

Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches

**Des aérosols désertiques en Afrique sub-saharienne à la
pollution particulaire en zones urbaines :**

Téledétection multi-échelles, Variabilités spatio-temporelles,
Relations avec la santé humaine

Par Nadège Martiny



Discipline : Sciences de l'environnement

UMR BIOGEOSCIENCES

Université de Bourgogne

Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches

**Des aérosols désertiques en Afrique sub-saharienne à la
pollution particulaire en zones urbaines :**

Téledétection multi-échelles, Variabilités spatio-temporelles,
Relations avec la santé humaine

Par Nadège Martiny

Discipline : Sciences de l'environnement

UMR BIOGEOSCIENCES

Université de Bourgogne

A Alban

« *L'homme doit s'élever au-dessus de la Terre – aux limites de l'atmosphère et au-delà – ainsi seulement pourra-t-il comprendre tout à fait le monde dans lequel il vit* » - **Socrate**

Remerciements

Durant mon parcours, j'ai eu la chance de rencontrer des personnes bienveillantes et de bon conseil. Elles ont joué un rôle important à des moments-clés de ma carrière, contribuant ainsi de manière indirecte et significative aux travaux présentés dans cette Habilitation à Diriger les Recherches. Je tiens à les remercier tout particulièrement ici.

Je souhaite en premier lieu remercier Bernard Fontaine, directeur du Centre de Recherches de Climatologie lors de mon arrivée en post-doctorat à Dijon en 2004. Il a été un pilier fondateur de mes recherches futures en m'apportant confiance, écoute, conseils et opportunités notamment dans le cadre du programme AMMA.

Je souhaite ensuite remercier Pierre Camberlin pour les nombreux échanges scientifiques et le travail en collaboration sur le terrain de jeu africain pendant toutes ces années, mais aussi pour sa gentillesse, sa sérénité et son sens de l'équité. Je le remercie chaleureusement d'avoir accepté d'être le garant de mon HDR, ainsi que pour sa précieuse relecture du document.

Merci à Yves Richard avec qui j'ai découvert la climatologie en Afrique du Sud à mes débuts au CRC, et avec qui je partage aujourd'hui la passion des mesures en ville. Je le remercie également de son enthousiasme pour les enseignements en qualité de l'air que nous avons imaginés ensemble. C'est toujours exploratoire, souvent risqué, mais tellement plaisant ! Merci d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

Un merci particulier à Pascal Roucou pour les activités de recherches menées ensemble sur le climat, l'environnement et la santé. Ce fut une réelle source de motivation ; merci d'avoir cru en moi ! Merci également pour les nombreux co-encadrements d'étudiants en stage ou en thèse sur cette thématique. Côté enseignements, un grand merci pour cette décennie de Géoforum(s) partagés !

Merci aux 3 rapporteurs de mon mémoire : Benjamin Sultan, qui m'a confié la coordination du groupe Santé d'AMMA France en 2007, ce qui a constitué un tournant dans mes recherches à l'interface entre aérosols et méningites en Afrique ; Victoria Cachorro qui m'a accueilli quelques semaines à Valladolid pendant ma thèse de doctorat et avec qui j'ai commencé à travailler sur les AOD et leurs mesures ; Jean-Louis Roujean pour les échanges scientifiques enrichissants en télédétection environnementale, notamment lors des comités CNES-TOSCA annuels à Paris.

Merci aux membres de mon jury Vincent Dubreuil, pour l'intérêt qu'il a toujours porté à l'évolution de mon parcours de climatologue, ainsi que Judith Mueller pour le partage de l'expérience MAMEMA et son expertise en épidémiologie des maladies infectieuses ; sans elle le groupe n'aurait pas avancé de la même manière.

J'en profite pour remercier Hélène Broutin, également épidémiologiste, avec qui l'aventure de la pluridisciplinarité a été un réel plaisir, et ce, depuis AMMA. Merci pour son ouverture scientifique et ces nombreuses années de collaborations solides et fructueuses.

