelques mètres.

Le minimum de la réduction de la visibilité reste certes enregistré au milieu de la nuit, mais en saison des pluies, il est très fréquent, aux stations de Podor et surtout de Matam, que cette partie du jour connaisse le maximum de réduction de visibilité du fait des phénomènes de "*haboobs*" qui sont des murs de poussières de fortes concentrations et de forte intensité accompagnant le plus souvent les orages et précédant le plus souvent les précipitations. Devrons-nous souligner qu'il serait illusoire de penser que l'obscurité de la nuit influencerait le fait de reconnaître le

maximum de réduction de la visibilité à ces heures de la nuit lors de ces événements d'orage et de pluies. Même si l'illumination générale était augmentée jusqu'à atteindre l'intensité normale de la lumière du jour, comme il se fait d'ailleurs lorsqu'il s'agit d'observation de nuit, on constaterait que ces événements poussiéreux connus à ces heures de la nuit engendraient le maximum de réduction journalière de visibilité horizontale.

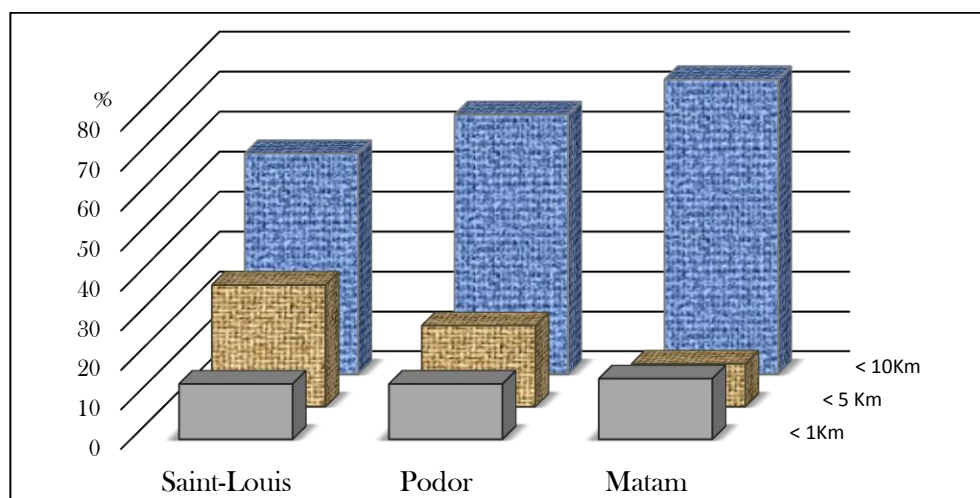
Ce constat sur la réduction de la visibilité qui présente son maximum au cœur de la journée et son minimum en pleine nuit reste quasiment une règle dans toutes les stations sahéliennes.

Si nous entreprenons à présent l'analyse de la répartition de visibilité réduite à moins de 10 km, à moins de 5 km et à moins de 1 km, nous arriverons à déterminer la fréquence journalière de la réduction de la visibilité horizontale suivant ces distances qui indiquent respectivement la présence de poussière en suspension, une densité de poussières importante et de niveaux de concentrations extrêmement élevées en particules. L'analyse suivant les phases climatiques (avant sécheresse, période de sécheresse et après sécheresse) de la réduction de la visibilité horizontale aux différentes distances (< 10 km, < 5 km, < 1 km) pour cause de la présence de lithométéores nous permettra de constater si la répartition de la réduction de la visibilité suivant les différentes distances connaît des modifications en fonction des caractéristiques climatiques des périodes humides (1965-1971), de sécheresse (1972-1992) et celle actuelle (1993-2014). Le **tableau 31** indique la répartition journalière de la visibilité < 10 km, < 5 km et < 1 km pour raisons de présence d'aérosols désertiques aux stations de l'extrême Nord-Sénégal de 1965 à 2014. Il est illustré par la **figure 90**.

Tableau 31 : répartition journalière (%) de la visibilité < 10 km, < 5 km et < 1 km pour raisons de la présence d'aérosols désertiques aux stations de l'extrême Nord-Sénégal de 1965 à 2014

Distances \ Stations	< 1Km	< 5 Km	< 10Km
Saint-Louis	14	31	55
Podor	14	21	65
Matam	15	11	74

Figure 90 : Répartition journalière de la visibilité horizontale < 10 km, 5 km et 1 km pour cause de la présence de lithométéores dans les stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1965-2014)



À l'extrême Nord-Sénégal, les jours affectés par les lithométéores connaissent une visibilité horizontale majoritairement réduite à moins de 10 km. Aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam la réduction à cette distance représente respectivement 55, 65 et 74% de la fréquence journalière. La réduction de la visibilité à moins de 5 km représente quant à elle respectivement 31, 21 et 11%. Cette réduction journalière à moins de 5 km témoigne une densité de poussières importante. La figure nous indique qu'elle est plus fréquente à la station de Saint-Louis comparée aux autres stations de la zone. De notre point de vue, il s'agit des erreurs d'interprétation. En effet, il nous semble que des brumes humides, fréquentes dans la station surtout dans les premières heures de la journée en période d'hiver du fait de sa position plus océanique aient probablement été répertoriées comme brumes sèches ou brumes de poussières. Soulignons que les brumes humides présentent des caractéristiques beaucoup plus locales et par conséquent peuvent réduire la visibilité à moins de 5 km. Ces probables erreurs d'interprétation expliqueraient même le fait que la fréquence de la réduction de la visibilité < 10 km soit moins importante à la station de Saint-Louis comparée à celles de Podor et de Matam.

Il est aussi important de souligner le pourcentage de la fréquence journalière de la réduction de visibilité à moins de 1 km. La réduction de la visibilité à cette distance témoigne des concentrations extrêmement élevées en particules de poussières. 14% des jours affectés par les aérosols désertiques à l'ouest et au centre et 15% à l'est de la zone sont marqués par une réduction moyenne journalière de la visibilité inférieure à 1 km. Aux yeux du profane ce pourcentage peut paraître faible, mais quand on essaie de corréliser ces jours connaissant la réduction à moins de 1 km avec les niveaux de concentrations en particules qu'ils présentent et en prenant en compte

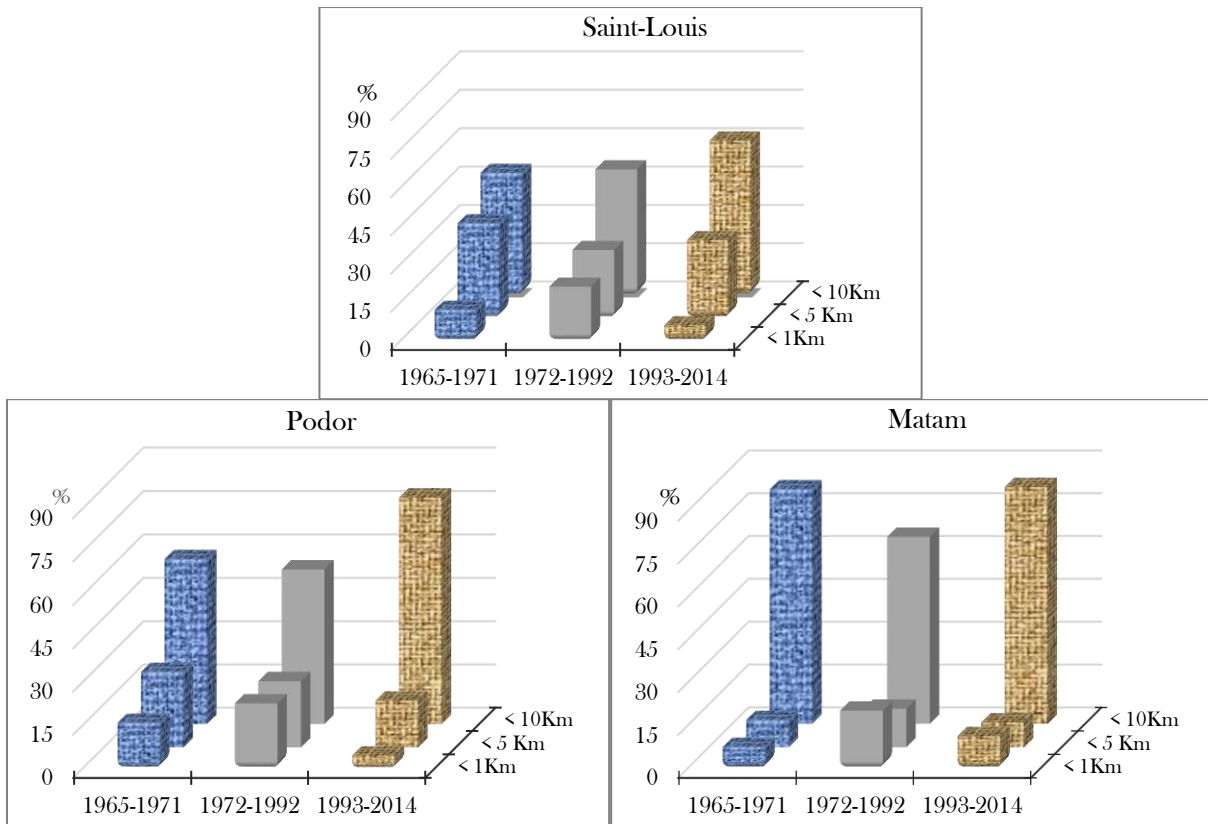
toutes les conséquences qui en découlent (blocage de certaines activités humaines, impacts sur la santé des populations), l'on se rendra compte de l'importance de considérer ces fréquences journalières. En outre, le pourcentage un peu plus élevé de cette fréquence < 1 km à la station de Matam par rapport aux autres stations de la zone ne devrait en aucun cas nous surprendre d'autant plus que comme nous l'avons indiqué c'est la station qui présente le plus des cas de déflation associant une forte dynamique éolienne et qui souvent en raison des conditions litho-pédologiques entraînent des concentrations élevées en particules réduisant ainsi la visibilité à cette distance.

La répartition journalière analysée jusqu'ici concerne la moyenne 1965-2014. Du fait que l'extrême Nord-Sénégal, à l'instar des toutes stations sahéliennes, a connu différentes phases climatiques, il nous paraît important de suivre l'évolution de la fréquence de la réduction de la visibilité horizontale journalière aux différentes distances retenues (< 10 km, < 5 km, < 1 km) aux cours de ces différentes phases afin de voir si les variabilités des caractéristiques climatiques y ont entraîné des modifications. Le **tableau 32** présente la fréquence de cette réduction visibilité à ces différentes distances dans les stations de notre zone d'étude au cours des différentes phases climatiques de 1965 à 2014. Il est illustré par la **figure 91**.

Tableau 32 : Fréquence (%) de la réduction de la visibilité à moins de 10 m, 5 km et 1 km pour cause de lithométéores aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam aux cours des phases climatiques de 1965 à 2014

Stations	Distance	< 1km	< 5 km	< 10km
	Période			
Saint-Louis	1965-1971	13	38	49
	1972-1992	22	28	50
	1993-2014	07	31	61
Podor	1965-1971	17	26	57
	1972-1992	23	23	54
	1993-2014	05	16	78
Matam	1965-1971	08	10	82
	1972-1992	21	13	65
	1993-2014	12	09	83

Figure 91 : Evolution de la fréquence (%) de la visibilité < 1 km, < 5 km, < 10 km pour raisons de présence de poussières désertiques au cours des différentes phases climatiques dans les stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1965-2014)



À la période prè-sécheresse (1965-1971), aux stations centre de Podor et ouest de Saint-Louis, respectivement 57 et 49% des jours affectés par les lithométéores connaissent une visibilité horizontale inférieure à 10 km. Ceci indique juste une présence de poussières désertiques sans une inquiétude majeure en terme de concentration en particules. Quant à la fréquence de visibilité < 5 km et < 1 km, elle caractérise 2/5 et 1/5 des jours lithométéoriques respectivement au centre et à l'ouest. Ces jours sont marqués par une concentration importante voir extrêmement élevée en particules de poussières.

La fréquence journalière des jours à visibilité réduite à moins de 1 km connaît une explosion durant la période de sécheresse (1972-1992) où aux stations de Podor et Saint-Louis, respectivement 23 et 22% des jours affectés par les poussières désertiques étaient marqués par une visibilité réduite à cette distance, soit une concentration de $1340 \mu\text{g.m}^{-3}$ à $1897 \mu\text{g.m}^{-3}$ en PST (Particules en suspension totale) (selon que l'on applique l'Equation de BEN MOHAMED et al. ou celle de BERTRAND) et $933 \mu\text{g.m}^{-3}$ en PM_{10} (particules fines) (d'après l'Equation de D'ALMEIDA). À préciser qu'à cette période, à Saint-Louis comme à Podor, 50% des jours

affectés par les aérosols désertiques étaient marqués par une réduction de visibilité ne permettant pas de voir et d'identifier un objet noir au-delà de 5 km.

À la période post-sécheresse (période actuelle, 1994-2014), la fréquence de visibilité réduite à moins de 5 km et 1 km a connu une diminution remarquable. Seul 1 jour sur 20 et 2 sur 30 pour respectivement Podor et Saint-Louis connaissent une visibilité < 1km. Si à Podor, environ 8/10 des jours poussiéreux sont affectés par une visibilité < 10 km, à Saint-Louis par contre plus de 30% des jours lithométéoriques engendrent une réduction de la visibilité horizontale à moins de 5 km sans tenir en compte la fréquence de celle réduite à moins de 1 km. Devrons-nous souligner à nouveau que de notre point de vue, il s'agit d'une erreur d'interprétation. Des brumes humides, fréquentes dans la station surtout dans les premières heures de la journée en période d'hiver et ayant une capacité de réduction de la visibilité à moins de 5 km voir même à moins de 1 km auraient été enregistrées pour des brumes sèches ou brumes de poussières et que la visibilité ainsi observée aurait été attribuée à ces lithométéores.

Quant à la station de Matam, l'essentiel des jours affectés par les lithométéores était caractérisé par une réduction de la visibilité horizontale à moins de 10 km lors de la période pré-sécheresse, soit 8 jours/10. Seuls 2 jours/10 étaient marqués par une visibilité < 5 km dont 1 jour à visibilité réduite à moins de 1 km. Comme partout dans la zone d'étude, à cette station Est de l'extrême Nord-Sénégal, les jours à visibilité réduite à moins de 1 km connaissent une explosion durant la période de sécheresse (1972-1992) atteignant un facteur 3 même si 3/5 des jours lithométéoriques sont affectés par une visibilité < 10 km.

À la période post-sécheresse (période actuelle, 1993-2014), on retrouve les mêmes caractéristiques qu'à la période pré-sécheresse. La majeure partie des jours poussiéreux est caractérisée par un temps où la visibilité reste réduite à moins de 10 km. Cependant, il serait une grande erreur de ne pas accorder une importance à la fréquence des jours (2/10) à visibilité horizontale < 5 et 1 km car, du fait qu'en terme de concentrations en particules de poussières ils témoignent un risque sanitaire très important. En guise d'illustration, si nous considérons uniquement les PM₁₀ (particules à taille fine) on constate, suite à l'application de l'Equation D'ALMEIDA, qu'à ces 2 jours/10, les taux de concentrations varient entre 301 et 933 µg.m⁻³. Est-il important de souligner qu'au-dessus de 150 µg.m⁻³, la qualité de l'air est déjà jugée malsaine et qu'au-delà de 500 µg.m⁻³, l'air respirable est qualifié de dangereux en termes de conséquences sur la santé des populations surtout chez les enfants et les personnes âgées.

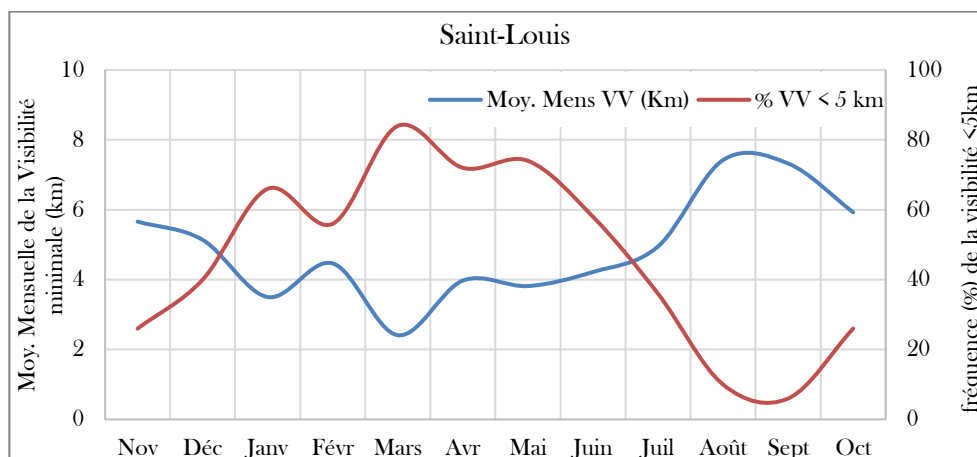
Du fait que la fréquence des lithométéores (aussi bien en terme du nombre de jour qu'en terme de concentration en particules) suit une saisonnalité et que le maximum et le minimum se situent respectivement au cœur des mois de la saison sèche et au mois de la saison des pluies, par conséquent la fréquence de la visibilité réduite pour cause de ces poussières désertiques est aussi variable d'un mois à un autre, d'une saison à une autre.

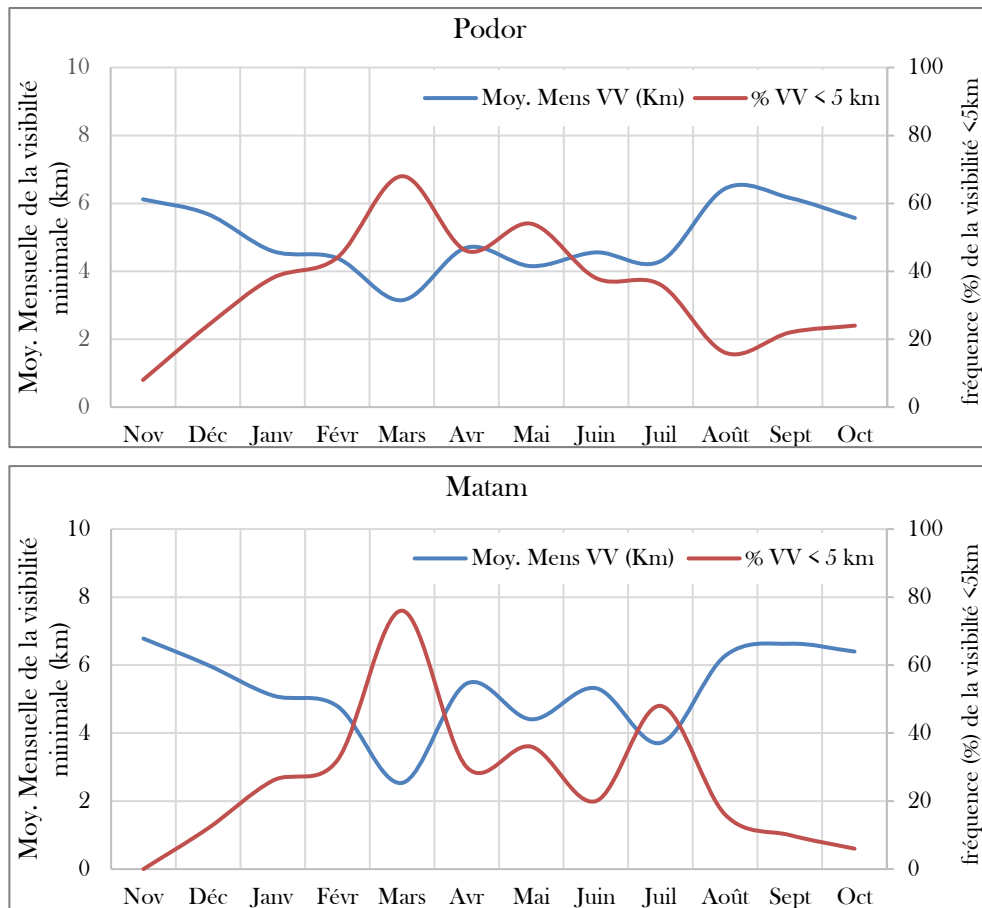
1.2. Variation mensuelle et saisonnière de la fréquence de la visibilité réduite pour cause de lithométéores

Comme pour le nombre de jours de lithométéores et les concentrations en particules, le diagnostic de la répartition mensuelle et saisonnière de la fréquence de la visibilité réduite du fait de la présence de ces aérosols désertiques nous permet de détecter le maximum et le minimum des événements au niveau de chaque station suivant les mois et les saisons de l'année.

À l'extrême Nord-Sénégal, c'est au mois de Mars, au cœur de la saison sèche que la présence des poussières désertiques réduit au maximum la visibilité horizontale (*figure 92*). À ce mois de Mars, aux stations de Matam et Podor, cette visibilité horizontale est réduite à moins de 3 km en moyenne (de 1965 à 2014) alors que sur cette même série de 50 ans elle reste inférieure à 2 km à la station de Saint-Louis. Si nous considérons seulement la visibilité réduite à moins de 5 km, on constate qu'environ 85% des événements poussiéreux réduisent la visibilité horizontale à cette distance à la station de Saint-Louis. Environ 70% et 75% de la présence des lithométéores réduisent la visibilité horizontale à moins de 5 km au mois de mars aux stations de Podor et Matam (*figure 92*).

Figure 92 : Evolution mensuelle de la visibilité (km) réduite pour cause de présence de lithométéore et fréquence (%) de la visibilité < 5 km aux stations de l'extrême Nord-Sénégal





Déjà nous comprenons que l'importance de réduction de la visibilité n'est pas forcément définie par le nombre de jours de lithométéores mais reste plutôt déterminée par la concentration en particules. Si nous prenons l'exemple de la station de Matam, les chasse-sables y constituent environ 70% des poussières désertiques et pourtant ce lithométéore présente un maximum au mois de Janvier alors que comme nous venons de le constater, la réduction de la visibilité horizontale pour cause d'événements lithométéoriques y est maximale au mois de mars. C'est également le cas à la station de Saint-Louis avec les brumes de poussières.

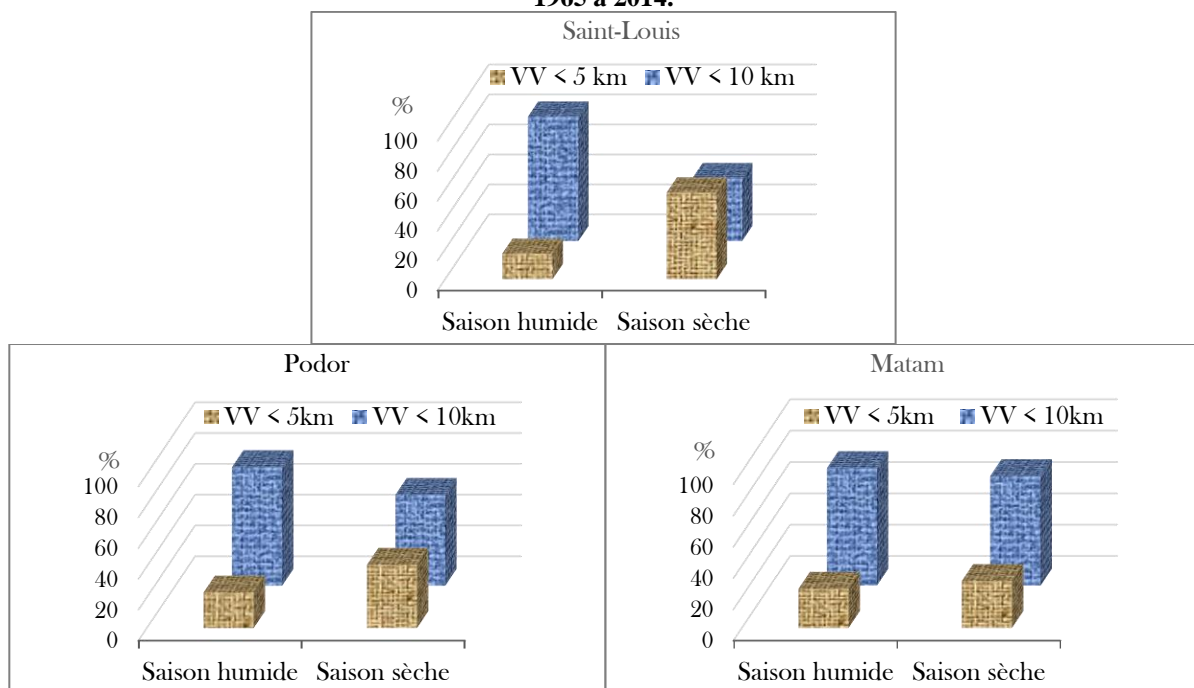
Le maximum de réduction de la visibilité observé au mois de mars est à mettre à relation avec l'émission des zones sources sahélo-sahariennes qui présentent quasiment toutes le maximum de leur activité en cette période de l'année (*voire section : **corrélation visibilité horizontale réduite/concentrations en particules, p.257***)

Si le maximum de la réduction de la visibilité horizontale atteint son pic au mois de mars à l'extrême Nord-Sénégal, l'impact des lithométéores sur la qualité de l'air y est minimal, de façon générale en pleine saison des pluies. Au mois d'août, au centre et à l'est de cette partie du pays, seul 1 événement de lithométéore sur 10 présente une réduction de visibilité à moins de 5 km. À

l'ouest, seuls 2 jours de présence d'aérosols désertiques sur 10 sont affectés par une visibilité inférieure à 5 km au mois d'août. Est-il nécessaire de rappeler qu'à cette période, la quasi-totalité des zones sources présente une faible émission en particules du fait qu'elles sont sous contrôle de la pluviométrie qui engendre des conditions défavorables à l'arrachement des particules. C'est aussi à ces mois de l'année que le FIT atteint sa position la plus haute, réduisant le déplacement des panaches libérés vers le sud.

On comprend dorénavant que l'importance de la réduction de la visibilité est définie par le rapport visibilité < 5 km/visibilité < 10 km, autrement dit le rapport entre temps où l'air est fortement affecté par une concentration en particules et temps où la qualité de l'air témoigne juste une présence de poussières. L'on ne doit pas s'attendre à ce que ce rapport soit forcément positif pour parler d'une augmentation de la réduction de la visibilité d'un moment à autre, mais juste que la fréquence de la visibilité < 5 km connaisse une hausse au désavantage de celle <10 km. La **figure 93** présente ce rapport saisonnier aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam durant la période 1965-2014.

Figure 93 : Rapport saisonnier visibilité < 5 km/visibilité < 10 km aux stations de l'extrême Nord-Sénégal de 1965 à 2014.



Au regard de la **figure 93**, on constate qu'aux stations de l'extrême Nord-Sénégal la visibilité réduite à moins de 5 km est largement plus manifeste en saison sèche. Même si à Matam et à Podor, la visibilité < 10 km domine les fréquences aussi bien en saison sèche qu'en saison des pluies, le rapport VV < 5 km/VV < 10 km résulte une valeur plus élevée en saison sèche, ce qui

indique que la fréquence de la VV < 5 km est beaucoup plus importante en saison sèche qu'en saison des pluies. Notons que cette augmentation de la visibilité inférieure à 5 km est largement plus manifeste à Podor et à Saint-Louis où on connaît une hausse respective de 18 et 41% qu'à la station de Matam qui enregistre une hausse de 5%. Cette situation à Matam est particulière du fait que la station est beaucoup soumise aux influences d'une source proche (sud-ouest mauritanienne). Cette faible hausse de la fréquence de la VV < 5 km en saison sèche ne signifie en aucun que la station est moins affectée par les lithométéores comparée aux autres stations de la zone, mais c'est plutôt dû au fait qu'en saison sèche comme en saison des pluies, elle est fortement marquée par des cas de déflation (chasse-sables surtout) et qui restent déterminés par des niveaux de concentration quasiment pareils toutes les saisons de l'année.

Pour mieux explorer ce rapport saisonnier VV < 5 km/ VV < 10 km, nous avons cherché à suivre son évolution au cours des différentes phases climatiques depuis les cinquante dernières années (1965-2014), ceci du fait que jusqu'ici nous avons porté l'étude de la variation mensuelle et saisonnière sur toute la série prise sous l'angle globale, ce qui ne permet de révéler que la moyenne, toutes les années confondues. Or, l'analyse détaillée par phase climatique nous permettra de déceler les différentes modifications d'une période à une autre et d'apprécier la tendance actuelle par rapport aux précédentes sous-séries. Les **tableaux 33, 34, 35** montrent la variation de ce rapport saisonnier VV < 5 km/ VV < 10 km (%) aux différentes stations de la zone sur la période 1965-2014.

Tableau 33 : variation du Rapport saisonnier VV < 5 km/ VV < 10 km à la station de Saint-Louis sur la série 1965-2014

Station de Saint-Louis	Période	VV	Saison humide	Saison sèche
	1965-1972		< 5 km	9
		< 10 km	91	39
1973-1992		< 5 km	24	60
		< 10 km	76	40
1993-2014		< 5 km	14	55
		< 10 km	86	45

Tableau 34 : variation du Rapport saisonnier VV < 5 km/ VV < 10 km à la station de Podor (33) sur la série 1965-2014

Station de Podor	Période	VV	Saison humide	Saison sèche
	1965-1972		< 5 km	38
		< 10 km	62	63
1973-1992		< 5 km	33	52
		< 10 km	67	48
1993-2014		< 5 km	12	28
		< 10 km	88	72

Tableau 35 : variation du Rapport saisonnier VV< 5 km/ VV< 10 km à la station de Matam sur la série 1965-2014

Station de Matam	Période	VV	Saison humide	Saison sèche
	1965-1972		< 5 km	9
		< 10 km	91	79
1973-1992		< 5 km	19	44
		< 10 km	81	56
1993-2014		< 5 km	35	21
		< 10 km	65	79

En décidant de suivre l'évolution du Rapport saisonnier VV< 5 km/ VV< 10 au cours des différentes phases climatiques depuis la seconde moitié des années 60, nous nous attendions à des éventuelles modifications dans toutes les stations.

À la station de Saint-Louis, le **tableau 33** nous révèle que non seulement le pourcentage de visibilité inférieure à 5 km connaît toujours une hausse remarquable en saison sèche durant toutes les phases climatiques, mais constitue même la majorité de la fréquence de visibilité réduite pour cause de lithométéores en cette saison de l'année (61% à la période pré-sécheresse, 60% durant les années de sécheresse et 55% à la période actuelle). Autrement dit que le Rapport VV< 5 km/ VV< 10 est partout > 1 en saison sèche (R= 1.6 de 1965 à 1971, R= 1.5 de 1972 -1992, R= 1.2 de 1993 à 2014).

Si à cette même station la fréquence de VV< 5 km en saison humide a connu son maximum durant la période de sécheresse, son pourcentage est largement supérieur à la période actuelle comparée à celle avant la sécheresse. On comprend alors que même si le Rapport VV< 5 km/ VV< 10 reste inchangé en termes d'évolution de la saison humide à la saison sèche, le pourcentage de la fréquence de la VV< 5 km varie fortement entre ces différentes périodes.

À la station de Podor, en période pré-sécheresse, aucune évolution saisonnière du Rapport VV< 5 km/ VV< 10 en termes de pourcentage de fréquence n'est notée. Cela sous-entend quasiment le même d'une saison à l'autre (0.61 en saison humide et 0.59 en saison sèche). Le rapport qui voit la fréquence de VV< 5 km plus importante en saison sèche qu'en saison humide ne s'observe qu'à partir des premières années de la Grande sécheresse climatique. Durant la période de sécheresse (1972-1992), non seulement cette fréquence connaît une augmentation en saison sèche, mieux encore elle domine à plus de 50% la visibilité horizontale réduite pour cause d'aérosols désertiques. À la période actuelle, certes cette fréquence a connu une baisse comparée à la période de sécheresse aussi bien en saison humide qu'en saison sèche, mais le rapport qui

voudrait que la visibilité inférieure à 5 km soit plus manifeste en saison sèche reste quand même maintenu. 12% de la fréquence de visibilité horizontale réduite pour cause de poussières désertiques en saison des pluies, la $VV < 5$ km constitue environ 30% de la visibilité minimale attribuée à la présence de lithométéore en saison sèche soit un Rapport respectif de 0.1 et 0.4.

S'agissant de la station de Matam, à la période pré-sécheresse (1965-1971) que durant les années de sèches (1972-1992), l'évolution du rapport $VV < 5$ km/ $VV < 10$ de la saison humide à la saison sèche était manifeste (0.1 ; 0.3 en 1965-1971 et 0.2 ; 0.8 en 1972-1992). Mais contrairement à la station de Saint-Louis où, en saison sèche et sur toute la série (1965-2014) la $VV < 5$ km domine largement la fréquence de la visibilité horizontale réduite et contrairement aussi à la station de Podor où elle constituait la majorité de la fréquence de visibilité réduite en saison sèche durant la période de sécheresse, à la station de Matam cette fréquence de $VV < 5$ km reste toujours inférieure à celle de $VV < 10$ km aussi bien en saison humide qu'en saison sèche, quel que soit la période considérée. Cela sous-entend que de la période pré-sécheresse à la période actuelle, le Rapport $VV < 5$ km/ $VV < 10$ y est tout au long de l'année inférieur à 1.

Si à la période actuelle, la fréquence de la $VV < 5$ km en saison sèche reste identique à celle de la période avant-sécheresse, son pourcentage en saison humide durant cette période actuelle mérite d'être souligné. En effet, en cette période de l'hivernage, 35% des événements lithométéoriques réduisent la visibilité à cette distance. Est-il nécessaire d'accorder cette forte fréquence de $VV < 5$ km en cette saison humide aux "haboobs" très riches en termes de concentrations en particules et qui en leur présence ont donc l'aptitude de réduire la visibilité à cette distance.

1.3. Corrélation visibilité réduite et Concentration en particules

Si l'estimation de la visibilité horizontale est retenue comme critère principal pour déterminer la présence de lithométéore et que par conséquent la répartition diurne, mensuelle et saisonnière de la réduction de cette visibilité reste proportionnelle à la répartition diurne, mensuelle et saisonnière de ces lithométéores, des chercheurs ont également utilisé une variété importante de visibilités limites pour décrire les lithométéores. Autrement dit qu'à chaque type de lithométéore, ils attribuent une distance à laquelle la visibilité est réduite. OZER (2001) a repris ces visibilités au *tableau 36*.

De notre point de vue il s'agit d'une erreur d'autant plus il n'y a pas de niveau de concentrations en particules limite pour distinguer un type de lithométéore d'un autre. Il est possible qu'un phénomène de poussières en suspension (brumes sèches ou brumes de poussières) réduise la

visibilité horizontale plus qu'un cas de déflation (chasse-sables ou tempête de poussières) comme il arrive qu'un cas de déflation soit beaucoup plus riche en concentrations en particules qu'un événement de poussières en suspension.

Tableau 36 : Visibilités-limites pour décrire les types de lithométéores, sources et régions d'études

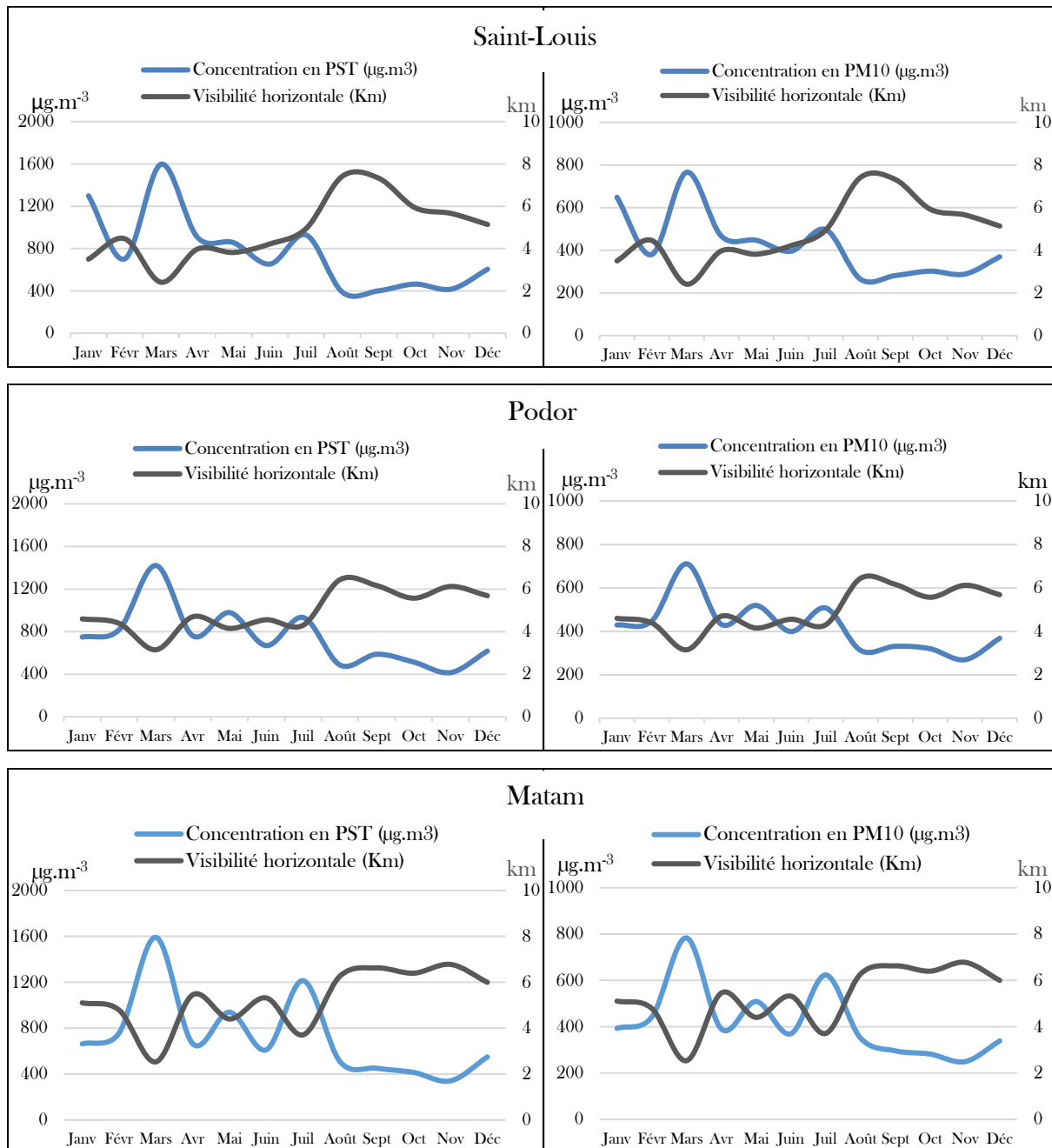
Phénomène	Visibilité	Auteurs et régions d'étude
Lithométéore	< 100 dam	Kalu 1979 (Sahel)
Lithométéore	< 500 dam	Ozer 1993, 1995, 1997, 1998 (Niger) ; Nouaceur 1994, 1999 (Mauritanie)
Lithométéore	< 1000 dam	Bertrand 1976 (Niger-Côte d'Ivoire) ; Bertrand et al. 1979 (Sahel) ; N'Tchayi et al. 1992, 1994, 1997 (Sahel)
Lithométéore	< 1130 dam	Orgill et Sehmel 1976 (USA) ; Brahel 1989 (USA)
Brume sèche	< 200 dam	Ojo 1977 (Tchad)
Brume sèche	< 300 dam	Adetujni et al. 1979 (Nigeria)
Brume sèche	< 500 dam	Bertrand et al. 1979 (Sahel) ; Modi 1983 (Niamey-Niger) ; Ozer 1993, 1995, 1997, 1998 (Niger) ; Nouaceur 1994, 1999 (Mauritanie) ; N'Tchayi et al. 1992, 1994, 1997 (Sahel)
Brume sèche	≥ 500 dam	Al Kulaib 1984 (Koweït) ; Safar 1985 (Koweït)
Brume sèche	< 1000 dam	Bertrand 1976 (Niger-Côte d'Ivoire)
Brume sèche	400-1800 dam	Morales 1986 (Soudan)
Brume sèche légère	< 1000 dam	Bertrand et al. 1979 (Sahel) ; N'Tchayi et al. 1992, 1994, 1997 (Sahel)
Brume de poussière	< 500 dam	Ozer 1993, 1995, 1998 (Niger), Nouaceur 1994, 1999 (Mauritanie)
Brume de poussière	100-< 500 dam	Al Kulaib 1984 (Koweït) ; Safar 1985 (Koweït)
Brume de poussière	< 200 dam	Burns 1961 (USA)
Brume sèche légère	200-1000 dam	Burns 1961 (USA) ; Ojo 1977 (Tchad)
Chasse-sable	< 500 dam	Ozer 1993, 1995, 1997, 1998 (Niger) ; Nouaceur 1994, 1999 (Mauritanie)
Chasse-sable	100-< 500 dam	Al Kulaib 1984 (Koweït) ; Safar 1985 (Koweït)
Chasse-sable	< 1100 dam	Patterson et al. 1976 (USA) ; Middleton 1986 (Moyen-Orient)
Tempête de sable	< 70 dam	Oliver 1945 (Egypte)
Tempête de sable	< 80 dam	Brazel et Hsu 1981 (USA) ; Pewe et al. 1981 (USA)
Tempête de sable	< 1450 dam	Hagen et Woodruff 1973 (USA)
Tempête de sable	< 1130 dam	Gillette et al. 1978 (USA)
Tempête de sable	≤ 100 dam	Bhalotra 1958 (Soudan) ; Derbyshire et al. 1998 (Chine)
Tempête de sable	< 100 dam	Huschke 1969 (USA) ; Patterson et al. 1976 (USA) ; Goudie 1978, 1983 (Global) ; Al Kulaib 1984 (Koweït) ; Middleton 1984 (Australie), 1985A (Mauritanie et Soudan), 1986 (Moyen-Orient) ; Khalaf et al. 1985 (Koweït) ; Safar 1985 (Koweït), McTainsh et Pitblado 1987 (Australie) ; McTainsh et al. 1989 (Australie) ; Yu et al. 1992 (Australie)
Tempête de sable sévère	< 50 dam	Patterson et al. 1976 (USA)
Tempête de sable sévère	< 20 dam	Oliver 1945 (Egypte) ; Al Kulaib 1984 (Koweït) ; Safar 1985 (Koweït)

D'après Ozer (2001)

On comprend alors que seul le niveau de concentrations en particules peut déterminer la distance à laquelle la visibilité horizontale peut être réduite.