Merci à mes collègues de la communauté française en télédétection de l'atmosphère. Je tiens en premier lieu à remercier Isabelle Chiapello avec qui j'ai mené les premières explorations du lien entre poussières désertiques et méningites au sein du groupe Santé d'AMMA France. Merci pour sa vision éclairée. Je tiens ensuite à remercier Jean-François Léon, qui est devenu un collaborateur non seulement sur la thématique de la télédétection des aérosols, mais aussi sur leurs mesures et leurs impacts sociétaux. Merci de refaire le monde (des aérosols !) lors

de chacune de nos conversations, et merci d'avoir accepté de faire partie de chacun des projets CNES que j'ai portés, de TELEDM à Quali_ThR.

Je tiens à adresser un grand merci à Nicolas Marilleau, modélisateur informaticien, sans qui le projet QameleO n'aurait pas pu voir le jour. Merci pour tous les échanges scientifiques (et métrologiques !) sur le thème de la qualité de l'air mais aussi sur le lien entre environnement et santé. Merci pour les opportunités de co-encadrements de thèse, ainsi que pour celles de nombreux projets de recherches qui se dessinent en France et en Afrique pour les 4 à 5 années à venir. Merci pour cette belle collaboration, et qu'elle dure encore longtemps !

J'en profite pour remercier la cellule de valorisation de l'IRD, et notamment Alexandre Bisquerra, dont le travail a permis de mieux faire connaître les travaux de recherches communs entre l'Université de Bourgogne et l'IRD au sein de la communauté française, internationale ainsi qu'auprès d'entreprises privées. Merci pour cette dynamique.

Je souhaite également remercier Thomas Thevenin pour les nombreuses opportunités qu'il m'a offertes sur le thème de la qualité de l'air à Dijon via la Plateforme GeoBFC, au titre de directeur adjoint de la Maison des Sciences de l'Homme. Merci pour son dynamisme, sa clairvoyance, et surtout sa vision de la recherche partagée entre les laboratoires ThéMa et Biogéosciences.

Je remercie l'équipe d'ATMO BFC pour le travail en collaboration côté enseignements depuis de nombreuses années, et plus récemment côté recherches, en particulier Francis Schweitzer, Anaïs Detournay et Mathieu Boilleaut. Les particules fines vont avoir du fil à retordre !

Au CRC, je tiens à remercier l'ensemble de mes collègues enseignants-chercheurs et chercheurs (dans l'ordre géographique du 4^{ème} étage et en partant de mon bureau) : Benjamin Pohl, Benjamin Bois, Marie-Charlotte Anstett, Olivier Planchon, Thierry Castel et Albin Ullmann pour leur bon état d'esprit, les services rendus, les discussions scientifiques, les événements de convivialité et leur humour en toutes circonstances.

Un grand merci également aux ingénieurs de l'équipe, sans qui la vie du CRC ne serait pas la même. Merci pour leur patience et leur disponibilité. J'en profite pour remercier spécifiquement Mario Rega que j'embarque de près ou de loin dans tous mes projets de terrain : du TEOM de Dédougou au Burkina Faso à l'expérience plus récente des micro-capteurs de qualité de l'air à Dijon. Merci également à Julien Pergaud pour le partage de son expertise en modélisation numérique et sa participation au projet H2020 à venir. J'ai hâte !

Merci à la « TEOM Team » : Régis Belleville, explorateur, expert de l'Afrique et du désert, qui a installé l'appareil de mesures à Dédougou. Je me souviendrai du « coup du mamba noir » ! Merci à Basile Pauthier pour son investissement dans le projet à un moment où nous en avons vraiment besoin. Merci à Sébastien Zito pour les nombreux coups de main ! Enfin, merci à Camille Bebane au Burkina Faso, d'assurer le recueil fastidieux des données et la maintenance de l'instrument, ce n'est pas facile tous les jours.

A l'UMR Biogéosciences, je remercie Emmanuel Fara, à la direction du laboratoire, pour sa bienveillance et sa rapidité dans la signature de documents toujours urgents et importants ! Je tiens également à remercier mes collègues de l'équipe SEDS. J'espère que les projets sur les poussières désertiques se poursuivront dans les années à venir : Pierre Pellenard, Jean-François Deconinck et Ludovic Bruneau.