Les **figures 94** montrent cette corrélation entre visibilité horizontale réduite et concentrations en particules aux stations de l'extrême Nord-Sénégal

Figure 94 : corrélation Visibilité horizontale réduite et concentration en PST (à gauche) et PM₁₀ (à droite) aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1965-2014)



Les **figures ci-dessus** attestent parfaitement l'existence de cette corrélation entre visibilité horizontale réduite et niveaux de concentrations en particules de poussières. On note que les deux

courbes suivent toujours des allures opposées. Plus (moins) la concentration en particules est forte, moins (plus) la visibilité est bonne. Le mois de mars qui, comme nous l'avons vu précédemment, est le mois de l'année où la visibilité minimale est en moyenne la plus réduite (< 2 km à la station de Saint-Louis, < 3 km aux stations de Podor et Matam) coïncide parfaite avec les niveaux de concentrations moyennes mensuelles en PST (Particules en Suspension Totale) et en PM₁₀ (Particules en taille très fine) les plus élevés de l'année (respectivement 1597 µg.m⁻³ et 766 µg.m⁻³ à la station de Saint-Louis, 1421 µg.m⁻³ et 711 µg.m⁻³ à la station de Podor, 1592 µg.m⁻³ et 783 µg.m⁻³ à la station de Matam). Le premier minima observé au mois d'août, caractérisant le premier mois de l'année (calendrier) où la visibilité horizontale est moins affectée (VV < 7 km à la station de Saint-Louis et < 6 km aux stations de Podor et Matam) correspond au premier minima de concentration en PST et en PM₁₀ (respectivement 387 et 264 µg.m⁻³ à la station de Saint-Louis, 486 et 312 µg.m⁻³ à la station de Podor, 508 et 351 µg.m⁻³ à a station de Matam). Les mois de janvier et/ou février et les mois d'avril-mai-juin (visibilité réduite de moins 4 à moins 5 km) qui marquent la situation intermédiaire entre les mois à visibilité fortement réduite et ceux à visibilité faiblement affectée constituent sans surprise aucune la transition (600-980 µg.m⁻³ en PST et 350-520 µg.m⁻³ en PM₁₀) entre les mois où les événements poussiéreux sont caractérisés par les plus fortes concentrations en PST et en PM₁₀ et ceux où la présence de lithométéore est associée à des concentrations en PST et en PM₁₀ les moins fortes de l'année aux stations de l'extrême Nord-Sénégal.

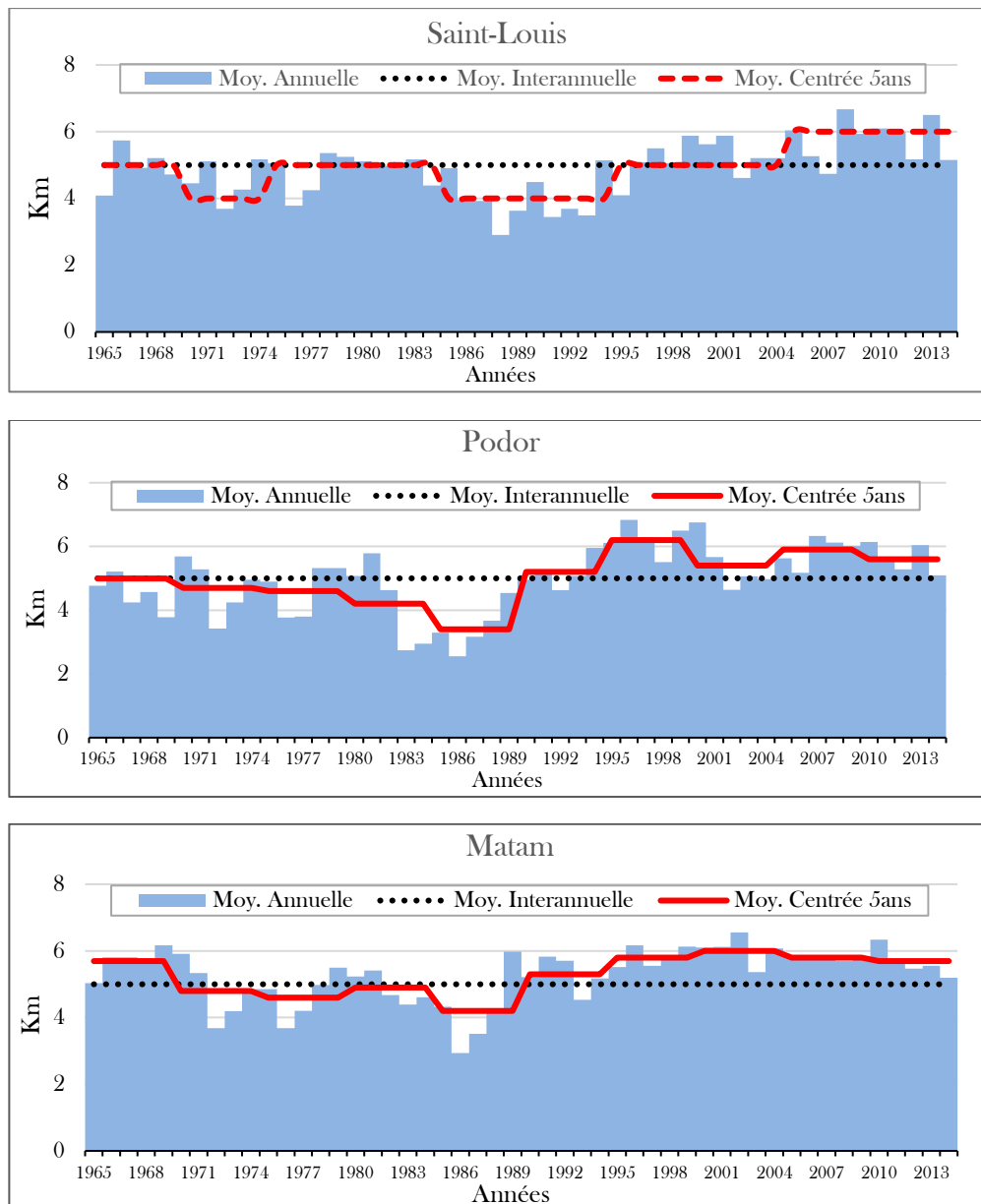
On constate alors toute l'évidence de la corrélation entre l'importance de réduction de visibilité horizontale pour cause de la présence d'un lithométéore et niveaux de concentrations en particules de celui-ci. Et du fait que, comme nous l'avons souligné, autant il n'existe pas un niveau de concentration limite définissant un type de lithométéore quelconque, autant il est impossible de définir et d'attribuer à un type de lithométéore une distance de réduction de la visibilité. Or le trouble de l'air, qui crée un écran ne permettant plus de voir et de distinguer un objet situé à proximité du plan horizontal où l'on se trouve, reste défini par la quantité de particules dans l'air. On comprend dès lors que seul le niveau de concentration en particules d'un lithométéore et non le type de ce lithométéore peut justifier l'importance de la réduction de la visibilité horizontale.

1.4. Evolution annuelle de la réduction de la visibilité horizontale pour cause de présence de lithométéores

La moyenne annuelle de la fréquence de la visibilité horizontale due aux événements d'aérosols désertiques reste définie par la fréquence de la présence de lithométéores en terme du nombre de

jours et de concentrations en particules. Or, cette fréquence elle-même est tributaire des conditions climatiques et/ou exacerbée par ces dernières. En effet les années de sécheresse ainsi que celles qui les suivent sont plus fortement marquées par une fréquence de réduction de la visibilité horizontale que les années de l'avant-sécheresse et celles de la période actuelle. La *figure 95* atteste cette situation dans les stations de l'extrême Nord-Sénégal.

Figure 95 : Evolution de la moyenne annuelle et moyenne centrée sur 5 ans de la visibilité réduite pour cause d'événements de lithométéores aux stations de l'extrême Nord-Sénégal de 1965 à 2014



L'analyse des figures nous amène à constater une forte variabilité de la fréquence annuelle de la réduction de la visibilité horizontale sur notre période d'étude dans tout l'extrême Nord-Sénégal. De l'ouest à l'est, le constat est identique, les années de sécheresse ainsi que celles qui les suivent

sont fortement marquées par une réduction de la visibilité pour cause de présence de lithométéores et de fortes concentrations en particules. L'allure des moyennes annuelles indique une variabilité d'une année à une autre, ce qui justifie et est justifiée par une variabilité d'une année à une autre du nombre de jours de lithométéore et du niveau de concentrations en particules.

Les moyennes centrées sur 5 ans révèlent que dans les stations de l'extrême Nord-Sénégal, jusqu'à la fin des années 60 (période pré-sécheresse), la visibilité horizontale affectée par la présence de lithométéore était réduite en moyenne à moins de 5 km voir 6 km, oscillant donc entre densités importantes et niveau modéré de concentrations en particules de poussières. Dans cette partie du Sénégal, c'est véritablement l'année 1969 qui a constitué une véritable rupture de la machine climatique de la période humide des années 50-60, marquant les premières influences de la Grande Sécheresse sahélienne. Et c'est justement à partir de cette année que la visibilité horizontale a été réduite au maximum par la présence de brumes sèches, brumes de poussières, chasse-sables et tempêtes de poussières. Est-il nécessaire de rappeler que c'est à partir de cette année que les stations de Saint-Louis, Podor et Matam ont connu une recrudescence de la fréquence de ces aérosols désertiques aussi bien terme du nombre de jours de présence qu'en niveaux de concentrations en particules.

À l'ouest de la zone d'étude (station de Saint-Louis), cette forte réduction de la visibilité horizontale en moyenne annuelle durera jusqu'ici la fin de la première moitié des années septante. Durant cette période de sécheresse, la présence de lithométéores limite la visibilité à moins de 4 km du fait donc d'une concentration en PST oscillant entre 540 et 530 $\mu\text{g.m}^{-3}$ selon que l'on applique l'Equation de BERTRAND⁵⁸ ou celle de BEN MOHAMED et al.⁵⁹ et d'une concentration en PM_{10} de 350 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Durant la seconde moitié des années 70 et jusqu'avant la sécheresse des années 80, on retrouve la même situation que celle de la période humide 1950-1960 avec une visibilité minimale pouvant dépasser 5 km témoignant ainsi des concentrations modérées. À partir de 1983 (année marquant le début de la sécheresse des années 80) jusqu'à la fin de la première moitié des années 90, on retrouve les caractéristiques des années de la Grande sécheresse. La moyenne annuelle de la visibilité horizontale réduite pour cause de présence de poussières désertiques est à - 4 km. Ce qui justifie de fortes concentrations en PST (540-530 $\mu\text{g.m}^{-3}$) et en PM_{10} (350 $\mu\text{g.m}^{-3}$) durant cette période. Depuis les deux dernières décennies (1996-2014), les moyennes annuelles restent au-dessus de celle interannuelle, ce qui indique que durant

⁵⁸ Op.cit.

⁵⁹ Op.cit.

cette période la visibilité reste moins affectée par une réduction attribuable aux lithométéores. Pour en attester si nous prenons la période 1992-2014 (que nous surnommons "période actuelle"), sur les 23 années, seul environ la moitié (13 années) ont connu une visibilité minimale moyenne inférieure à 5 km, autrement dit signalant une densité importante en particules. Cependant, 21 sur les 23 années présentent une visibilité minimale moyenne n'atteignant jamais 6 km. Ceci révèle alors des niveaux de concentrations moyennes annuelles en PST jamais au-delà de $400 \mu\text{g.m}^{-3}$ (en appliquant seulement l'Equation de BEN MOHAMED et al.) et des concentrations en PM_{10} toujours supérieures à $265 \mu\text{g.m}^{-3}$. Ce qui, loin d'être négligeable reste extrêmement élevé et constitue une sérieuse question sur le plan de l'impact sanitaire sur les populations.

Au centre (stations de Podor) et à l'est (station de Matam), la situation est identique (allures des courbes quasi-identique). Ici aussi, comme c'est le cas à la station de l'ouest de la zone, et comme nous l'avons déjà souligné, les moyennes centrées sur 5 ans révèlent que jusqu'à la fin des années 60 (période pré-sécheresse), la visibilité horizontale était "modérément" réduite pour cause de lithométéores. Le début de la Grande sécheresse marque une hausse remarquable de la visibilité réduite pour fortes concentrations en particules de poussières. Cette visibilité horizontale remarquablement réduite restera en hausse voir même s'aggravera surtout à Podor jusqu'au début des années 80. On comprend alors qu'il n'y a pas de rupture importante dans cette hausse de visibilité réduite durant période. La moyenne annuelle reste toujours inférieure à 5 km. Sans revenir à une situation modérée voire bonne, la visibilité horizontale connaîtra une réduction explosive durant la deuxième sécheresse des années 80 pour cause de fréquences extrêmement élevées de concentrations en particules de poussières lithométéoriques. À la station de Matam, la moyenne annuelle entre 1984 et 1989 est de - 4 km alors qu'elle est inférieure à 3 km à la station de Podor durant cette période. La moyenne interannuelle des concentrations en PST justifiant cette forte réduction de visibilité en cette période oscillait entre 530 et $540 \mu\text{g.m}^{-3}$ à l'est de l'extrême Nord-Sénégal et entre 650 et $700 \mu\text{g.m}^{-3}$ au centre de la zone d'étude. Pour ce qui est de PM_{10} (particules très fines), qui donc jouent un rôle majeur dans la capacité de réduction de la visibilité horizontale des aérosols désertiques, leurs niveaux de concentrations en moyenne interannuelle lors de cette période 1984-1989 étaient de $350 \mu\text{g.m}^{-3}$ à la station de Matam et de $425 \mu\text{g.m}^{-3}$ à la station de Podor. À la "période actuelle" (1992-2014), comme il est le cas à l'ouest, au centre et à l'est aussi les moyennes centrées sur 5 ans restent toutes supérieures à la moyenne interannuelle de la série, indiquant ainsi que durant cette période post-sécheresse la visibilité reste moins affectée par une réduction attribuable aux différents types de lithométéores. En guise d'illustration, au cours de cette période actuelle, seules 08 sur les 23 années à la station

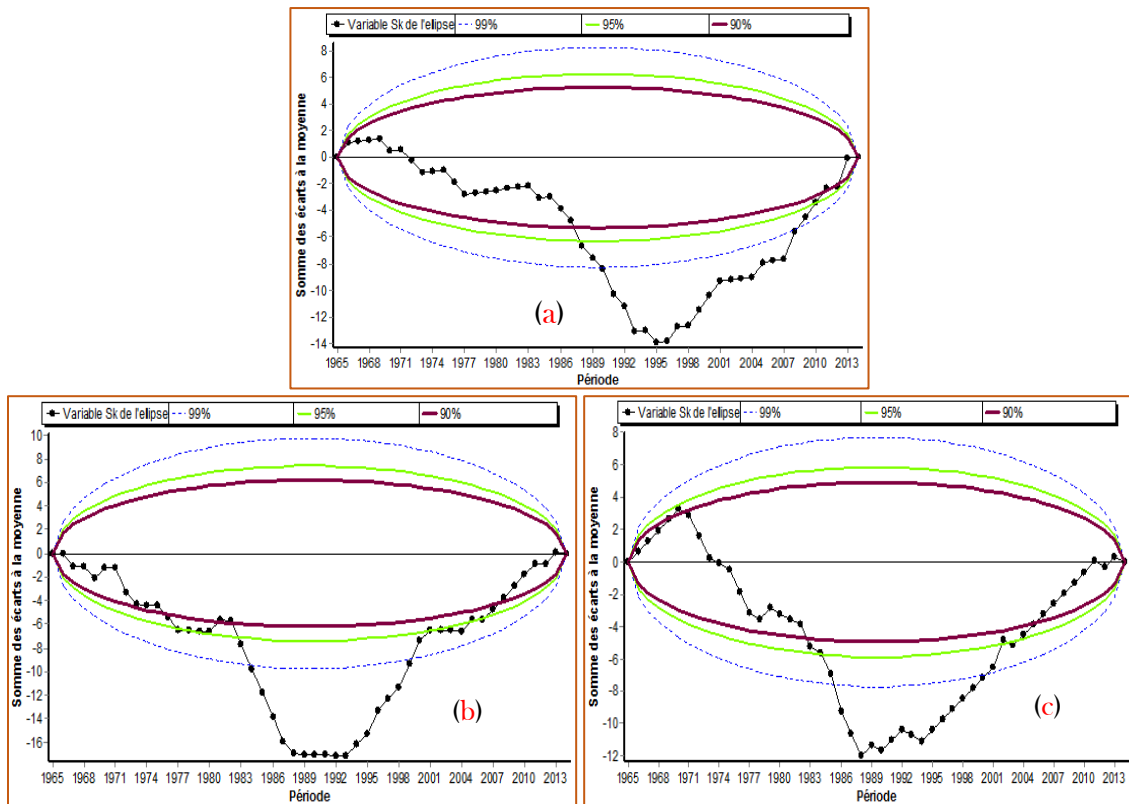
de Podor et seules 05 sur les 23 à la station de Podor enregistrent en moyenne une visibilité réduite à moins de 5 km, autrement dit attestant une densité extrêmement importante en particules. Cependant, 18 de ces 23 mêmes années à Podor et 22 sur ces 23 années de la "période actuelle" restent néanmoins caractérisées par une visibilité moyenne centrée sur 5 ans < 6 km. Comme c'est le cas dans le reste de cette partie extrême Nord-Sénégal, cette visibilité réduite à moins de 6 km révèle des niveaux de concentrations moyennes annuelles en PST jamais au-delà de $400 \mu\text{g.m}^{-3}$ (en appliquant seulement l'Equation de BEN MOHAMED et al.) et des concentrations en PM_{10} toujours supérieures à $265 \mu\text{g.m}^{-3}$. Est-il nécessaire de rappeler que loin d'être négligeables, ces fortes concentrations en particules fines réduisant la visibilité à cette distance (< 6 km) constituent une sérieuse question sur le plan de l'impact sanitaire sur les populations.

Notons que quelle que soit la station considérée dans cette partie du pays, jamais, du fait de la présence de lithométéore et en termes de concentrations, la visibilité minimale n'a dépassé 7 km. Ce qui signifie que de 1965 à 2014, la visibilité horizontale a à chaque année été affectée au moins par une concentration de plus de $350 \mu\text{g.m}^{-3}$ en PST et d'environ $250 \mu\text{g.m}^{-3}$ en PM_{10} .

Au su de tout ce qui a été détaillé jusqu'ici, on comprend qu'à l'extrême Nord-Sénégal, les stations restent fortement caractérisées par une irrégularité en ce qui concerne l'impact des lithométéores sur la visibilité horizontale. L'application du test de BUIHAND (*figure 96*) en plus de témoigner l'existence ou non d'une rupture comme c'est l'une des fonctionnalités majeures du test de PETTITT, attestent ici cette non-stationnarité des variables (visibilité moyenne annuelle réduite) dans ces stations de cette partie du pays.

L'allure de la variable S_k (somme des écarts à la moyenne) de l'ellipse de bois des séries de moyennes annuelles de la visibilité réduite des stations de Saint-Louis, Podor et Matam confirme, du fait que plusieurs points correspondant à la somme des écarts cumulés à la moyenne sortent des intervalles de confiance, qui sont respectivement de 99%, 95% et 90%, la non-stationnarité des variables dans cet extrême Nord-Sénégal.

Figure 96 : Résultats du test de BUISHAND appliqué aux moyennes annuelles de la visibilité horizontale réduite pour cause de concentrations en particules lithométéoriques dans les stations de Saint-Louis (a), Podor (b) et Matam (c) de 1965 à 2014



Les résultats du test de BUISHAND confirment également ceux que nous a révélés le test de PETTITT pour la rupture de tendance à la baisse de la fréquence de la réduction de visibilité horizontale notée à la période actuelle. Suite au maximum de réduction de la visibilité horizontale pour cause de fortes concentrations en particules durant les années de sécheresse (des années 70 et des années 80), la rupture de tendance est survenue en 1988 à la station de Matam, en 1993 à la station de Podor et en 1995 à la station de Saint-Louis. Ces résultats sont clairement constatables à la *figure 96*.

En conclusion de cette section, nous rappellerons que l'impact environnemental direct des poussières désertiques est la réduction de la visibilité horizontale. Il ressort de cette étude que la visibilité horizontale est fortement affectée aux stations de l'extrême Nord-Sénégal. Qu'il s'agisse de la répartition journalière, de l'évolution mensuelle ou saisonnière ou de la variabilité annuelle et cours des phases climatiques, l'étude révèle une parfaite corrélation avec les niveaux de concentrations en particules de poussières lithométéoriques. De ces fortes réductions de visibilité horizontale rendant celle-ci mauvaise découlent des impacts socio-économiques manifestes.

2. Conséquences socio-économiques dues à la réduction de la visibilité par les poussières désertiques

En dehors des troubles respiratoires liées à l'inhalation de poussières, la principale conséquence de la réduction de la visibilité horizontale par les lithométéores décrite par l'essentiel des auteurs abordant la question notamment en région sahélienne reste les perturbations dans le domaine du transport aérien (retards, annulations, détournements d'avions sur d'autres aéroports, crashes aériens, fermetures d'aéroports...) et routier (accidents de la route). A l'extrême Nord-Sénégal, si le transport aérien semble ne pas connaître des perturbations pour cause de visibilité médiocre, celui routier par contre reste fortement affecté à chaque fois que la visibilité est réduite à une certaine distance par les poussières désertiques. Les déplacements quotidiens des personnes et certaines autres activités économiques notamment le commerce font offices de victimes directes de mauvaise visibilité horizontale en cette région sahélienne du pays. Nous avons réalisé un questionnaire dans le cadre de cette étude afin de vérifier l'ampleur de ces perturbations dans ces principaux secteurs affectés. Au total 150 personnes furent interrogées dont 45 transporteurs routiers, 45 commerçants notamment des vendeuses aux marchés et 60 personnes choisies au hasard dans le but répondre aux questions relatives aux éventuelles perturbations de leurs déplacements pour cause de fortes concentrations de poussières.

La visibilité prise en compte dans cette étude est celle réduite à moins de 1 km, qui rappelle le concerne 14 et 15% de la fréquence totale de jours affectés par une visibilité réduite par les lithométéores et témoignant une concentration élevée en particules de poussières. Le choix de cette distance est dû au fait que de notre point de vue, elle serait la seule à pouvoir causer des perturbations importantes dans les différents secteurs considérés dans cette étude.

2.1. Conséquences sur les activités socio-économiques

Les résultats de l'enquête nous révèlent que les activités socio-économiques, en particulier le transport routier et le commerce sont fortement affectées par les événements de mauvaise visibilité horizontale par les poussières désertiques.

Figure 97 : Activités de transport affectée lors de la réduction de la visibilité par les poussières désertiques ?

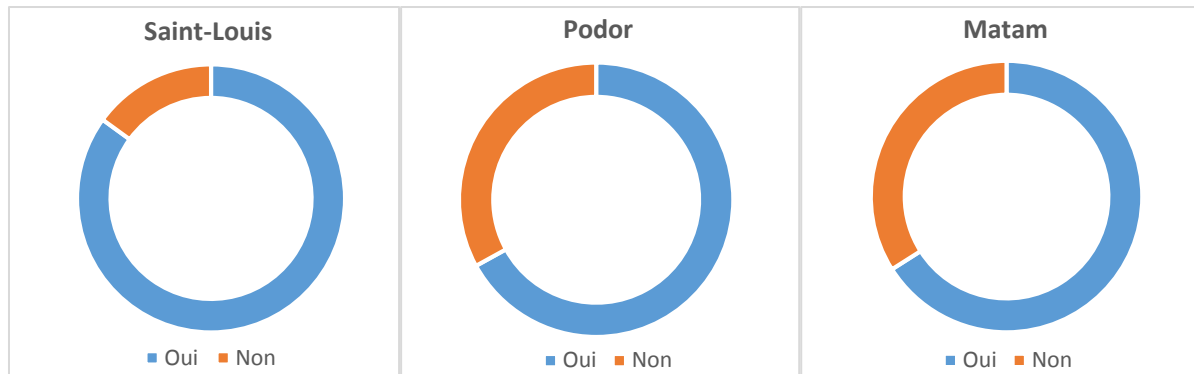
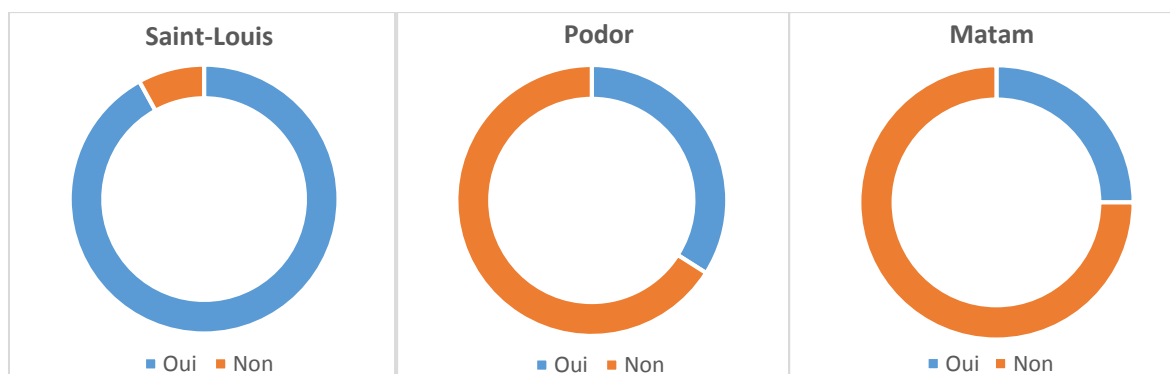


Figure 98 : Activités de commerce affectées lors de la réduction de la visibilité par les poussières désertiques ?



Pour ce qui est du transport routier, la majeure partie des acteurs soulignent éprouver d'énormes difficultés de pratique de l'activité en ces jours de très fortes concentrations de poussières rendant ainsi mauvaise la visibilité. 66 à 87% des transporteurs routiers interrogés affirment que leur activité est fortement affectée lors des épisodes de forte réduction de la visibilité par les lithométéores.

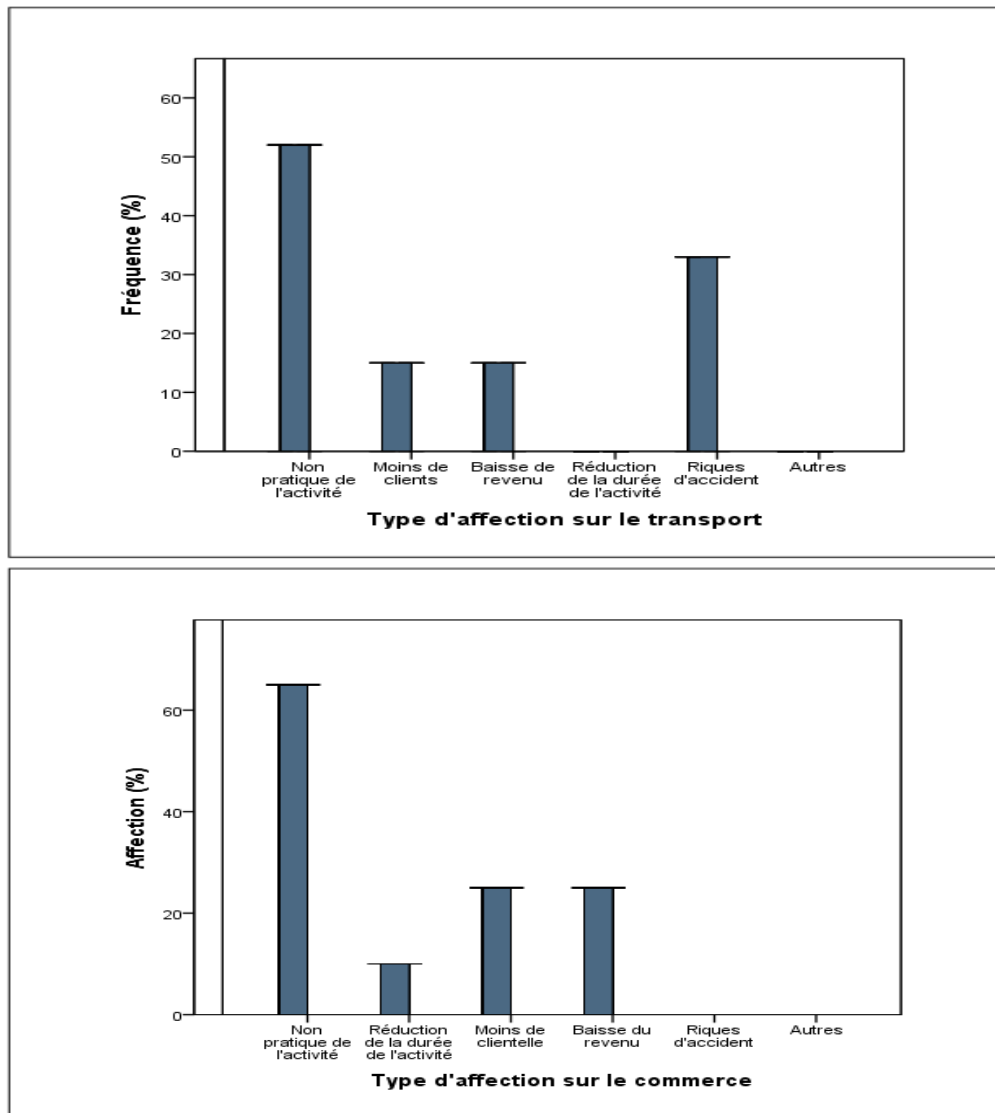
Les activités de commerce subissent elles aussi, les effets directs de mauvaise visibilité pour cause d'événements de poussières. Alors que l'essentiel des commerçants enquêtés à Saint-Louis affirme être fortement affecté dans la pratique de leur activité lors de forte concentration en poussières, 25 à 34% des commerçants à Matam et à Podor notamment boutiquiers et vendeuses de marché notent d'énormes difficultés de pratique et d'écoulement de leurs produits en ces jours où la visibilité horizontale reste très réduite par la présence de poussières désertiques.

Cette fréquence plus importante des menaces à l'ouest (station de Saint-Louis) comparée au reste de la région s'explique par le fait que contrairement au centre (station de Podor) et à l'est (station de Matam) où ces phénomènes ont toujours été fréquents et donc très connus des populations qui ont su s'adapter, à l'ouest, il s'agit plutôt d'événements irréguliers et qui d'ailleurs n'ont connu

un essor "considérable" que récemment, constituant alors une véritable problématique d'adaptabilité.

La typologie et la fréquence des affections pour le transport et les activités de commerce restent diverses, cependant identiques partout dans la région.

Figure 99 : Type d'affectation du transport et du commerce lors des événements de mauvaise visibilité par les poussières désertiques à l'extrême Nord-Sénégal.

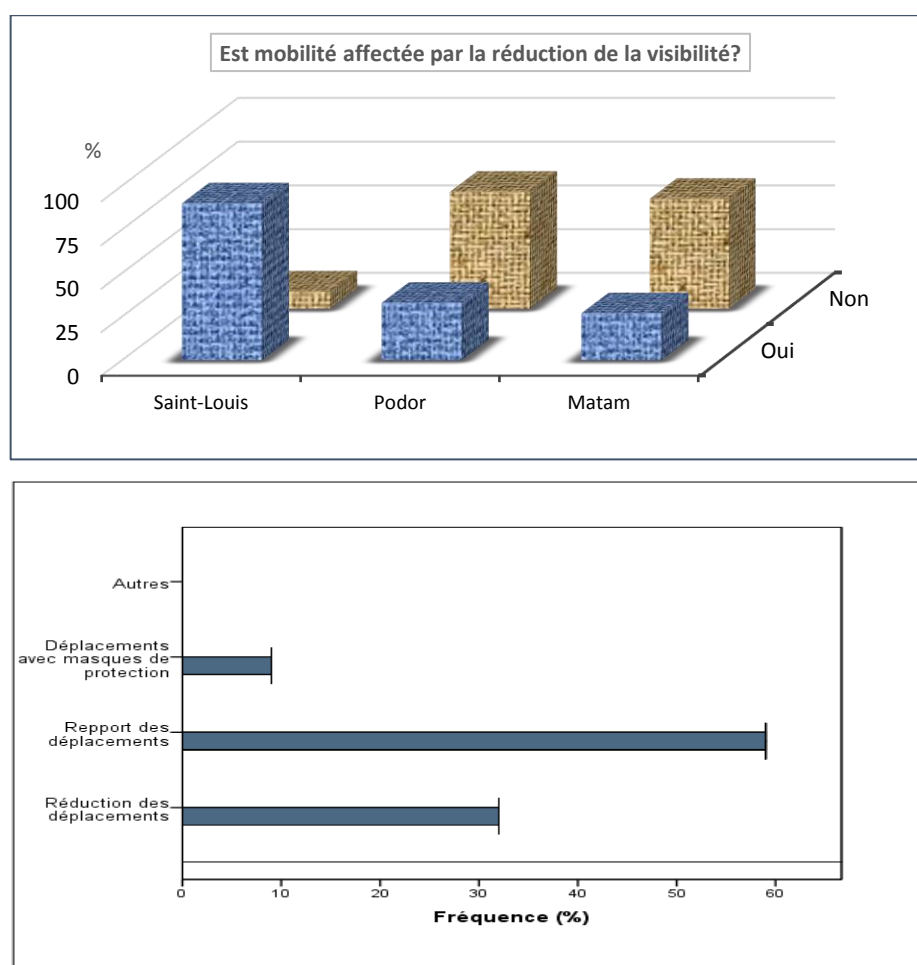


55% des transporteurs routiers enquêtés soulignent ne pas pratiquer l'activité à tel niveau de réduction de visibilité par les lithométéores. Si une bonne part de ces derniers avancent des raisons de moins de passagers et donc de baisse de revenu, la majeure partie évitent des risques d'accident. En effet, la teinte jaunâtre imposée par la masse énorme de particules en suspension dans l'air affaiblit la luminosité du jour, ce qui engendre de véritables dangers de circulation routière (accidents liés aux éventuels obstacles des routes, collisions entre véhicules...).

Du côté des acteurs du commerce, ils sont fréquemment exposés à l'arrêt des activités, sinon à une réduction de leur durée lors des jours à visibilité fortement réduite. En effet, 65% des commerçants enquêtés soutiennent arrêter ou ne pas du tout exercer leur commerce en de tel événements alors 15% soutiennent réduire la durée de l'exercice de leur activité en fonction de la persistance du niveau de concentration. L'arrêt ou la réduction de la durée de l'activité conduisent tous à une baisse de revenu, ce qui alors constitue un véritable impact économique.

2.2. Impacts sur la mobilité quotidienne des personnes

Figure 100 : Mobilité affectée par la réduction de la visibilité ? et types d'affectation lors des jours à visibilité réduite par les poussières désertiques



NB : Est mobilité affectée par la réduction de la visibilité ? (en haut) et types d'affectation de la mobilité (en bas)

Les fortes concentrations en particules de poussières réduisant la visibilité à moins de 1 km affectent diversement les déplacements quotidiens des populations dans l'extrême Nord-Sénégal. En effet, un contraste manifeste existe dans la réaction des populations par rapport aux événements de poussières rendant la visibilité très mauvaise. Alors que 27 à 33% (respectivement

à Matam et à Podor) des personnes enquêtées soulignent éprouvées des difficultés à vaquer à leur préoccupation à chaque fois que l'air est très saturé en particules de poussières et donc que la visibilité est fortement réduite, à l'ouest de la région (à Saint-Louis) 9/10 des enquêtés affirment que leurs déplacements sont affectés à de tel niveau de concentration en poussières et à de telle visibilité minimale pour cause de lithométéore. La question d'adaptabilité précédemment évoquée expliquerait en partie cette fort contraste de réaction des populations selon leur position géographique et qui y détermine justement la fréquence des événements lithométéoriques. Cependant toutes les personnes interrogées et ayant répondu au questionnaire ont avancé soit des raisons de gêne, soit des situations impropices et/ou de mesures de prudence quant aux risques sanitaires pouvant y écoulés. De ce fait trois principaux type de mesure sont adoptés par les populations. La majorité des enquêtés (58%) préfèrent reporter leurs déplacements à plus tard, 33% affirment limiter (réduire) leur déplacements et 9% soutiennent utiliser des masques de protection pour vaquer à leurs préoccupations en ces moment de mauvaise visibilité associée donc à de fortes concentrations en particules de poussières.

La dimension socio-économique reste alors un volet important quant aux impacts des lithométéores. L'arrêt et la réduction de la durée des activités de transport et/ou de commerce conduisant à une baisse de revenu impacte alors sur l'économie alors que le report et la limitation des déplacements quotidiens des populations constituent une véritable question sociale. L'ensemble de ces impacts caractérisent l'importance de l'action de mauvaise visibilité horizontale sur les populations en dehors des conséquences sanitaires qui s'y associent.

En dehors de leurs actions sur la visibilité horizontale et donc sur de leurs impacts socio-économiques, l'une des conséquences les plus évidentes des poussières désertiques reste leurs impacts sanitaires notamment respiratoires. La troisième partie de ce chapitre V étudie ces impacts sanitaires à l'extrême Nord-Sénégal.

3. impacts sanitaires des poussières désertiques dans l'extrême-Nord Sénégal

3.1. Généralité

3.1.1. Impacts de la pollution particulaire des poussières désertiques sur la santé

La pollution particulaire des poussières désertiques représente à certains niveaux de concentrations un danger pour la santé humaine. Au cours de ces dernières décennies, de nombreuses études ont mis en évidence l'importance de la pollution lithométéoriques dans

l'apparition et/ou l'exacerbation de nombreuses pathologies surtout respiratoires. Des effets, à la fois à court terme et à long terme ont été mis en relation avec des épisodes de pollution particulaire par de nombreuses études épidémiologiques. Ces dernières indiquent généralement des effets respiratoires et cardiovasculaires.

3.1.1.1. Etude épidémiologiques

Bon nombre d'études épidémiologiques ont permis de mettre en relation la pollution particulaire d'aérosols désertiques à la morbidité chez l'homme. Parmi ces études, les plus intéressantes concernent essentiellement l'effet des particules dont la taille est inférieure à 10 μm , autrement dit celles ayant la possibilité de pénétrer dans l'appareil respiratoire et donc susceptibles d'entraîner d'effets sanitaires.

Toutes les études ayant révélé une corrélation entre forte pollution particulaire d'aérosols désertiques et morbidité ont déterminé qu'une augmentation de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de la concentration en PM_{10} dans l'air entraîne des augmentations d'admissions pour cause de problèmes cardiaques, d'obstruction pulmonaire et de pneumonies (SCHWARTZ, 2001). En 2000, ZANOBETTI et al. ont souligné qu'une étude portant sur 9 années ont établi une corrélation entre les admissions pour pneumopathies et cardiopathies et la pollution particulaire. Partant de plusieurs études épidémiologiques récemment effectuées, l'Organisation Mondiale de la Santé a estimé qu'une augmentation moyenne annuelle de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'aérosol de PM_{10} peut induire entre 5 et 10% de mortalité supplémentaire (ANDERSON, 2000). Du fait de fortes expositions à des niveaux ambiants de pollution de l'air, l'OMS a rapporté que près d'un quart de la totalité des décès survenus en Afrique obtenus en 2002 serait attribué à des facteurs de risques liés à l'environnement dont 40 000 décès liés à la pollution de l'air (WHO, 2006 ; 2007).

Une attention toute particulière est aussi nécessaire en ce qui concerne les particules susceptibles de pénétrer profondément dans le système respiratoire, particules fines de diamètre inférieur à 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$). Des études épidémiologiques récentes ont confirmé le risque considérable que les particules fines représenteraient pour la santé du fait qu'elles peuvent atteindre les bronchioles et les alvéoles pulmonaires. Même si jusqu'ici il n'existe que très peu d'études épidémiologiques relatives à des expositions épisodiques des $\text{PM}_{2.5}$, les quelques-unes notamment celles de KÜNZLI et al. (2005) et HOFFMANN et al. (2007) ont révélé que la morbidité est affectée suite à de multiples épisodes de fortes concentrations en particules fines. Du fait d'une recrudescence des épisodes de poussières de concentrations jugées très élevées (notons que celles-ci restent néanmoins inférieures à la moyenne enregistrée dans les stations de l'extrême Nord-Sénégal),

une étude épidémiologique basée sur le suivi de la mortalité de 8111 adultes de 6 villes des Etats-Unis sur une période de 14 à 16 années a été réalisée dans le but de déceler une éventuelle corrélation entre ces épisodes de poussières et certaines pathologies. DOCKERY et al. (2005) nous apprennent que le résultat de cette étude a montré un lien entre les niveaux d'exposition aux PM_{2.5} et la mortalité cardio-pulmonaire ainsi que des déclenchements de cancer des poumons.

3.1.1.2. Appareil respiratoire, poussières respirables et effets respiratoires

Dans cette section, nous passerons en revue le processus qui va du contact de l'appareil respiration avec les particules de poussières contenues dans l'air respiré. Nous mettrons l'accent en premier sur l'exposition et l'inhalation des particules par l'appareil respiratoire, avant de voir comment ces dernières pénètrent et se déposent dans les différents compartiments de l'arbre respiratoire de l'homme. Nous aborderons par la suite le devenir des particules dans l'appareil respiratoire et les différentes pathologies respiratoires et enfin nous verrons quelles sont les populations les plus sensibles à l'exposition aux particules de poussières.

3.1.1.2.1. Exposition et Inhalation de particules de poussières désertiques

La réalisation des échanges gazeux entre le sang de l'organisme et l'air atmosphérique est la fonction essentielle de l'appareil respiratoire humain. Or en état d'impureté, cet air atmosphérique est fortement pollué. En régions arides et semi-arides du globe, l'un des polluants les plus manifestes reste les aérosols notamment les particules de poussières désertiques. Lorsque l'homme est exposé à un air chargé en particules de poussières désertiques, deux cas de figure peuvent se présenter : soit ces particules en suspension sont arrêtées par la "barrière naturelle" que constitue la peau⁶⁰, soit elles pénètrent dans l'organisme où elles constitueront alors un danger. Certes il existe différentes voies d'exposition pour l'homme notamment l'ingestion (*pénétration par les voies digestives des particules via les aliments et l'eau*), la voie cutanée (*pénétration des particules par l'épiderme*), mais la principale reste l'inhalation (absorption des particules dans le système respiratoire par la bouche et/ou le nez).

L'inhalabilité désigne la probabilité avec laquelle les particules entrent dans le nez et/ou la bouche du fait de la respiratoire. Elle peut être caractérisée par la fraction de particules entrant effectivement par le nez et/ou la bouche⁶¹.

⁶⁰ Boumahdi N., 2009. *Approche pluridisciplinaire de l'étude de l'activité biologique des particules fines*, thèse de doctorat, spécialité : génie des procédés, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, N° d'ordre 512 GP, 253p.

⁶¹ Maurice G. et Lefebvre E., 2008. *Nanoparticules : santé et environnement. Etude bibliographique*, rapport, Ecole des Mines de Douai, 56p.

Contrairement aux particules du mode grossier, les nanoparticules présentent une dimension si petite que le nez ou la bouche de l'homme ne peuvent empêcher leur inhalation. Est-il alors nécessaire de souligner que pour ces PUF (particules ultrafines), l'inhalation peut être totale.

L'inhalation des particules par les voies respiratoires est conditionnée par différents facteurs, certains propres à la personne exposée (mode respiratoire, volume et rythme respiratoire, état de santé générale et cardio-pulmonaire, qualité des émonctoires...); d'autres propres au produit inhalé (toxicité, taille des particules, aérodynamique des particules, etc.); d'autres enfin, propres aux conditions d'exposition (durée d'exposition, niveaux de concentrations en particules dans l'air, sédimentabilité des particules...).

Il est à noter que dans le cas des poussières désertiques, la durée de l'exposition détermine principalement trois types d'intoxication : l'intoxication suraiguë pour une exposition très courte (quelques secondes à quelques minutes); l'intoxication aiguë correspondant à une durée d'exposition inférieure à 24 heures et l'intoxication subchronique lorsque la durée d'exposition varie de quelques jours à quelques mois. On comprend alors que la durée de l'exposition est un paramètre fondamental de l'évaluation des potentiels impacts de ces particules de poussières sur la santé de la personne exposée. Outre la durée de l'exposition, le niveau de concentration en particules dans l'air respiré est aussi un paramètre important car caractérisant la quantité de substance toxique auquel l'organisme aura été exposé pendant la durée de l'exposition. C'est ce qu'on appelle la *dose toxique*. Généralement, associée à la durée, plus la dose à laquelle on a été exposé est importante, plus la probabilité d'impacts sanitaires est importante. Ce phénomène est connu sous le concept de *relation dose-effet*.

Lorsque les facteurs conditionnant l'inhalation sont réunis et que les particules ne sont pas arrêtées par la "barrière naturelle", ces dernières sont donc absorbées par les voies respiratoires nasale et/buccale. Pour en simplifier l'approche, le système respiratoire a été décomposé en trois régions : la région extra-thoracique qui comprend les voies aériennes supérieures jusqu'à larynx, la région trachéo-bronchique (trachée et bronches) et la région alvéolaire (bronchioles terminales et alvéoles).

Après leur inhalation, les particules sont véhiculées vers les différents organes du système respiratoire, en suivant les lignes du champ de vitesse dues aux mouvements de l'air. Les mécanismes de pénétration et le site de dépôt des particules dans les différentes régions du système respiratoires sont influencés principalement par leurs caractéristiques (taille, morphologie, etc.).

3.1.1.2.2. Pénétration et Dépôts des particules inhalées dans l'appareil respiratoire

3.1.1.2.2.1. Pénétration des particules dans l'appareil respiratoire

À la suite de leur inhalation, les particules contenues dans l'air sont entraînées avec celui-ci dans les différents compartiments de l'appareil respiratoire humain. Cet air "particulaire" passe par les cavités nasale ou buccale avant de traverser le pharynx puis le larynx. Cet ensemble constitue la région extra-thoracique (voies aérienne supérieure) où les plus grosses particules sont arrêtées. L'air chargé en particules de poussières parvient ensuite au niveau de la trachée puis arrive aux niveaux des bronches et bronchioles. Cet ensemble constitue la région trachéo-bronchique et c'est ici où sont arrêtées les particules moyennes. Enfin la fraction particulaire restante contenue dans l'air accède avec ce dernier à la région alvéolaire constituée de bronchioles terminales, de sacs alvéolaires et les alvéoles. Seules les PUF (particules ultrafines) pénètrent jusqu'aux alvéoles où elles sont en contact direct avec les capillaires sanguins ou les lymphatiques qui les irriguent abondamment

La profondeur de pénétration des particules dans les voies aériennes de l'appareil respiratoire et leurs effets lorsqu'elles sont déposées dépendent de leurs propriétés aérodynamiques : taille, forme, volume. Par conséquent les particules doivent être suffisamment petites et leurs concentrations suffisamment élevées pour parvenir à déjouer les défenses respiratoires⁶².

3.1.1.2.2.2. Dépôt des particules inhalées

En fonction de la granulométrie des particules et du fait du comportement de ces particules dans le mouvement de l'air dans l'appareil respiratoire divers dépôts sont notées au cours de leur trajet et dans les différentes régions anatomiques précédemment décrites. La probabilité de dépôt est la probabilité moyenne qu'une particule inhalée d'un diamètre donné se dépose à un endroit quelconque le long des voies respiratoires. Le dépôt total est la somme des probabilités de dépôt dans les trois régions anatomiques⁶³.

3.1.1.2.2.2.1. Mécanismes de dépôts des particules

Les particules inhalées peuvent se déposer dans les différentes régions par action combinée de quatre principaux mécanismes qui sont : la *sédimentation*, *l'impaction*, *l'interception* et la

⁶² Stephan Y.-R., 2013. Qualité de l'air dans les couvoirs : quels impacts sur la santé des salariés ? thèse de doctorat en Médecine, diplôme d'Etat, faculté de Médecine, Université de Brest-Bretagne Occidentale, 60p.

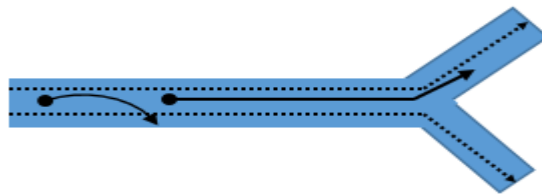
⁶³ Op.cit.

diffusion. Cependant le dépôt dépend aussi de la *vélocité* et du *type d'écoulement* (notamment l'écoulement laminaire et l'écoulement turbulent) d'air dans les voies respiratoires.

- **Écoulement laminaire** : caractérisé par des lignes de courant qui se déplacent parallèlement les unes des autres et par rapport aux parois du canal d'écoulement, il est associé à un faible débit d'écoulement.
- **Écoulement turbulent** : caractérisé par un mouvement plus aléatoire des particules le long du canal et est associé à un débit d'écoulement élevé. La densité des particules est importante pour déterminer les débits d'écoulement turbulent ; une augmentation de la densité entraîne une diminution du débit d'écoulement.

La sédimentation : lorsque, dans l'appareil respiratoire la vitesse d'écoulement de l'air ralentit suffisamment, plusieurs particules tombent du fait de leur dimension qui ne leur permet plus d'être contenues dans cet air et ainsi le suivre dans son trajet vertical. Cela revient à dire qu'il existe une vitesse minimale d'écoulement de l'air pour que celui-ci puisse entraîner avec lui certaines particules de dimension assez importante tout au long de son trajet. L'effet de la sédimentation augmente avec la taille, autrement dit lorsque cette vitesse d'écoulement ralentit plus la taille de la particule est élevée plus celle-ci est susceptible de tomber. Outre la taille, cet effet de sédimentation est également déterminé par la densité et le temps de résidence de la particule dans les voies respiratoires.

Figure 101 : Dépôt par sédimentation le long des parois des voies aériennes



Le ralentissement de la vitesse de l'écoulement oblige la particule à tomber du fait sa dimension [flèche en bas]

L'impaction : elle est liée à l'inertie des particules c'est-à-dire la tendance qu'ont les particules à poursuivre leur mouvement en ligne droite. Du fait donc de cette inertie, lorsque la configuration des voies respiratoires et la vélocité de la trajectoire imposent à l'écoulement de l'air des changements de direction, la particule sortira de sa course et s'arrêtera sur toute surface avec laquelle elle entrera en contact. L'effet de l'impaction s'accroît avec la taille et la densité de la particule mais aussi avec la vitesse de l'air.

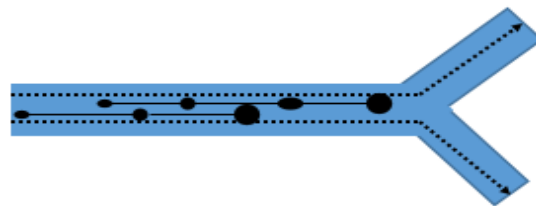
Figure 102 : Dépôt par impaction inertielle



Les changements de direction [flèche en haut] obligent la particule qui poursuit son mouvement en ligne droite à se déposer [flèche en bas]

L'interception : ce type de dépôt a lieu lorsque l'extrémité de la particule entre en contact avec la paroi humide du conduit. La probabilité qu'une particule se dépose suivant ce mécanisme augmente lorsque la longueur de la particule augmente relativement au diamètre des conduits des voies respiratoires. Les dimensions géométriques de la particule, entraînée dans le filet d'air empêchent donc celle-ci de franchir l'obstacle. Ce mécanisme peut ainsi constituer une barrière "dimensionnelle" à la pénétration des particules, qui vient s'ajouter aux barrières aérodynamiques résultant des autres mécanismes. Notons que le dépôt par interception peut être très significatif pour les particules de formes allongées.

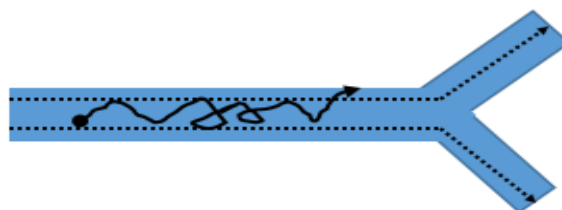
Figure 103 : Dépôt par interception



La longueur de la particule augmente et son extrémité entre en contact avec la paroi humide du conduit qui donc l'intercepte

La diffusion : elle est due aux mouvements aléatoires des particules causés par les chocs des molécules d'air sur la particule. Ce mouvement aléatoire fait que la particule entre en contact avec les surfaces de la voie aérienne. Ce mécanisme de dépôt est important lorsque la vitesse d'écoulement de l'air est proche de zéro et que les particules sont caractérisées par un coefficient de diffusion brownien élevé liée à leur petite taille.

Figure 104 : Dépôt par diffusion

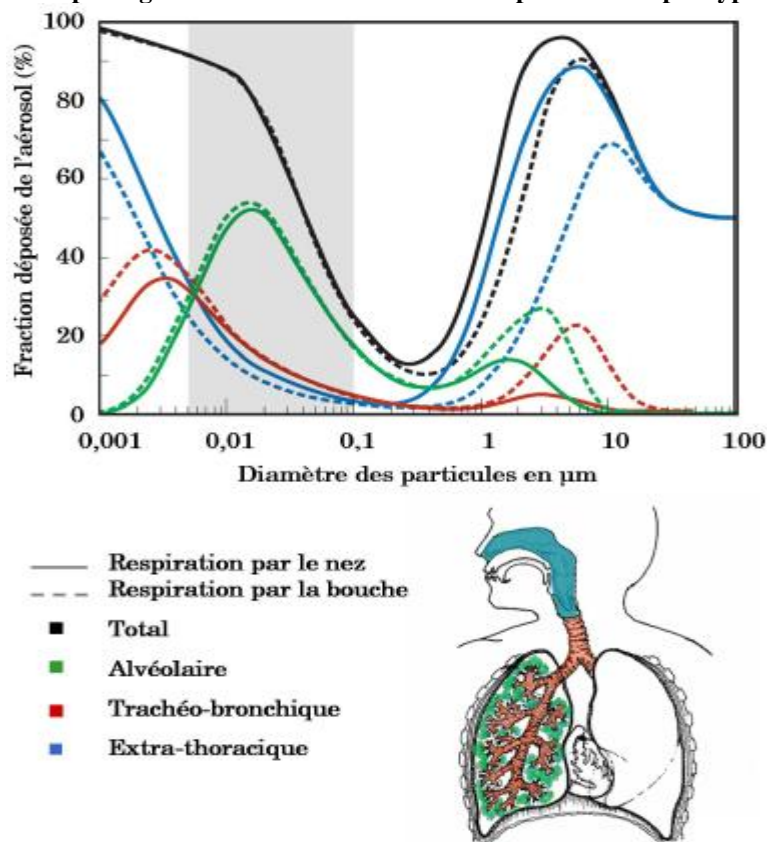


Le choc des molécules sur la particule entraîne son mouvement aléatoire et conduit à son entrée en contact avec les surfaces de la voie aérienne où elle reste déposée

3.1.1.2.2.2. Dépôt des particules selon la taille et suivant les régions anatomiques

Le dépôt des particules dans les voies respiratoires est déterminé en grande partie par la taille des particules, même si les modes de respiration jouent un rôle important à cet égard. Les données expérimentales et les efforts de modélisation ont fourni de l'information fiable sur le dépôt des particules de poussières chez l'homme. Parmi ces modèles, nous avons celui de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) de 1994 (*figure 105*) qui a la particularité d'être complet et internationalement reconnu. Il décrit la probabilité de dépôt de particules dans les différentes parties de l'appareil respiratoire en fonction de la taille et du mode de respiration.

Figure 105 : Dépôt régional en fonction de la taille des particules et par type de respiration



(Traits en couleur : verte pour la région alvéolaire, rouge pour la région trachéo-bronchique et bleue pour la région extra-thoracique) ; (traits continus pour la respiration par le nez et traits en tiretés pour la respiration par la bouche). Les traits en couleur noire indiquent le dépôt total. Ce dépôt a été prédit par un modèle mathématique publié par la CIPR (1994)

L'exploitation directe des courbes du modèle de CIPR (1994) permet de dégager plusieurs points en fonction du diamètre des particules. Quel que soit la partie de l'appareil respiratoire considérée, le dépôt est minimal lorsque la taille des particules se situe entre 0,1 et 1 μm et augmente pour les intervalles de dimensions entre les particules grossières et les PUF (particules ultrafines). Pour les PUF, le dépôt dans la région alvéolaire est plus important que les particules

de dimension entre 0,01 et 0,1 μ m. Le dépôt des PUF dans la région **TB** (Trachéo-bronchique) et la région **ET** (Extra-thoracique) connaît une augmentation lorsque les particules sont inférieures à 0,1 μ m. Pour les particules d'environ 10 μ m, le dépôt atteint son pic dans la région **ET** et pour celles de taille un peu plus petite que cette dimension le pic est atteint dans la région **TB** et dans la région **ALV** (Alvéolaire).

De façon plus explicite, en fonction du diamètre des particules noté **D** :

☞ **D** \geq 10 μ m : les particules sont prépondérantes dans les régions ET et TB ;

☞ **D** \leq 10 μ m : les particules pénètrent plus profondément dans le système respiratoire et déposent également dans les alvéoles pulmonaires et dans la région TB ;

☞ **D** \leq 1 μ m : (**a**) pour les particules de taille voisine de 300 nm, seuls environ 20% de la quantité inhalée se déposent du fait que la taille est trop petite pour qu'elles puissent se déposer par sédimentation ou par impaction et cette même taille est trop grosse pour que leur dépôt se fasse par diffusion. Par conséquent, il en résulte qu'environ 80% de ces particules inhalées sont rejetés dans l'air expiré. (**b**) pour les particules de dimension proche de 20 μ m, le dépôt est maximal (\approx 50%) dans la région AVL alors que (**c**) pour les particules de dimension 5-6 nm le dépôt reste uniforme dans les trois parties de l'appareil respiratoire.

L'autre point important que nous révèlent les courbes du modèle CIPR (1994) est celui relatif au dépôt total suivant le mode de respiration (par le nez ou par la bouche) (cf. **figure 105** ; courbes de couleur noire). Ainsi on note que dans la région ET des voies respiratoires humaines, lorsque les particules de taille supérieure à 10 μ m sont inhalées par le nez la quasi-totalité se dépose dans la région nasale alors que si la respiration se fait par la bouche, seulement 65% environ de ces particules se déposent dans le nez. Pour cette respiration buccale, seules les particules de dimension inférieure ou égale à 10 μ m se déposent dans la région TB, mais jusqu'à 10% des particules de diamètre pouvant aller jusqu'à 15 μ m se déposent dans cette région du fait que la respiration par la bouche permet de contourner la cavité nasale (MILLER ET AL., 1995). Pour les particules ultrafines et celles du mode d'accumulation, la différence est inexistante selon que la respiration se fasse par le nez ou la bouche, toutefois la respiration buccale conduit à un dépôt plus important des particules du mode grossier dans la région TB et dans la région ALV du fait que la dimension de ces particules ne leur permet pas de passer par le nez qui agit comme un filtre pour les particules grossières.

En résumé de cette section consacrée au dépôt des particules dans l'appareil respiratoire, il est à retenir que celui-ci se réalise par une combinaison de quatre principaux mécanismes à savoir la sédimentation, l'impaction, l'interception et la diffusion. Toutefois il est important de noter que la taille des particules détermine leur site de dépôt dans les différents compartiments de l'appareil respiratoires décrits à cet égard. On parle ainsi de dépôt régional suivant la taille. Par conséquent, du fait que les particules inhalées n'ont pas les mêmes capacités de dépôt suivant l'anatomie des régions du système respiratoire, l'on devrait s'attendre à ce que leur devenir dans l'appareil respiratoire diffère aussi.

3.1.1.2.3. Devenir des particules dans l'appareil respiratoire

Le cycle poussières désertiques/organisme humain ne s'arrête pas à la phase de dépôt de ces aérosols inhalés dans les différents compartiments de l'appareil respiratoire. En effet, du fait que le site de dépôt varie suivant la dimension des particules, une phase de rétention variable est observée selon les caractéristiques de la particule mais aussi de sa localisation dans l'appareil respiratoire, localisation qui est également déterminante dans les processus et mécanismes d'élimination de ces particules de poussières dans l'appareil respiratoire.

3.1.1.2.3.1. Rétention des particules

La rétention des particules inhalées et déposées dans les régions du système respiratoire dépend principalement de la taille de ces particules mais aussi des capacités d'élimination de l'organisme. En effet la taille reste déterminante en ce sens qu'elle conditionne la profondeur du dépôt de la particule dans l'appareil respiratoire. L'importance de cette profondeur du site de dépôt exige alors un temps variable pour le délogement de la particule. ANDUJAR P. et al.⁶⁴ soutiennent qu'à concentration égale, la rétention pulmonaire des NP (Nanoparticules : particules ultrafines) après inhalation est plus importante par rapport aux particules de même nature chimique et de taille plus élevée. Est-il alors nécessaire de se demander si, en dehors de la taille, la nature chimique de la particule serait-elle déterminante sur l'importance de rétention de la particule dans l'appareil respiratoire ? L'état de santé de la personne semble aussi être un critère important de rétention de la particule. En effet des études ont montré que la rétention pulmonaire des nanoparticules est d'autant plus importante que la personne soit atteinte d'une pathologie obstructive, telle que l'asthme ou la bronchopneumopathie chronique obstructive.

⁶⁴ Andujar P. et al., 2009. « Effets respiratoires des nanoparticules manufacturées » in Série « Maladies respiratoires professionnelles », Ed. Elsevier Masson SAS, pp 625-637.

3.1.1.2.3.2. Élimination des particules dans l'appareil respiratoire

Après le dépôt des particules inhalées dans les différents compartiments de l'appareil respiratoire, l'organisme humain est susceptible d'entreprendre plusieurs mécanismes d'élimination de ces poussières en fonction de leur localisation, leur taille et leur nature. Deux processus permettent d'éliminer les particules déposées dans le système respiratoire : les mécanismes d'élimination physiques qui sont différents dans les trois régions du système respiratoire et les mécanismes d'élimination chimique des particules insolubles ou peu solubles, qui eux sont identiques dans toutes les régions. Ainsi nous envisageons une analyse de l'élimination des particules suivant les différentes anatomiques décrites jusqu'ici et en prenant en compte la solubilité ou non de la particule. Nous mettrons par la suite l'accent sur le temps réel nécessaire pour l'élimination des particules en fonction de leur taille et de leur localisation.

3.1.1.2.3.2.1. Mécanismes et voies d'élimination des particules

☞ *Élimination dans la région extra-thoracique (ET)* : selon la localisation (zone de dépôt) et les caractéristiques physico-chimiques, les particules qui se déposent dans les voies nasales (Région ET) sont éliminées de différentes façons. Pour ce qui est surtout des particules insolubles, le dépôt dans la zone postérieure est éliminé par transport mucociliaire vers le nasopharynx tandis que le dépôt dans la zone antérieure est éliminé par transport mucociliaire dans les régions nasales où l'élimination se fait lorsque la personne se mouche, éternue ou souffle, et dans les régions les plus profondes lorsque la personne avale ou expectore le mucus contenant ces particules. Cette clairance dans la région ET de l'appareil humain peut varier de 10-20mn jusqu'à un ou plusieurs jours (PROCTOR et WAGUER, 1965). S'agissant des particules solubles qui se déposent sur l'épithélium nasal, il est admis qu'elles se diffusent dans le mucus et atteignent les cellules sous-jacentes. Une fois dissoutes les particules peuvent transférées vers les vaisseaux sanguins des voies nasales, qui sont bien vascularisées⁶⁵.

☞ *Élimination dans la région trachéo-bronchique (TB)* : dans les conduits de la région TB, le principal mécanisme d'élimination des particules insoluble est leur transport par l'ascenseur mucociliaire (ou escalator mucociliaire). En effet, la trachée et les bronches, jusqu'au niveau des bronches terminales, sont tapissées de cellules ciliées, recouvertes d'une couche muqueuse. Les cils (qui forment l'ascenseur) sont en mouvement continu et synchrone, imposant à la couche muqueuse contenant les particules un mouvement ininterrompu vers le haut (vers le système digestif) où ces particules sont éliminées de l'organisme par déglutition ou expectoration. C'est

⁶⁵ Santé Canada, 2013. *Évaluation scientifique canadienne du smog : Effets sur la santé*, vol. 2, Cat. : En88-5/2-2013F-PDF, ISBN : 978-0-660-21045-2, Pub. : 130108, 656p.

un mécanisme d'élimination très rapide et efficace qui est en grande partie terminé dans les 24 heures suivant le dépôt des particules dans cette région⁶⁶. Toutefois, il existe des preuves à l'appui d'une rétention trachéo-bronchique à long terme. SMALDONE et al. (1988) n'hésitent pas de parler d'une rétention de centaines de jours. Ce qui témoigne alors qu'il existe alors un phage d'élimination lente des particules dans cette région TB. L'OMS⁶⁷ met elle l'accent sur la vitesse du mouvement de la couche muqueuse et indique celle-ci varie généralement de 10 à 30 mm/mn. Quant aux particules solubles, il est soutenu qu'elles peuvent traverser l'épithélium et atteindre la circulation systémique, et dans EPA des E.U. (2004), il a été démontré que les particules solubles peuvent aussi être éliminées par transport mucociliaire.

☞ **Élimination dans la région alvéolaire (AVL)** : dans la région AVL, le mécanisme principal est la phagocytose des particules par les macrophages alvéolaires. Ici, les particules insolubles et/ou peu solubles vont être prises en charges par les macrophages par un mécanisme de phagocytose. Les macrophages vont entourer ces particules, ensuite les digérer si elles le peuvent et se diriger vers l'ascenseur mucociliaire de la région TB pour leur élimination selon les processus décrits précédemment. La plupart des particules déposées dans la région EVL est rapidement phagocytée en 6 à 12 heures (ANDUJAR P. et al.⁶⁸, MAURICE G. et LEFEBVRE E.⁶⁹, ...). Ce mécanisme de phagocytose par macrophages se révèle donc très efficace et rapide, toutefois cette efficacité est par contre fortement dépendante de la forme et de la grosseur de la particule. Plusieurs études dont celles de TABATA et IKADA (1988) et GREEN et al. (1998) semblent démontrer que les PUF non agglomérées déposées dans les alvéoles ne sont pas phagocytées de façon efficace par les macrophages contrairement aux particules de dimension de 1 à 3 μm . Donc d'autres mécanismes seront nécessaires pour l'élimination de ces nanoparticules. MAURICE G. et LEFEBVRE (2008) parle justement de mécanisme d'élimination physique, par translocation qui va leur permettre d'atteindre des régions extra-pulmonaire et des mécanismes d'élimination chimique qui les supprimeront définitivement. CHAUCHERIE X et al.⁷⁰ soutiennent même que l'on retrouve dans les poumons des macrophages alvéolaires chargées de particules pendant une période pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de jours après l'exposition, ce qui, si l'on se fie à ce rapport, indiquerait alors

⁶⁶ Chaucherie X. et al., 2004. *Détermination de la granulométrie des aérosols dans les émissions diffuses d'ateliers sidérurgiques : PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ et PM_{0.1}*, ADEME-Rapport final RE 109/a, LECES, 13p.

⁶⁷ Organisation Mondiale de la Santé, 1984. *Evaluation de l'exposition aux particules atmosphériques dans les ambiances de travail*, publication offset, N° 80, Genève, 78p.

⁶⁸ Op.cit.

⁶⁹ Op.cit.

⁷⁰ Op.cit.

que certains macrophages ne migrent et que les particules sont de nouveau ingérées par d'autres générations de macrophages alvéolaires.

Cependant, même si le mécanisme de phagocytose par macrophages se révèle très rapide et efficace pour la plupart des particules déposées dans la région AVL, il faut noter le déplacement qu'effectuent ces macrophages vers l'ascenseur mucociliaire après avoir phagocyté les particules est relativement lent. Beaucoup d'auteurs (OBERDÖRSTER, 2005, CHAUCHERIE X et al⁷¹, ANDUJAR et al.⁷², ...) parlent d'une durée allant jusqu'à plusieurs mois.

Outres le déplacement vers l'ascenseur mucociliaire, les particules phagocytées peuvent aussi subir un transfert dans l'interstitium vers un conduit lymphatique ou également pénétrer directement dans le système sanguin en traversant l'endothélium des capillaires alvéolaires (SANTÉ CANADA⁷³).

Pour ce qui est des particules solubles, leur élimination de la région AVL se fait par processus d'absorption qui comprennent la dissolution dans le fluide alvéolaire de surface, suivie du transport dans l'endothélium et dans l'interstitium. Les particules l'on assiste ainsi à leur diffusion dans la circulation systémique ou lymphatique.

Le tableau suivant résume les différents mécanismes d'élimination des particules dans l'appareil respiratoire selon les différentes régions décrites précédemment

Tableau 37 : Récapitulatif des différents mécanismes d'élimination par région respiratoire

	Région ET	Région TB	Région AVL
Élimination physique			
Mouvement mucociliaire	X	X	
Phagocytoses par les macrophages		X	X
Endocytose épithéliale	X	X	X
Translocation interstitielle		X	X
Drainage lymphatique		X	
Circulation sanguine		X	X
Élimination chimique			
Dissolution	X	X	X

⁷¹ Op.cit.

⁷² Op.cit.

⁷³ Op.cit.

3.1.1.2.3.2.2. Temps réel d'élimination des particules

Le temps réel durant lequel a lieu l'élimination des particules déposées dans une région de l'appareil respiratoire a un effet sur la dose cumulative conservée par les voies respiratoires ainsi que la dose transférée aux organes extra-pulmonaires.

Pour la **région extra-thoracique**, dans le nez, le transport par le mouvement du mucus des voies nasales, des particules peu solubles et/ou insolubles déposées dans la zone postérieure des voies nasales se déroule en 10 à 20 mn environ. Celles déposées dans la zone antérieure sont généralement éliminées dans les 24 heures tandis que les particules déposées dans les zones un peu plus profondes peuvent y être retenues jusqu'à quelques jours avant d'être éliminées.

Le temps réel d'élimination des particules déposées dans la **région trachéo-bronchique** se déroule généralement en 24 heures ; toutefois, il semble que l'élimination des particules de la région TB comporte à la fois un volet rapide et un volet lent. Des études expérimentales ont démontré que dans certaines circonstances, la part importante des particules déposées dans cette région est éliminée dans les 24 heures suivant le début de l'exposition, tandis que l'autre part est soumise à une élimination de deux phase : 2 à 3 jours pour une portion et d'une dizaine voire une centaine de jours pour le reste des particules (MÖLLER et Coll., 2004). Dans sa publication de 2013, SANTÉ CANADA⁷⁴ a cherché à expliquer l'élimination lente de certaines particules. Il souligne que cette dernière est due au fait que la vitesse de la clairance mucociliaire diminue progressivement dans les voies aériennes distales et que les particules en question seraient celles déposées dans les petits arbres bronchiques (les bronchioles) donc des particules ultrafines (PUF). Cette idée de phase d'élimination lente de certaines particules dans la région TB est même soutenue par KREYLING et Coll. (2004) qui ont constaté que seulement 20% des PUF déposées sont éliminées dans la région bronchiolaire par le mécanisme de clairance mucociliaire, le reste étant retenu à long terme. Par conséquent, quand on sait que le dépôt de particules est important dans cette région, ceci associé à la clairance mucociliaire moins efficace pourrait expliquer la charge particulaire plus élevée à certains endroits des voies aériennes, comme le témoigne d'ailleurs l'EPA (Environmental Protection Agency) des Etats Unis (2004).

Dans la **région alvéolaire**, le temps d'élimination des particules est beaucoup plus lent par rapport aux voies aériennes et se déroule en plusieurs phases. Selon la taille et la composition chimique, les particules déposées dans la région AVL sont phagocytées rapidement (généralement dans les 24 heures suivant le dépôt) par les macrophages alvéolaires (MA). La

⁷⁴ Op.cit.

vitesse d'élimination des macrophages chargés de poussières par le biais du système mucociliaire dépend de l'endroit de la prise en charge par rapport à l'extrémité de la couche de mucus, précise SANTÉ CANADA⁷⁵ dans sa publication de 2004. Toutefois, si la plupart des particules fines est rapidement et efficacement phagocytée, les PUF, elles ne sont phagocytées qu'en partie par les MA, on s'attend alors à ce que leur élimination des poumons périphériques prenne plus de temps que celles des particules plus grosses. Ces PUF insolubles et qui ne sont phagocytées par les MA, sont éliminées de la région AVL par translocation en traversant l'épithélium en quelques heures et atteignent la circulation systémique ou lymphatique. S'agissant des particules solubles, leur élimination se déroule rapidement par absorption à travers la surface épithéliale et atteignent la circulation systémique. Toutefois, le taux d'absorption varie peut varier selon la taille des particules et leurs propriétés chimiques.

3.1.1.2.4. Poussières inhalées et organisme humain

3.1.1.2.4.1. Réaction de l'organisme à l'inhalation des poussières

Comme on l'a vu précédemment, les particules inhalées et déposées dans les poumons sont majoritairement éliminées par clairance mucociliaire. Cependant en cas de dysfonctionnement des mécanismes d'élimination et/ou en cas de concentration élevée de particules de poussières, celles-ci vont s'accumuler localement dans les poumons. En réponse à cette accumulation, des processus se mettent en place afin de contenir ces particules et de les éliminer. Un de ces processus majeurs est la réponse inflammatoire. L'inflammation est une réponse biologique complexe de type défense immunitaire de l'organisme face à une agression par un : un agent pathogène qui peut être infectieux, de type biochimique, une atteinte physique ou chimique ; un agent endogène (cellules endommagées)⁷⁶. La réponse inflammatoire a pour principal effet d'amener les phagocytes (cellules capables de phagocytose c'est-à-dire d'englober et digérer des particules étrangères) sur le lieu de l'inflammation. La mobilisation des phagocytes (comme les macrophages) a lieu lors de la phase vasculo-sanguine. La réponse se déroule en trois étapes :

☞ ***Congestion active*** : caractérisée par une vasodilatation artérielle et une dilatation des capillaires, augmentant ainsi le volume de ces canaux sanguins, mais aussi la sécrétion d'amines vasoactives qui a pour effet de provoquer l'augmentation rapide du débit sanguin.

⁷⁵ Op.cit.

⁷⁶ Goulaouic S., 2009. *Effet des particules fines atmosphériques sur la sécrétion des cytokines pro-inflammatoires par les cellules thp-1 et mesures de marqueurs du stress oxydant*, thèse de doctorat, discipline : Toxicologie de l'environnement, Université Paul Verlaine de Metz, Ecole doctorale ressources procédés produits environnement Laboratoire des Interactions Ecotoxicologie, Biodiversité, Ecosystème CNRS UMR 7146, 169p.

☞ **Formation d'un œdème inflammatoire** : l'œdème est caractérisé par un gonflement localisé. Il permet la dilution et la limitation du foyer inflammatoire et un ralentissement local du flux circulatoire, facilitant ainsi le passage des phagocytes du flux circulatoire au foyer de l'inflammation.

☞ **Diapédèse** : se caractérise par l'extraction de molécules qui permet l'adhésion des phagocytes mobilisées arrivant par le flux circulant avant la traversée des parois vascularisées. Ces phagocytes se chargent de particules qui seront éliminées par le phénomène de clairance pulmonaire (BEVILACQUA et al., 1994 ; BAULIG, 2004).

Cette réponse inflammatoire qui est une action de type défense de l'organisme face aux particules de poussières qui s'accumulent localement dans les poumons, entraîne le déclenchement de pathologies respiratoires aiguës et des pathologies respiratoires chroniques comme la broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO) ou l'asthme lorsque cette inflammation est persistante, ce qui est souvent due à une rétention pulmonaire de particules.

3.1.1.2.4.2. Pathologies respiratoires

La réponse inflammatoire de l'organisme conduit à deux types fondamentaux de réaction : les *symptômes immédiats* et les *symptômes différés* qui traduisent les pathologies respiratoires déclenchés par cette réponse inflammatoire. Les symptômes immédiats se manifestent par une irritation des yeux, une congestion nasale, un écoulement nasal ou irritation de la gorge. Les symptômes différés se caractérisent par des maux de tête, étourdissement, nausées, essoufflement, fièvre, vomissements et toux. Le déclenchement des pathologies respiratoires du fait de la réponse inflammatoire suite à l'accumulation locale des particules de poussières dans les poumons, se fait en trois temps suivant la durée de l'exposition de la personne aux poussières mais aussi selon le niveau de l'accumulation et l'efficacité de la réaction de l'organisme pour l'élimination de ces particules inhalées et accumulées. D'abord, les premiers effets que va subir l'appareil respiratoire se manifestent par des lésions temporaires. Ce sont des lésions temporaires puisqu'elles vont disparaître au fur et à mesure que la personne victime cessera d'être en contact avec la poussière. En deuxième lieu, lorsque la personne est en contact prolongé avec la poussière, l'appareil respiratoire peut être atteint de lésions insidieuses (STEPHAN Y.-R., 2013)⁷⁷, se développant progressivement, telles que la bronchite ou l'asthme. La réaction se traduit par divers symptômes dont la diminution de la capacité respiratoire. Cependant, lorsque la personne est en contact avec la poussière et qu'elle cesse d'être exposée, l'appareil respiratoire

⁷⁷ Op.cit.

peut se rétablir complètement et la personne peut ainsi retrouver sa capacité respiratoire normale. Enfin, les expositions chroniques (quotidiennes) durant de longues périodes peuvent entraîner chez la personne exposées une forte accumulation locale de particules dans les poumons. Cette forte accumulation de particules de poussières conduit à des inflammations persistantes qui entraînent des lésions pulmonaires permanentes, déclenchant ainsi des pathologies respiratoires chroniques telles que l'asthme ou la Broncho-Pneumopathie Chronique Obstructive (BPCO). Plusieurs études biologiques ont mis en évidence les effets toxicologiques des poussières inhalées, en particulier les PUF, sur les mécanismes de stress oxydatif. Une exposition chronique conduisant à une accumulation de particules, augmentant ainsi le degré toxique inhalé, ce qui augmente le stress oxydatif. En augmentant le stress oxydatif, elles aggravent l'inflammation des BCPO et conduisent à leur exacerbation⁷⁸. De plus, les lésions anatomo-pathologiques des bronches et des bronchioles peuvent également être associées à une exposition chronique.

Dans plusieurs circonstances, la réponse inflammatoire induite par l'accumulation des particules de poussières dans les poumons, surtout lors d'une exposition prolongée ou chronique est susceptible d'entraîner l'endommagement de certaines parties des tissus pulmonaires, conduisant à une réduction de la capacité respiratoire de façon irréversible. Cependant, l'efficacité des mécanismes d'intoxication des poussières varie d'un individu à un autre pour plusieurs raisons, ce qui alors détermine la sensibilisation des populations exposées.