Je remercie les étudiants que j'ai encadrés en thèse et en stages de Master. Nombre d'entre eux sont cités dans mon mémoire : sans eux la recherche avancerait indéniablement moins vite ! Je tiens en particulier à remercier Justin Emery, aujourd'hui en poste de maître de conférences, dont les travaux en qualité de l'air, par le biais du développement de SCAUP, ont permis de voir plus loin.

Côté enseignements, je souhaite remercier l'ensemble de mes collègues du Département de Géographie, et en particulier Anne Jegou, Valérie Facchinetti et Julie Fen Chong. C'est toujours un bonheur de partager les expériences pédagogiques, les idées pour la suite et certaines pauses-déjeuner.

Merci à tous les doctorants et ex-doctorants du CRC, en particulier ceux qui ont partagé des enseignements avec moi: Julien Crétat, Joseph Boyard-Micheau, Florian Raymond, Damien Boulard, Mélissa Poupelin, Maxime Duchez.... Un merci tout particulier à Catinca Gavrilescu pour son investissement dans les enseignements de statistiques multivariées en L3 ainsi que pour les excellents moments passés en salle de sport les mardis soirs. Un merci chaleureux à Julita Diallo-Dudeck pour son implication dans les enseignements de télédétection en L2 et L3 ainsi que pour son optimisme et sa bonne humeur.

Merci à ceux qui ont compté pendant mon parcours. Merci à Nathalie Philippon pour les 8 années partagées dans le même bureau au CRC. Nous avons fait un bon bout de chemin ensemble sur la végétation naturelle en Afrique de l'Ouest, poursuivi ensuite en Afrique centrale. Merci pour cette précieuse relation de travail et pour son amitié.

Merci à Nadia Sénéchal, Aldo Sottolichio et Jean-Marie Froidefond de m'avoir réservé un si bel accueil lors de mes deux premières années en tant qu'enseignante-chercheuse à l'Université de Bordeaux en 2007-2009. Elles ont représenté un tremplin essentiel dans ma carrière et je suis ravie de pouvoir continuer à vous croiser, pour certains au CNU.

Mon parcours n'aurait sans doute pas été le même sans l'amitié et le soutien d'Irina. Ce fut une magnifique rencontre à Wimereux, sans laquelle mon chemin n'aurait peut-être pas croisé celui de la climatologie. De tout cœur, merci ! Merci à mes amis dont le soutien a été important dans la phase de rédaction de ce mémoire, en particulier Marmotte, toujours fidèle au poste depuis l'Italie, et Diane, pour sa patience et sa prévenance.

Enfin, je souhaite remercier ma famille, mes parents, et en particulier mon époux, Vincent, pour sa présence, son soutien, son écoute, ses conseils et ses attentions au quotidien, ainsi que notre petit pirate Alban, qui fait de tous les moments partagés un véritable bonheur.

Sommaire

Partie A. Synthèse des travaux de recherches

I. Introduction : enjeux et objectifs scientifiques

- I.1 Les aérosols atmosphériques, un objet de recherche central
- I.2 Ma démarche scientifique

II. Télédétection des poussières désertiques

- Préambule : le climat et les poussières désertiques au Sahel
- Questions scientifiques et éléments contextuels
- II.1 Bilan des produits aérosols présentant un potentiel pour la santé
- II.2 Les AI sont-ils représentatifs des poussières désertiques en surface ?
- II.3 Différenciation des types d'aérosols à partir des produits MODIS
- II.4 Apport de la télédétection active et de la mission CALIPSO
- Synthèse de la partie II

III. Poussières désertiques, climat et santé en Afrique

- Préambule : les méningites bactériennes au Sahel
- Questions scientifiques et éléments contextuels
- III.1 Bref historique du lien entre climat, environnement et méningites
- III.2 Les aérosols versus le climat pendant les méningites saisonnières
- III.3 Importance des aérosols au démarrage et développement épidémiques
- III.4 Poussières et méningites à l'échelle de la Ceinture
- Synthèse de la partie III