3.1.1.2.4.3. Sensibilité des populations exposées aux particules de poussières

La sensibilité des populations aux poussières est variable à la fois en termes d'inhalation et de dépôt des particules dans les compartiments de l'appareil respiratoire qu'en terme de réaction de l'organisme face à ces agents pathologiques. Pour un même niveau de concentration, on peut observer un impact chez certaines personnes en raison de leur constitution ou de leur exposition à d'autres facteurs de risque (PROUVOST H. et DECLERCQ C.)⁷⁹. Ces populations sensibles ou à risque sont en grande partie les jeunes enfants et les personnes souffrants de maladies respiratoires telles que l'asthme, la BCPO, l'insuffisance respiratoire.

L'exposition aux poussières est critique pour les enfants en raison notamment de l'immaturation respiratoire. Les voies respiratoires sont plus fragiles car étant en plein développement. De la naissance à 3 ans, le nombre d'alvéoles pulmonaires passe de 25 millions à quelques centaines

⁷⁸ Prouvost H. et Declercq C., 2007. *Effets des particules en suspension sur la santé respiratoire des enfants ; Intérêt et faisabilité de l'étude d'un panel d'enfants lillois*, Rapport, L'ORS Nord-Pas-de-Calais, Conseil Régional Nord - Pas-de-Calais, 42p.

⁷⁹ Op.cit.

de millions (PROUVOST H. et DECLERCQ C.)⁸⁰. Leurs bronches ne disposent que peu de muscles pour expectorer les particules de poussières. Comparativement à un adulte, la proportion de particules fines qui parviennent jusqu'aux alvéoles est trois fois supérieure chez les enfants car chez eux, l'arbre respiratoire n'est pas autant ramifié⁸¹. La croissance et le développement ne serait complet qu'à l'âge de 18-20 ans⁸². Pendant son développement, l'arbre respiratoire est soumis, outre aux facteurs de croissance, à l'agression de ces polluants de l'air pouvant altérer son développement. Ces derniers sont susceptibles d'agir sur le tractus respiratoire et induire des symptômes et pathologies respiratoires. L'autre raison justifiant la gravité de la question pour les enfants est liée à leur activité physique, supérieure à celle des adultes. En fait, cette forte activité physique des enfants augmente leur fréquence respiratoire, ce qui, par conséquent fait qu'ils inhalent davantage de particules de poussières pour un même niveau d'exposition. Cette inhalation élevée associée à l'inefficacité du système de défense (exemple les bronches qui ne disposant que peu de muscles pour expectorer les particules inhalées) entraînent une rétention plus persistante des particules et donc une forte accumulation. Or nous avons vu que plus l'accumulation des particules est forte plus l'inflammation est persistante. La persistance de la réponse inflammatoire conduit à des effets sanitaires allant de la diminution de la capacité respiratoire au déclenchement des pathologies respiratoires chroniques.

S'agissant des personnes souffrantes de maladies respiratoires, leur forte sensibilité à l'exposition aux poussières est soutenue dans ce sens que la présence d'une maladie pulmonaire peut modifier considérablement la dose des particules inhalées par rapport à ce qui est observé avec les poumons en santé. Dans sa publication de 2013, SANTÉ CANADA justifie cette sensibilité de ces personnes malades par le fait qu'elles affichent souvent une augmentation de l'efficacité du dépôt des particules, une répartition moins uniforme de l'air inhalé, une modification dans la distribution des particules déposées dans les voies aériennes et une diminution des taux de clairance des particules. Des études plus récentes comme celles de STURM et HOFMANN (2004) ; BENNETT et ZEMAN, (2004) ; PHALEN et OLDHAM, (2006) ont fortement fortifié cette thèse sur le risque élevé chez les personnes souffrant de maladies respiratoires pulmonaires. Elles ont toutes démontré que le risque est plus énorme comparé aux personnes dont les poumons sont en bonne santé du fait des changements dans la morphométrie des poumons de personnes

⁸⁰ Op.cit.

⁸¹ COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE, 2013. Pollution de l'air et santé : *les maladies respiratoires et le coût pour le système de soin*, Le point sur, n° 176, 4p.

⁸² Roda C., 2012. *Exposition domestique à des polluants chimiques de l'air intérieur : modélisation et évaluation de l'impact sur la santé respiratoire chez le jeune enfant*, thèse de doctorat, Université Paris Descartes, Spécialité : Santé Publique, UFR des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques, École Doctorale 420, 344p.

malades accompagnés entre autres d'une progression de l'insuffisance, mais aussi du fait des modes de respiration aux modifications de l'architecture pulmonaire.

Il semblerait ainsi que plusieurs maladies pulmonaires comme les maladies pulmonaires obstructives chroniques (MPOC) et l'asthme, entraîneraient une modification de l'efficacité du dépôt des particules. Ces modifications de l'efficacité du dépôt sont étroitement liées aux changements dans la répartition de l'air inhalé (ces modifications varient suivant les maladies). Ceci s'explique par la pathophysiologie des maladies respiratoires.

Ces modifications soulignées sont en phase avec les conclusions de l'EPA (Environmental Protection Agency) des Etats Unis (2004), qui soutient que par rapport aux sujets en bonne santé, les patients atteints d'une MPOC affichent un dépôt de particules plus important dans la région TB. Ce qui veut dire alors une augmentation du dépôt dans la région TB, et qui correspond par conséquent à une réduction du dépôt dans la région ALV. L'EPA attribue ces deux cas à l'augmentation de la bronchoconstriction des voies aériennes. Les sujets qui ont une MPOC respirent généralement à une fréquence plus élevée, ce qui signifie que leur de pointe et leur ventilation au repos sont plus élevés que la normale et que le dépôt des particules est donc plus important. Les conclusions des différents travaux sur cet aspect sont en phase avec celles de SANTÉ CANADA (2013) qui note que l'augmentation de la bronchoconstriction, combinée aux rythmes de répartition modifiés observés chez les patients atteints d'une MPOC, aura pour effet d'accroître l'écoulement d'air turbulent dans les voies aériennes, dans des conditions de respiration normales. Or l'augmentation de la turbulence est généralement associée à des niveaux élevés de l'impaction des particules dans les voies aériennes supérieures. Ce qui augmente l'accumulation des particules dans la région TB et exacerbe ainsi les MPOC comme les BPCO.

En conclusion de sous-chapitre où il a été question de détailler toutes les étapes à travers lesquelles les particules de poussières en suspension dans l'air arrivent à affecter la santé humaine, il est à noter que le processus débute par l'exposition. La notion fait ici allusion au contact de la personne à un air atmosphérique pollué en particules de poussières. Lorsqu'il y a exposition, nous avons souligné que deux cas de situation peuvent se présenter : soit les particules sont arrêtées par la "barrière naturelle", ce qui fait donc référence aux particules dont la taille ne leur permet pas d'être inhalées à travers les voies nasale et buccale de la personne exposée ; soit elles pénètrent dans l'organisme, ce qui se réfèrent donc aux particules fines, particules inhalées. De toutes les voies de pénétration, l'inhalation reste la principale chez l'homme et désigne la pénétration par la bouche et/ou le nez. Elle reste toutefois conditionner

par des facteurs à la fois relatifs à la personne, au produit inhalé et aux conditions d'exposition. Après leur inhalation, les particules vont pénétrer dans l'organisme et se déposer dans les différents compartiments de l'appareil respiratoire suivant quatre principaux mécanismes à savoir la sédimentation, l'impaction, l'interception et la diffusion. Ce dépôt régional est déterminé par la dimension de la particule. Les particules déposées restent retenues un temps soit peu dans leur site de dépôt avant d'être soumises au phénomène d'élimination. La durée de rétention est également contrôlée par la taille puisque cette dernière conditionne la profondeur du site de dépôt. La nature chimique semble aussi être un critère important de rétention des particules. L'élimination des particules dans l'appareil respiratoire se fait suivant des mécanismes développés dans les différentes régions respiratoires, compte tenu de la localisation et les caractéristiques physico-chimiques de ces particules mais aussi de leur insolubilité. Toutefois, lorsqu'il y a dysfonctionnement dans ces mécanismes d'élimination de particules ou une forte concentration, les particules déposées s'accumulent localement dans les poumons. En réponse à cette accumulation, l'organisme développe une réaction inflammatoire dont le but est d'amener des phagocytes dans le lieu de l'inflammation en vue de l'élimination de ces particules. Mais cette réaction inflammatoire n'est pas sans conséquences. En effet, elle crée le déclenchement de pathologies respiratoires allant de la forme aiguë et la forme chronique suivant la persistance de l'inflammation. Au terme de cette section, la sensibilité des populations exposées a été étudiée. Elle révèle qu'aussi bien en termes d'inhalation, de dépôt et de rétention, le risque est plus sérieux pour les enfants et les personnes souffrant d'une pathologie respiratoire.

Cependant l'analyse des impacts sanitaires des aérosols désertiques doit être faite de façon locale du fait de la variabilité de la fréquence de ces phénomènes d'un lieu à un autre. Ce qui nous amènera à étudier et à analyser sous plusieurs angles la question dans l'extrême-Nord Sénégal.

3.2. L'Extrême Nord-Sénégal : *Poussières désertiques et Maladies respiratoires*

L'exploration de cette section nous amènera à mettre d'abord l'accent sur les fréquences des épisodes de concentrations en particules de poussières susceptibles de dégrader la qualité de l'air et donc d'affecter la santé des populations exposées. Il s'agira des PM₁₀. La transition sera ainsi trouvée pour aborder en second point de ce sous-chapitre l'épidémiologie des poussières désertiques dans l'extrême-Nord Sénégal, ce qui nous amènera à analyser entre autres la fréquence des pathologies respiratoires ayant trait aux particules lithométéoriques, leur saisonnalité, leur fréquence suivant l'âge et le sexe et leur morbidité (comparée aux autres maladies). Les analyses chimiques des particules fines en suspension dans l'air collectées au niveau de nos stations de captage que nous avons disposées dans le cadre de cette thèse nous

permettrons d'apporter des résultats sur la toxicité de ces poussières, ce qui nous conduira à comprendre plus au fond l'impact sanitaire de ces épisodes de poussières.

3.2.1. Episodes de poussières désertiques dans les stations de l'extrême Nord-Sénégal et impact sur la qualité de l'air

Les stations de l'extrême Nord-Sénégal sont marquées par la présence d'un nombre important d'épisodes de lithométéores dégradant fortement la qualité de l'air. Généralement, depuis l'avant-sécheresse une dizaine voire plusieurs dizaines d'épisodes de concentrations élevées en particules affecte (ent) chaque année cette partie du pays. En considérant la période 1992-2014, la fréquence annuelle d'épisodes de concentration en PM₁₀ varie entre 5 (en 2008) et 90 (en 1993) à la station de Saint-Louis, entre 2 (en 1996 et 2000) et 33 (en 2014) à la station de Podor et entre 2 (en 1996) et 50 (en 1993) à la station de Matam (*tableau 38*). De 1965 à 2014, la fréquence moyenne annuelle d'épisodes de poussières dégradant la qualité de l'air est respectivement de 46 ; 38 et 32 pour les stations de Saint-Louis, Podor et Matam.

Tableau 38 : Nombre annuel d'épisodes de concentration en PM₁₀ dans les stations de l'extrême Nord-Sénégal de 1965 à 2014

Années	Nombre d'épisodes de lithométéores de concentration en PM ₁₀			Années	Nombre d'épisodes de lithométéores de concentration en PM ₁₀		
	Saint-Louis	Podor	Matam		Saint-Louis	Podor	Matam
1965	67	77	49	1990	137	34	36
1966	26	25	55	1991	67	21	26
1967	31	37	23	1992	57	28	25
1968	55	46	28	1993	90	28	50
1969	41	43	18	1994	17	9	16
1970	63	12	20	1995	99	6	10
1971	46	52	39	1996	53	2	2
1972	55	54	43	1997	22	11	15
1973	44	49	38	1998	35	19	14
1974	46	40	34	1999	14	3	10
1975	34	31	27	2000	27	2	3
1976	72	65	53	2001	11	6	6
1977	67	66	54	2002	28	10	8
1978	35	33	20	2003	27	25	11
1979	34	35	27	2004	17	8	15
1980	46	39	37	2005	23	13	17
1981	45	37	29	2006	17	10	15
1982	40	38	43	2007	18	7	6
1983	51	155	125	2008	5	9	8
1984	59	171	80	2009	9	7	11
1985	46	185	78	2010	12	6	8
1986	75	80	117	2011	15	14	13
1987	103	123	90	2012	25	22	18
1988	140	51	55	2013	6	16	21
1989	114	23	34	2014	26	33	34

L'étude de l'impact des épisodes de poussières désertiques sur la qualité de l'air doit, au-delà des valeurs guides fixées par l'OMS, se focaliser sur les valeurs limites nationales du fait que ces dernières peuvent varier selon le pays, et ainsi être plus ou moins strictes. Si les valeurs guides de l'OMS fixent pour les PM₁₀ une concentration moyenne journalière de 50 µg/m³, au Sénégal les valeurs limites journalières de concentration en PM₁₀ sont fixées à 260 µg/m³ (*Norme Sénégalaise NS 05-065 d'Octobre 2003*). En partant de cette concentration limite de 260 µg/m³, limite au-delà de laquelle la qualité de l'air est qualifiée de malsaine voir dangereuse pour la santé humaine, 60 à 70% de la concentration moyenne journalière en PM₁₀ dans les stations de l'extrême Nord-Sénégal dépassent largement cette valeur guide (à Saint-Louis, Podor et Matam, respectivement 71%, 68% et 62% de la concentration moyenne journalière en PM₁₀ sont supérieurs à 260 µg/m³). Plus inquiétant encore 13 à 17% de ces épisodes de poussières présentent une concentration supérieure à 1000 µg/m³ dans les stations de cette partie totalement sahéenne du Sénégal. Des impacts sanitaires de telles dégradations de la qualité de l'air sont évidents. La fréquence très élevée de la dégradation de la qualité de l'air dans cette zone sahéenne du Sénégal pour cause de fortes concentrations en poussières dépassant de loin aussi bien les limites fixées par l'OMS que les valeurs guides définies par la Norme Sénégalaise expliquerait l'importance des maladies attribuables aux poussières désertiques (soit elles sont directement causées par ces poussières, soit ces dernières les ont exacerbées).

3.2.2. Toxicité des particules de poussières désertiques en suspension à l'extrême Nord-Sénégal

La toxicité des poussières désertiques est déterminée par plusieurs facteurs, incluant sa toxicité intrinsèque autrement dit son propre pouvoir toxique, le niveau de concentration, la durée et la fréquence de l'exposition, la ou les voie (s) d'exposition et la sensibilité de chaque individu envers ces poussières en suspension. La toxicologie a joué un rôle important au cours des dernières années dans la compréhension des effets biologiques des particules atmosphériques. Elle implique des études en condition contrôlée *in vivo* ou *in vitro* qui permettent d'établir une relation dose/effet⁸³. L'étude de la toxicité des poussières en suspension permet d'obtenir des informations sur leurs composantes chimiques spécifiques dans les réponses biologiques. Les études expérimentales ont cherché ces dernières années à trouver des explications causales aux données épidémiologiques qui associent la pollution particulaire lithométéorique à la mortalité mais surtout à la morbidité respiratoire.

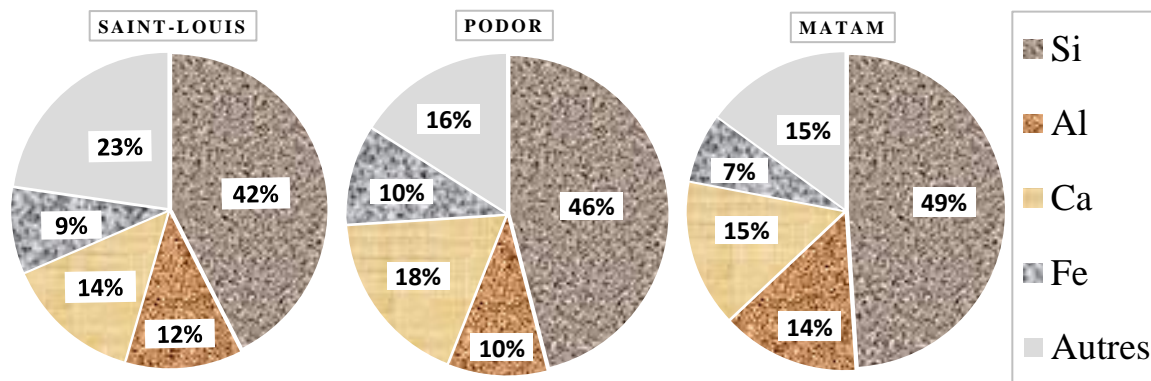
⁸³ Marano F. et al., 2004. « Impacts des particules atmosphériques sur la santé : aspects toxicologiques », *Environnement, Risques & Santé*, vol. 3, n°2, pp : 87-96.

Bien qu'en constante évolution, la composante des aérosols minéraux est principalement dictée par la composante des sources d'où ils sont soulevés. Toutes les études réalisées sur les lithométéores en Afrique de l'Ouest ont révélé qu'ils sont principalement constitués d'argiles, de feldspaths, de quartz, de calcites, etc. CHOU et al.⁸⁴ ont récemment confirmé la position de beaucoup d'auteurs dont SCHEÏTZ et RAHN (1982) et MARTICORENA et al. (1997), qui soutiennent largement que ces minéraux sont de forte teneur en silicium, aluminium, calcium et fer.

Ainsi pour vérifier la toxicité des poussières en suspension dans cette partie sahélienne du Sénégal, nous avons cherché à ressortir la teneur de ces composantes chimiques les plus constatées dans la sous-Région. Des analyses chimiques des échantillons de particules de poussières collectées aux niveaux de nos trois stations de captages (*figure 2* dans la partie méthodologie) que nous avons disposées et mises en place dans le cadre de cette étude ont été effectuées au laboratoire de CNRA de Bambey.

Les résultats de ces analyses sont traduits par la *figure 106* (Saint-Louis, Podor, Matam).

Figure 106 : Composantes chimiques des poussières désertiques en suspension dans l'air à l'extrême Nord-Sénégal



⁸⁴ Chou C. et al., 2008 : *Size distribution, shape, and composition of mineral dust aerosols collected during the african monsoon multidisciplinary analysis special observation period 0 : Dust and Biomass-Burning experiment field campaign in niger*, january 2006. Journal of Geophysical Research, PP : 113-117.

Ces résultats révèlent que le silicium, l'aluminium, le calcium et le fer composent environ 75 à 85% de la teneur des poussières lithométéoriques dans ces stations de l'extrême Nord-Sénégal. Ceci reste alors en parfaite phase avec les résultats des études réalisées sur cette question en Afrique de l'Ouest.

Nous avons cherché à comprendre comment la teneur de ces composantes chimiques constituent-elles des effets toxiques sur la santé des personnes exposées.

► Le **Fer** (*Fe*) : si certains soutiennent que le *Fe* n'a aucun effet toxique sur le poumon, il est toutefois reconnu que les particules riches en Fe peuvent irriter les voies respiratoires. Une exposition prolongée et intense aux particules de fer entraînant leur forte inhalation est susceptible de conduire à une sidérose pulmonaire qui est une accumulation des particules de fer inhalées se déposant dans les tissus interstitiels et les macrophages, le plus souvent sans provoquer de réaction. En générale, les sidéroses n'entraînent pas de diminution de la fonction pulmonaire et ne sont pas ou très peu évolutives. C'est certainement pour cette que le Fe est considéré comme sans effet toxique sur le poumon humain. Au contraire son déficit dans l'organisme humain est source d'anémie.

► Le **Calcium** (*Ca*) : le Ca est d'une faible toxicité pour l'homme. Toutefois une longue exposition à la poussière minérale riche en Ca peut nuire le système respiratoire. Le Ca est reconnu comme pouvant être au centre des symptômes de l'Asthme. Cela est d'ailleurs attesté par plusieurs études expérimentales à l'instars de celles menées par les chercheurs de l'Université de Cardiff, de Manchester et du King College de Londres (UK), de l'Open University et de l'Université de Californie (US) sur des tissus humains des voies respiratoires, prélevés chez les patients asthmatiques et non asthmatiques. En cas d'asthme, les détecteurs de Ca, tout comme la concentration cellulaire de Ca sont augmentation. Cela suppose alors que la forte teneur en Ca est déclencheur de la maladie. Par ailleurs, l'inflammation en réponse aux allergies pour cause de la teneur en Ca provoque une contraction des voies respiratoires, des difficultés de respirer et des crises.

► Le **Silicium** (*Si*) : la toxicologie de silicium réside le plus sous sa forme combinaison oxygénée (silice). La silice (ou quartz) correspond au dioxyde de silicium (SiO_2). La silice cristalline est un des principaux composants du sable. Leurs effets toxiques sur la santé sont liés aux particules suffisamment fines pour atteindre la partie profonde des poumons (bronchioles et sacs alvéolaires). Par conséquent, ce sont les particules de silice cristalline dite "respiratoires"

qui présentent un risque potentiel pour la santé. La silice cristalline doit ses effets au fait qu'elle peut s'accumuler dans les poumons. Une fois présente au niveau des alvéoles, la silice est capturée par les cellules (phagocytoses) qui ont pour rôle de la détruire. Les systèmes de destruction de ces cellules sont donc stimulés mais, comme la silice ne peut être détruite, cette stimulation perdure et conduit à une inflammation chronique et à la formation de nodules. Plus la silice s'accumule dans les poumons, plus il y a de cellules impliquées et plus l'inflammation et la formation de nodules sont importantes. Cela a notamment pour effet de monopoliser la première ligne de défense du système immunitaire (phagocytose) et de produire des dommages cellulaires du fait de l'inflammation chronique. Les effets toxiques de cette substance chimique sur la santé sont donc liés à l'inflammation chronique et à la diminution de défense immunitaire au niveau des poumons. Les premiers symptômes liés à une exposition à des particules de poussières riches en silice se manifestent par une irritation des yeux et des voies respiratoires supérieures (nez, gorge). À plus long terme, du fait de l'inflammation chronique, une bronchite chronique et des limitations des voies respiratoires peuvent se développer⁸⁵

► **L'Aluminium (Al)** : l'Al peut avoir des effets toxiques sur le système respiratoire. Les plus récentes publications mettent en évidence qu'une très forte dose en Al est source de bronchite chronique ou plus simplement des perturbations des fonctions respiratoires. Des études ont montré que la durée d'exposition aux particules riches en aluminium augmente le risque de développer une pathologie respiratoire. Il est même calculé que le risque de décès liés aux pathologies respiratoires est de 1.6 à 2.4 fois plus important chez les populations les plus exposées aux particules de poussières respirables riches en Al. À des teneurs élevées dans un panache de poussières respirables, l'Al est un élément qui est irritant pour l'appareil respiratoire. SONTHONNAX⁸⁶ parle dans ce sens de l'existence de relation dose-effet. Cependant il est unanime que l'Al présente une faible toxicité aiguë, autrement dit à une exposition brève. Les risques de morbidité respiratoire du fait de l'exposition prolongée aux particules de poussières de forte teneur en Al ont largement été évoqués dans des études. Les plus récentes révèlent l'Asthme, la bronchite chronique et les perturbations dans la fonction ventilatoire. Pour l'Asthme, il se caractérise par la survenue de crises d'Asthme caractéristiques, avec des troubles ventilatoires réversibles s'associant parfois à une hyper réactivité chronique GOURIER-FREY

⁸⁵ American Thoracic society, 1997.

⁸⁶ Sonthonnax J., 2014. *L'aluminium et son potentiel toxique*, Thèse de doctorat en Pharmacie, Université de Limoges, faculté de Pharmacie, 142p.

et al.⁸⁷. L'étude de SJÖGREN et al.⁸⁸ a montré que la prévalence de la bronchite chronique est 2 fois plus importante chez les exposés aux poussières en suspension riche en aluminium.

Il apparaît par conséquent que la toxicité des poussières lithométéoriques en suspension dans l'air et susceptibles d'être respirées est extrêmement importante pour la santé humaine. Les analyses chimiques réalisées dans le cadre de cette étude révèlent une teneur importante en Si, Al, Ca et Fe, qui, à eux seuls représentent plus de 3/4 de la chimie des particules au niveau de nos différentes études. La toxicité de ces polluants particulaires respirables constituerait les explications causales aux données épidémiologiques qui associent celles-ci à la mortalité mais surtout à la morbidité respiratoire dans cet extrême Nord-Sénégal.

3.2.3. Epidémiologie des poussières désertiques

Nous savons qu'en moyenne l'homme respire 15 m³ d'air par jour et que le poumon constitue l'interface la plus importante entre le milieu extérieur et l'organisme, ce qui, par son rôle dans l'oxygénation des différents tissus, lui confère un intérêt particulier en toxicologie. Il est ainsi une cible privilégiée pour les différents agents toxiques et polluants susceptibles de se retrouver dans l'air que nous respirons dont les particules de poussières désertiques en suspension constituent des plus manifestes surtout sous nos latitudes sahéliennes.

Aux stations de l'extrême Nord-Sénégal, nous avons vu que depuis la seconde moitié des années 60, le nombre d'épisodes de concentration en PM₁₀ est très élevé en termes de moyenne annuelle. Ces épisodes de PM₁₀ restent également une menace très sérieuse d'autant que 60 à 70% de leur fréquence sont marqués par une concentration dépassant la limite définie par la norme sénégalaise, limite au-delà de laquelle la qualité de l'air est qualifiée de malsaine voir dangereuse. On comprend alors que le niveau d'exposition des populations à ces agents pathogènes respiratoires est extrêmement altier.

Dans toutes les structures sanitaires de l'extrême Nord-Sénégal, que ce soit dans les hôpitaux ou les districts, allant des postes aux centres de santé, les résultats révèlent que les **Bronchites** et les **Pneumopathies** sont les pathologies respiratoires les plus répandues en termes de fréquence et de régularité et ayant trait aux poussières désertiques inhalées. Et ce rapport est, soit direct lorsque les particules de poussières sont déclencheuses de ces pathologies par la réponse inflammatoire de l'organisme suite à leur accumulation locale dans les poumons ; soit indirect,

⁸⁷ Gourier-Fréry et al., 2003. Aluminium, quels risques pour la santé ? *Synthèse des études épidémiologiques*, Volet épidémiologique de l'expertise collective InVS-Afssa-Afssaps - Institut de Veille Sanitaire, 271p.

⁸⁸ Sjögren et al. *Exposure and urinary excretion of aluminum during welding*, Scandinavian Journal of Work, Environment & Health 1985 ; 11 (1) :39-43.

lorsque l'inhalation de ces poussières entraîne l'exacerbation d'une pathologie respiratoire déjà existante. Cette dernière possibilité conduit le plus à une forme chronique, ce qui fait qu'aux côtés des Bronchites et Pneumopathies, nous avons une fréquence marquée des **BPCO (Broncho-Pneumopathie Chronique Obstructives)** enregistrées aux niveaux des différentes structures de santé de l'Extrême-Nord Sénégal. Ces **BPCO** constituent la forme évoluée (en stade chronique) des Bronchites et Pneumopathies aiguës.

L'**Asthme/Crise d'Asthme** et **Toux/Rhume** complètent la liste des quatre pathologies respiratoires les plus fréquentes dans cette partie extrême septentrionale du Sénégal et susceptibles d'avoir un lien évident avec les poussières désertiques en suspension dans l'air respirables par les populations de la Région. Il est toutefois important de noter que comparées aux bronchites et pneumopathies, leur rapport avec les poussières désertiques est "moins important". Alors que les bronchites et pneumopathies peuvent directement être déclenchées par les particules de poussières inhalées, autrement dit que celles-ci peuvent être la cause principale de l'apparition de ces pathologies chez la personne exposée, l'asthme et la toux/rhume ont plutôt un rapport indirect avec l'inhalation des particules de poussières, autrement dit celles-ci ne sont pas généralement la cause première de l'apparition de ces maladies chez l'individu mais plutôt favorisent leur exacerbation et/ou leur persistance. Pour la toux/rhume, elles font évoluer la phase aiguë à une phase chronique en augmentant la fréquence de la toux d'une part et en bouchant davantage les narines d'autre part. Cette dernière situation entraîne deux effets : d'abord ce bouchage davantage des narines, qui fait donc allusion aux particules retenues au stade supérieur de l'appareil respiratoire, constitue une sorte de barrière réduisant l'efficacité de l'élimination par mouchage suite au transport mucociliaire des particules ayant préalablement pu être déposées dans la zone antérieure de la région extra-thoracique ; cette circonstance entraîne elle-même le second effet qui est la diminution de la fréquence respiratoire. Pour l'asthme, l'inhalation des particules suite à l'exposition aux poussières favorise le plus souvent non pas le déclenchement de la maladie elle-même mais plutôt les crises (crises d'asthmes) du fait exactement à la diminution de la capacité respiratoire.

Cependant, du fait que, comme nous l'avons montré, chacune des trois stations (Saint-Louis, Podor, Matam) de notre zone d'étude est caractérisée par un type de lithométéore spécifique dominant et que l'étude des niveaux de concentrations surtout en PM_{10} ne révèle pas les mêmes résultats suivant ces stations, nous avons cherché à détecter une éventuelle corrélation entre cette spécificité pour chacune de ses stations, aussi bien en terme du type de lithométéore dominant

qu'en terme de concentration en PM₁₀ et l'épidémiologie de ces poussières de sorte que la pathologie respiratoire imputable à ces aérosols soit différente d'une station à une autre.

Ici nous mettons l'accent uniquement sur les bronchites et les pneumopathies du fait non seulement que ce sont les maladies respiratoires les fréquentes dans la région et ayant un lien direct et/ou indirect avec les poussières désertiques mais aussi justement parce que ce lien avec les poussières est beaucoup moins direct et donc plus indirect pour ce qui concerne l'asthme et la toux/rhume.

S'il est impossible de trouver une explication de cause à effet entre la pathologie respiratoire la plus fréquente et le type de lithométéore dominant suivant chacune de ces stations, il est néanmoins important de révéler que la pathologie respiratoire la plus répandue aussi bien en terme fréquence (nombre de patients consultés) qu'en terme de régularité n'est pas partout la même dans la zone.

Tableau 39 : Taux de fréquence des pathologies respiratoires dominantes suivant les stations

Districts	Saint-Louis	Podor	Matam
<i>Période</i>	<i>2011-2015</i>	<i>2009-2015</i>	<i>2006-2015</i>
Bronchite	47,6%	71%	68%
Pneumopathie	52,4%	29%	32%
Bronchite + Pneumopathie	100%	100%	100%

En effet à l'ouest de la région, à la station de la Saint-Louis, la **pneumopathie** est la pathologie "poussièreuse" la plus fréquente. Quand on considère le nombre de patients consultés pour les deux maladies les plus en rapport avec les poussières, les résultats (*tableau 39*) indiquent qu'au district de Saint-Louis, par exemple de 2011 à 2015, plus 52% souffraient de pneumopathie contre environ 48% de bronchite. Contrairement à la station de Saint-Louis, aux stations centre et est de la région, c'est plutôt les bronchites qui dominent largement la fréquence. Les résultats du district de Podor portés sur 6 ans (2009-2015) et de celui de Matam couvrant une décennie (2006-2015) indiquent que plus 2/3 des personnes consultées pour les deux maladies étaient atteintes de bronchite contre moins 1/3 de pneumopathie. Le rapport étant exactement de 71%/29% à Podor et de 68%/32% à Matam. Cette similitude entre Podor et Matam ne devrait en aucun cas constituer une surprise, au contraire elle fortifie les résultats quasi-pareils trouvés jusqu'ici entre ces deux stations et cela pour presque tous les points développés tout au long de cette étude.

3.2.4. Fréquence des pathologies respiratoire imputables aux poussières désertiques dans l'extrême Nord-Sénégal

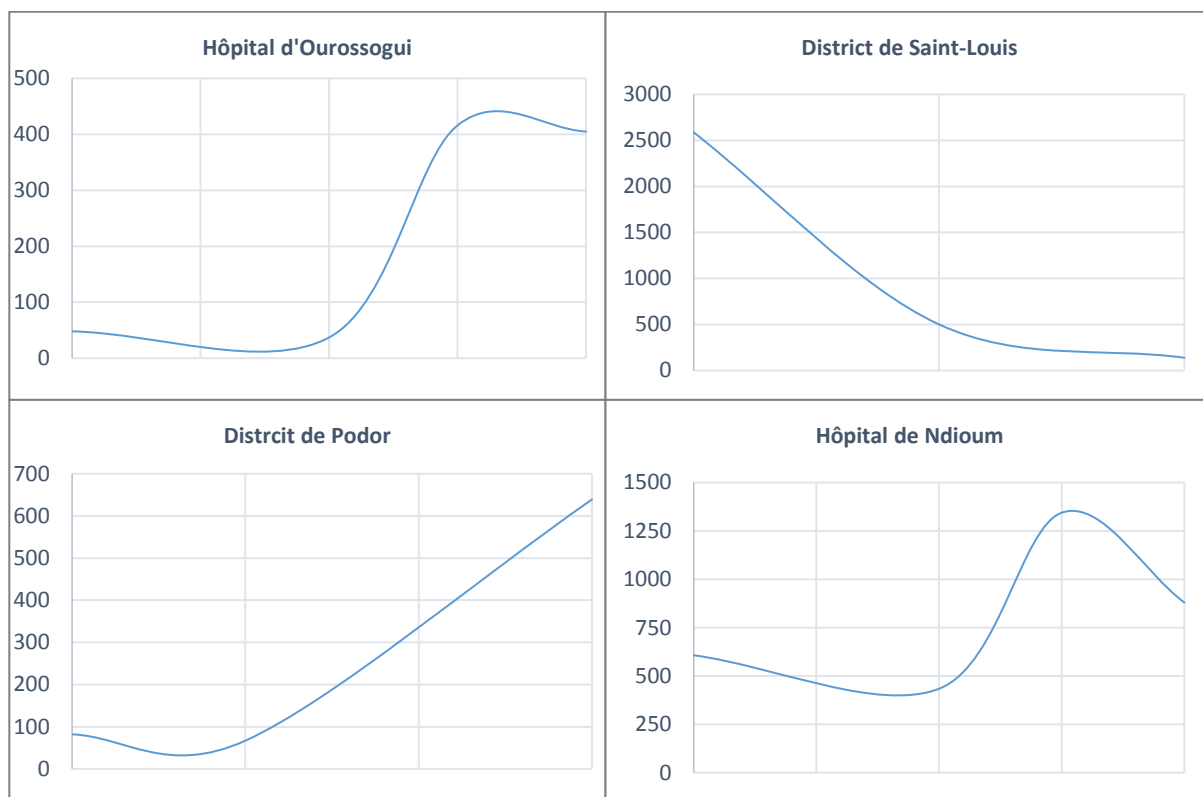
Pour entreprendre cette étude des pathologies respiratoires ayant lien avec les poussières désertiques dans l'extrême Nord-Sénégal, nous analyserons leur fréquence en terme d'évolution annuelle et leur saisonnalité, en terme de sensibilité des populations (affections suivant les classes d'âge et suivant le sexe), leur morbidité (l'importance de leur fréquence comparée aux autres maladies existante dans la région) Du fait que les résultats semblent indiquer les mêmes caractères suivant les structures et services de santé de la zone d'étude, nous avons choisi, pour chaque point exploré de porter l'exemple sur deux à ou trois structures au lieu de l'étendre sur tous les services pris en compte dans cette étude. Ce qui non seulement nous évitera de répéter les mêmes résultats mais également nous permettra d'analyser ces résultats par "pôles" représentatifs du grand ensemble.

3.2.4.1. Variabilité annuelle et saisonnalité des fréquences

3.2.4.1.1. Variabilité annuelle de la fréquence des pathologies imputables aux poussières respirables

Le suivi de la fréquence annuelle des pathologies respiratoires imputables aux poussières dans l'extrême Nord-Sénégal nous amène à nous focaliser sur deux axes majeurs. Le premier est relatif à la variabilité de cette fréquence annuelle autrement dit les fluctuations du nombre total par année de patients consultés pour ces maladies, ce qui d'ailleurs nous amènera à découvrir le second qui concerne la stationnarité ou non c'est-à-dire la régularité ou non de la zone à enregistrer annuellement des valeurs élevées de patients souffrant de Bronchites, de pneumopathies, de broncho-pneumopathies, La *figure 107* affiche le résultat de quatre structures sanitaires (deux hôpitaux : Ourosogui et Ndioum et deux districts : Podor et Saint-Louis) portant sur la dernière décennie (2006-2015)

Figure 107 : Variabilité annuelle de la fréquence des pathologies respiratoires imputables aux poussières désertiques aux niveaux des structures de Ndioum (toutes pathologies confondues), Podor (Bronchite + Pneumopathie), Saint-Louis (Bronchite + Pneumopathie) et Ourossogui (Broncho-Pneumopathie)



La fréquence de pathologies "poussiéreuses" suivant le nombre de patients consultés varie fortement d'une année à une autre. Le Rapport entre le nombre annuel maximum et nombre annuel minimum sur la décennie 2006-2015 est de 10.9 à Ourossogui, 18.6 à Saint-Louis, 9.5 à Podor et 3.1 à Ndioum. Cette fréquence varie d'une dizaine de patients (ex : 37 en 2013 et 67 en 2011 respectivement à Ourossogui et Podor) à des centaines voire des milliers (1344 en 2014 à Ndioum et 2587 en 2011 à Saint-Louis). Ce qui semblait extraordinaire, c'est effectivement cette fréquence aussi élevée durant certaines années et qui malheureusement est récurrente partout dans cette partie du pays. Mais quant à ce qui concerne la forte variabilité d'une année à une autre de la fréquence de ces pathologies imputables aux poussières inhalées, rien ne devrait nous paraître surprenant d'autant que, comme nous l'avons vu, les événements de lithométéores qui conditionnent l'inhalation de ces particules "pathogènes" sont très variables d'une année à une autre dans l'extrême Nord-Sénégal, aussi bien pour leur fréquence en terme de nombre de jour de présence qu'en terme du niveau de concentration en particules. En guise d'illustration de cette relation entre fréquence annuelle des pathologies respiratoires et événements annuels de PST (Poussières en Suspension Totale) et de PM₁₀ (Particules fines respirables), nous allons juste donner l'exemple d'Ourossogui entre 2013 et 2014 et de Saint-Louis entre 2013 et 2012. Pour

Ourossogui, l'année 2013 qui a été l'une des années de la décennie (2006-2015) ayant connu moins de consultations pour bronchites et Pneumopathies (37 consultations), fut marquée par un nombre de jours de poussière 2 fois moins important que l'année 2014 qui, elle, connût une cinquantaine de jours poussiéreux et une concentration de $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de particules respirables (PM_{10}). Cette forte concentration en PM_{10} en 2014 ne justifie-t-elle pas le nombre aussi élevé de patients consultés pour bronchite et Pneumopathie et évalué à 416 patients en cette année à Ourossogui ? Quand on reprend la même année 2013, on se rend compte qu'au district de Saint-Louis, elle reste aussi l'une des années ayant connu le moins de patients consultations pour bronchite et pneumopathie. Elle fut marquée par une concentration annuelle d'environ $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec un nombre de jours poussiéreux 2.5 fois moins important que l'année précédente (2012) qui justement est l'une des années de la décennie (2006-2015) qui connurent plus de patients consultés pour bronchite et pneumopathie avec plus 500 consultations. En cette année de 2012, la concentration annuelle en particules respirables et donc pathogènes a été plus de $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 2012 fut avec 2015 les deux années de la décennie les plus riches en termes de niveau de concentration en PM_{10} et furent exactement aussi les deux années de la décennie qui enregistrèrent plus de patients consultés pour les deux pathologies respiratoires les plus attribuables aux poussières inhalées.

Ces deux exemples témoignent amplement cette relation de cause à effet entre fréquence annuelle d'événements d'aérosols désertiques (nombre de jours de présence et niveau de concentration en PM_{10}) et fréquence annuelle de pathologies respiratoires imputables à ces poussières.