IV. Pollution particulière en milieu urbain

- Préambule : la ville, milieu complexe et hétérogène
- Contextualisation et questions scientifiques
- IV.1 Potentiel de l'imagerie satellitaire Pléiades
- IV.2 La SMA pour la pollution atmosphérique automobile
- IV.3 Le concept QameleO
- IV.4 Des mesures « low-cost » de qualité scientifique
- Synthèse de la partie IV

V. Conclusion générale

VI. Perspectives de recherches

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Références citées

Nouveaux sites de mesures et création de base de données originales

- Fiche 1. Le TEOM de Dédougou
- Fiche 2. Le réseau QameleON à Dijon Métropole
- Fiche 3. Un photomètre CIMEL à Archachon

Partie B. Résumé de carrière

1. Etat civil, statut actuel, formation et expériences professionnelles

2. Activités en recherches et valorisation

- 2.1 Principaux projets de recherches avec responsabilités scientifiques
- 2.2 Principaux projets de recherches en tant que participante
- 2.3 Responsabilités d'évaluation ou d'administration scientifique
- 2.4 Collaborations principales
- 2.5 Brevet, création de données et de base de données originales, responsabilités de stations et de réseaux de mesures
- 2.6 Séjours ou participation à des événements en tant que chercheuse invitée
- 2.7 Participations à l'organisation d'école d'été, de colloque ou à l'animation scientifique du laboratoire
- 2.8 Actions de vulgarisation scientifique et communications destinées aux gestionnaires et décideurs politiques
- 2.9 Partenariats avec des associations, la sphère éducative, les collectivités et le privé

3. Activités en enseignements

- 3.1 Responsabilités pédagogiques et administratives
- 3.2 Prix et distinction
- 3.3 Enseignements réguliers avec descriptif et analyse
- 3.4 Autres enseignements
- 3.5 Autres responsabilités

4. Formation par la recherche

- 4.1 Encadrements de thèse
- 4.2 Membre de comités de pilotage de thèse
- 4.3 Références des thèses encadrées ou pilotées
- 4.4 Participations à des jurys de thèse
- 4.5 Encadrements de post-doctorat, d'ingénieurs et de technicien
- 4.6 Encadrements de stages
- 4.7 Références des stages de recherches encadrés et co-encadrés

5. Production scientifique

- 5.1 Articles parus dans des revues à comité de lecture
- 5.2 Article soumis
- 5.3 Articles dans des actes de congrès internationaux avec comité de lecture
- 5.4 Chapitres d'ouvrage à visée internationale
- 5.5 Communications et posters dans des conférences internationales
- 5.6 Communications et posters dans des conférences nationales
- 5.7 Communications et posters dans des ateliers nationaux et régionaux
- 5.8 Rapports d'activités
- 5.9 Monographie
- 5.10 Récapitulatif des productions scientifiques

6. Synthèse quantitative

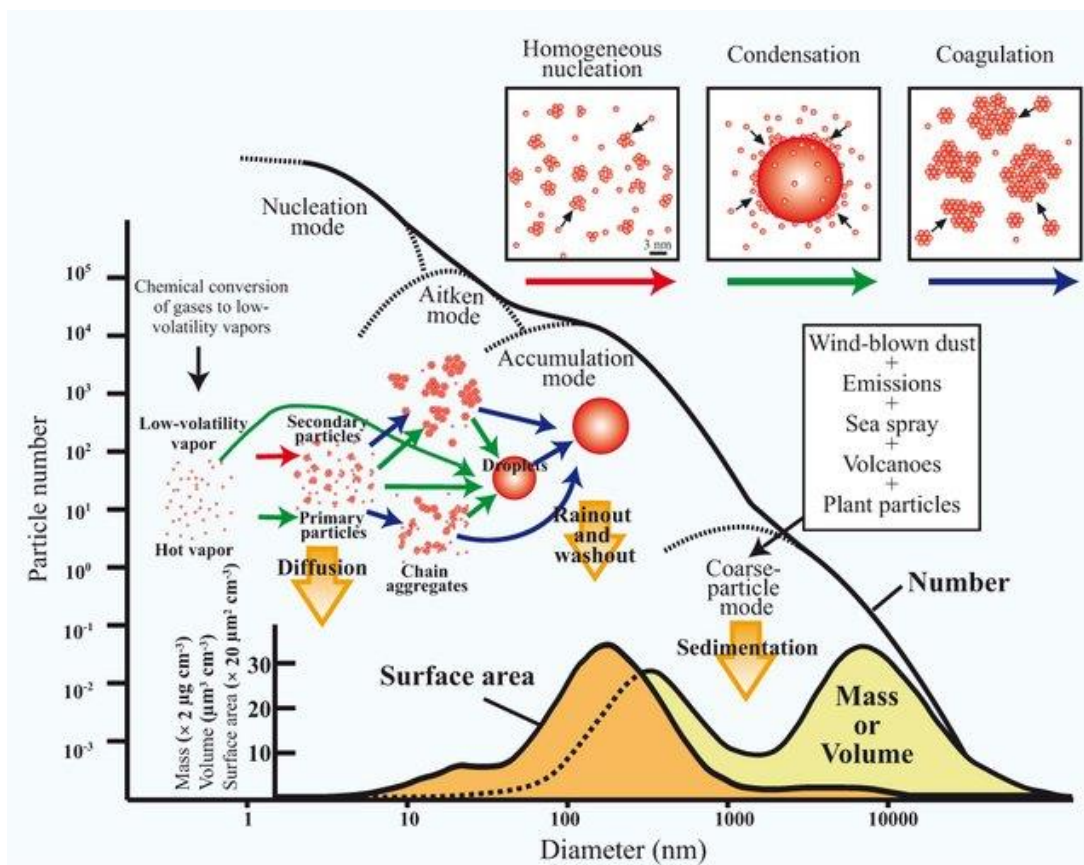
Partie A :
Synthèse des travaux de recherches

I. Introduction :

Enjeux et objectifs scientifiques

I.1 Les aérosols atmosphériques, un objet de recherche central

Les aérosols atmosphériques sont des particules solides ou liquides en suspension dans l'air dont le diamètre varie entre 0.001 et 10 μm . Les aérosols sont complexes et présentent une grande diversité de taille, de nature, de compositions et de propriétés physico-chimiques, optiques et hygroscopiques. Ils peuvent être localisés dans la troposphère, libre ou polluée, comme dans la stratosphère où leur durée de vie peut atteindre 1 à 2 ans. Les aérosols troposphériques ont un caractère plus éphémère avec des temps de résidence variant de quelques minutes à une dizaine de jours. Ils peuvent avoir une origine primaire lorsqu'ils sont directement émis par des sources naturelles (les déserts, les océans, les volcans, les feux de forêts) ou anthropiques (les routes et les véhicules, les activités industrielles et agricoles ou encore les feux de cheminée). Ils peuvent également résulter d'une conversion gaz-particule par le biais d'un processus de condensation. Si la première catégorie intègre des aérosols pouvant atteindre 10 μm , la deuxième catégorie (Figure I.1) concerne exclusivement des aérosols fins formés par accumulation (diamètre compris entre 0.1 et 2.5 μm) et ultrafins formés par nucléation ($d < 0.1 \mu\text{m}$) (Buseck & Adachi, 2008).