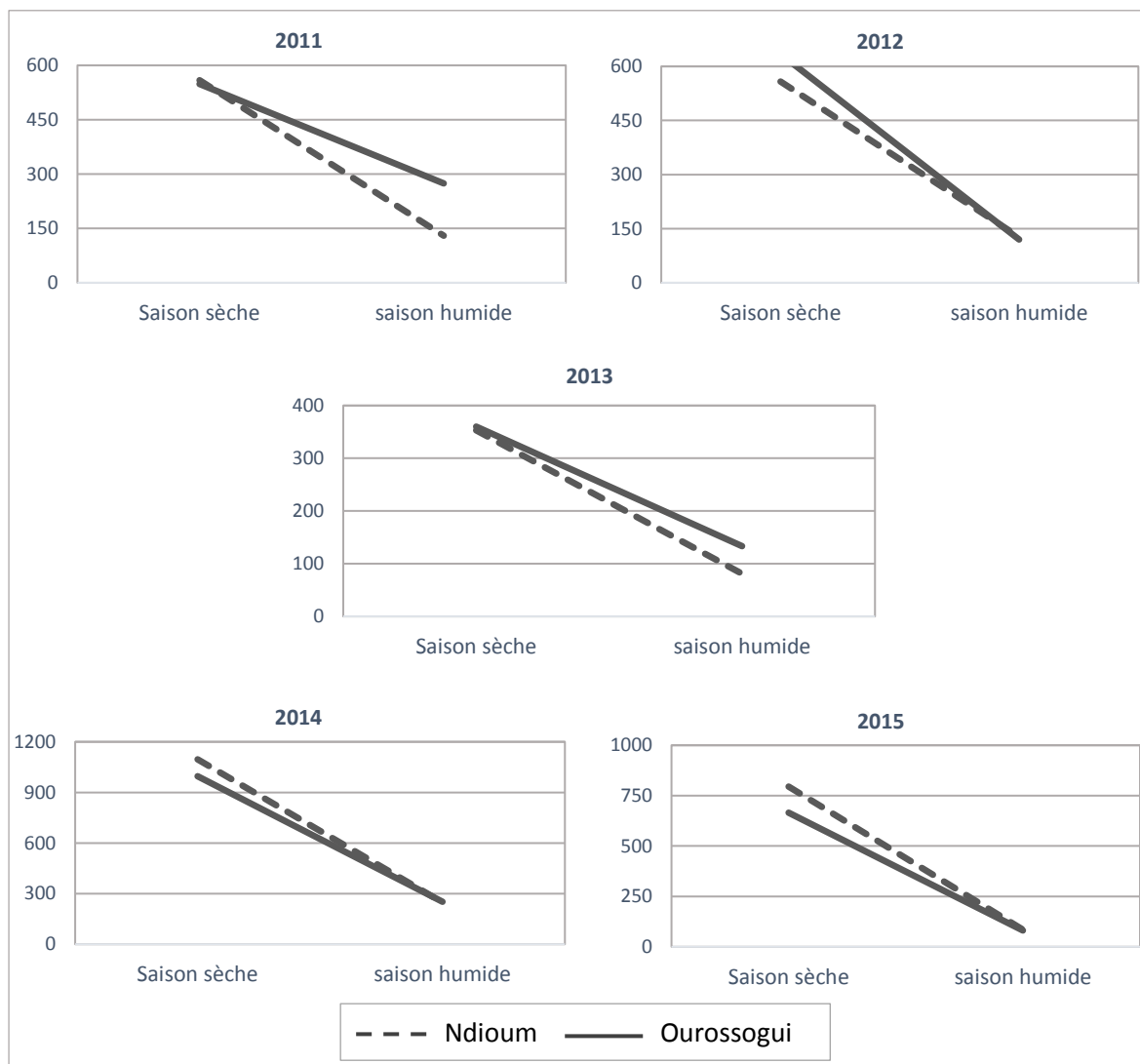
L'analyse de la fréquence des pathologies respiratoires imputables aux poussières lithométéoriques doit aussi et surtout se faire suivant les saisons du fait entre autres du caractère saisonnier des maladies surtout sous nos latitudes mais aussi de la saisonnalité de l'importance des événements poussiéreux tant sur le point de vu nombre de jours de présence que sur le point de vu de niveau de concentration en particules notamment en PM_{10} .

3.2.4.1.2. Saisonnalité des pathologies "poussiéreuses"

Le suivi saisonnier de la fréquence des pathologies respiratoires imputables aux poussières désertiques nous amènera à observer l'évolution de l'importance de ces maladies dans cette zone sahélienne du Sénégal. Le caractère justement sahélien dont l'un des aspects physiques les plus identifiables est l'opposition des types de temps entre saisons humide et sèche fortifie l'importance d'une évaluation saisonnière des différents impacts en lien à ces derniers.

Pour cette étude saisonnière nous prendrons l'exemple des hôpitaux de Ndioum et Ourossogui et la porterons sur cinq années d'observation (2011-2015). La *figure 108* révèle les résultats de cette étude.

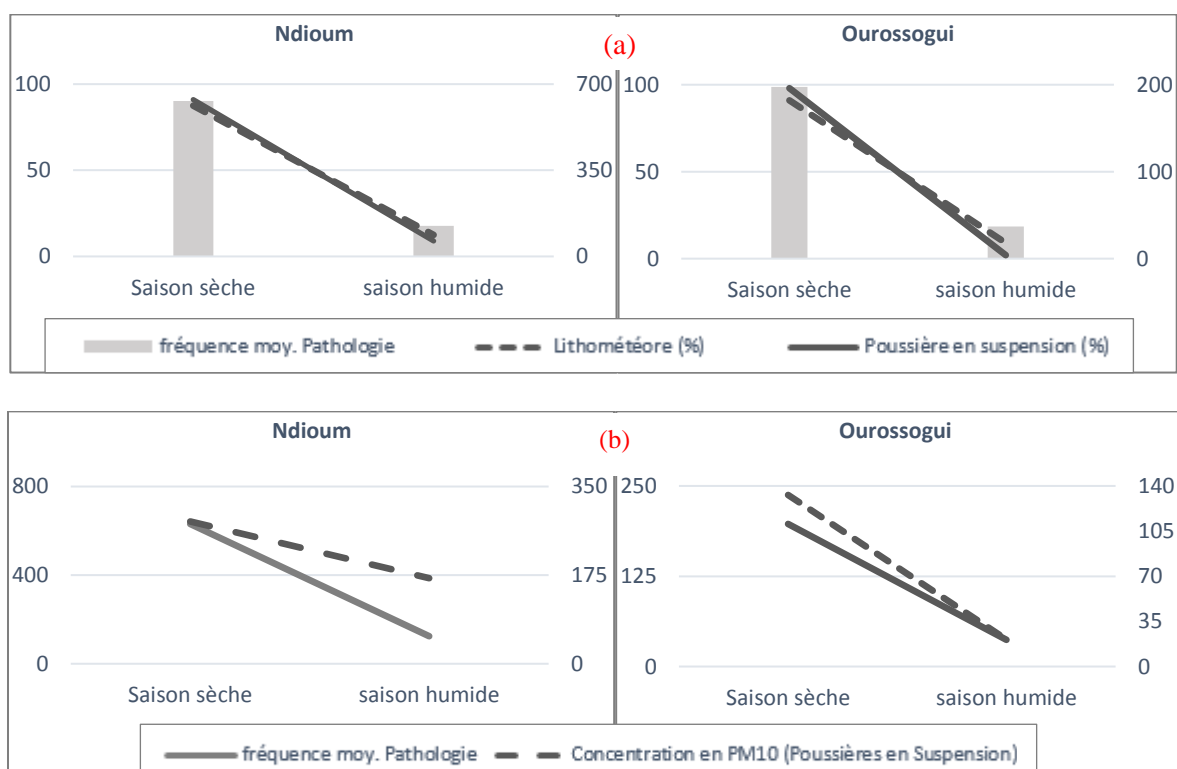
Figure 108 : variabilité saisonnière de la fréquence des pathologies respiratoires imputables aux poussières désertiques aux hôpitaux de Ndioum et Ourossogui



L'analyse des courbes de la *figure 108* montre la forte variabilité de la fréquence des pathologies respiratoire entre les périodes sèche et humide de l'année. À travers l'exemple porté sur deux hôpitaux (Ndioum et Ourossogui), faisant partie des structures sanitaires les plus sollicitées et enregistrant plus de patients, on note que les bronchites, pneumopathies, broncho-pneumopathies... sont largement plus fréquentes en saison sèche dans l'extrême Nord-Sénégal. Quel que soit la structure sanitaire considérée, jamais la saison humide n'a connu plus de patients consultés pour ces pathologies respiratoires comparée à la période sèche de l'année. Mieux

encore, chaque année, 2/3 à 9/10^e des patients souffrant de maladies liées aux poussières inhalées ont été consultés au cours des mois de la saison sèche contre seulement 30 à 10% en saison des pluies. La **figure 108** portant sur cinq années d'observation (2011-2015) témoigne clairement cette variabilité de la fréquence suivant les saisons sèche et humide. À l'hôpital d'Ourossogui, seule en 2011, la saison humide a enregistré environ 16 patients consultés pour Broncho-Pneumopathie sur un total annuel de 48, soit donc environ 30% des fréquences. Outre cette année, jamais la saison humide n'a atteint ce pourcentage des fréquences, ce qui signifie que chaque année plus de 70% des patients souffrant de Broncho-Pneumopathie ont été consultés en saison sèche. À Ndioum, le rapport est plus manifeste. Ici, nous avons considéré toutes les pathologies ayant rapport à l'inhalation des particules de poussières, les résultats révèlent que quel que soit l'année considérée, plus de 81 à 90% des patients consultés pour l'une de ces pathologies ont été affectés de novembre à mai contre 10 à moins de 20% entre juillet et septembre. Est-il nécessaire d'indiquer que cette forte variabilité des fréquences entre les deux saisons de l'année dans cette région est à corrélérer avec la saisonnalité des lithométéores, notamment les poussières en suspension tant sur le point de vue de nombre de jour de présence que sur point de vue de niveau de concentrations en particules, surtout en particules respirables (PM₁₀). La **figure 109** (a) et (b) atteste clairement cette corrélation dans cette partie sahélienne du Sénégal.

Figure 109 : Corrélation fréquences saisonnières Pathologies respiratoires/Poussières en suspension (a) ; Pathologies respiratoires/Niveau de concentration en PM₁₀ des poussières en suspension (b)



Le choix de corrélérer la fréquence saisonnière des pathologies imputables à l'inhalation des particules à celle des poussières en suspension n'est pas arbitraire. Elle se justifie plutôt par le fait que les particules susceptibles d'être inhalées par les voies respiratoires de l'homme sont justement celles des poussières en suspension. Ce sont les types de lithométéores qui s'observent en temps calme, permettant ainsi une suspension et un maintien des particules dans l'air et qui seront donc respirées une fois en contact avec la personne exposée, contrairement aux cas de déflation qui constituent des lithométéores associés à une forte dynamique éolienne ne permettant pas ainsi aux particules de se maintenir un temps soit peu dans l'atmosphère. De ce fait, on comprend par la suite l'importance de la corrélation entre fréquence saisonnière de ces pathologies et variation saisonnière du niveau de concentration en particules ultrafines (PM₁₀) de ces poussières en suspension d'autant que plus la concentration en particules respirables est élevée plus la probabilité de l'importance de la quantité inhalées est forte.

La *figure 109* nous montre à quel point il existe un lien saisonnier parfait entre l'importance des pathologies respiratoires et événements de poussières en suspension tant en termes de nombre de jours qu'en termes de concentrations en particules. Alors qu'en saison humide les poussières en suspension ne constituent qu'entre moins de 50% à moins de 5% des événements totaux de lithométéores dans l'extrême Nord-Sénégal, en saison sèche, elles connaissent une hausse allant de 40 à 500% suivant les stations. D'ailleurs, à l'exception de la partie Est de la zone d'étude, ces poussières en suspension dominent jusqu'à 60-70% (62% à la station de Podor et 71% à la station de Saint-Louis) des événements de lithométéore en cette période sèche de l'année dans cette partie sahélienne du Sénégal. Mieux encore, quand l'on considère le niveau de concentration en PM₁₀ (particules respirables) de ces poussières en suspension suivant les saisons, on note une concentration moyenne largement plus élevée en saison sèche comparée à la saison humide. Sur la demi-décennie 1965-2014, le rapport de ce niveau de concentration en PM₁₀ saison sèche/saison humide est de 281/169 $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Ndioum et de 133/21 $\mu\text{g.m}^{-3}$ à Ourossogui soit une hausse respective de 66% et d'environ 530% en saison sèche.

On comprend alors au vu de la forte variabilité saisonnière de l'importance de "l'agent pathogène" les raisons qui expliquent la saisonnalité des bronchites, pneumopathie, broncho-pneumopathie... en terme de nombre de patients qui en souffrent dans l'extrême Nord-Sénégal.

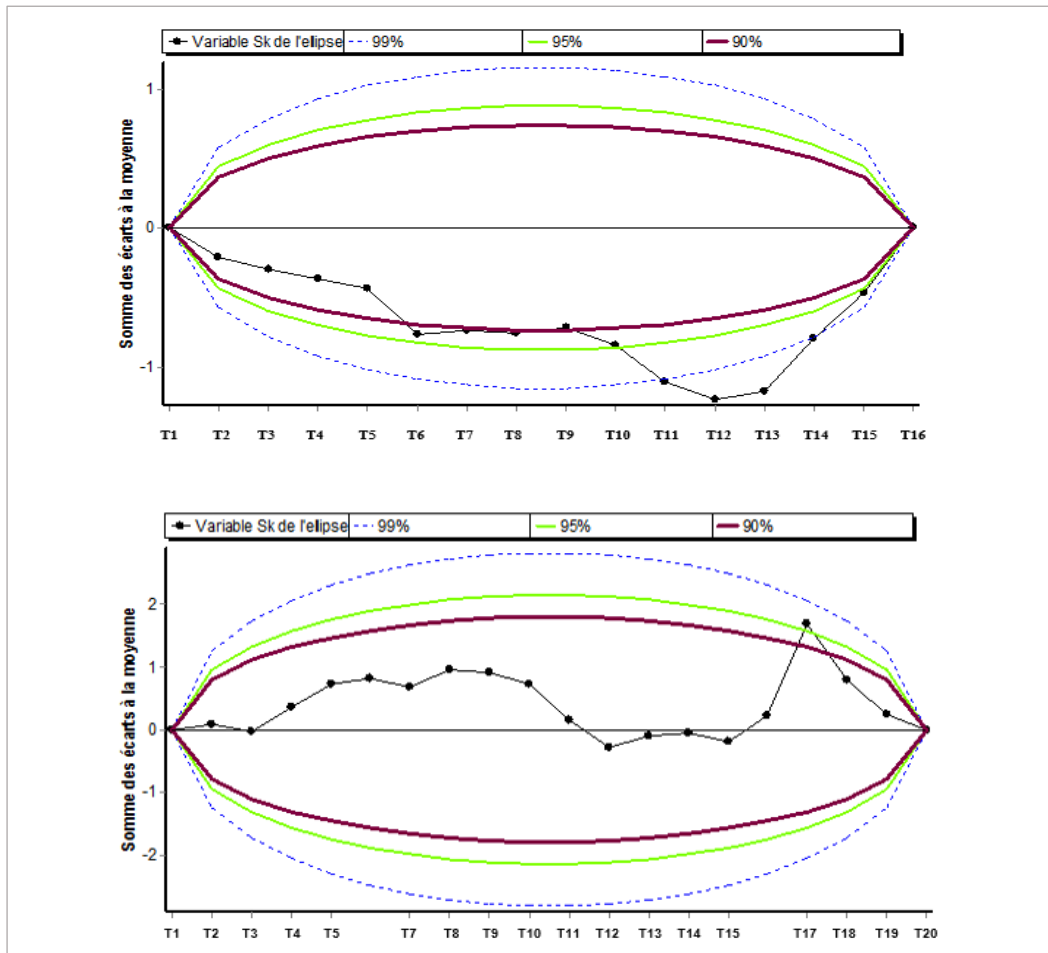
Cependant, aussi variable que soit la fréquence saisonnière de ces pathologies, ces dernières restent néanmoins assez régulières voir même très régulières tout au long l'année et sur toutes

les années d'observation. Cette régularité témoigne même en grande partie la morbidité de ces pathologies dans cette zone septentrionale du Pays.

3.2.4.2. Morbidité et Régularité des pathologies

L'étude de la régularité des pathologies imputables aux poussières désertiques respirables nous a amené à considérer 16 trimestres d'observation à Oourossogui et 20 trimestres à Ndioum sur la période récente de 2010-2015 et nous avons appliqué le test de BUISSAND dont l'une des fonctions principales est de témoigner à travers l'Ellipse de Bois (*figure 110*) la stationnarité ou non d'une variable dans une station quelconque.

Figure 110 : Ellipses de Bois de la fréquence trimestrielle des pathologies imputables aux poussières aux hôpitaux d'Oourossogui (en haut) et Ndioum (en bas)



L'allure de la variable Sk (somme des écarts à la moyenne) de l'ellipse de bois de la fréquence trimestrielle du nombre de patients souffrant de pathologies ayant rapport aux poussières à l'hôpital d'Oourossogui et à celui de Ndioum témoigne sur la régularité de ces dernières dans cet extrême Nord-Sénégal. Sur l'ellipse d'Oourossogui, seuls deux points sortent carrément des intervalles de confiance, ce qui confirme que la fréquence des pathologies imputables aux

poussières y est assez régulière suivant les années et suivant les saisons. La régularité de ces pathologies dans cette zone d'étude est d'ailleurs plus remarquable à travers l'ellipse de Ndioum où aucun point ne sort de tous les intervalles de confiance. Les résultats de l'hôpital de Ndioum sur la régularité de ces pathologies "poussiéreuses" sont identiques à ceux s'observant sur la plupart des structures sanitaires de la région. Le **tableau 40** affiche la régularité des dix principales pathologies les plus fréquentes à l'hôpital de Ndioum. Selon leur degré de régularité nous les qualifions ici de "parfaite", "considérable", "assez-bonne" et "faible". On désigne par "Maladies respiratoires" toutes les pathologies imputables aux poussières respirables.

Tableau 40 : Régularité des principales maladies consultées à l'hôpital de Ndioum

Pathologies	REGULARITÉ
Hypertension Artérielle	Considérable
Maladies respiratoires	Parfaite
IST	Parfaite
Traumatismes	Parfaite
Maladies diarrhéiques	Considérable
Anémie	Assez-bonne
Diabète	Assez-bonne
Syndromes infectieuses	Parfaite
Maladies de la peau (dermatose)	Considérable
Maladies de l'œsophage et estomac	Faible

Nous nous rendons compte non seulement de la régularité totale des bronchites, pneumopathies, broncho-pneumopathies...mais mieux encore, nous découvrons qu'elles sont au premier rang des maladies les plus consultées aux niveaux des structures sanitaires de la région. Leur importance y est fortement attestée à travers le tableau qui indique qu'elles sont plus régulières que certaines maladies (ex : *Hypertension Artérielle, Maladies diarrhéiques, Maladies de la peau...*) pourtant étant des pathologies parmi les plus décriées par les populations de la région.

Tout comme à Ndioum et dans toute cette partie Nord-Sénégalaise, à l'Ouest de la zone notamment à Saint-Louis, les Bronchites et Pneumopathies constituent avec les Toux/Rhume, Hypertension Artérielle, les maladies diarrhéiques et les maladies de la peau les 6 pathologies les plus morbides.

Cette régularité des maladies ayant rapport avec les poussières inhalées n'est-elle pas à mettre en lien avec les évènements de lithométéore dans cet extrême Nord-Sénégal qui comme nous l'avons vu, ont toujours caractérisé cette région à l'image de tout le Sahel quoiqu'y connaissant une variabilité des fréquences suivant les périodes climatiques. Quoi qu'il en soit, cette régularité impacte fortement sur le degré de morbidité de ces pathologies.

Tableau 41 : Morbidité des pathologies respiratoires imputables à l'inhalation des particules de poussières à l'Hôpital de Ndioum

Hôpital de Ndioum		
Pathologies	Nombre de cas (Moy. annuelle)	N° d'ordre
Maladies respiratoires	2391	1^e
Traumatismes	1764	2 ^e
Hypertension Artérielle	1403	3 ^e
IST	1089	4 ^e
Syndromes infectieuses	955	5 ^e
Maladies diarrhéiques	880	6 ^e
Maladies de la peau (dermatose)	795	7 ^e
Anémie	462	8 ^e
Diabète	307	9 ^e
Maladies de l'œsophage et estomac	280	10 ^e

Tableau 42 : Morbidité des pathologies respiratoires imputables à l'inhalation des particules de poussières au District de Saint-Louis

District de Saint-Louis		
Pathologies	Nombre de cas (Moy. annuelle)	N° d'ordre
Toux/Rhume	1570	1 ^e
Hypertension Artérielle	1141	2 ^e
Maladies Diarrhéiques	753	3 ^e
Pneumopathie	665	4^e
Maladies de la peau	653	5 ^e
Bronchite	624	6^e
Epigastralgie	599	7 ^e
IRA Basses	590	8 ^e
Grippe	546	9 ^e
Plaies	534	10 ^e

Le **tableau 41** présente le taux de morbidité des maladies attribuables aux poussières tous types confondus ainsi que leur classement parmi les dix pathologies les plus fréquentes en termes de nombre annuel de consultations à l'Hôpital de Ndioum. Au **tableau 42**, nous avons considéré séparément le taux de morbidité des deux principales pathologies directement attribuables à l'inhalation des particules de poussières ainsi que leur classement parmi les dix principales maladies les plus consultées au District de Saint-Louis.

Nous notons que prises séparément ou présentées sous un seul lot, les pathologies imputables aux poussières sont des plus morbides dans l'extrême Nord-Sénégal. En attribuant aux bronchites, pneumopathies, broncho-pneumopathies... l'étiquette "Maladies respiratoires", elles constituent la première morbidité dans la plupart des services de santé de la région avec une moyenne annuelle de plus de 1500 consultations. Au district sanitaire de Saint-Louis, nous avons dépouillé ces maladies respiratoires séparément, pour mieux apprécier leur importance. Les résultats révèlent que la pneumopathie et la bronchite occupent respectivement les 4^e et 6^e places des dix maladies les plus consultées dans cette station ouest de la région avec en moyenne plus de 600 cas par année.

Nous avons noté des bronchites et pneumopathies de stade aigu peuvent évoluées en stade chronique et donnaient donc naissance aux BPCO (Broncho-Pneumopathie Chronique Obstructive). Celle-ci présente une morbidité considérable même si n'étant pas parmi les plus manifestes dans la région. L'hôpital d'Ourossogui est l'une des structures sanitaires de la zone qui enregistrent plus de patients souffrant de broncho-pneumopathie. Nous y avons considéré la morbidité de cette pathologie sur les toutes récentes années (2010-2015). Le résultat montre qu'en moyenne annuelle 165 personnes en sont consultées tous services confondus. Ce qui alors loin d'être négligeable, constitue un taux de morbidité élevé.

En gros, il ressort de cette analyse que quel que soit le service sanitaire considéré et quel que soit sa localisation dans la zone (l'Hôpital d'Ourossogui à l'est, l'Hôpital de Ndioum au centre et le District de Saint-Louis à l'ouest), les pathologies imputables aux événements de poussières sont des plus régulières et des plus morbides. L'importance de leur fréquence dans cette partie du pays y est tellement manifeste qu'en les regroupant dans un seul lot, elles présentent un taux de morbidité le plus élevé parmi toutes maladies les affectant les populations de la région. Cependant toutes les personnes exposées aux poussières qui affectent la région n'ont pas la même susceptibilité de développer une pathologie respiratoire. Ce qui introduit la notion "populations à risque", autrement dit la sensibilité des populations aux pathologies découlant de l'inhalation des particules de poussières auxquelles elles sont exposées.

3.2.4.3. Sensibilité des Populations aux pathologies respiratoires

Face à un même niveau de concentration en particules de poussières lithométéorique, la grande majorité des individus ressentira aucun symptôme au moment où la santé de certaines personnes se voit s'altérer pour des raisons liées soit à leur "fragilité", soit à leur exposition à d'autres pollutions qui vont aggraver l'effet de la pollution particulaire. La sensibilité via à vis d'un niveau

de concentration en particules de poussière est donc très variable selon les personnes et implique donc ici leur degré d'affectivité aux pathologies respiratoires ayant lié à l'exposition à ces aérosols désertiques. N'est-il pas alors important de définir l'exposition. En effet, par exposition on entend "le contact entre un agent chimique, physique ou biologique et un organisme vivant"⁸⁹. Au regard de cette variabilité de sensibilité, les études des effets sanitaires d'exposition aux poussières inhalables, doivent tenir compte de cette « susceptibilité individuelle » (BORIE, 2006).

L'étude que nous mènerons en vue de déceler la sensibilité des populations aux pathologies respiratoires ayant liée aux lithométéores dans l'extrême Nord-Sénégal se fera en analysant la prévalence des affections suivant le sexe (hommes, femmes) et les classes d'âge (jeunes, adultes, vieux). Ici également nous ne mettrons l'accent que sur les pathologies que nous qualifions de principales à savoir les bronchites et les pneumopathies du fait que, comme nous l'avons déjà souligné, ce sont des pathologies pouvant avoir un lien à la fois direct et indirect avec les poussières inhalées.

3.2.4.3.1. Taux de prévalence hommes/femmes

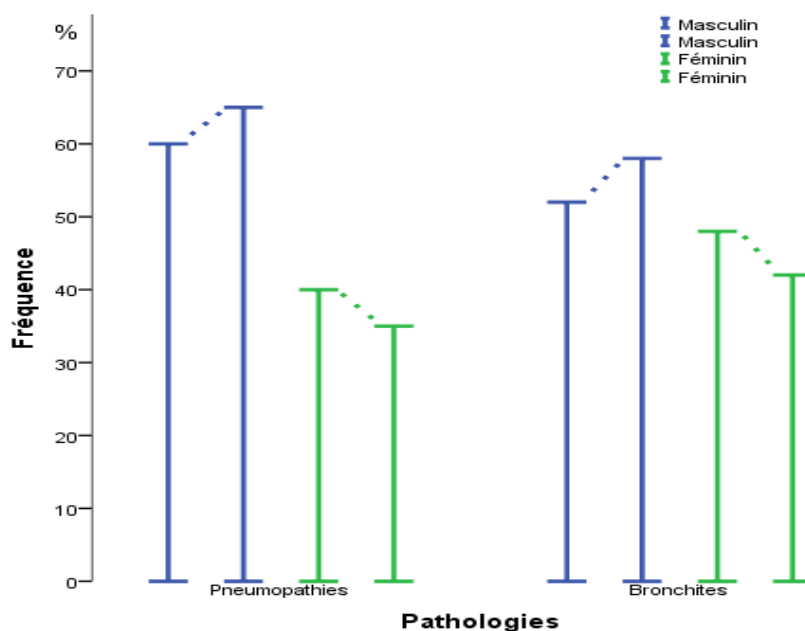
Les résultats du traitement de données relatives à la fréquence des affections suivant le sexe nous révèlent qu'à l'extrême Nord-Sénégal les hommes sont plus touchés par les bronchites et les pneumopathies que les femmes. Quel que soit la structure sanitaire considérée, de l'extrême ouest à l'extrême est de la Région, les rapports indiquent que quel que soit la période observée les hommes sont plus consultés pour ces deux pathologies que les femmes. Nous avons examiné les observations de toutes les structures prises en compte dans cette étude (hôpitaux et districts confondus) sur différentes périodes, les résultats (*tableau 43*) montrent que pour les bronchites, les consultations indiquent un pourcentage de 52 à 58% chez les hommes contre 48 à 42% chez

Tableau 43 : Fréquence des Bronchites et Pneumopathies par sexe de 2011 à 2015 à l'extrême Nord-Sénégal

Sexe	Hommes	Femmes
Pathologies		
Bronchites	52-58%	42-48%
Pneumopathies	60-65%	35-40%

⁸⁹ BORIE A. L., 2006. *Pollution atmosphérique et santé : les sujets à risque en Limousin, états des lieux des attentes locales pour une information plus ciblée*, thèse de doctorat en pharmacie, faculté de pharmacie, Université de Limoges, 204p.

Figure 111 : Fréquence par sexe des Bronchite et Pneumopathie dans l'extrême Nord-Sénégal



les femmes. Au district de Saint-Louis, sur la période 2011-2015, nous avons en moyenne annuelle 178 hommes consultés pour bronchite contre 165 femmes et 339 hommes consultés pour pneumopathie contre 225 femmes. Les résultats de l'hôpital de Saint-Louis attestent ces observations. Ici, si nous prenons l'exemple des pneumopathies, le rapport hommes/femmes est de 100 pour 61. Comme ces deux exemples le révèlent, quand on compare les deux pathologies, on note que le ratio homme/femme est plus manifeste pour les cas de pneumopathies. Alors que pour les bronchites, les résultats montrent que généralement la prévalence est à peine plus levée chez les hommes que chez les femmes, pour les pneumopathies par contre, le rapport oscille entre 3 pour 2 à 2 pour 1 en faveurs des hommes.

Nous avons cherché à trouver la ou les raison (s) de cette prédominance de ces maladies respiratoires chez les hommes à travers des études épidémiologiques ayant déjà analysé les effets de la pollution particulaire sur la santé. Cependant, les résultats de ces études ne permettent pas à priori de conclure l'existence ou non d'une différence selon le sexe quant aux effets à court et à long terme de la pollution de poussière lithométriques sur la santé.

Jusqu'à récemment, les données analysées et les risques relatifs rendant compte des effets sanitaires de la pollution atmosphérique notamment de celle des poussières désertiques concernaient la totalité de la population, avec parfois des distinctions selon l'âge, mais sans aucune distinction selon le sexe. Mais au vu des résultats de l'analyse de la fréquence des

consultations par sexe pour maladies respiratoires ayant lié à l'inhalation des particules de poussières désertiques en suspension dans l'air, il nous semblé intéressant de chercher plus au fond une ou des explications à la plus forte prévalence chez les hommes, et qui déterminerait une éventuelle différence de sensibilité selon le sexe vis-à-vis à l'exposition aux poussières respirables.

La prédominance des pathologies respiratoires chez les hommes relèverait plus de déterminants biologiques liés au sexe.

Ces déterminants biologiques liés au sexe et pouvant expliquer l'apparition plus fréquente des pathologies respiratoires chez les hommes sont plus particulièrement :

☞ la taille des voies respiratoires ; en effet, des études morphologiques et physiologiques ont montré que les femmes ont des poumon de plus petite taille que les hommes⁹⁰. Ceci impacte dès lors sur la capacité d'inhalation des particules respirables et par conséquent sur leur accumulation et leur rétention dans les poumons, beaucoup plus favorable alors chez les hommes. Est-il nécessaire de rappeler que pour ce qui est imputable aux poussières, c'est l'importance de la quantité accumulée des particules et de leur durée de rétention dans les poumons qui conditionnent la réponse inflammatoire de l'organisme, déclencheuse des pathologies respiratoires ou entraînant leur exacerbation ;

☞ des facteurs hormonaux : outre la taille des voies respiratoires, chez les femmes, les déterminants biologiques sont eux-mêmes liés au fonctionnement du système hormonal (cycles menstruels, ménopause) et donc à l'âge considéré. En effet, des études sur la différence de sexe dans le domaine des pathologies respiratoires ont montré qu'à l'enfance les garçons sont plus à développer des pathologies respiratoires suite à une exposition aux poussières que les filles du fait. NICHOLSON (2009) souligne une prévalence presque deux fois plus élevée chez les garçons, à savoir dans une proportion d'environ 18/10. Cela serait en rapport avec la taille des voies respiratoires. Ce n'est qu'en atteignant la puberté que les voies respiratoires des femmes augmentent proportionnellement à leurs poumons et c'est donc à l'âge adulte que se développe la plus grande prévalence d'hyperréactivité de leurs voies respiratoires. Ceci s'explique par le fait que les niveaux d'hormone peuvent influencer sur les cellules réceptrices de la paroi des voies respiratoires qui stimulent celles-ci et les poussent à relaxer ;

⁹⁰ GRANADOS D. et al., *Exploration de la différence de sensibilité à la pollution atmosphérique chez les hommes et les femmes. Hospitalisations pour causes respiratoires, Paris et proche couronne, 2000-2003*, Erpurs, Observatoire régional de santé d'Île-de-France, 66p.

☞ le système immunitaire et notamment les éléments impliqués dans les réactions allergiques : l'immunologie est différente selon le sexe, ce qui a donc des répercussions sur ce qui déclenche la réaction inflammatoire des voies respiratoires qui définissent les pathologies respiratoires. En effet à l'enfance, les hommes ont une plus grande hypersensibilité allergique que les filles dans les tests cutanés. NICHOLSON (2009) affirme à cet égard que ce n'est qu'après la puberté que la réactivité à ces tests est plus grande chez les femmes. De ce fait les garçons sont donc plus à déclarer de bronchites, de pneumopathies....

Outres ces déterminants biologiques, il a été mis en évidence une interaction entre déterminants biologiques et socioculturels dans l'expression cliniques des maladies respiratoires notamment les bronchites et les pneumopathies. D'après GRANADOS et al⁹¹, cette interaction se traduit par des différences entre sexe dans la perception, l'expression et l'interprétation des symptômes de ces pathologies respiratoires. Par l'exemple, les femmes rapportent moins la gêne associée à un essoufflement comparée à des hommes présentant le même symptôme obstructif. Ce qui fait qu'alors elles sont moins déclarées comme cas de bronchites, de pneumopathies, etc.

3.2.4.3.2. Sensibilité par classes d'âge

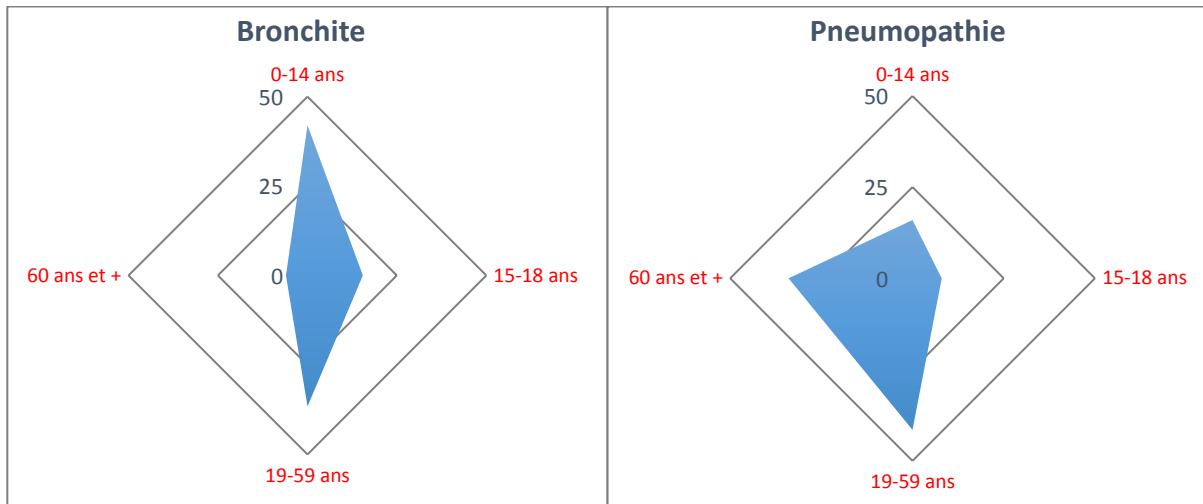
Dans cette section nous analysons la fréquence des pathologies respiratoires imputables aux poussières désertiques inhalées selon les différentes classes d'âge dans le but de déceler leur degré de sensibilité face à ces "agents pathogènes". Pour cette étude, nous partirons du postulat admis par les études à la fois épidémiologiques, toxicologiques mais aussi par tous les travaux scientifiques reposant sur des données analysées et les risques relatifs rendant compte des effets sanitaires de la pollution atmosphérique notamment de celle des poussières désertiques sur les populations. Ce postulat admet que suivant les classes d'âge, les enfants et les personnes âgées sont plus à risque de développer une pathologie respiratoire suite à une exposition à une concentration en particules de poussières désertiques.

Pour cette étude, nous ne traiterons que les bronchites et les pneumopathies pour des raisons évoquées précédemment. Nous analyserons de façon confondue les données de toutes les structures sanitaires prises en compte dans cette étude. Nous classerons les populations en quatre classes d'âges : [0-14 ans] ; [15-18 ans] ; [20-59 ans] ; [60 ans et +] et y analyserons la fréquence de ces pathologies ayant lié à l'inhalation des poussières.

⁹¹ Op.cit.

La **figure 112** montre la fréquence des bronchite et pneumopathie suivant ces différentes classes d'âge dans l'extrême Nord-Sénégal. Les données concernent la dernière décennie (2006-2015).

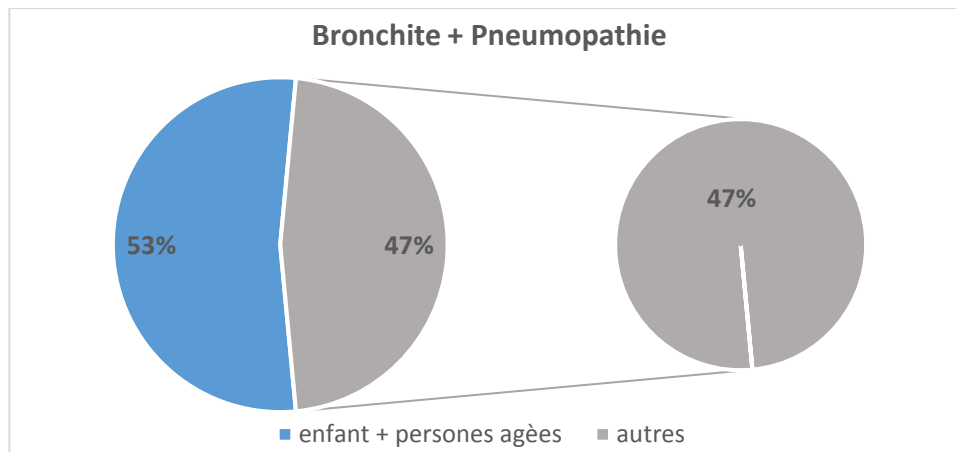
Figure 112 : Fréquence des bronchite et pneumopathie dans l'extrême Nord-Sénégal suivant les différentes classes d'âge



Au regard de la **figure 112**, on note l'importance de la fréquence des maladies ayant rapport avec l'exposition aux particules de poussières. Quand on considère les deux classes d'âge dites les plus sensibles, on note effectivement qu'elles constituent des groupes de populations de l'extrême Nord-Sénégal fortement affectées par les pathologies respiratoires. L'analyse de la fréquence des deux pathologies montre que les enfants sont beaucoup plus affectés par les bronchites alors que les personnes âgées sont plus consultées pour pneumopathies.

La sensibilité des enfants est ici plus attestée d'autant qu'ils (0-14ans) constituent la classe la plus touchée par les bronchites. Pour la dernière décennie (2006-2015), sur l'ensemble des patients consultés pour bronchite, toutes structures sanitaires confondues, 42% sont âgées de 0 à 14 ans. Le postulat selon lequel les personnes âgées sont le second groupe le plus à risque face aux maladies "poussièreuses" se vérifie dans le Nord-Sénégal avec les pneumopathies. Le résultat de l'analyse de la fréquence de cette pathologie dans toutes les structures sanitaires considérée dans cette étude révèle sur les dix dernières années, sur l'ensemble des consultations, 34% des patients étaient âgées de 60 et plus. Quand on connaît la proportion de cette classe d'âge par rapport au reste de la population, on se rend effectivement compte qu'elle est la plus touchée par les pneumopathies. L'importance de ces pathologies pour ces deux classes d'âge est beaucoup plus manifeste en analysant la fréquence de ces dernières de façon confondues (bronchite +

Figure 113 : taux de morbidité des populations les plus sensibles (enfants et personnes âgées) aux pathologies respiratoires



pneumopathie) et en considérant ces deux classes à risque comme un seul groupe par rapport au reste de la population. Les résultats de cette approche (*figure 113*) montrent qu'à l'extrême Nord-Sénégal, les enfants et personnes âgées constituent à eux seuls 53% des patients souffrant de bronchite et pneumopathie contre 47% pour le reste âgé de 15 à 59 ans, qui pourtant, faut-il le souligner composent l'essentiel de la population de la zone.

Les enfants et les personnes âgées possèdent une susceptibilité accrue à la pollution particulaire pour diverses raisons.