Les aérosols atmosphériques constituent un objet de recherche central en physique de l'atmosphère parce qu'ils affectent le bilan radiatif de la planète de manière directe, semi-directe et indirecte. Tous les aérosols diffusent et absorbent le rayonnement solaire (0.1-3µm) et tellurique (3-100 µm) dans des proportions très variables et encore assez méconnues, impliquant un forçage radiatif négatif (refroidissement) ou positif (réchauffement) selon leur type et leur quantité : il s'agit de l'effet radiatif direct des aérosols (Bohren & Huffman, 1998). Cet effet se manifeste majoritairement en condition de ciel dégagé. En considérant l'ensemble des aérosols atmosphériques, cet effet a pu jouer en faveur d'un refroidissement du climat depuis le début de l'ère industrielle (Boucher *et al.*, 2013). La structure verticale de l'atmosphère peut également se trouver modifiée par la présence d'aérosols absorbants, soit par le biais de la formation de nuages bas ou au contraire de la disparition de nuages se trouvant au-dessus de la couches d'aérosols : il s'agit de l'effet radiatif semi-direct des aérosols (Hansen *et al.*, 1997). Cet effet complexe peut induire un forçage radiatif positif à certains endroits et négatif à d'autres. Il apparaît dominant par rapport à l'effet direct des aérosols (Koren *et al.*, 2010). Enfin, les aérosols peuvent interagir avec la microphysique des nuages en constituant des noyaux de condensation : il s'agit de l'effet indirect des aérosols, scindé en deux catégories. Le pouvoir réfléchissant du nuage peut se trouver augmenté, c'est l'effet albédo des aérosols ou premier effet indirect (Twomey, 1977). La dynamique interne du nuage peut également être modifiée, impactant la formation des précipitations et ainsi la durée de vie, plus longue, du nuage : c'est le deuxième effet indirect (Albrecht, 1989). Bien que difficiles à estimer, ces effets indirects semblent contribuer au forçage radiatif négatif des aérosols sur le climat (Denman *et al.*, 2007). Au bilan, l'effet radiatif des aérosols au sommet de l'atmosphère est estimé négatif (refroidissement) (Figure I.2).

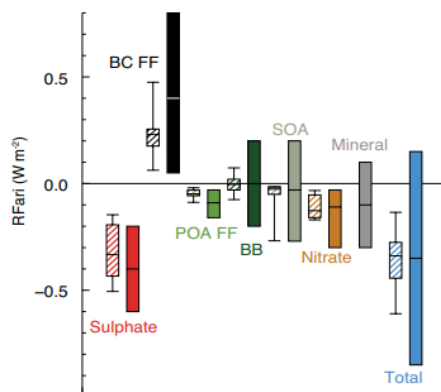


Figure I.2. Moyenne annuelle du forçage radiatif des aérosols au sommet de l'atmosphère (exprimé en W/m^2). La période considérée est 1750-2010. FF représente les combustibles fossiles et les biocarburants, BC le Black Carbon ou carbone suie, POA les aérosols organiques primaires, SOA les aérosols organiques secondaires et BB les Biomass Burning ou aérosols de combustion de la biomasse. Figure extraite de Boucher *et al.* (2013) dans IPCC-AR5 (2013).

Les aérosols atmosphériques localisés dans la troposphère impactent également de manière significative nos environnements terrestres (naturels ou anthropisés) et océaniques. La liste est longue, en voici quelques exemples. Les aérosols peuvent jouer un rôle sur les cycles hydrologiques à l'échelle régionale. C'est le cas notamment du carbone suie qui peut inhiber les précipitations par le biais de son interaction avec les nuages (Rosenfeld *et al.*, 2000). Ainsi, certains aérosols de nature anthropique pourraient présenter un impact sur le positionnement et l'intensité des moussons (Randles & Ramaswamy, 2008) ou encore accélérer la fonte des neiges de par leurs propriétés d'absorption du rayonnement solaire (Lee *et al.*, 2013). Les aérosols minéraux, communément appelés poussières désertiques (en anglais *desert dust*), d'origine naturelle, peuvent également influencer les régimes de mousson en Inde (Miller & Tegen, 1998) et en Afrique (Zhao *et al.*, 2011). Ces aérosols, qui

ont une durée de vie moyenne de 2,5 jours dans la troposphère et peuvent parcourir des distances de plusieurs centaines de kilomètres, ont également des impacts environnementaux liés à leur composition. Par exemple, le contenu en phosphore des poussières sahariennes semblerait affecter, de l'autre côté de l'océan Atlantique (Chiapello *et al.*, 2005), l'activité photosynthétique de la forêt amazonienne (Lovett, 2010). Leur contenu en fer impactent également la production primaire des océans (Dutkiewicz & Parekh, 2005) notamment via l'apparition de blooms phytoplanctoniques (exemple en Mer d'Arabie dans Bali *et al.*, 2019). Les poussières désertiques peuvent également transporter des contaminants organiques, des métaux-traces ou encore des micro-organismes qui peuvent servir de substrat à de multiples espèces de spores et champignons favorisant le déclin des récifs coralliens (exemple des Caraïbes dans Shinn *et al.*, 2000). Les aérosols atmosphériques peuvent également avoir un impact sur la visibilité horizontale à l'échelle régionale. C'est le cas des poussières en Afrique de l'Ouest (Anuforum, 2007) mais aussi des aérosols sulfatés et organiques qui, dans certaines zones humides, voient leur taille augmenter de par leurs propriétés hygroscopiques, ce qui favorise la diffusion du rayonnement solaire (exemple des parcs nationaux aux Etats-Unis dans Brignon, 2003). De manière plus générale, les aérosols atmosphériques, qu'ils soient de nature anthropique ou naturelle, peuvent considérablement altérer la qualité de l'air que nous respirons, des échelles régionales à urbaines, de manière directe, par le biais de concentrations élevées (exemple des poussières désertiques en Israël dans Ganor *et al.*, 2009), ou indirecte via des effets radiatifs amenant à la production d'ozone troposphérique (exemple des aérosols de pollution à Mexico dans Castro *et al.*, 2001).

On comprend alors aisément le rôle central que les aérosols troposphériques peuvent jouer sur la santé humaine. D'après l'OMS (2018), la pollution de l'air ambiant pourrait être responsable d'un total de 4.2 millions de décès prématurés à travers le monde, dont 300 000 décès d'enfants de moins de cinq ans. La notion de pollution atmosphérique particulière prend alors tout son sens. Il y est surtout question des particules fines, dont le diamètre est inférieur à 10 μm , et dont la définition correspond rigoureusement à celles des aérosols atmosphériques (§I.1), à ceci près qu'elles se trouvent en surface et sont respirables par les populations (notion d'exposition). Les études réalisées *in vivo* et *in vitro* combinées à des analyses épidémiologiques indiquent que les particules fines, peuvent provoquer des allergies, de l'asthme, des complications dans les grossesses mais aussi des maladies cardiaques, vasculaires, cérébrales, respiratoires ainsi qu'à long terme des cancers (Oh *et al.*, 2020). Certaines maladies infectieuses d'origine bactérienne telles que la légionellose, la tuberculose ou encore la maladie du charbon (anthrax) peuvent également être la conséquence d'une exposition chronique aux bioaérosols, aérosols constitués d'organismes vivants comme les bactéries, champignons, pollens et virus (Chen *et al.*, 2019).

Enfin, les aérosols atmosphériques constituent un objet de recherche central dans le domaine de la télédétection spatiale car ils sont difficiles à quantifier en environnement réel (naturel ou anthropique) de par leurs caractéristiques intrinsèques complexes et parce qu'ils sont dotés d'une grande variabilité dans l'espace (diversité des sources d'émissions et des quantités émises), dans le temps (durée de vie variant de quelques minutes à quelques jours) et sur la verticale (dépendant des caractéristiques des aérosols, notamment leur taille, et des conditions météorologiques). Par ailleurs, si l'estimation de l'impact radiatif des aérosols à l'échelle planétaire nécessite la connaissance des propriétés optiques et radiatives des aérosols de manière intégrée sur la colonne atmosphérique, les analyses d'impacts, notamment sur la santé humaine, impliquent de caractériser les aérosols, et notamment leur type et quantité, au plus proche de la surface.