Pour les enfants, rappelons que leur sensibilité découle de plusieurs de plusieurs raisons notamment de l'immaturation respiratoire. Comme nous l'avons déjà souligné, les voies respiratoires sont plus fragiles car étant en plein développement. Le nombre d'alvéoles pulmonaires formés et n'étant pas suffisant à la naissance est soumis à la multiplication au cours des premières années de l'enfant. Leurs bronches ne disposent que peu de muscles pour expectorer les particules de poussières. Comparativement à un adulte, la proportion de particules fines qui parviennent jusqu'aux alvéoles est trois fois supérieure chez les enfants car chez eux, l'arbre respiratoire n'est pas autant ramifié. La croissance et le développement ne serait complet qu'à l'âge de 18-20 ans. Pendant son développement, l'arbre respiratoire est soumis, outre aux facteurs de croissance, à l'agression de ces polluants de l'air pouvant altérer son développement. En effet, une partie des enzymes (ayant un rôle fondamental sur le métabolisme pulmonaire) est responsable de la détoxification des xénobiotiques (tout agent étranger à l'organisme vivant). L'exposition aux toxiques de particules de poussières inhalées durant cette période de la vie, altère considérablement ce groupe d'enzymes et limite ainsi les phénomènes de détoxification essentiels à la protection de l'organisme. Ces particules toxiques sont susceptibles d'agir sur le

tractus respiratoire et induire des symptômes et pathologies respiratoires. L'autre raison justifiant la gravité de la question pour les enfants est liée à leur fréquence respiratoire plus élevée que celle d'un adulte. Cette dernière est d'autant plus importante qu'elle est associée à la pratique d'une activité physique. La ventilation des poumons est alors accrue, la quantité d'air brassée est supérieure par rapport à celle d'une personne sédentaire (quantité d'air entrant dans les poumons par kg de poids plus forte). La diffusion des polluants dans l'organisme est donc plus importante, ce qui favorise ainsi leur forte accumulation dans les poumons.

En outre, l'étude de l'OMS (2002)⁹² souligne que la petite taille d'un enfant rend l'interaction avec le milieu physique plus étroite, ce qui contribue à accroître la vulnérabilité des enfants face à la pollution atmosphérique et donc face à une exposition aux poussières désertiques.

Pour ce qui concerne les personnes âgées, la forte prévalence d'effets sanitaires indésirables dus à la pollution particulaire chez eux est liée à la physiologie de leur organisme. En effet, les moyens de défenses respiratoires commencent à décroître dès l'âge de trente ans et ce d'environ 10% par décennie (BORIE A. L., 2006)⁹³. La sensibilité vis-à-vis de la pollution de la pollution de poussières inhalables est d'autant plus forte que les personnes sont âgées. N'est-il pas utile de souligner que les études corrélant la sensibilité des personnes âgées à l'augmentation du niveau de concentration en particules de poussières dans l'air s'accordent pour montrer que pour une augmentation de 50 µg/m³ des niveaux journaliers de polluants, résulte dans les jours qui suivent une augmentation de 1 à 3% du nombre journalier d'hospitalisation pour causes respiratoires chez les personnes âgées de 65 ans et plus par rapport à la population générale.

En conclusion de ce sous-chapitre, il est à retenir que la présence d'un nombre important d'épisodes de lithométéores dégradant la qualité de l'air dans l'extrême Nord-Sénégal est source d'une fréquence élevée de pathologies respiratoires. Ici, la pneumopathie et la bronchite restent de ces pathologies les plus répandues. L'étude révèle une morbidité extrêmement importante de ces dernières aux différentes structures sanitaires de la région. Quel que soit la structure considérée, elles figurent toujours parmi les fréquents et les plus régulières. Les enfants et les personnes âgées sont les plus sensibles à ces pathologies et concentrent à eux seuls 53% des patients consultés pour ces deux maladies aux différentes structures sanitaire de l'extrême Nord-Sénégal.

⁹² Organisation Mondiale de la Santé (OMS). - Children's health and environment: A review of evidence (2002) [en ligne]. Disponible sur <http://www.euro.who.int/document/e75518.pdf>.

⁹³ Op.cit.

Conclusion générale

« *Après s'être laissé prendre avec excès aux charmes jusqu'à tomber dans l'illusion, de l'analyse, la pensée moderne se réhabitue à envisager la fonction évolutivement créatrice de la synthèse.* »

P. T. De CHARDIN, *le phénomène humain*, P.298.

Cette conclusion fait un bref rappel des principaux traits de la climatologie de l'extrême Nord-Sénégal, présente les différents résultats assortis de l'approche méthodologique développé dans ce travail, montre l'intérêt de cette étude, dégage les limites de celle-ci et annonce les perspectives de recherche qui s'ouvrent à cette thèse.

La climatologie de l'extrême Nord-Sénégal replace la zone dans la circulation atmosphérique générale de l'Afrique de l'ouest. L'alternance des masses d'air boréal en provenance de régions continentales de l'hémisphère nord (d'octobre-novembre à Mai) et de masses d'air austral issues de l'Anticyclone de Saint Hélène (juin à septembre-octobre) détermine le cycle saisonnier (saison sèche et saison humide) du climat. La circulation dans les basses couches est contrôlée par l'alternance du flux de Mousson (vent du sud-ouest dirigé de l'océan vers le continent apportant ainsi une humidité nécessaire à la formation des zones de convection profonde) et l'Harmattan (vent de secteur nord-est, chaud et sec en provenance du Sahara). En moyenne et en haute altitude, la circulation est assujettie aux jet d'est tropical, jet d'est africain, jet d'ouest subtropical. Deux principales structures convectives de grande échelle que sont la ZCIT et la dépression thermique saharienne s'ajoutent aux éléments clés du mouvement zonal en basse troposphère (flux de mousson et l'Harmattan) et en moyenne et haute troposphère (TEJ, JEA, JOST) et l'ensemble fonde la climatologie de l'Afrique de l'ouest et donc de l'extrême Nord-Sénégal.

L'analyse des éléments du climat à travers des différentes stations de la zone d'étude nous a amené à revisiter les principaux paramètres qui caractérisent la structure climatique de la région. Le traitement anémométrique (1984-2013) indique une périodicité de direction du vent. Alors que de novembre à avril-mai, la station de Saint-Louis est marquée par une direction préférentielle nord-ouest nord-est avec une dominance manifeste du secteur nord ; au centre et à l'est de la région, les secteurs nord à est avec une suprématie absolue du secteur est contrôlent les stations. De juin-juillet à octobre, l'ouest de la région est sous contrôle du cadran ouest à

nord-ouest alors que le centre et l'est de l'extrême Nord-Sénégal est marqué par une direction préférentielle des secteurs ouest-sud-ouest porteurs de flux de Mousson. La période novembre à avril-mai connaît le maximum d'évaporation, la température moyenne maximale (au centre et à l'est), l'humidité relative minimale et enregistre le minima des précipitations annuelles. Juin-juillet à octobre connaît les températures maximales (à Saint-Louis), de forts écarts entre températures diurne et nocturne, les maxima de l'humidité relative et l'essentiel des précipitations annuelles.

Les résultats ont été largement détaillés et discutés (comparés par la plupart du temps avec les observations assorties des études faites sur l'Afrique de l'Ouest et sur le Sahel). Défini au chapitre III, l'aérosol atmosphérique désigne tout système de particules solides ou liquide en suspension dans l'air. Cette thèse a porté spécifiquement sur la partie solide, l'aérosol désertique connu aussi sous le nom *Poussières désertiques* ou encore *Lithométéore*. Les résultats montrent qu'ils sont soumis à un cycle comportant trois phases : le soulèvement des particules en zones sources (localisées pour l'essentiel dans les régions saharienne et sahélienne notamment la dépression de Bodélé et le sud-ouest mauritanien), la suspension et le transport sur de longue distance, la phase de dépôt sec et/ou humide. Est-il utile de souligner la nécessité auparavant de la formation du matériel érodable. Les lithométéores sont reconnus pour les typologie diverse et variée. À l'extrême Nord-Sénégal, les résultats montrent quatre principaux types (Brume sèche, Brume de poussières, Chasse-sables et Tempête de Poussières). La région est diversement caractérisée par ces lithométéores.

L'analyse de la répartition diurne des lithométéores révèle une fréquence maximale au cœur de la journée, généralement entre 09 et 15 heures et un minima au milieu de la nuit, le plus souvent entre 21 et 03 heures. Cette répartition diurne est identique partout dans la région et reste inchangée depuis les premières études des aérosols désertiques au Sahara et au Sahel. L'analyse de la répartition diurne suivant la typologie [poussières en suspension (Brume sèche et Brume de poussières), cas de déflation (Chasse-sable et Tempête de poussières) révèle la dominance des poussières en suspension à Saint-Louis (70% des observations dont 50% de Brume de poussières) et à Podor (60%). Cependant, à Podor la fréquence de Chasse-sables (35%), qui est quasi-égale à celle des Brumes sèches (lithométéore dominant avec 37%) nuance la situation en cette station. À l'est (station de Matam), les polluants lithométéoriques restent largement dominés par les cas de déflation notamment les chasse-sables, qui à elles seules constituent 70% de la fréquence diurne. Le diagnostic de la répartition mensuelle et saisonnière nous a permis de détecter le maxima des fréquences au cœur de la saison sèche (janvier-mai) et le minima en hivernage

(juillet-septembre). Le maxima en saison sèche est à corrélérer en premier avec les perturbations en zones sources qui connaissent une plus grande activité en cette période et permet ainsi le maximum de déflation et en second à l'action des vents de l'Harmattan, qui opposés aux conditions (pédologiques, lithologiques et météorologiques) qui lui sont favorables, transportent des quantités importantes sur de longues distances. Le minima en saison des pluies reste lui dû d'une part à l'action de la pluviométrie qui contrôle les zones sources, atténuant ainsi leur émission d'autre part à la position plus au nord du FIT dont l'une des caractéristiques est de freiner le déplacement vers le sud-ouest vents du secteur nord, qui porteraient les panaches de particules soulevées en zones sources. Ce qui réduit ainsi l'apport de ces lithométéores en cet extrême Nord-Sénégal en cette période de l'année. N'est-il pas intéressant de rappeler qu'à cette période l'essentiel des événements de lithométéores est dominé par des cas de déflation partout dans la zone. Cette situation est due à la fréquence des haboobs qui sont très souvent associés à la convection humide surtout au centre et à l'est de la région. Les résultats de suivi de l'évolution annuelle de la fréquence de lithométéores sur la demi-décennie (1965-2014) révèle une variabilité suivant les phases climatique qu'a connue le Sahel. Cette fréquence reste faible dans la première moitié des années 60 coïncidant avec la fin de la phase humide des années 50-60. La fin des années 60 jusqu'à la fin des années septante est marquée par une hausse de la fréquence des épisodes de lithométéores avec une moyenne oscillant entre 40 et 80 jours suivant les stations (Saint-Louis, Podor et Matam). Sans décroître, cette fréquence connaît une explosion dès le début des années 80 correspondant avec la seconde vague de sécheresse climatique sahélienne et dure jusqu'à la fin de la décennie voir même jusqu'au début des années nonante. Au cours de cette période 7 des 10 années à Saint-Louis connaissent 1 total annuelle supérieur à 100 jours de poussières désertiques au moment où 5 et 4 sur 6 années respectivement à Podor et à Matam enregistrent ce même chiffre supérieur à 100 jours lithométéoriques. La période post-sécheresse que nous nommons période actuelle est marquée par une décroissance des fréquences comparée à la période précédente. Cette baisse est amorcée durant les années 1995-96 (à la station de Saint-Louis), 1991-92 (à la station de Podor), 1993-94 (à la station de Matam). Cependant, le suivi montre que depuis quelques années, une tendance à la hausse quoique légère s'observe par rapport au reste de la période.

Les résultats de l'étude des concentrations en particules de poussières lithométéoriques aux stations de l'extrême Nord-Sénégal nous révèle une concentration journalière en PST largement au-dessus du seuil retenu par les différentes directives nationales sur la qualité de l'air ($300\mu\text{g.m}^3$ ne pouvant être dépassés qu'en un certain nombre de jours). Quel que soit la station considérée,

plus de 80% des jours affectés par les lithométéores réduisant la visibilité horizontale à moins de 10 km sont marqués par un niveau de concentration en PST de plus de $300\mu\text{g.m}^3$. Pire, alors qu'à $500\mu\text{g.m}^3$, la qualité de l'air est jugée de dangereuse pour la santé, 15 à 19% de ces jours connaissent une concentration de plus de $1000\mu\text{g.m}^3$. Quand on considère uniquement les PM_{10} ($<10\mu$ = particules ultrafines), 70 à 85% des jours à visibilité réduite à moins de 10 km pour cause de lithométéore connaissent une concentration oscillant entre 150 et $500\mu\text{g.m}^3$ alors que le seuil retenu pour cette gamme varie entre 50 et $150\mu\text{g.m}^3$. Ces jours sont alors marqués par un air malsain voire dangereux pour les populations surtout celles les plus sensibles. Plus inquiétant encore, 12 à 17% de ces jours présentent des niveaux de concentration de plus de $1000\mu\text{g.m}^3$. La distribution mensuelle et saisonnière des niveaux de concentration montre des valeurs plus élevées en saison sèche avec un pic en mars. Ceci est dû au fait que c'est exactement à cette période de l'année que les zones sources sont plus active et donc une émission plus intense en terme de quantité. Un second maxima est noté au mois de juillet coïncidant avec l'installation et au démarrage de l'hivernage. Justement, à cette période de l'année l'extrême Nord-Sénégal surtout son centre et son est sont affectés par des phénomènes de haboobs qui sont associés le plus souvent avec la convection humide. Ces haboobs sont extrêmement riches en concentrations de poussières et expliquent le niveau élevé en cette partie de la saison. Les valeurs minimales s'observent en plein hivernage du fait que d'une part les zones sources sont moins actives à cause de la pluviométrie qui atténue l'érodabilité des particules sont devenues plus humides et donc plus compactes, ce qui limite ainsi leur émission. D'autre part, le FIT qui atteint sa position la plus au nord, les vents de la Mousson s'oppose à la pénétration des poussières au sud. L'une des caractéristiques du FIT est de freiner la progression des vent chargés de particules de poussières vers le sud. Le suivi de l'évolution annuelle des niveaux de concentration révèle une forte influence des conditions climatiques. Ce qui indique que les années de la sécheresse étaient plus affectées par des concentrations élevées que les années humides et celles de la période actuelle. Cependant quel que soit la phase climatique considérée, les niveaux de concentrations en PST et en PM_{10} reste largement au-dessus de la concentration annuelle de guide définie par l'OMS (60 à $90\mu\text{g.m}^3$) et par les différentes réglementations nationales sur la qualité de l'air (oscillant entre 40 et $60\mu\text{g.m}^3$). Pour la période actuelle (1993-2014), les niveaux de concentrations en PST ont oscillé entre 3 à 20 fois plus que ceux retenus par les différentes réglementations nationales sur la qualité de l'air alors que les PM_{10} , les moyennes annuelles sont de 4 à 10 fois supérieures que les seuils de ces différentes réglementations nationales. Les conséquences de tels niveaux de concentrations en particules de lithométéores sur le climat, sur la visibilité horizontale et sur la santé des populations ont été étudiées dans cette thèse. Les résultats sur le climat révèlent trois

effets radiatifs des panaches de poussières désertiques (effets direct, semi-direct et indirect). Le forçage combiné de ces trois effets conduit au changement du profil de température au sommet de l'atmosphère, dans la couche de l'atmosphère mais aussi en surface. En tenant en compte d'un certain nombre de paramètres, la pollution particulaire dans l'extrême Nord-Sénégal y conduit, comme c'est le cas sur l'ensemble du Sahel, à un réchauffement global dans la journée sur l'ensemble de la colonne atmosphérique entre 0 et 6 km d'altitude résultant des interactions onde-matière dans le domaine des courtes longueurs d'onde et un refroidissement à haute altitude. De nuit, l'effet principal est un refroidissement au niveau du panache de poussières entre 2 et 5 km et un réchauffement en dessous des interactions onde-matière dans le domaine de grandes longueurs d'onde. Outre l'action sur la température, l'impact sur les précipitations se solde par la réduction de ces dernières du fait de l'action sur la Mousson ouest-africaine. Cette action serait en rapport avec le refroidissement en surface en réponse d'une diminution du rayonnement solaire associée à l'échauffement des couches hébergeant les panaches de poussières. Du côté anémométrique, l'effet des poussières désertiques en suspension dans l'atmosphère est également estimé dans cet extrême Nord-Sénégal. En effet, on sait que du fait de l'équilibre dit géostrophique établi entre champs de vent et champs de température, toute modification du second entraîne la modification du premier. En cette partie sahélienne du pays, les évaluations des échauffements de la couche atmosphérique pour cause de présence de polluant particulaire sont de l'ordre de 3 à 6 K/j. Cela entraînerait une augmentation du vent thermique entre 0.5 et 1.75 cm/s.

Le diagnostic de la pollution des poussières désertiques sur la visibilité horizontale (VV) aux stations de l'extrême Nord-Sénégal révèle des résultats intéressants. La répartition diurne de la VV réduite par les lithométéores montre un maxima au cœur de la journée et un minima au cœur de la nuit, respectivement aux heures du maxima et du minima de la fréquence des lithométéores. Ces constats sont en parfaite phase avec les observations faites dans toutes les stations sahéliennes. À l'extrême Nord-Sénégal, 55 à 74% des jours affectés par les lithométéores sont marqués par une VV réduite à moins de 10 km, 11 à 32% de ces jours connaissent une visibilité réduite à moins de 5 km. Cette dernière limite est caractéristique d'une densité importante de poussières puisqu'oscillant entre 439 et 456 $\mu\text{g.m}^3$ en PST et marquée par une concentration de 301 $\mu\text{g.m}^3$ en PM_{10} . Nous avons constaté des erreurs d'interprétation à la station de Saint-Louis qui enregistrerait d'après nos données des fréquences plus importantes en visibilité réduite à moins de 5 km pour cause de lithométéores que les autres stations de la région. De notre point de vue, des brumes humides très fréquentes à la station auraient été répertoriées comme brumes de

poussières, ce qui expliquerait alors cette valeur plus élevée de visibilité réduite à moins de 5 km à cette partie ouest de la région. Une fréquence de visibilité réduite à moins de 1 km par les lithométéores est également très importante dans la zone. En effet, d'ouest à est, 14 à 15% des jours de lithométéores conduisent à une VV réduite à moins de 1 km. La VV réduite à cette distance est caractéristique de concentrations extrêmement élevées en PST évaluées entre 1340 et 1897 $\mu\text{g.m}^3$ et en PM_{10} de 933 $\mu\text{g.m}^3$. L'évolution de la fréquence journalière de la réduction de la VV suivant les phases climatiques aux différentes distances (<10 km, < 5 km et < 1 km) suit celle du nombre de jours de lithométéores et celle des niveaux de concentrations en particules de lithométéores. Le suivi mensuel et saisonnier de la réduction de la VV indique un maximum de réduction en saison sèche avec un pic au mois de mars. À cette saison, 70 à 75% de la fréquence des lithométéores réduisent la visibilité à moins de 5 km. Quel que soit la station considérée et la phase climatique prise en compte, la fréquence de VV à moins de 5 km est plus importante en saison sèche comparée à la saison humide. En cette saison sèche, le rapport $\text{VV} < 5\text{ km} / \text{VV} < 10\text{ km}$ révèle que la $\text{VV} < 5\text{ km}$ est toujours plus fréquente. Ces résultats restent aussi en phase avec les observations faites en Afrique de l'ouest et en région sahélienne de façon plus élargie. La corrélation VV/concentration en particules est parfaite aux stations Nord-Sénégal. C'est d'ailleurs l'une des observations unanimes de toutes les études faites sur les différentes stations au Sahel. Cette parfaite corrélation explique d'ailleurs le fait que la réduction de la VV soit retenue comme premier critère d'évaluation des niveaux de concentrations en particules de poussières lithométéoriques. Quoique variable d'une année à une autre, d'une période climatique à une autre, les moyennes annuelles de VV réduite par les lithométéores restent très élevées sur notre série (1965-2014). Certes les valeurs phase climatique actuelle restent faibles comparées à la période de sécheresse, mais de 1992 à 2014, 21 des 23 années présentent une VV moyenne réduite à moins de 6 km, autrement dit présentant des concentrations en PST jamais au-delà de 400 $\mu\text{g.m}^3$ et en PM_{10} toujours supérieures à 265 $\mu\text{g.m}^3$.

Ces impacts sur la VV affectent finalement les activités socio-économiques des populations mais aussi leurs mobilités quotidiennes. 66 à 87% des transporteurs routiers enquêtés affirment être victimes des événements de forte réduction de visibilité au moment où l'essentiel des commerçants à Saint-Louis et 25 à 34% de leurs homologues à Podor et à Matam éprouvent des difficultés dans la pratique et l'écoulement de leurs produits lors des jours à forte réduction de visibilité par les lithométéores. De telles situations sont sources de pertes économiques énormes. Sur le plan de la mobilité quotidienne, 27 à 33% des populations à Matam et à Podor et 9/10^e

personnes interrogées à Saint-Louis soutiennent éprouver des difficultés à vaquer à leurs préoccupations en ces jours de fortes concentrations en poussières désertiques.

En dehors de ces impacts de fortes concentrations en particules de poussières, l'une des conséquences majeures des poussières désertiques reste sanitaire.

La pollution particulaire des poussières désertiques présente un fort risque sanitaire pour les populations exposées. Les études épidémiologiques ont concerné les particules fines appelées aussi "respirables" dans le cadre de mise en relation pollution particulaire/morbidité humaine. Il s'agit alors de particules pouvant pénétrer l'appareil de l'homme à travers les voies nasales et buccales. La durée d'exposition de la personne en contact avec ces polluants atmosphériques reste un paramètre fondamental de l'importance de l'inhalation des particules et de leur potentiel impact sanitaire. La finesse des particules inhalées détermine leur capacité de pénétration de l'appareil respiratoire, leur passage donc des voies respiratoires supérieures (région extra-thoracique) jusqu'à la région alvéolaire en passant par la région trachéo-bronchique. Au cours de ce passage d'une région à une autre, les particules, en fonction de leur vitesse et du type d'écoulement (laminaire, turbulent...) peuvent subir divers dépôts notamment par sédimentation, l'impaction, l'interception et la diffusion. Est-il nécessaire de rappeler que le dépôt des particules de fait suivant les régions anatomiques, ceci du fait notamment de la taille des particules. Ces particules déposées observent une phase de rétention, variable selon leur taille, la profondeur de leur localisation mais aussi selon les capacités d'élimination de l'organisme. Justement l'organisme humain est susceptible d'entreprendre deux processus d'élimination des particules. Il s'agit des mécanismes d'élimination physique qui sont différents dans les trois régions du système respiratoire et les mécanismes d'élimination chimique qui concernent les particules solubles et/ou peu solubles qui, eux restent identiques dans les différentes régions. Lors de ces processus d'élimination, il arrive que des dysfonctionnements surviennent, ce qui conduit alors à une accumulation locale des particules dans les poumons. En réponse à cette accumulation se développe l'inflammation qui est une réponse biologique complexe de type défense immunitaire de l'organisme. Les conséquences immédiates majeures liées à cette inflammation est le déclenchement des pathologies respiratoires. La persistance de l'accumulation des particules détermine la persistance de l'inflammation qui, elle, détermine à son tour la sévérité (aiguë ou chronique) des pathologies déclenchées.

Ces pathologies respiratoires en relation avec des poussières respirables apparaissent très fréquentes dans l'extrême Nord-Sénégal. La détection des épisodes de lithométéores rendant

mauvaise voire dangereuse la qualité de l'air indique une fréquence importante dans les stations de Saint-Louis, Podor et Matam au cours des cinq dernières décennies. L'analyse chimique des particules capturées au niveau de nos station de captage a révélé une composition élevée en Si, Al, Ca et Fe. La forte teneur en ces substances chimiques constitue un risque toxique pour la santé humaine. Cette toxicité constituerait alors des explications causales aux données épidémiologiques qui associent la pollution lithométéorique à la fréquence des pathologies respiratoires. Les résultats assortis de l'exploitation des données sanitaires des différentes structures de santé couvertes par cette étude révèlent que la bronchite et la pneumopathie sont les plus fréquentes dans la zone d'étude en relation directe et/ou indirecte avec ces polluants particuliers. Le taux de patients souffrant de ces pathologies varie d'une dizaine à des centaines voire des milliers au niveau de ces structures sanitaire de la région. 2/3 à 9/10^e de ces patients ont été consultés en saison sèche (entre novembre et Mai), ce qui indique ainsi la saisonnalité de ces maladies, saisonnalité qui d'ailleurs est en phase avec celle des lithométéores [les brumes de poussières (dominantes à l'ouest de la région), les brumes sèches (dominantes au centre de la région) et les vents de sable (majoritaires à l'est de la région) sont toutes plus fréquentes en saison sèche], ce qui indique une réelle corrélation cause-effet. L'exemple porté sur les données des hôpitaux d'Ourossogui et de Ndoum montre une régularité assez-bonne voire parfaite de ces pathologies. Les résultats de l'hôpital de Ndoum et ceux du district de Saint-Louis témoignent l'importance de la fréquence de ces maladies parmi les plus fréquentes dans la région. En effet, prises séparément, la pneumopathie et la bronchite occupent respectivement la 4^e et la 6^e place des pathologies les plus consultées dans l'extrême Nord-Sénégal alors que regroupées dans un seul lot de maladies respiratoires, elles occupent la première place tableau devant même des pathologies les plus décriées des populations. L'analyse suivant le sexe montre que les l'hommes sont plus touchés comparés aux femmes (52 à 65% contre 48 à 35%) alors l'étude de la sensibilité suivant les classes d'âge indique que les enfants (0-14 ans) sont les plus affectés de bronchite (42% des patients sur la décennie 2006-2015) et que 34% des patients souffrants de pneumopathie sont âgés de 60 et plus. La sensibilité des enfants est expliquée par leur immaturité respiratoire et à leur fréquence respiratoire plus élevée que celle des adultes. Pour ce qui est des personnes âgées, c'est la physiologie de leur organes (décroissance des moyens de défense) qui conditionnent leur vulnérabilité.

L'intérêt de cette thèse est large dans ce sens qu'elle aborde à la fois l'aspect physique (effet radiatif et conséquence sur la visibilité horizontale), humain (impact sur la santé des populations,

conséquence sur la mobilité quotidienne de celles-ci) et social (conséquences sur les activités socio-économiques).

La démarche méthodologique développée dans ce travail en vue de vérifier les hypothèses formulées en amont ont conduit à des résultats, tous confirmant la sensibilité du milieu (dimension physique des conséquences des lithométéores) et des populations (dimensions humaines et sociales des conséquences de ces aérosols désertiques).

Malgré la qualité de ces résultats, ce travail présente *des limites* sans lesquelles il aurait pu être "parfait". Sur le plan des effets radiatifs, une modélisation et des simulations mathématiques auraient donné des résultats meilleurs comparés à ceux ressortis des estimations développées dans cette thèse. Le problème d'archivage des données aux niveaux des structures sanitaires n'a pas permis de couvrir une longue série d'observation. En outre, nous n'avons pu disposer du matériel pour nos stations de captage de particules en vue de l'analyse chimique faite pour le compte de la toxicité des poussières et donc de leur impact sanitaire qu'en dernière année de cette thèse. Ceci a empêché un suivi qui aurait révélé un caractère évolutif de cette toxicité des particules. Le problème d'archivage des données sanitaires et la disposition tardive du matériel des stations a donc limité la qualité des impacts sanitaires des poussières désertiques étudiés dans ce travail. L'ensemble de ces limites découle ainsi des moyens techniques et matériels qui fonderont sans doute des perspectives de recherches.

Des perspectives de recherche s'ouvrent à cette étude. Nos stations de captage des particules disposées dans cette recherche nous permettront de suivre l'évolution de la toxicité des lithométéores. Des modélisations et des simulations mathématiques qui ont manqué à cette thèse seront entreprises ultérieurement dans le but d'approfondir des résultats sur l'impact des poussières en suspension sur le climat dans cet extrême Nord-Sénégal. Une étude sanitaire des poussières désertiques élargie sur d'autres zones du pays et/ou de la sous-région permettra une vérification et une confirmation des résultats assortis de cette thèse.

Références bibliographie

1. ABDERRAHIM H. et al., Janvier 2013. « Caractérisation et modélisation des aérosols atmosphériques sahariens », Communication Science & technologie N° 12. COST, 7p.
2. AFSSET, 2010. *Valeurs guides de qualité d'air intérieur pour les particules*, Edition scientifique - Air et agents chimiques, Rapport d'expertise collective, Comité d'experts spécialisés « Évaluation des risques liés aux milieux aériens », 97p.
3. AIRPARIF-surveillance de la qualité de l'air en Ile de France, 2008. *Synthèse des connaissances sur les particules en suspension dans l'air*, 105p.
4. AISSANI O. et MOKHNACHE A., 2008. *Application de la télédétection pour étudier l'effet des aérosols atmosphériques sur le rayonnement solaire global*, Laboratoire de Physique Energétique, Université Mentouri, Constantine, Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1, pp 65-73.
5. AIT BOUH et al., 2012. « *Caractérisation physico-chimique des particules atmosphériques en suspension et identification de leurs sources de pollution dans la ville de Meknès au Maroc* », J. Mater. Environ. Sci. CODEN : JMESCEN, pp : 434-445.
6. ANDUJAR P. et al., 2009. « *Effets respiratoires des nanoparticules manufacturées* » in *Série « Maladies respiratoires professionnelles* », Ed. Elsevier Masson SAS, pp 625-637.
7. Anselmo C., 2011. *Imagerie satellitaire appliquée à la cartographie des aérosols en Guyane*, Rapport de stage Master de Physique Environnement, Atmosphère, Radioprotection (EAR), 54p.
8. ANSES, Sept. 2015. « *La pollution chimique de l'air des enceintes de transports ferroviaires souterrains et les risques sanitaires associés chez les travailleurs* », Rapport d'expertise collective, Edition scientifique, Maisons-Alfort, Saisine n°2011-SA-0265, 382p.
9. ANUP K. et al., 2007. « *Comparison of MISR-MODIS aerosol optical depth over the Indo-Gangetic basin during the winter and summer seasons (2000–2005)* », Remote Sensing of Environment, n°107, pp : 109-119.
10. AOUADII E., 2005. *Estimation de la Quantité de Vapeur d'Eau Précipitable et du Forçage Radiatif de l'Aérosol atmosphérique à partir de la Télédétection passive à Oujda (Maroc)*, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences OUJDA, Laboratoire de Physique de l'Atmosphère, Spécialité : Physique de l'Atmosphère, 164p.
11. AOUIZERATS B., 2010. *Impacts radiatifs des aérosols sur la dynamique en couche limite urbaine : Application à la campagne CAPITOUL*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Discipline ou spécialité : Physique et chimie de l'atmosphère, E. D. SDU2E, Unité de recherche : CNRM-GAME, 160p.

- 12.** *Application à l'étude des nuages, des aérosols et de leurs interactions*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, Spécialité : Science de l'environnement d'Ile-de-France, 148p.
- 13.** ASSAMOY A. Y. E-M., 2011. *Emissions anthropiques d'aérosols carbonés en Afrique en 2005 et en 2030 : élaboration d'inventaires et évaluation*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Discipline ou spécialité : Physique-Chimie de l'Atmosphère, Ecole doctorale : Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E), Unité de recherche : Laboratoire d'Aérodynamique (LA), 258p.
- 14.** AUBERT L., 2002. *Les maladies respiratoires chroniques obstructives chez le chat*, Thèse pour le Doctorat vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, 108p.
- 15.** AURIOL F. et al., 29 mai 2008. « *Polarimètre grand-champ Visible-Moyen Infrarouge pour la détection des aérosols atmosphériques* », Laboratoire d'Optique Atmosphérique, CNRS-Université de Lille 1, AEI, Toulouse, 20p.
- 16.** AYMOZ G., mars 2005. *Etude de la fraction carbonée de l'aérosol atmosphérique à Chamonix et St Jean de Maurienne : évolutions saisonnières, sources et caractéristiques chimiques*, Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier (Grenoble 1), Spécialité : Sciences de la Terre et de l'Univers, Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, UMR5183, Centre National de la Recherche Scientifique, 290p.
- 17.** AZONHE T., sept. 2015. « *Paramètres climatiques et infections respiratoires aiguës dans la ville de Parakou* », Revue de Géographie de l'Université de Ouagadougou, N°04, Vol. 1, pp : 61-73.
- 18.** BADUEL C., Janvier 2010. *Fraction organique de l'aérosol : quantification et caractéristique de la fraction HUMIC LIKE*, Thèse de Doctorat de l'université Joseph Fourier (Grenoble 1), Spécialité : Sciences de la Terre et de l'Univers, Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, UMR5183, Centre National de la Recherche Scientifique, 250p.
- 19.** BALME-DEBIONNE M., 2004. *Analyse du régime pluviométrique sahélien dans une perspective hydrologique et agronomique. Étude de l'impact de sa variabilité sur la culture du mil*, Thèse de Doctorat, Institut national Polytechnique de Grenoble, Spécialité : Océan, Atmosphère, Hydrologie, E. D. Terre, Univers, Environnement, 163p.
- 20.** BEGUE N., 2012. *Evolution des propriétés physico-chimiques des aérosols désertiques issus de l'outflow africain*, Thèse de Doctorat Université de LA REUNION, E. D. Sciences, technologie et santé, Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (LACy, UMR 8105), Discipline : Physique, Spécialité : Physique de l'Atmosphère, 255p.

21. BELLOUIN N., 2003. *Estimation de l'effet direct des aérosols à partir de la modélisation et de la télédétection passive*, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Spécialité : Lasers, Molécules, Rayonnement Atmosphérique, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, U.F.R de Physique Fondamentale, 188p.
22. BENAOUA D., 2014. *Simulation des émissions d'aérosols désertiques à l'échelle Régionale : Analyse climatologique des émissions du Nord de l'Afrique*, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Faculté de Génie Mécanique, Département de Génie Mécanique, Spécialité : Génie Mécanique, 160p.
23. BEN MOHAMED et al., *Spatial and temporal variations of atmospheric turbidity and related parameters in Niger*. J Appl Meteorol 1992 ; 31 : 1286-94.
24. BERGAMETTI G., « *Les aérosols atmosphériques* », Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA), UMR CNRS 7583 Universités Paris7-Paris12, Centre Multidisciplinaire de Créteil 61 avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil Cedex, France, 29p.
25. BERTHET S., 2010. *Développement d'un nouveau schéma de physique des nuages dans le modèle de méso-échelle MésoNH pour l'étude des interactions aérosol-nuage*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Discipline ou spécialité : Physique de l'Atmosphère, E. D. Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E), Unité de recherche : Laboratoire d'Aérodynamique, 227p.
26. BERTRAND J. (1976), « *Visibilité et brume sèche en Afrique* ». La météorologie ; 6 : 201-11.
27. BESSON L., 2009. *Processus physiques responsables de l'établissement et de la variabilité de la mousson africaine*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, E. D. Sciences de l'environnement de l'Ile-de-France, Spécialité Physique de L'atmosphère, 207p.
28. BEUCHER F., 2010. « *État moyen et cycle saisonnier en régions tropicales* », Chap. 4, in *Manuel de Météorologie tropicale*, Météo-France ©, pp.69-170.
29. BLAIVE B., 2008. *Rappels anatomiques et fonctionnels de la respiration*, Faculté de Médecine, Université Nice-Sophia Antipolis, 48p.
30. BLEUX C. et al., août 2012. *Risques biologiques*, Les cahiers de prévention Santé Sécurité Environnement, CNRS, 2ème édition, 80p.
31. BORIE A. L., 2006. *Pollution atmosphérique et sante : les sujets à risque en limousin, états des lieux des attentes locales pour une information plus ciblée*, thèse de doctorat en pharmacie, faculté de pharmacie, Université de Limoges, 204p.

- 32.** BOU KARAM D. 2008. Mécanismes de soulèvement d'aérosols désertiques en Afrique de l'Ouest, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, E.D. Sciences de l'Environnement en Ile de France, 311p.
- 33.** BOUCHER AND HAYWOOD, 2000. « *Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols : a review* » Reviews of Geophysics, 38, 4, pp : 513-543.
- 34.** BOUCHER O. : « *Impacts radiatifs direct et indirect des aérosols : Modélisation et mesures satellitaires* », Partie I, Cours IX : IMPACT, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Université de Lille I, Villeneuve d'Ascq, 12p.
- 35.** BOUMAHDY N., 2009. *Approche pluridisciplinaire de l'étude de l'activité biologique des particules fines*, thèse de doctorat, spécialité : génie des procédés, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, N° d'ordre 512 GP, 253p.
- 36.** BOUZID S., 2005, *Validation du modèle global GOCART de NASA et son apport à l'étude des variations mensuelles des phénomènes de sable sur le Sahara Algérie*, Mémoire de Master en Sciences et Technologies de l'Espace Option : Météorologie Spatiale et Climat Mondial, Centre Régional Africain des Sciences et Technologies de l'Espace en Langue Française (Affilié à L'ONU) Rabat-MAROC
- 37.** BRENGUIER J. L., « *Etude expérimentale des effets directs et indirects des aérosols sur le climat* » IANR, La Londe les Maures, 16-18 septembre 2001, 7p.
- 38.** BROCHOT C., 2012. *Filtration des nanoparticules ; Application aux appareils de protection respiratoire*, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Spécialité, Génie des Procèdes et des Produits, Ecole Doctorale Ressources, Procèdes, Produits et Environnement (RP2E - ED n°410), 180p.
- 39.** BUCHARD-MARCHANT V., juin 2009. *Caractérisation du contenu atmosphérique en ozone et en aérosols au moyen de mesures spectrales dans l'UV. Validation de l'instrument spatial OMI/AURA*, Thèse de Doctorat, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, U.F.R de Physique Fondamentale, Université Lille1-Sciences et Technologies, 59655 Villeneuve d'Ascq France, spécialité : Optique, Lasers, Physico-Chimie, Atmosphère, 209p.
- 40.** CAMREDON M., 2007. *Développement d'un modèle déterministe pour la formation des aérosols organiques secondaires : application à la sensibilité du système AOS/COV/NOx*, Thèse de Doctorat, Université Paris XII - Val de Marne, Spécialité : Sciences de l'Univers et de l'Environnement, Ecole doctorale Sciences et Ingénierie : Matériaux - Modélisation – Environnement, 132p.
- 41.** CANUT G., 2010. *Interaction mousson/Harmattan, échanges de petite échelle*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Discipline ou spécialité : Physique de l'atmosphère, Ecole

doctorale : Sciences de l'univers, de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E), Unité de recherche : Laboratoire d'Aérodologie, UMR-5560, Toulouse, France, 176p.

42. CAQUINEAU S., 1997. *Les sources des aérosols sahariens transportés au-dessus de l'Atlantique tropical nord : localisation et caractéristiques minéralogiques*, Thèse de Doctorat, Université Paris 12 Val-de-Marne, UFR de Sciences et Technologie, Spécialité : Chimie de la Pollution Atmosphérique, 205p.

43. CARBONNEL J. P. et HUBERT P., 1985. Sur la sécheresse au Sahel de l'Afrique de l'Ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso (ex Haute Volta). Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 301, série II, pp. 941-944.

44. CCE (2014), *Document-cadre sur les facteurs à prendre en considération dans la caractérisation de la vulnérabilité à la pollution de l'environnement en Amérique du Nord*, Commission de coopération environnementale, Montréal (Québec), Canada, 50 p.

45. CEI : 1997, NORME INTERNATIONALE, *Instrumentation pour la radioprotection- Etalonnage et contrôle de l'efficacité de la compensation radon des instruments de mesure des aérosols radioactifs émetteurs alpha et/ou bêta-Méthodes d'essais*, Première édition, 9p.

46. CHATELLIER D. et al., 2009. *Pneumopathies d'inhalation*, Service de réanimation médicale, CHU de Poitiers, 2, rue de la Milèterie, 86021 Poitiers cedex, France, Elsevier Masson SAS, pp : 328-333.

47. CHAUCHERIE X. et al., 2004. *Détermination de la granulométrie des aérosols dans les émissions diffuses d'ateliers sidérurgiques : PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ et PM_{0.1}*, ADEME-Rapport final RE 109/a, LECES, 13p.

48. CLAQUIN T., 1999. *Modélisation de la minéralogie et du forçage radiatif des poussières désertiques*, Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, Spécialité : Physique, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (UMR CEA-CNRS, Gif-sur-Yvette), Institut für Anorganische und Angewandte Chemie der Universität Hamburg, 148p.

49. COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE, 2013. *Pollution de l'air et santé : les maladies respiratoires et le coût pour le système de soin*, Le point sur, n° 176, 4p.

50. CRUMEYROLLE S., 2008, *Impact des systèmes convectifs sur les propriétés hygroscopiques des aérosols : Analyse de deux cas d'étude durant la campagne AMMA*. Thèse de Doctorat, Spécialité Physique de l'Atmosphère, Université de Toulouse III – PAUL SABATIER, École Doctorale « Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace », 250p.

51. CUESTA J. E., 2006, *Caractérisation des aérosols atmosphériques en Ile-de-France : Contribution locale et Transport à longues distances*, Thèse de Doctorat, Spécialités Télédétection Physique de l'atmosphère, Laboratoire de Météorologie Dynamique, Ecole Polytechnique, Institut Pierre-Simon Laplace, 222p.
52. DACOSTA H. et al., 2002. La variabilité spatio-temporelle des précipitations au Sénégal depuis un siècle, *FRIEND 2002-Regional Hydrolog*) : *Bridging the Gap between Research and Practice* (Proceedings of the Fourth International FRIEND, Conference held at Cape Town. South Africa. March 2002). IAHS Publ. no. 274, pp. 499-506.
53. D'ALMEIDA GA. A model for Saharan dust transport. *J Climate Appl Meteor* 1986 ; 25 : 903-16.
54. D'ARGOUGES O., 2009. *Mise en place d'une mesure rapide de la composition chimique de l'aérosol en zone urbaine : étude en mégapoles*, Thèse de Doctorat de l'Université de Paris VII-Denis Diderot, Spécialité : Chimie atmosphérique, 212p.
55. DAMAY P., Avril 2010. *Détermination expérimentale de la vitesse de dépôt sec des aérosols submicroniques en milieu naturel : Influence de la granulométrie, des paramètres micrométéorologiques et du couvert*, Thèse de Doctorat, Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville ISRN/IRSN-2010/134, Université de Rouen, Discipline : Physique, Spécialité : Energétique, 217p.
56. DAOUDA M. et al., 1998. Conséquences de la sécheresse sur la longueur et l'amplitude de la saison des pluies au Niger. In Demaree G., Alexandre J., De Dapper M. (eds.), *Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology*, Brussels, Royal Meteorological Institute of Belgium and Royal Academy of Overseas Sciences, pp. 497-506.
57. DE LONGUEVILLE F. et al., 2014. *Première évaluation des impacts des poussières désertiques sur la santé des enfants en Afrique de l'ouest : étude de cas dans le Bénin septentrional*, XXVII^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, pp : 536-542.
58. DEANDREIS C., 2008. *Impact des aérosols anthropiques sur le climat présent et futur*, Thèse de Doctorat, l'Université Pierre et Marie Curie, Spécialité : Science du Climat et de l'Environnement, EDSE, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, 150p.
59. DEBIA M. et al., 2012. *Caractérisation et contrôle de l'exposition professionnelle aux nanoparticules et particules ultrafines*, IRSST, RAPPORT R-746, 66p.
60. DEBRY E., Janvier 2010. *Modélisation des aérosols atmosphériques*, Notes de cours Master SGE-AQA, INERIS - Verneuil en Halatte, 40p.
61. DEPUYDT G., 2013. *Étude expérimentale in situ du potentiel de lessivage de l'aérosol atmosphérique par les précipitations*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Discipline ou

Spécialité : Océan, Atmosphère et surfaces continentales, E. D. Sciences de l'Univers de l'Environnement et de l'Espace (SUEE), Unité de recherche Groupe d'études de l'Atmosphère Météorologique-GAME (Toulouse, France), 163p.

62. DEROUBAIX A., 2013. *Impact des aérosols désertiques et du climat sur les épidémies de méningites au Sahel*, Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Spécialité : Sciences de l'environnement d'Ile-de-France, Mention : Physique de l'atmosphère, 222p.

63. DESBOEUF K. « *Chimie de l'aérosol atmosphérique* », Master SGE, UE Aérosols I: Physique et Chimie, Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques, 69p.

64. DIALLO et al., 1991, *Le point sur les observations quotidiennes des brumes sèches au Sénégal de 1984 à 1991*, Projet CEE (EQUESEN) TS 2 0198 F EDB, Fonds Documentaire ORSTOM, 24p.

65. DIEME D., 2011. *Caractérisation physicochimique et étude des effets toxiques sur des cellules pulmonaires BEAS-2B des polluants particulaires de la ville de Dakar (Sénégal)*, Thèse de Doctorat, Université du Littoral-Côte d'opale, Unité de Chimie Environnementale et Interactions sur le Vivant, Discipline : Toxicologie, 182p.

66. DIONE O., 1995. Déficit pluviométrique et variation de l'écoulement dans le Sahel occidental. *Revue de Géographie de Lyon*, 70 : 199-203.

67. DIOP M., 1996. A propos de la durée de la saison des pluies au Sénégal. *Sécheresse*, 7, pp.7-15.

68. DIOP ET AL., 1996. Variabilité des dates de début et de fin de l'hivernage au Sénégal (1950-1991). Publication de l'Association Internationale de Climatologie, 9, pp. 430-436.

69. DIOUF D., 2012. *Méthode mixte d'inversion neuro-variationnelle d'images de la couleur de l'océan. Application aux signaux SEAWIFS au large DE l'Afrique de l'Ouest*, Thèse de Doctorat, Université Paris 6, E. D. : Sciences de l'Environnement d'Ile de France (ED129), Spécialité : Télédétection et Méthodes Statistiques et Université Cheikh Anta Diop de Dakar, E. D. : Mathématiques, Informatique et Sciences Connexes Spécialité : Modélisation des Systèmes Complexes, 138p.

70. Dixon A. A., avril 2010. « *Abandonnés dans la poussière ; l'héritage radioactif d'AREVA dans les villes du désert nigérien* », Édition française : juin 2010, Greenpeace International, Ottho Heldringstraat 5, 1066 AZ Amsterdam, Pays-Bas, 64p.

71. DOMBROWSKI-ETCHEVERS I., décembre 2008. *Etude de l'aérosol atmosphérique en Europe : observations et modélisation en sites d'altitude*, Thèse de Doctorat de l'Université Toulouse III–Paul Sabatier, Discipline ou spécialité : Physique et Chimie de l'Atmosphère, Ecole

doctorale : Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace, Unité de recherche : CNRM/GAME, URA1357, 166p.

72. DOR F. et al., *Estimation de l'exposition des populations aux polluants présents à l'intérieur des habitations*, 79p.

73. DOUKPOLO B. 2007, *Variabilité et tendances pluviométriques dans le nord-ouest de la Centrafrique : enjeux environnementaux*, mémoire de DEA, Université d'Abomey-Calavi.

74. DOUMBIA E. H. T., 2012, *Caractérisation physico-chimique de la pollution atmosphérique urbaine en Afrique de l'Ouest et étude d'impact sur la santé*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Discipline ou spécialité : Physique et chimie de l'Atmosphère, Ecole doctorale : Science De l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E), Unité de recherche : Laboratoire d'Aérodologie, 242p.

75. DOUMONT D. LIBION F., 2006. *Impact sur la santé des différents polluants : quels effets à court, moyen et long terme ?* UCL- RESO Dossier technique 06-38, 46p.

76. Dr. CARILLO S., 2004. *HISTOLOGIE de l'appareil Respiratoire, Voies aériennes profondes L'appareil broncho-pulmonaire*, Module intégré 2 : Cardiologie et pneumologie, Faculté de Médecine Montpellier-Nîmes, 31p.

77. DRAME M. S. et al., novembre 2012. « *Simulation de l'impact des aérosols sur le rayonnement solaire à Mbour, Sénégal* », in *La Météorologie*, n° 79, pp. 51-57.

78. DRON J., juin 2008. *Analyse fonctionnelle par spectrométrie de masse tandem : Application aux aérosols organiques atmosphériques*, Thèse de doctorat de l'Université de Provence AIX-Marseille 1, Spécialité Biosciences de l'Environnement, Chimie, Santé, École doctorale de Sciences de l'Environnement, Laboratoire Chimie Provence, CNRS/UMR 6264, Équipe instrumentation et réactivité atmosphérique, 248p.

79. DUCE R.A. et al., Janvier 2009. « *Les impacts des dépôts atmosphériques dans l'océan sur les écosystèmes marins et le climat* », Bulletin de l'OMM 58 (1), pp.61-66.

80. DULAC F., septembre 2001. INDOEX : un exemple de programme intégré pour l'étude du système aérosols-nuages-rayonnement Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Ecole d'Été "interaction Aérosols-Nuages-Rayonnement"- La Londe Les Maures, conf. N°2, 79 Diapo.

81. DUPART Y., 2012. *Impact de la chimie des poussières minérales sur la photochimie atmosphérique*, Thèse de Doctorat, Université de Lyon, E. D. de Chimie, Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon (IRCELYON), 190p.

82. DUPUY R., 2003, *Étude de l'activation des noyaux de condensation mesure, analyse et développement instrumental*, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II (U.F.R. de recherche

scientifique et technique) École doctorale des sciences fondamentales, Spécialité : Physique de l'atmosphère), 209p.

83. EILSTEIN D., 2010. « *Pollution atmosphérique ; Exposition prolongée à la pollution atmosphérique et mortalité par pathologies respiratoires* », », Revue française d'allergologie n° 50, Elsevier Masson, pp : 51-61.

84. EL HADDAD I., 2011. *Fractions primaire et secondaire de l'aérosol organique : Méthodologies et application à un environnement urbain méditerranéen, Marseille*, Thèse de doctorat de l'Université de Provence, Laboratoire Chimie Provence, CNRS UMR 6264, Equipe Instrumentation et Réactivité Atmosphérique, Spécialité Chimie de l'Environnement et Santé, 397p.

85. ELGRABLI D., 2008. *Toxicité et clairance pulmonaires des nanotubes de carbone*, Thèse de Doctorat, Spécialité : Toxicologie, Université Paris 7- Denis Diderot, Ecole doctorale ABIES, 94p.

86. ENDLICHER W. et al., 2008. « *Variabilité spatio-temporelle de la concentration atmosphérique des particules à Berlin* », Climatologie, vol. 5, pp : 71-81.

87. ENGELSTAEDTER S., 2006., « *North African dust emissions and transport* », Earth-Science Reviews, n° 79, ELSEVIER, pp : 73-100.

88. ERPICUM M. et OZER P., 1999, « *Observation des litho météores pour le suivi de la désertification en Afrique de l'Ouest. Mise au point sur le recours aux observations synoptiques* », Association Internationale de Climatologie, vol 12, 10p.

89. FABRIES J-F. et WITSCHGER O., 2005. *Particules ultra-fines et santé au travail ; caractéristiques et effets potentiels sur la santé*, INRS-Hygiène et sécurité du travail-Cahiers de notes documentaires-2^e trimestre, n°199, pp : 21-35.

90. FALLY S. 2001, *Composition, propriétés et comportement des aérosols atmosphériques, des brouillards, des rosées et des pluies en région bruxelloise*, Thèse de doctorat, Sciences de la Terre et de l'Environnement, Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, 418p.

91. FAVEZ O. et al., Décembre 2010. *Métrologie des particules PM10 et PM2.5 : Caractérisation chimique des particules*, LCSQA, 34p.

92. FONTAN J. et SERVANT J., « *L'Aérosol atmosphérique* », Physique des Aérosols et Echanges Atmosphériques, E.R.A. n° 378, Centre de Physique Atomique, Université Paul-Sabatier, Toulouse, France, in *Journal de Physique, Colloque C8, supplément au n° 12, Tome 36, Décembre 1975, page C8-25*.

93. FONTAN J., 2004, *Les Pollutions de l'air, les connaître pour les combattre*, paris, vuibert nouvelle édition, 211p.

94. FORTI L. et al., (2006), *Les aérosols (PM2.5) en milieu urbain : Origine et quantification des contributions des différentes sources par une approche multi-isotopique (C, N, Pb, Sr)*, rapport fanal, BRGM/RP -XXXXX-FR, 125p.
95. GASSANI J. et al., 2005. *Premiers résultats des mesures des retombées au sol des aérosols désertiques durant la saison des pluies 2005 à Mâle (Mauritanie méridionale)*, *Geo-Eco-Trop*, 29 : 69-76, 10p.
96. GAUSSEN G.C., 1990. « *Les régions-sources de poussières au Sahara* » *Sécheresse*, n°2, pp : 134-141.
97. GAUSSEN G.C., 1991, *Les Poussières Sahariennes, cycle sédimentaire et place dans les environnements et paléoenvironnements désertiques*, Paris, John Libbey Eurotext, 485p.
98. GAUTIER F. et al., 1998. Variabilité du régime pluviométrique de l’Afrique de l’Ouest non sahélienne entre 1950 et 1989. *Hydrological Sciences Journal*, 43, pp. 921-935.
99. GAYE D., 2013. Étude de l’évolution du climat à Saint-Louis ; analyse de la variabilité des aérosols : le cas des brumes sèches, Mémoire de Master, U.G.B, section de Géographie, option : Ecosystème et Environnement, 198 p.
100. GELLON S. et al., 2004. *Évaluation et gestion des risques liés aux poussières agricoles*, ENSP Rennes, formation d’ingénieur du génie sanitaire, atelier santé-environnement, 57p.
101. GENEROSO S., 2004. *Étude des interactions entre aérosols et climat : assimilation des observations spatiales de POLDER dans LMDz-INCA*, Thèse de doctorat, Université Paris VII, Spécialité : Méthodes Physiques en Télédétection, Laboratoire des Sciences du Climat et de l’Environnement (LSCE/IPSL, CEA-CNRS), 165p.
102. GERARD B., 2003. *Caractérisation des aérosols au cours de la campagne SHADE*, Rapport de DEA, Université des Sciences et Technologies de Lille, DEA Lasers, molécules et rayonnement atmosphérique, Laboratoire d’Optique Atmosphérique, 36p.
103. GOULAOUIC S., 2009. *Effet des particules fines atmosphériques sur la sécrétion des cytokines pro-inflammatoires par les cellules thp-1 et mesures de marqueurs du stress oxydant*, thèse de doctorat, discipline : Toxicologie de l’environnement, Université Paul Verlaine de Metz, Ecole doctorale ressources procédés produits environnement Laboratoire des Interactions Ecotoxicologue, Biodiversité, Ecosystème CNRS UMR 7146, 169p.
104. GRANADOS D. et al., *Exploration de la différence de sensibilité à la pollution atmosphérique chez les hommes et les femmes. Hospitalisations pour causes respiratoires, Paris et proche couronne, 2000-2003*, Erpurs, Observatoire régional de santé d’Île-de-France, 66p.
105. GRIFFIN D. et al., JUILLET 2003 « *La mondialisation des poussières* », in *Pour la Science-Climatologie*, N° 309, pp.78-85.

- 106.** GUILLAUME B., 2006. *Les aérosols : émissions, formation d'aérosols organiques secondaires, transport longue distance. Zoom sur les aérosols carbonés en Europe*, Thèse de Doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier, Spécialité : Océan, Atmosphère et Environnement, Discipline : Physique et Chimie de l'Atmosphère, Laboratoire d'Aérodynamique, 288p.
- 107.** GUILLAUMIE K. et al., année universitaire 2004-2005, *La sécheresse au Sahel, un exemple de changement climatique*, Atelier Changement Climatique ENPC-Département VET, 40p.
- 108.** GUYON A. et al., 2008. « *Effets nocifs de l'exposition à la pollution de l'air à court terme sur la santé cardiovasculaire : mesures de protection des populations à risque* », Revues systématiques en santé environnementale, Centre de collaboration nationale en santé environnementale Centre de contrôle des maladies de la Colombie-Britannique, Vancouver, Canada, 25p.
- 109.** HASSANE B. et al., 2014. « *Variabilité de la dynamique éolienne au Sahel : caractéristiques des vents et de la visibilité horizontale entre 1950 et 1989 à Maïné-Soroa (Niger Oriental)* », CIFEG, Volume spécial : Géosciences & Développement, n° 47/48, pp : 19-27.
- 110.** HAUTIERE N., 2005. *Détection des conditions de visibilité et estimation de la distance de visibilité par vision embarquée*, Thèse de Doctorat, Université Jean Monnet de Saint-Etienne, Faculté des Sciences, Spécialité : Image, 188p.
- 111.** HEIMANN H., M. D., « *Les effets de la pollution de l'air sur la santé de l'homme* », 62p.
- 112.** HERVO M., 2013. *Étude des propriétés optiques et radiatives des aérosols en atmosphère réelle : Impact de l'hygroscopicité*, Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont Ferrand, Ecole Doctorale des Sciences Fondamentales, Mention Physique de l'atmosphère, 170p.
- 113.** HODZIC A., 2005. *Modélisation des aérosols de pollution en Ile-de-France*, Thèse de Doctorat de l'École Polytechnique, Spécialité : Physique et Chimie de l'Atmosphère, Institut Pierre-Simon Laplace (Laboratoire de Météorologie Dynamique, École Polytechnique), 273p.
- 114.** IBASETA N., 2007. *Etude expérimentale et modélisation de l'émission d'aérosols ultrafins lors du déversement de poudres nanostructures*, thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, École doctorale : Mécanique Energétique Génie Civil et Procédés, Spécialité : Génie des Procédés et de l'Environnement, 188p.
- 115.** INERIS, 11/05/2004 « *Exposition par inhalation aux aérosols. Principes et méthodes de mesures* », Rapport d'étude, N°INERIS-DRC-04-56770-AIRE-n°0401-OBI, 39p.

- 116.** INERIS, 2004. *Exposition par inhalation au benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes (BTEX) dans l'air : Sources, mesures et concentrations*, Rapport d'étude, N°INERIS-DRC-04-56770-AIRE-n°1056-IZd, 29p.
- 117.** INERIS, 2009. *La pollution particulaire, comprendre, prévenir, agir*, Le magazine, n°23, pp :5-11.
- 118.** INERIS, 23 juin 2009. « *Les interactions entre pollution atmosphérique et changement climatique* », 13p.
- 119.** INSTITUT DE VEILLE SANITAIRE, « *Bronchite chronique : prévalence et impact sur la vie quotidienne - Analyse des données de l'enquête santé Insee 2002-2003* » Maladies chroniques et traumatismes, 40p.
- 120.** INSTITUT DE VEILLE SANITAIRE, « *Note de synthèse relative à la problématique des vents de sable en provenance des déserts* » 16p.
- 121.** IRSN 2009-Portail de la surveillance de la radioactivité de l'environnement, *Surveillance radiologique de l'environnement : la surveillance des aérosols*, 10p.
- 122.** JINGMEI Y., 2005. *Erosion éolienne à Kerguelen et transfert atmosphérique au milieu marin*, Rapport de stage, Université de Paris VII Master AQA Recherche II Atmosphère et Qualité de l'Air, Stage effectué au LISA-Créteil (Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques), 25p.
- 123.** JOSSET D., 2009. *Etude du couplage radar-lidar sur plates-formes spatiales et aéroportées*.
- 124.** JOURNET E., 2008. *Étude du facteur minéralogique sur la solubilité et la spéciation redox du fer dissous dans le contexte biogéochimique du dépôt atmosphérique des aérosols désertiques sahélo-sahariens*, Thèse de Doctorat, Université Paris Diderot, École Doctorale des Sciences de l'Environnement d'Ile de France, Spécialité : Chimie de la pollution atmosphérique et physique de l'environnement, 259p.
- 125.** KACENELENOGEN M., Du 01/ 03/ 2004 au 30/ 06/ 2004. *Application de la télédétection spatiale pour la surveillance de la pollution de l'atmosphère en aérosols*, rapport de stage réalisé dans le cadre du D.E.A de Méthodes Physiques en Télédétection, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), Laboratoire d'Optique Atmosphérique, UMR CNRS 8518, Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve d'Ascq, 31p.
- 126.** KACENELENOGEN-TILOT M., Avril 2008. *Application de la télédétection spatiale à la surveillance de la pollution en aérosols*, Thèse de doctorat, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, U.F.R de Physique Fondamentale, Université des Sciences et Technologies de

Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq France, 181p. Spécialité : Lasers, Molécules, Rayonnement Atmosphérique, 181p.

127. KASPARIAN J., 1997. *Étude de spectroscopie linéaire et non-linéaire d'aérosols atmosphériques*, Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard-Lyon I, 137p.

128. KAVOURAS I., 2013. « *Estimations de la relation entre la pollution de l'air et l'espérance de vie ou la mortalité* », Milieux, 5p.

129. KHELLAF, Avril 2003. *Infections Respiratoires*, Service de Médecine Interne CHU Mondor, 26p.

130. KOCHA C., 2011. *Interactions entre poussières désertiques et convection profonde en Afrique de l'Ouest : observation et modélisation à échelle convective*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Ecole doctorale : S.D.U.2, Unité de recherche : CNRM-GAME (URA 1357) CNRS/Météo-France, 204p.

131. KUMMER J. *Caractérisation des aérosols atmosphériques : aspects qualitatifs, quantitatifs et évaluation des risques environnement et santé*, Exposé, Ecole de Santé Publique –IGEAT ULB, 46p.

132. L.O.A., *Projet du laboratoire 2010-2013*, UMR 8518 LILLE1-CNRS, 41p.

133. L'ACROLEINE, Avr. 2013. *Proposition de valeurs guides de qualité d'air intérieur*, Avis de l'Anses, Rapport d'expertise collective, Edition scientifique, 174p.

134. LACRESSONNIERE G., 2012. *Etude par modélisation numérique de la qualité de l'air en Europe dans les climats actuel et futur*, Thèse de Doctorat, l'Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), Discipline ou spécialité : Océan, Atmosphère et Surfaces continentales, 125p.

135. LAFON S., *Les oxydes de fer dans l'aérosol désertique en relation avec ses propriétés optiques : caractérisations physico-chimiques de poussières minérales générées en soufflerie*, Thèse de Doctorat, Université Paris 12 Val-De-Marne, U.F.R. de Sciences et Technologie, Spécialité : physique dynamique et géochimie de l'atmosphère, 317p.

136. LAFONTAINE S., décembre 2009. *Nanoparticules et Toxicologie pulmonaire : une évaluation en 2009*, Thèse de Doctorat, Université HENRI POINCARÉ-NANCY 1, Faculté de Pharmacie, 188p.

137. LAÏD Y. et al., 2006. « *Impact sanitaire de la pollution de l'air par les PM10 dans une ville du sud : le cas d'Alger* », in The International Journal of Tuberculosis and Lung Disease, 5p.

138. LAJ P., « *Mesures in-situ sur les nuages et les aérosols* », Laboratoire de Météorologie Physique, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand 24, av. des Landais 63177 Aubière Cedex, CNES école d'été Aérosol Nuage-Radiation, 23p.

- 139.** LASSERRE F., 2006. *Modélisation du cycle d'aérosols naturels et anthropiques en Asie orientale*, Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, U.F.R. Sciences et Technologies, E. D. des Sciences Fondamentales, Laboratoire de Météorologie Physique, 258p.
- 140.** LAST J. et al., 1999, *Les effets de la pollution atmosphérique et des changements climatiques sur la santé*, climat de changement, David Suzuki Foundation, 55p.
- 141.** LE BORGNE J., Avril 1988. *La pluviométrie au Sénégal et en Gambie*, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Département de Géographie, Laboratoire de Climatologie, 96p.
- 142.** LEFRANC A., sept. 2007. « *Comment un polluant inhalé peut-il agir sur le système cardiovasculaire... et quel peut être l'apport de l'épidémiologie pour répondre à cette question ?* » Pollution atmosphérique n° 194, Extrapol n° 32, pp : 3-6.
- 143.** LEMAÎTRE C., *Détermination du chauffage radiatif des aérosols désertiques au-dessus de l'Afrique de l'Ouest et de leur impact sur la dynamique atmosphérique à l'aide d'observations satellitaires au cours de la campagne AMMA*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, E.D. Sciences de l'Environnement en Ile de France (EDSE), UFR des Sciences de l'Environnement, Spécialité : Science de l'Environnement, 235p.
- 144.** LEROUX M., 1996, *La dynamique du temps et du climat*, Paris, Dunod, 367p.
- 145.** LETERTRE-DANCZAK J., février 2012. *Caractérisation des aérosols au-dessus des océans à partir des capteurs spatiaux de l'A-TRAIN*, Thèse de Doctorat, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, U.F.R de Physique Fondamentale, Université Lille1-Sciences et Technologies, 59655 Villeneuve d'Ascq France, spécialité : Optique, Lasers, Physico-Chimie, Atmosphère, 180p.
- 146.** LOUEDEC K., 2011. *Les aérosols atmosphériques à l'Observatoire Pierre Auger : caractérisation et effet sur l'estimation de l'énergie des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie*, Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud 11 Ecole Doctorale : Particules, Noyaux, cosmos, E.D. 517, Laboratoire de l'accélérateur linéaire, Discipline : astroparticules, 299p.
- 147.** LOUVET S., 2008. *Modulations intrasaisonniers de la mousson d'Afrique de l'Ouest et impacts sur les vecteurs du paludisme à Ndiop (Sénégal) : diagnostics et prévisibilité*, Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, École Doctorale « Environnement, Santé/STIC », Discipline Géographie-Option Climatologie, Centre de Recherches de Climatologie-UMR 5210 CNRS/UB, 253p.
- 148.** MADELAINE G. J., 1975, « *Formation et évolution de l'aérosol atmosphérique* », in *Journal de Physique*, Colloque Cg, supplément au n°12, Tome 36, Décembre 1975, page C8-1.

- 149.** MAENHAUT W. et al., Sources, caractéristiques physico-chimiques et forçage climatique des aérosols atmosphériques, Synthèse du rapport scientifique intégré final Pour la période de 4 ans, du 1/12/1996 au 30/11/2000, Accords d'étude n° CG/DD/03A, CG/DD/03B et CG/DD/03C, 7p.
- 150.** MALAVELLE F., 2011. *Effets direct et semi-direct des aérosols en Afrique de l'ouest pendant la saison sèche*. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), Discipline ou Spécialité : Physique de l'Atmosphère, E.D. Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E), Unité de Recherche : Laboratoire d'Aérodologie UMR 5560, 205p.
- 151.** MARANO F. et al., « *Impacts des particules atmosphériques sur la santé : aspects toxicologiques* », Synthèse, in *Environnement, Risques et santé*, vol. 3, n°2, Mars-Avril, pp.87-96
- 152.** MARANO F. et al., 2004. « *Impacts des particules atmosphériques sur la santé : aspects toxicologiques* », *Environnement, Risques et Santé*, vol. 3, n°2, pp : 87-96.
- 153.** MARANO F. nov. 2012. « *Mécanismes d'action des particules atmosphériques fines et ultrafines* », dans *Pollution atmosphérique*, numéro spécial, 4p.
- 154.** MARANO F., 2008. *Les problèmes posés par l'évaluation des risques des nanoparticules sur la santé*, adsp n° 64, 3p.
- 155.** MARTINY N. et al., 2015. « Définition d'un événement de poussières désertiques au sahel : apport de nouvelles mesures de Pm₁₀ au Burkina Faso », XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015, 6p.
- 156.** MASCLLET P., 1998. *L'aérosol atmosphérique. Analyse de la composante organique*, Laboratoire TEPE (Transferts et Effets des Polluants dans l'Environnement), Équipe LESAM (Études des Systèmes Atmosphériques Multiphasiques), ESIGEC-Université de Savoie, 73376 Le Bourget du Lac, France, ANALUSIS MAGAZINE, 26, N° 9, 5p.
- 157.** MAURICE G. et LEFEBVRE E., 2008. *Nanoparticules : santé et environnement. Etude bibliographique*, rapport, Ecole des Mines de Douai, 56p.
- 158.** MENEGOZ M., 2009, *Modélisation globale des interactions atmosphère-aérosols*, Thèse de Doctorat, spécialité : Physique et Chimie de l'Atmosphère, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 198p.
- 159.** MICHAUD V., décembre 2009. *Etude des propriétés hygroscopiques des aérosols atmosphériques*, Thèse de Doctorat, Université BLAISE PASCAL, U.F.R. de Recherche Scientifique et Technique, Ecole doctorale des Sciences Fondamentales, (Spécialité Physique et Chimie de l'Atmosphère), N° 627, 305p.

- 160.** MINVIELLE-MONCLA F., 2003, *Aspects physiques et radiatifs du cycle atmosphérique des aérosols : étude numérique sur l'Océan Indien (expérience INDOEX)*, Thèse de Doctorat, Spécialité : Physique de l'Atmosphère, École doctorale des sciences fondamentales, U.F.R. de Recherche Scientifique et Technique, Université Blaise PASCAL, N° 392, 162p.
- 161.** MISHCHENKO M., « *Optical properties of aerosols and clouds (UV TO IR)* », Goddard Institute for Space Studies, 2880 Broadway, New York, NY 10025, USA, 14p.
- 162.** MOKHTARI M., 2012, *Amélioration de la prise en compte des aérosols terrigènes dans les modèles atmosphériques à moyenne échelle*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Discipline ou spécialité : Océan Atmosphère, E.D. : Sciences de l'Univers de l'Environnement et de l'Espace, Unité de recherche : CNRM-GAME U.R.A 1357, 185p.
- 163.** MONCELLY L. et al., 2010. « *Les exacerbations aiguës de BPCO chez la femme : étude EABPCO-CPHG du Collège des pneumologues des hôpitaux généraux* », Revue de Pneumologie clinique (2010) n° 66, Elsevier Masson SAS, pp : 107-119.
- 164.** MOREL R., 1998. « Début de la sécheresse en Afrique de l'Ouest », in Demaree G., Alexandre J., De Dapper M. (eds.), *Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology*, Brussels, Royal Meteorological Institute of Belgium and Royal Academy of Overseas Sciences, pp. 200-211.
- 165.** MORELIERE M., 2014. *Étude de la prescription d'antibiotiques par les médecins généralistes français dans les angines, les bronchites aiguës, les états fébriles et les rhinopharyngites, de 2000 à 2009*, Thèse Pour le Diplôme d'Etat de Docteur en Médecine, DES de Médecine Générale, académie de Versailles, université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, UFR des sciences de la sante Paris-Ile-de-France-Ouest, 194p.
- 166.** MOTZKUS C. 2007. *Etude de la mise en suspension de particules lors de l'impact de gouttes*, Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences de Creteil, UFR des Sciences et de Technologie Université Paris XII-Val de Marne, Discipline : Sciences de l'Univers et de l'Environnement, Spécialité : Physique des aérosols, 252p.
- 167.** MOURET G., 2008. *Etude de la filtration des aérosols nanométriques*, Thèse de Doctorat, INPL, Spécialité : Génie des Procédés et des Produits, Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, UPR CNRS, Institut National de Recherche et de Sécurité, Département Ingénierie des Procédés, 203p.
- 168.** NABAT P., 2014. *Interactions aérosols-rayonnement-nuages et variabilité climatique en méditerranée-approche par la modélisation régionale couplée*, Thèse de Doctorat, L'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse) Discipline ou spécialité : Océan, Atmosphère et surfaces continentales, 137p.

- 169.** NAKES M. T. et al., « *Téledétection de l'aérosol désertique, Indice de poussière IDDI* », 4p.
- 170.** NDONG J. B. et DIONE O., 1994. Dynamique de la sécheresse en Afrique soudano-sahélienne : cas du Sénégal. Publication de l'Association Internationale de Climatologie, 7, pp. 415-420.
- 171.** NERISSON P., 2009. *Modélisation du transfert des aérosols dans un local ventilé*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Discipline ou spécialité : Dynamique des Fluides Ecole doctorale : Mécanique, Energétique, Génie civil et Procédés (MEGeP), Unité de recherche : Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, 288p.
- 172.** NICOLAS J. P., 1959, *Bioclimatologie humaine de Saint-Louis (Essai de Méthodologie bioclimatologique)*, Mémoire de l'Institut Française d'Afrique Noire (IFAN)-Dakar, N°57, 340p.
- 173.** NOBILEAU D., 2005. *Caractérisation, détection et quantification des aérosols désertiques à partir des observations satellitaires de la couleur de l'océan*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI (spécialité Méthodes Physiques en Télédétection), Laboratoire d'Océanographie de Villefranche sur Mer (LOV), 286p.
- 174.** NOUACEUR Z., 2001, « *L'évolution des lithométéores en Mauritanie confirme une plus grande efficacité de l'action éolienne* », Revue européenne de géographie-Nature, paysage et environnement, n°203, 13p.
- 175.** NOUACEUR Z., 2008, « *Apport des images satellite dans le suivi des nuages de poussières en zones saharienne et sub-saharienne* » Revue Télédétection, vol. 8, n° 1, p : 5-15.
- 176.** NOUACEUR Z., Juin 2002, « *Les lithométéores : des types de temps caractéristiques des régions arides et semi-arides* », Université de Rouen, Laboratoires d'études du développement des régions arides, Science et changements planétaires/Sécheresse. Volume 13, Numéro 2, Notes méthodologiques, pp 87-93,
- 177.** NOUCEUR Z., 2004-2005. « *Les vents de sable en Afrique saharienne et subsaharienne* », The Annals of Valahia University of Târgoviște, Geographical Series, Tome 4-5, pp : 108-118.
- 178.** N'TCHAYI MBOUROU G., juillet 1992, *Les aérosols sahariennes et sahéliennes en Afrique au Nord de l'Equateur : Répartition spatiale et temporelle, influence de la pluviosité sur l'évolution*, Thèse de Doctorat 3ème Cycle, Option : Physique, Spécialité : Géophysique externe, l'Université Nationale de Côte d'Ivoire, N° d'ordre :172, 124p.
- 179.** OBERSON-GENESTE D., 2003. « *Les particules ultrafines : qui sont-elles, ou sont-elles et que font-elles ?* in poussières minérales et santé, bulletin d'information documentaire adressé aux professionnels des poussières minérales et de la santé, n° 6, INERIS, 6p.
- 180.** OFEFP, 2005. *Poussières fines : un fléau*, Editorial, Berne, 16p.

- 181.** OLIVA P., et al., 1985 « *Etude de la dynamique de quelques lithométéores sahariens par télédétection spatiale* », In : Méditerranée, troisième série, tome 54, Télédétection III. pp. 21-52.
- 182.** ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE (OMS), (2002). *Children's health and environment : A review of evidence* [en ligne]. Disponible sur <http://www.euro.who.int/document/e75518.pdf>.
- 183.** ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE, 1983. *Estimation de l'exposition de l'homme aux polluants atmosphérique*, Genève, publication Offset, n° 69, 70p.
- 184.** ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE, 2006. *Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air : particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre : Synthèse de l'évaluation des risques*, WHO/SDE/PHE/OEH/06.02, 25p.
- 185.** Organisation Mondiale de la Santé-Série des rapports techniques « *Exposition à certaines poussières minérales (silice, carbone) : limites recommandées d'exposition professionnelles à visée sanitaire* », Rapport d'un Groupe d'étude de l'OMS, Genève, 6-12 mars 1984, n° 734, 102p.
- 186.** OSTIGUY C. et al., avril 2008. *Les effets sur la santé reliés aux nanoparticules*, IRSST/Université de Montréal, RAPPORT R-558, 2e édition, 120p.
- 187.** OZER P., « *Utilisation de la visibilité horizontale pour l'estimation de la qualité de l'air à Niamey (Niger)* », Bulletin de la Société géographique de Liège, 44, 2004, 105-114, 10p.
- 188.** OZER P., 2001. *Les Lithométéores en région sahélienne, un indicateur climatique de la désertification*, GEO-ECO-TROP, Revue internationale d'Ecologie et de Géographie tropicales, vol. 24, 327p.
- 189.** OZER P., 2005. « *Estimation de la pollution particulaire naturelle de l'air en 2003 à Niamey (Niger) à partir de données de visibilité horizontale* », Environnement, Risques & Santé. Vol. 4, N°1, pp : 43-49.
- 190.** PAIRON J-C., 2016. *Pneumoconioses Pathologies liées à l'amiante*, Unité de pathologie professionnelle, CHI Créteil, Université Paris-Est Créteil, 107p.
- 191.** PANCRATI O., 2003, *Télédétection de l'aérosol désertique depuis le sol par radiométrie infrarouge thermique multibande*, Thèse de Doctorat, Discipline Lasers, Molécules, rayonnement Atmosphérique, U.F.R. Physique Fondamentale, Université des Sciences et Technologies de Lille, 181p.
- 192.** PATUREL J. E. et al., 1998. Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. Hydrological Sciences journal, 43, pp. 937-946.

- 193.** PAYEN J., décembre 2009. Etude et développement de structures fibreuses nontissées dédiées à la filtration de particules fines dans l'air, Thèse de Doctorat, Université de valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Laboratoire du Génie des Matériaux Textiles, 257p.
- 194.** PELON J., Août 2001. « *Méthodes de mesure des caractéristiques des nuages et aérosols : une Introduction à l'Analyse des Propriétés Radiatives et Dynamiques des Nuages et des Aérosols par Télédétection Active* », Service d'Aéronomie du CNRS, Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS, Institut Pierre Simon Laplace, Support de cours (Résumé), 10p.
- 195.** PENIDE G., 2010. *Mise en place de simulateurs d'instruments de télédétection dans un modèle méso-échelle (BRAMS) : Application à l'étude d'un système convectif observé pendant la campagne AMMA*, Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, U.F.R. Sciences et Technologies, E. D. des Sciences fondamentales, Spécialité : Physique de l'Atmosphère, 208p.
- 196.** PERE J-C., 2010. *Simulation de l'impact climatique des aérosols en Europe*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Discipline ou Spécialité : Physique et Chimie de l'Atmosphère, E.D. Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E), Unité de Recherche : Laboratoire d'Aéologie & Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 178p.
- 197.** PERNELET-JOLY V., Septembre 2008. *La composition chimique des particules atmosphériques : quels composants participent à la nocivité des particules ?* Editorial Extrapol n° 35, Pollution atmosphérique n° 198-199, pp : 5-9.
- 198.** PETROFF A., 2005. *Étude mécaniste du dépôt sec d'aérosols sur les couverts végétaux*, Thèse de Doctorat, Université Aix-Marseille II, Spécialité : Mécanique, option : Mécanique des fluides, 233p.
- 199.** PETTITT, A. N. (1979) : A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.* 28(2), 126-135.
- 200.** PEYRIDIEU S., 2010. *Établissement d'une climatologie des propriétés des aérosols de poussières à partir d'observations hyperspectrales dans l'infrarouge. Application aux instruments AIRS et IASI*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, UFR Terre, Environnement, Biodiversité, E.D. des Sciences de l'Environnement d'Ile de France, Spécialité : Méthodes Physiques en Télédétection, 240p.
- 201.** PEYRILLE P., 2005. *Étude idéalisée de la mousson ouest-africaine à partir d'un modèle numérique bi-dimensionnel*, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, Discipline : Physique de l'Atmosphère, 218p.
- 202.** PIECHOWSKI J. et MENOUX B., 1984. *Rétention et excrétion des radionucléides après incorporation par inhalation chez l'homme adulte*, Institut de protection et de sureté nucléaire

département de protection sanitaire, Centre d'Etudes Nucléaires de Fontenay-aux-Roses Rapport CEA-R-5266, 216p.

203. PIERANGELO C., septembre 2005. *Apports du sondage infrarouge à l'étude des aérosols atmosphériques ; application aux instruments HIRS et AIRS : caractérisation des aérosols en épaisseur optique, en altitude et en taille*, Thèse de Doctorat, Laboratoire de Météorologie Dynamique-IPSL/CNRS (Ecole Polytechnique, Palaiseau), Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, Spécialité : Méthodes Physiques en Télédétection, 282p.

204. PIERRE C., 2010. *Variabilité interannuelle des émissions d'aérosols minéraux en zone semi-aride sahélienne*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Ecole Doctorale des Sciences de l'Environnement d'Ile de France, Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques, Institut Pierre-Simon Laplace, 214p.

205. PISON C., 2002. *Broncho-pneumopathie chronique obstructive (227)*, Corpus Médical-Faculté de Médecine de Grenoble, 25p.

206. PLANETE VIABLE, 2012. « *Aérosols atmosphériques et changements climatiques* », <http://planeteviable.org/> *Les résultats de la recherche en science du développement durable*, 7p.

207. Programme "GLOBAL CHANGE" ET DÉVELOPPEMENT DURABLE, *Sources, caractéristiques physico-chimiques et forçage climatique des aérosols atmosphériques*, Synthèse du rapport scientifique intégré final Pour la période de 4 ans, du 1/12/1996 au 30/11/2000, Accords d'étude n° CG/DD/03A, CG/DD/03B et CG/DD/03C, 7p.

208. Programme de Recherche Interorganisme pour une Meilleure Qualité de l'Air à l'Echelle Local « *Qualité de l'air et particules ; impacts sur l'environnement et santé. Que préconiser pour demain ?* » 8p.

209. PROUVOST H. et Declercq C., 2007. *Effets des particules en suspension sur la santé respiratoire des enfants ; Intérêt et faisabilité de l'étude d'un panel d'enfants lillois*, Rapport, L'ORS Nord-Pas-de-Calais, Conseil Régional Nord - Pas-de-Calais, 42p.

210. RAJOT J. L. et al., « *Le cycle des aérosols terrigènes au Sahel : ce qu'AMMA nous a appris* », Spécial AMMA-octobre 2012, in *La Météorologie*, pp.33-40.

211. RAJOT J. L. et al., « *Les poussières terrigènes au Sahel-un marqueur climatique ou anthropique ?* », 8p.

212. RANGOGNIO J., *Impact des aérosols sur le cycle de vie du brouillard. De l'observation à la modélisation*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, U.F.R. Physique, Chimie et Applications. Sciences de la Planète et de l'Univers, Discipline : Physique de l'Atmosphère, 252p.

- 213.** REDELSPERGER J-L., Août 2006. « *Amma, une étude multidisciplinaires de la Mousson Africaine* », in *La Météorologie*, n°54, pp.22-32.
- 214.** REE 2008 : Atelier disciplinaire « Calisph'air : l'espace au service de l'étude de l'atmosphère », 31p.
- 215.** RICARD V., 2001. *Aérosols dans l'Arctique européen : sources, transformations et propriétés optiques*, Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble I, Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement – CNRS, 358p.
- 216.** RICHARD-MAZET A., 2005. *Etude écotoxicologique et environnementale de la rivière Drôme : application à la survie de la loutre*, Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble I-France, École Doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition, l'Environnement, Spécialité : Toxicologie de l'environnement, 238p.
- 217.** RIMETZ-PLANCHON J., *Les aérosols de pollution en zone urbaine et industrielle sous influence marine. Physico-chimie des particules*, Thèse de Doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, Discipline : Structure et Dynamique des Systèmes réactifs, Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman (LISIR), 284p.
- 218.** RIVA G. et al., 2010. *Pollution de l'air et santé : il s'agit avant tout d'un problème de particules en suspension*, Les dossiers, UPMC Science et politiques publiques, Diplôme d'Université Science et politiques publiques, 38p.
- 219.** RIVA M., 2013. *Caractérisation d'une nouvelle voie de formation des aérosols organiques secondaires (AOS) dans l'atmosphère : Rôle des précurseurs polyaromatiques*, Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, É.D. des Sciences Chimiques, Spécialité : Chimie Analytique et Environnement, 418p.
- 220.** RODA C., 2012. *Exposition domestique à des polluants chimiques de l'air intérieur : modélisation et évaluation de l'impact sur la santé respiratoire chez le jeune enfant*, thèse de doctorat, Université Paris Descartes, Spécialité : Santé Publique, UFR des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques, École Doctorale 420, 344p.
- 221.** Rouspard P., 2013. *Étude phénoménologique du dépôt sec d'aérosols en milieu urbaine. Influence des propriétés des surfaces, de la turbulence et des conditions météorologiques*, Thèse Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, Discipline : Physique, E. D. Sciences Physiques, Mathématiques et de l'Information pour l'Ingénieur (SPMII), Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville, 234p.
- 222.** RYLANDER R. et SCHILLING R. S. F., « *Les maladies provoquées par les poussières organiques* » [en ligne].

- 223.** SAGNA P., 1994. « *L'évolution de la mousson et des précipitations au Sénégal de 1974 à 1993* », Publication de l'Association Internationale de Climatologie, 7, pp. 311-317.
- 224.** SAGNA P., 1995. « *L'évolution pluviométrique récente de la Grande-Côte du Sénégal et de l'archipel du Cap-Vert* », In Revue de géographie de Lyon. Vol. 70 n°3-4, Sahel, la grande sécheresse. pp. 187-192.
- 225.** SANDU I., 2007. *Impact de l'aérosol sur le cycle de vie des nuages de couche limite*, Thèse de Doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier, U.F.R. PCA, Discipline : Physique de l'Atmosphère, 178p.
- 226.** SANTE CANADA, 2013. *Évaluation scientifique canadienne du smog : Effets sur la santé*, vol. 2, Cat. : En88-5/2-2013F-PDF, ISBN : 978-0-660-21045-2, Pub. : 130108, 656p.
- 227.** SARRACANIE M., 2011. *Imagerie quantitative du dépôt d'aérosols dans les voies aériennes par résonance magnétique de l'hélium-3 hyperpolarisé*, Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud Spécialité : Physique, Faculté des sciences d'Orsay, 231p.
- 228.** SELLEGRI K., 2002. *Étude du processus d'activation des particules d'aérosol en gouttelettes de nuage : implications en chimie multiphases*, Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Science et Géographie, Laboratoire de Météorologie physique, Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, 229p.
- 229.** SIGG L. et al., 1994. « *Chimie des milieux aquatiques* », © Dunod, Paris, 2000, 2006, 2014, 5^e édition, 30p.
- 230.** SIMON-DECKERS A., 2008. *Effets biologiques de nanoparticules manufacturées : influence de leurs caractéristiques*, Thèse de Doctorat, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech), Spécialité : Toxicologie humaine et environnementale, 282p.
- 231.** STEPHAN Y.-R., 2013. *Qualité de l'air dans les couvoirs : quels impacts sur la santé des salariés ?*, Thèse de doctorat en Médecine, diplôme d'Etat, faculté de Médecine, Université de Brest-Bretagne Occidentale, 60p.
- 232.** TAHIRI A., et al., « *Forçage radiatif dû à l'aérosol atmosphérique observé à Oujda en 2011* », 16^{èmes} Journées Internationales de Thermique (JITH 2013) Marrakech (Maroc), du 13 au 15 Novembre 2013, 5p.
- 233.** TANRÉ D., *Methods of measurements of clouds and aerosols: Part I: Passive remote sensing*, L.O.A., U.S.T. de Lille 59655-Villeneuve d'Ascq, 200p.
- 234.** TETON S. et al., 2010., « *Pollution atmosphérique ; Surveillance de la qualité de l'air en France : Outils, missions, avenir* », Revue française d'allergologie n° 50, Elsevier Masson, pp : 82-87.

- 235.** THEORET S., 1987. *Les maladies respiratoires*, Département de Santé Communautaire, Hôpital Sainte-Croix, 59p.
- 236.** THOMAS C., janvier 2010. *Caractérisation des aérosols atmosphériques en milieu urbain par télédétection à très haute résolution spatiale*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, École doctorale : Génie électrique, électronique, télécommunications, Unité de recherche : Équipe d'accueil ISAE-ONERA OLIMPES, Spécialité : Télédétection, 232p.
- 237.** TOBIAS C., MEGIE C., 1980-1981, « *Les lithométéores au Tchad Premiers résultats concernant la nature, la composition et l'importance des aérosols transportés par voie atmosphérique dans la région de N'Djamena Tchad* », Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol, vol. XVIII, numéro1 : 71-81
- 238.** TOMBETTE M., 2007, *Modélisation des aérosols et de leurs propriétés optiques sur l'Europe et l'Ile de France : validation, sensibilité et assimilation de données*. Thèse de doctorat, spécialité sciences et techniques de l'environnement, Ecole nationale des ponts et chaussées, 274p.
- 239.** TRAD S. et al., 2013. *Appareil respiratoire*, Collège National des Enseignants de Médecine Interne, UMVF-Université Médicale Virtuelle Francophone, 26p.
- 240.** TSAMALIS C., 2009. *Variabilité de la distribution verticale de l'ozone et des aérosols troposphériques en région méditerranéenne : processus de transport et impacts radiatifs*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, E. D. des Sciences de l'Environnement d'Ile de France, Spécialité : Physico-chimie de l'atmosphère, 200p.
- 241.** TUNON DE LARA M. et al., « *Infections broncho-pulmonaires du nourrisson, de l'enfant et de l'adulte* », Module 7 : santé et environnement-maladies transmissibles, service des maladies respiratoires et allergiques, 39p.
- 242.** UE 2010 : atelier « *Calisph'air : étude de l'impact des aérosols sur le climat* », 17p.
- 243.** UNGAI F. et al., « *Étude des relations entre les propriétés physico-chimiques et optiques des aérosols à partir de mesures de télédétection et d'analyses de laboratoire* » Journées Interdisciplinaires de la Qualité de l'air 2014, 10 et 11 février, 7p.
- 244.** VERGÉ-DÉPRÉ G., 2007. *Télédétection multispectrale des poussières désertiques dans l'infrarouge thermique au-dessus de l'Afrique à partir de MSG/SEVIRI*, Thèse de Doctorat, Université des Antilles et de la Guyane, Faculté des Sciences Exactes et Naturelles, Spécialité : Physique, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Université des Sciences et Technologies de Lille, 252p.
- 245.** VIATTE C., 2007. *Etude de l'impact radiatif des aérosols dans la couche limite planétaire*, Rapport de stage, 36p.

- 246.** VIDOT J., 2005. *Téledétection des aérosols au-dessus des terres émergées à l'aide des capteurs « couleur de l'eau » et applications*, Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, 154p.
- 247.** VILLANI P., décembre 2006. *Développement, validation et applications d'un système de mesure des propriétés hygroscopiques des particules atmosphériques type VH-TDMA*, Thèse de Doctorat, Université BLAISE PASCAL, U.F.R. de Recherche Scientifique et Technique, Ecole Doctorale des Sciences Fondamentales, N° 519, 202p.
- 248.** VILLENAVE É. Et al., nov. 2002. « *La pollution de l'air par les particules : 20 des connaissances scientifiques au service des acteurs* », Pollution atmosphérique, numéro spécial, 7p.
- 249.** VINCENT J., 2012. *Evaluation du dépôt atmosphérique de poussières sahariennes en Méditerranée occidentale : approche expérimentale et modélisation*, Rapport de Stage, Master Sciences et Génie de l'Environnement, Spécialité Atmosphères et Qualité de l'Air (AQA), Laboratoire Inter-universitaire des Systèmes Atmosphériques, 37p.
- 250.** VOGT P. et RÜEGGER M., 3 juillet 2002. « *Maladies respiratoires professionnelles* », Forum Med Suisse N° 27, pp 647-654.
- 251.** WADE C.T., 2008, *Problématique de la gestion durable des usages littoraux au niveau de la Grande Côte sénégalaise*, Thèse de Doctorat, spécialité Ecosystème et Environnement, Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 302.
- 252.** WANG H., 2015. *Imagerie quantitative du dépôt d'aérosols dans les voies aériennes du petit animal par résonance magnétique*, Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, Ecole Doctorale 422, Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes, Discipline : Physique, 245p.
- 253.** WIDORY D. et al., (2002). *Etude de la pollution atmosphérique particulaire à Paris à l'aide des isotopes du carbone et du plomb*, BRGM/RP-52123-FR, 78p, 34fig., 17tab.
- 254.** ZEGHBIB S., *Etude théorique impliquant les mesures Lidar pour la caractérisation optique et microphysique de l'aérosol désertique*, Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département d'Electronique, Option : Semi-conducteurs, 155p.

Webographie

<http://cybergeogeo.revues.org>

<http://www.documentation-ird.fr>

<http://www.memoireonline.com>

<http://www.Persée> Portail de revues en sciences humaines et sociales.mht

<http://www.yo pdf.eu>

<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/index.html>

<http://www.earlinet.org/>

<http://www-lidar.nies.go.jp/AD-Net>

<http://mplnet.gsfc.nasa.gov/data.html>

http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD04_L2/index.html

http://eosweb.larc.nasa.gov/PRODOCS/calipso/table_calipso.html

<http://www.icare.univ-lille1.fr/>

Annexes

Annexe 1 : Concentration en PST et en PM₁₀ résultant de l'application des Equations de Bertrand et al., Ben Mohamed et al. et D'Almeida aux données de visibilité horizontale

Concentrations journalières

► **Station de Saint-Louis**

D'après l'Equation de Bertrand (PST)					
Concentrations journalières (µg.m⁻³)	<30	300-500	500-750	750-1000	>1000
	0				
Fréquence	120	257	112	5	103
%	20,1	43,0	18,8	0,8	17,3

D'après l'Equation de Ben Mohamed et al. (PST)					
Concentrations journalières (µg.m⁻³)	<300	300-500	500-750	750-1000	>1000
	6	382	110	10	91
Fréquence	6	382	110	10	91
%	1,0	63,8	18,4	1,7	15,2

D'après l'Equation de D'Almeida (PM₁₀)						
Concentrations journalières (µg.m⁻³)	<150	150-300	300-500	500-750	750-1000	>1000
	0	191	310	8	12	78
Fréquence	0	191	310	8	12	78
%	-	31,9	51,8	1,3	2,0	13,0

► **Station de Podor**

D'après l'Equation de Bertrand (PST)					
Concentrations journalières (µg.m⁻³)	<300	300-500	500-750	750-1000	>1000
	76	382	35	0	106
Fréquence	76	382	35	0	106
%	12,7	63,8	5,8		17,7

D'après l'Equation de Ben Mohamed et al. (PST)					
Concentrations journalières (µg.m⁻³)	<300	300-500	500-750	750-1000	>1000
	0	457	39	0	103
Fréquence	0	457	39	0	103
%	0	76,3	6,5	0,0	17,2

D'après l'Equation de D'Almeida (PM₁₀)						
Concentrations journalières (µg.m⁻³)	<150	150-300	300-500	500-750	750-1000	>1000
	0	222	272	1	10	84
Fréquence	0	222	272	1	10	84
%	0	37,7	46,2	1,7	1,7	14,3

► **Station de Matam**

D'après l'Equation de Bertrand (PST)					
Concentrations journalières (µg.m⁻³)	<300	300-500	500-750	750-1000	>1000
	94	371	21	1	112
Fréquence	94	371	21	1	112
%	15,7	61,9	3,5	0,2	18,7

D'après l'Equation de Ben Mohamed et al. (PST)					
Concentrations journalières ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	<300	300-500	500-750	750-1000	>1000
Fréquence	0	462	21	0	117
%	0	77	3,5		19,5

D'après l'Equation de D'Almeida (PM ₁₀)						
Concentrations journalières ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	<150	150-300	300-500	500-750	750-1000	>1000
Fréquence	0	357	115	0	26	102
%	0	59,5	19,2		4,3	17,0

Concentrations moyennes mensuelles

► Station de Saint-Louis

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
D'après l'Equation de Bertrand (PST)	129 9	703	159 7	908	856	654	928	387	401	464	417	605
D'après l'Equation de Ben Mohamed et al. (PST)	899	567	112 9	687	662	590	723	397	384	456	437	551
D'après l'Equation de D'Almeida (PM ₁₀)	649	380	766	467	447	396	497	264	282	302	289	370

► Station de Podor

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
D'après l'Equation de Bertrand (PST)	749	818	142 1	761	979	669	932	486	587	514	415	617
D'après l'Equation de Ben Mohamed et al. (PST)	633	676	102 1	694	759	592	741	466	492	490	408	545
D'après l'Equation de D'Almeida (PM ₁₀)	429	447	711	432	519	399	507	312	331	320	269	368

► Station de Matam

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
D'après l'Equation de Bertrand (PST)	664	758	159 2	665	940	612	121 5	508	451	415	342	550
D'après l'Equation de Ben Mohamed et al. (PST)	582	649	111 9	576	745	549	852	519	443	424	379	504
D'après l'Equation de D'Almeida (PM ₁₀)	393	442	783	390	509	370	623	351	296	282	249	339

Concentrations moyennes annuelles

► Station de Saint-Louis

Années	D'après l'Equation de Bertrand (PST)	D'après l'Equation de Ben Mohamed et al. (PST)	D'après l'Equation de D'Almeida (PM ₁₀)
1965	924	729	498
1966	549	508	341
1967	776	643	348
1968	467	473	313
1969	1021	749	520
1970	807	665	453
1971	568	529	354
1972	1155	873	602
1973	956	758	519
1974	859	611	415
1975	810	664	453
1976	1116	852	587
1977	997	779	535
1978	658	576	390
1979	544	515	344
1980	560	524	351
1981	698	601	407
1982	774	646	440
1983	947	732	504
1984	1211	876	610
1985	1173	863	599
1986	987	777	532
1987	792	671	454
1988	1118	860	591
1989	877	725	490
1990	854	548	470
1991	1350	950	775
1992	1232	903	626
1993	1153	865	597
1994	842	667	458
1995	844	694	472
1996	453	465	308
1997	432	439	290
1998	631	564	380
1999	415	434	287
2000	425	442	293
2001	399	423	279
2002	590	547	367
2003	1202	507	339
2004	539	511	342
2005	402	424	281
2006	931	539	363
2007	611	557	373
2008	359	391	258
2009	555	507	341
2010	584	518	350
2011	507	482	323
2012	718	610	414
2013	370	403	264
2014	673	587	390

► Station de Podor

Années	D'après l'Equation de Bertrand (PST)	D'après l'Equation de Ben Mohamed et al. (PST)	D'après l'Equation de D'Almeida (PM ₁₀)
1965	925	724	498
1966	534	508	339
1967	1204	886	615
1968	857	686	470
1969	1038	807	554
1970	536	500	336
1971	547	515	345
1972	1305	960	665
1973	1094	824	570
1974	651	578	390
1975	787	655	446
1976	1171	880	603
1977	1369	968	671
1978	643	568	384
1979	566	523	351
1980	570	529	355
1981	524	495	332
1982	854	692	473
1983	1460	1038	723
1984	1458	911	629
1985	1024	809	554
1986	1714	1126	782
1987	1474	1045	695
1988	1116	854	588
1989	883	708	433
1990	688	585	398
1991	554	519	348
1992	576	540	361
1993	747	608	416
1994	394	419	277
1995	520	499	327
1996	343	379	250
1997	367	399	263
1998	611	541	365
1999	354	388	256
2000	340	377	249
2001	408	428	283
2002	627	564	379
2003	589	783	362
2004	610	550	370
2005	407	436	288
2006	623	551	372
2007	488	467	313
2008	372	403	266
2009	548	498	336
2010	523	497	335
2011	542	505	339
2012	649	572	386
2013	380	409	270
2014	715	609	413

► Station de Matam

Années	D'après l'Equation de Bertrand (PST)	D'après l'Equation de Ben Mohamed et al. (PST)	D'après l'Equation de D'Almeida (PM ₁₀)
1965	679	594	401
1966	551	504	340
1967	648	561	381
1968	650	569	382
1969	475	462	308
1970	513	486	326
1971	524	500	334
1972	1167	880	607
1973	1017	788	542
1974	691	600	406
1975	791	664	448
1976	1168	880	608
1977	997	778	534
1978	699	602	408
1979	415	437	288
1980	575	530	355
1981	654	566	389
1982	709	684	467
1983	956	749	514
1984	992	767	528
1985	899	726	496
1986	1420	1031	716
1987	1269	939	650
1988	1126	847	585
1989	625	547	371
1990	713	604	410
1991	611	546	367
1992	605	542	366
1993	598	611	413
1994	713	605	411
1995	663	574	389
1996	582	524	353
1997	1127	564	546
1998	488	473	316
1999	658	562	382
2000	768	614	422
2001	677	571	389
2002	323	475	320
2003	635	562	379
2004	600	534	361
2005	612	543	367
2006	610	542	366
2007	750	614	417
2008	735	606	414
2009	630	563	381
2010	464	453	303
2011	676	576	392
2012	787	644	438
2013	384	410	271
2014	680	591	400

Annexe 2 : Fréquence du nombre de jours de lithométéores aux stations de l'extrême Nord-Sénégal

➤ **Fréquence journalière**

Stations	Brume Sèche	Brume de Poussière	Chasse-Sable	Tempête de Poussière
Saint-Louis	19%	51%	26%	4%
Podor	37%	23%	35%	5%
Matam	7%	18%	69%	6%

➤ **Fréquence moyenne mensuelle** (les lithométéores les plus fréquents suivant les stations)

Stations	Lithométéores	Mois											
		J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
Saint-Louis	Brume de poussière	7	5	5	4	3	2	0	0	0	1	1	2
	Chasse-sable	2	2	2	2	2	1	1	0	0	0	1	1
Podor	Brume Sèche	3	3	3	3	3	2	1	0	1	1	1	1
	Chasse-sable	2	2	3	2	2	2	2	1	1	1	0	1
Matam	Chasse-Sable	5	4	4	2	3	3	2	1	1	1	1	3
	Brume de poussière	2	1	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0

➤ **Total annuel (année saisonnière) de jours de lithométéores**

Station Années	Saint-Louis	Podor	Matam
1965-66	58	56	47
1966-67	45	49	71
1967-68	83	76	39
1968-69	49	71	23
1969-70	84	60	38
1970-71	51	53	47
1971-72	67	69	56
1972-73	61	65	53
1973-74	61	52	44
1974-75	50	48	39
1975-76	79	66	60
1976-77	80	81	60
1977-78	54	45	39
1978-79	51	44	41
1979-80	63	57	45
1980-81	57	53	43
1981-82	64	59	49
1982-83	69	169	116
1983-84	69	262	78
1984-85	74	228	59
1985-86	104	140	112
1986-87	128	125	142
1987-88	159	92	102
1988-89	132	54	52
1989-90	153	42	45
1990-91	99	49	27
1991-92	72	50	43
1992-93	97	37	48
1993-94	50	26	49
1994-95	109	8	22
1995-96	66	8	15
1996-97	32	13	22
1997-98	51	35	22
1998-99	26	8	24
1999-00	38	8	21
2000-01	18	9	6
2001-02	31	31	12
2002-03	39	39	14
2003-04	28	25	20
2004-05	43	43	29
2005-06	19	19	11
2006-07	21	17	29
2007-08	21	12	13
2008-09	15	10	12
2009-10	20	16	24
2010-11	21	17	19
2011-12	50	62	33
2012-13	13	15	27
2013-14	39	41	53

Annexe 3 : Visibilité horizontale réduite par la présence des lithométéores

➤ Répartition journalière (%) de VV < 10 km, < 5 km et < 1 km

Stations \ VV	< 1Km	< 5 Km	< 10Km
Saint-Louis	14	31	55
Podor	14	21	65
Matam	15	11	74

➤ Evolution mensuelle de la visibilité horizontale (km) réduite pour cause de présence de lithométéore

Stations \ Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
Saint-Louis	4	4	2	4	4	4	5	7	7	6	6	5
Podor	5	4	3	5	4	5	4	6	6	6	6	6
Matam	5	5	3	5	4	5	4	6	7	6	7	6

➤ Fréquence (%) de la visibilité < 5 km aux stations de l'extrême Nord-Sénégal

Stations \ Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
Saint-Louis	66	56	84	72	74	58	36	10	6	26	26	40
Podor	38	44	68	46	54	38	36	16	22	24	8	24
Matam	26	32	76	30	36	20	48	16	10	6	0	12

➤ **Moyenne annuelle de la visibilité horizontale (km) réduite pour cause de présence de lithométéore**

Station Années	Saint-Louis	Podor	Matam
1965	4	5	5
1966	6	5	6
1967	5	4	6
1968	5	5	6
1969	5	4	6
1970	4	6	6
1971	5	5	5
1972	4	3	4
1973	4	4	4
1974	5	5	5
1975	5	5	5
1976	4	4	4
1977	4	4	4
1978	5	5	5
1979	5	5	6
1980	5	5	5
1981	5	6	5
1982	5	5	5
1983	5	3	4
1984	4	3	5
1985	5	3	4
1986	4	3	3
1987	4	3	4
1988	3	4	4
1989	4	5	6
1990	4	5	5
1991	3	5	6
1992	4	5	6
1993	3	5	5
1994	5	6	5
1995	4	6	6
1996	5	7	6
1997	6	6	6
1998	5	6	6
1999	6	7	6
2000	6	7	6
2001	6	6	6
2002	5	5	7
2003	5	5	5
2004	5	5	6
2005	6	6	6
2006	5	5	6
2007	5	6	6
2008	7	6	6
2009	6	6	6
2010	6	6	6
2011	6	6	6
2012	5	5	5
2013	7	6	6
2014	5	5	5

Annexe 4 : Questionnaire sur l'impact de la forte réduction de la visibilité horizontale sur les activités socio-économiques et sur la mobilité quotidienne des population de l'extrême Nord-Sénégal

Identification	
<p>1. Prenon (s) et Nom</p> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>	<p>4. localité habitée</p> <p><input type="radio"/> 1. Dans Saint-Louis <input type="radio"/> 2. Dans Podor</p> <p><input type="radio"/> 3. Dans Matam</p>
<p>2. Sexe</p> <p><input type="radio"/> 1. Homme <input type="radio"/> 2. Femme</p>	
<p>3. Age</p> <p><input type="radio"/> 1. Moins de 20 ans <input type="radio"/> 2. 20 à 59 ans</p> <p><input type="radio"/> 3. 60 ans et plus</p>	
Connaissance du phénomène	
<p>5. comment jugez-vous la fréquence des poussières dans votre localité?</p> <p><input type="radio"/> 1. très forte <input type="radio"/> 2. forte <input type="radio"/> 3. modérée</p> <p><input type="radio"/> 4. faible <input type="radio"/> 5. très faible</p>	<p>7. Si 'Oui', depuis quand? :</p> <p><input type="radio"/> 1. Moins de 5 ans <input type="radio"/> 2. 5 à 10 ans <input type="radio"/> 3. plus de 10 ans</p>
<p>6. Avez-vous constaté une recrudescence de ces phénomènes?</p> <p><input type="radio"/> 1. Oui <input type="radio"/> 2. Non</p>	
Impact des événements poussières sur les activités des populations	
<p>8. vos activités sont-elles affectées par les événements de poussières.</p> <p><input type="radio"/> 1. Oui <input type="radio"/> 2. Non</p>	
<p>9. Si 'Oui', Lesquelles :</p> <p><input type="radio"/> 1. Commerce <input type="radio"/> 2. transport <input type="radio"/> 3. pêche</p> <p><input type="radio"/> 4. éducation <input type="radio"/> 5. autres</p>	
<p>10. Comment sont-elles affectées</p> <p><input type="radio"/> 1. risque de non pratique des activités</p> <p><input type="radio"/> 2. Moins de clientèle</p> <p><input type="radio"/> 3. perte de revenus</p> <p><input type="radio"/> 4. réduction de la durée des activités</p> <p><input type="radio"/> 5. risques d'accidents</p> <p><input type="radio"/> 6. autres</p>	
Impacts sur la mobilité	
<p>11. les événements de poussières affectent-ils vos déplacements quotidiens?</p> <p><input type="radio"/> 1. Oui <input type="radio"/> 2. non</p>	<p>13. à quel niveau de concentration en poussières vos déplacements sont-ils affectés?</p> <p><input type="radio"/> 1. à forte concentration</p> <p><input type="radio"/> 2. même à concentration modérée</p> <p><input type="radio"/> 3. déjà à faible concentration</p>
<p>12. Si 'Oui', comment? :</p> <p><input type="radio"/> 1. réduction des déplacements</p> <p><input type="radio"/> 2. report des déplacements</p> <p><input type="radio"/> 3. déplacement avec masques de protection</p> <p><input type="radio"/> 4. autres</p>	

Table des matières

Dédicaces	I
Remerciements	II
Sommaire	IV
Sigles et Acronymes	VI
Liste des illustrations	VIII
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	XIV
Avant-propos	XVII
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Contexte scientifique, Cadre théorique et conceptuel, Méthodologie et Climatologie de l’Afrique de l’Ouest	5
1. Contexte scientifique de l’étude	5
2. Cadre théorique	8
2.1. Problématique de l’étude.....	8
2.2 La question de recherche.....	10
2.3 Enjeux et Objectifs de la Thèse.....	10
2.4. Justification et intérêt du sujet.....	11
2.5. Hypothèses de recherche	12
3. Analyse conceptuelle.....	13
3.1. Le concept d’aérosol	13
3.2. Le concept de lithométéore	15
3.3. Les notions de brume sèche, brume de poussières, chasse-sable, tempête de poussière	16
4. Éléments de Méthodologie.....	19
4.1. La revue documentaire	19
4.1.1 Synthèse bibliographique	20
4.2 Collecte et traitement de données.....	30
4.2.1 La collecte de données	30
4.2.2 Le traitement de données (Choix des méthodes et des tests statistiques)	30
4.3. Les mathématiques	32
4.4. L’échantillonnage des particules et analyse au laboratoire	32
4.5. Enquêtes de vulnérabilité	33
4.6. Traitement cartographique	34

4.7. Difficultés rencontrées	35
5. Climatologie de l’Afrique de l’Ouest.....	36
5.1. La circulation en Saison sèche	36
5.2. La dynamique de la « mousson » ou saison des pluies	37
5.3. La circulation de Mousson	39
5.3.1. La circulation dans les basses couches.....	40
5.3.2. Circulation en moyenne et haute altitude (troposphère)	43
5.3.3. Cycle saisonnier de la mousson	61
5.3.3.3 Mousson, régime sahélien « Onset » (fin juin à fin août)	65
5.3.4. Le cycle diurne de la mousson	70
5.3.4.1 Modulation diurne de la convection et des pluies	70
5.3.4.2 Le Heat Low et la circulation de méso-échelle	71
5.4. La période de transition.....	73
Chapitre II : Étude des éléments du climat à l’extrême Nord-Sénégal : Stations synoptiques de Saint-Louis, Podor et Matam	76
1. Le vent	76
1.1 Répartition mensuelle des vents au sol	76
1.2 Analyse détaillée des vents	79
1.2.1 Analyse par direction	80
1.2.2 Evolution de la circulation au cours de l’année	83
1.3. Etude de la vitesse du vent	88
2. Température et Humidité relative.....	90
2.1. Température	90
2.1.1. Valeurs moyennes	90
2.1.1.1. Evolution de la température moyenne au cours de l’année.....	90
2.1.2. Les fréquences des températures.....	94
2.1.2.1. Groupement des fréquences par bandes larges.....	94
2.2. Humidité relative.....	98
2.2.1 Fréquence de l’humidité relative.....	98
3. Evaporation et Insolation.....	100
3.1. Evaporation	100
3.2. L’insolation	101
4. La pluviométrie.....	102
4.1. Les types de précipitations	102

4.1.1 La Rosée.....	102
4.1.2 La Brume.....	103
4.1.3 Le Brouillard	103
4.1.4 Le heug.....	103
4.1.5 Les pluies d’Hivernage.....	104
4.2. Les Fluctuations Pluviométriques	105
4.2.1. Variabilité des pluies moyennes mensuelles et saisonnières	105
4.2.1.1. Mois à pluviométrie faible	106
4.2.1.2. Mois à pluviométrie intermédiaire ou modérée	107
4.2.1.3. Mois à pluviométrie relativement forte.....	108
4.2.2. Variabilité des totaux et moyennes pluviométriques annuelles	111
4.3 Détection du/des point (s) de rupture par l’application du test de PETTITT.....	114
4.4. Distribution et variabilité du nombre de jours de pluies	119
5. Analyse intégrée des différents éléments du climat à l’extrême Nord-Sénégal (synthèse climatique).....	122
Chapitre III : Aérosols désertiques : cycle, zones sources et saisonnalité des émissions..	124
1. Généralité sur les aérosols	124
1.1. Caractéristiques générales	124
2. Cas spécifique des aérosols désertiques	139
2.1. Propriétés physico-chimiques et optiques	146
3. Cycle des aérosols désertiques ; de la formation de la matière érodable au dépôt des particules	159
3.1. Mécanismes d’émission des aérosols désertiques	160
3.1.1. Les mouvements des particules mobilisées.....	163
3.1.2. Phénomènes dynamiques et Processus météorologiques responsables du soulèvement des poussières désertiques en Afrique de l’Ouest	165
3.2. Transport de particules d’aérosols désertiques.....	169
3.2.1. Transport longue distance de l’aérosol désertique nord-africain	170
3.2.2. Evolution physico-chimique des aérosols désertiques au cours du transport	171
3.3. Phases de dépôt de particules d’aérosols désertiques.....	173
4. zones sources africaines du nord de l’Equateur et saisonnalité des émissions	181
4.1. Principales Zones Sources en Afrique au Nord de l’Equateur	181
4.1.1. Bodélé, principale source de poussières désertiques.....	184
4.1.2. Autres zones sources récemment identifiées.....	188

4.2. Variabilités temporelles d'émissions de particules désertiques	189
4.3. Principales trajectoires du transport des aérosols désertiques.....	195
Chapitre IV : Analyse de l'évolution des fréquences de lithométéores et étude de leurs effets radiatifs dans l'extrême Nord-Sénégal.....	201
1. Evolution et répartition de la fréquence du nombre de jours de lithométéores dans l'extrême Nord-Sénégal.....	201
1.1. Répartition diurne des lithométéores.....	201
1.2. Répartition mensuelle et saisonnières des lithométéores	205
1.3. Evolution annuelle des lithométéores de 1965 à 2014	208
2. Étude des concentrations en particules de lithométéores à l'extrême Nord-Sénégal.....	215
2.1. Concentration journalière en PST et en PM ₁₀	217
2.2. Concentration mensuelle en PST et PM ₁₀	220
2.3. Concentration annuelle en PST et PM ₁₀	222
3. Effets radiatifs des poussières désertiques dans l'extrême Nord-Sénégal	226
3.1. Généralité sur les effets radiatifs des aérosols désertiques	227
3.1.1. Effets radiatifs directs.....	227
3.1.1.1. Forçage radiatif direct dans les ondes courtes.....	229
3.1.1.2. Forçage radiatif direct dans l'infrarouge.....	230
3.1.2. Effets radiatifs semi-directs.....	233
3.1.3. Effets radiatifs indirects	236
3.2. Impact des poussières désertiques sur la dynamique atmosphérique à l'extrême Nord-Sénégal	239
3.2.1. Influence sur les précipitations.....	240
3.2.2. Impact sur le vent thermique.....	243
Chapitre V : Poussières désertiques dans l'extrême Nord-Sénégal : action sur la visibilité horizontale, conséquences socio-économiques et impacts sanitaires	245
1. Actions des poussières lithométéoriques sur la visibilité horizontale aux stations de l'extrême Nord-Sénégal.....	245
1.1. Répartition diurne de la visibilité réduite par la présence de lithométéore.....	246
1.2. Variation mensuelle et saisonnière de la fréquence de la visibilité réduite pour cause de lithométéores	252
1.3. Corrélation visibilité réduite et Concentration en particules.....	257
1.4. Evolution annuelle de la réduction de la visibilité horizontale pour cause de présence de lithométéores	260

2. Conséquences socio-économiques dues à la réduction de la visibilité par les poussières désertiques	266
2.1. Conséquences sur les activités socio-économiques	266
2.2. Impacts sur la mobilité quotidienne des personnes	269
3. impacts sanitaires des poussières désertiques dans l'extrême-Nord Sénégal.....	270
3.1. Généralité	270
3.1.1. Impacts de la pollution particulaire des poussières désertiques sur la santé.....	270
3.1.1.1. Etude épidémiologiques	271
3.1.1.2. Appareil respiratoire, poussières respirables et effets respiratoires	272
3.1.1.2.1. Exposition et Inhalation de particules de poussières désertiques.....	272
3.1.1.2.2. Pénétration et Dépôts des particules inhalées dans l'appareil respiratoire.....	274
3.1.1.2.2.1. Pénétration des particules dans l'appareil respiratoire	274
3.1.1.2.2.2. Dépôt des particules inhalées	274
3.1.1.2.2.2.1. Mécanismes de dépôts des particules	274
3.1.1.2.2.2.2. Dépôt des particules selon la taille et suivant les régions anatomiques	277
3.1.1.2.3. Devenir des particules dans l'appareil respiratoire	279
3.1.1.2.3.1. Rétention des particules	279
3.1.1.2.3.2. Élimination des particules dans l'appareil respiratoire	280
3.1.1.2.3.2.1. Mécanismes et voies d'élimination des particules	280
3.1.1.2.3.2.2. Temps réel d'élimination des particules.....	283
3.1.1.2.4. Poussières inhalées et organisme humain	284
3.1.1.2.4.1. Réaction de l'organisme à l'inhalation des poussières.....	284
3.1.1.2.4.2. Pathologies respiratoires	285
3.1.1.2.4.3. Sensibilité des populations exposées aux particules de poussières.....	286
3.2. L'Extrême Nord-Sénégal : Poussières désertiques et Maladies respiratoires	289
3.2.1. Episodes de poussières désertiques dans les stations de l'extrême Nord-Sénégal et impact sur la qualité de l'air.....	290
3.2.2. Toxicité des particules de poussières désertiques en suspension à l'extrême Nord-Sénégal	291
3.2.3. Epidémiologie des poussières désertiques	295
3.2.4. Fréquence des pathologies respiratoire imputables aux poussières désertiques dans l'extrême Nord-Sénégal	298
3.2.4.1. Variabilité annuelle et saisonnalité des fréquences	298
3.2.4.1.1. Variabilité annuelle de la fréquence des pathologies imputables aux poussières respirables.....	298

3.2.4.1.2. Saisonnalité des pathologies "poussiéreuses"	300
3.2.4.2. Morbidité et Régularité des pathologies.....	304
3.2.4.3. Sensibilité des Populations aux pathologies respiratoires.....	307
3.2.4.3.1. Taux de prévalence hommes/femmes	308
3.2.4.3.2. Sensibilité par classes d'âge	311
Conclusion générale	315
Références bibliographie.....	324
Webographie	348
Annexes	349

Résumé

Allant de Saint-Louis au Nord de Matam, l'extrême Nord-Sénégal, cette partie purement sahélienne est comme tout le reste de la région caractérisée par des types de temps litho météoriques. Les résultats de cette thèse témoignent une forte variabilité de ces événements de poussières désertiques. L'évolution journalière montre une fréquence maximale au cœur de la journée et un minima en pleine nuit. Le diagnostic de l'évolution mensuelle et saisonnière des fréquences nous permet de détecter le maximum de janvier à mai et le minimum de juillet à septembre. L'analyse du comportement annuel ressort une forte variabilité suivant les phases climatiques de 1965 à l'actuel. L'étude des niveaux de concentration en PST ou des PM₁₀ révèle des valeurs largement au-dessus du seuil défini et par l'OMS et par les différentes réglementations nationales sur la qualité de l'air. L'analyse des impacts radiatifs montre qu'en dehors de leurs effets direct, semi-direct et indirect, les aérosols désertiques sont susceptibles d'impacter sur la dynamique atmosphérique dans cet extrême Nord-Sénégal. Sur le plan environnemental, l'étude montre des fréquences importantes de réduction de la visibilité horizontale dans la région en lien avec les épisodes de litho météores. Le maxima et le minima de cette réduction sont assujettis aux maxima et minima de concentrations en particules. Les événements de mauvaise visibilité affectent les activités socio-économiques des populations ainsi que leurs mobilités. L'évaluation des impacts sanitaires révèle qu'en cette zone, les bronchites et pneumopathies sont les pathologies respiratoires les plus en relation avec les poussières désertiques inhalées. Le suivi annuel et saisonnier de ces maladies montre une forte variabilité de leur fréquence alors que l'application du test de BUISHAND témoigne leur régularité assez bonne voire parfaite dans cet extrême Nord-Sénégal. Mieux encore, le classement par maladies révèle que ces pathologies respiratoires sont au premier rang de celles les plus consultées dans la région.

Mots clés : litho météore, concentration en particules, conséquences radiatives, visibilité horizontale, pathologies respiratoires

Abstract

From Saint-Louis to the north of Matam, the extreme North-Senegal, this part purely Sahelian is like all the rest of the region characterized by types of lithometeoric weather. The results of this thesis show a high variability of these desert dust events. The daily evolution shows a maximum frequency at the height of the day and a minimum during the night. The diagnosis of the monthly and seasonal evolution of the frequencies allows us to detect the maximum from January to May and the minimum from July to September. The analysis of the annual behaviour shows a strong variability according to the climatic phases from 1965 to the present. The study of concentration levels in PST or the PM₁₀ reveals values well above the threshold defined and by the WHO and by the various national regulations on air quality. The analysis of radiative impacts shows that apart from their direct, semi-direct and indirect effects, desert aerosols are likely to affect atmospheric dynamics in this extreme North Senegal. From an environmental perspective, the study shows significant frequencies of horizontal visibility reduction in the region in relation to episodes of lithometeors. The maxima and minima of this reduction are subject to the maxima and minima particle concentrations. Low visibility events affect the socio-economic activities of populations and their mobility. The evaluation of the health impacts reveals that in this area, bronchitis and pneumopathies are the respiratory pathologies most related to the inhaled desert dust. The annual and seasonal monitoring of these diseases shows a high variability of their frequency whereas the application of the BUISHAND test testifies their regularity fairly good or even perfect in this extreme North Senegal. Better still, classification by disease reveals that these respiratory illnesses are at the forefront of those most consulted in the region.

Keywords: lithometeor, particle concentration, radiative consequences, horizontal visibility, respiratory pathologies