I.2 Ma démarche scientifique

Mes activités de recherches se sont orientées vers l'atmosphère et les aérosols atmosphériques dès la thèse de doctorat, dont l'objectif était d'améliorer les produits satellitaires de la couleur de l'eau en zones côtières par le biais du développement d'une méthodologie de corrections atmosphériques spécifiques à ce milieu complexe (Partie B/§5.9, [Martiny, 2002](#)). J'ai alors adopté une démarche de modélisation du transfert radiatif dans l'atmosphère (Partie B/§5.1, [Santer & Martiny, 2003](#) ; [Martiny *et al.*, 2005a](#) ; [Martiny *et al.*, 2005b](#)), qui m'a progressivement amenée à mieux caractériser et comprendre les propriétés optiques de différents composants atmosphériques parmi lesquels les aérosols troposphériques. Par ailleurs, les valeurs de réflectances marines (entre autres produits de la couleur de l'eau) que je cherchais à améliorer n'excédant pas 2%, il s'est avéré très vite nécessaire d'adopter une approche rigoureuse en physique de la mesure afin de calibrer et valider les résultats obtenus en télédétection spatiale. C'est à partir de 2004 que mon champ thématique s'est ouvert à la question de la variabilité climatique en Afrique et des impacts régionaux associés. Les premières études réalisées, qui portaient sur les états de surface dynamiques en milieu semi-aride (Partie B/§5.1, [Martiny *et al.*, 2005c](#) ; [Martiny *et al.*, 2006](#)) ont constitué un réel tournant dans mon parcours, orientant clairement mes recherches vers la climatologie et spécifiquement en Afrique tropicale (Partie B/§5.1, [Philippon *et al.*, 2007](#) ; [Camberlin *et al.*, 2007](#) ; [Philippon *et al.*, 2008](#) ; [Richard *et al.*, 2008](#) ; [Martiny *et al.*, 2009](#) ; [Djoufack *et al.*, 2012](#) ; [Richard *et al.*, 2012](#) ; [Philippon *et al.*, 2014](#) ; [Philippon *et al.*, 2016](#)).

Je commence à m'intéresser à l'impact régional de la variabilité climatique sur la santé humaine, en particulier aux épidémies de méningites bactériennes en Afrique sub-saharienne dès 2007. J'y vois tout d'abord une évolution naturelle de mes recherches, un pont entre mes activités dans le domaine des méthodes physiques en télédétection, via les aérosols atmosphériques, et mes activités plus récentes en climatologie, dédiées à l'analyse des impacts régionaux de la variabilité climatique. Par ailleurs, le lien entre aérosols atmosphériques, plus précisément poussières désertiques, climat et épidémies de méningites bactériennes, bien que suspecté de longue date, soulève de nombreuses questions scientifiques. Ce champ de recherches émergent, notamment par le biais de l'avènement de nombreux produits aérosols issus de la télédétection spatiale, représente un challenge à relever sur un plan international et impliquant d'autres expertises scientifiques notamment en épidémiologie et médecine. Cette perspective représente alors pour moi l'opportunité de dépasser un périmètre de recherches disciplinaires, dans les domaines de la climatologie tropicale et de la télédétection des poussières désertiques (§II), pour aborder des analyses plus transverses et intégratrices de questions sociétales telles que les relations entre poussières, climat et méningites en Afrique (§III).

Depuis 2018, je m'intéresse également à la question de qualité de l'air en zones urbaines plus particulièrement à la pollution particulaire (§IV). Ce choix est en cohérence avec le fil directeur de mes recherches portant sur les aérosols, me permettant ainsi d'ouvrir de nouvelles perspectives d'analyses dédiées cette fois aux aérosols de nature anthropique. Le milieu urbain est également plus complexe et hétérogène que le milieu rural africain considéré jusqu'alors. Enfin, les variabilités spatio-temporelles se produisent à d'autres échelles, plus fines, et à très haute résolution, ce qui constitue un nouveau défi méthodologique à relever en télédétection ainsi que dans le domaine de la physique de la mesure.

En résumé, les activités de recherches que j'ai choisies de mettre en lumière dans ce mémoire, et qui constituent l'élément le plus structurant de mon parcours scientifique, s'articulent autour des aérosols troposphériques, d'origine naturelle (poussières désertiques) et anthropiques (aérosols urbains). Elles investissent plusieurs milieux (rural et urbain), sont multi-échelles (régionale à locale) et s'insèrent dans des contextes climatiques tropical (Afrique sub-saharienne) et tempéré (zones urbaines françaises). Elles ont pour objectif commun de mieux quantifier, caractériser et comprendre la dynamique spatio-temporelle des aérosols en surface, en se basant sur des méthodes physiques en télédétection et des approches de terrain, comme élément essentiel de validation, afin notamment de servir des thématiques sociétales comme celle de la santé humaine. Elles sont le fruit de ma formation en physique de l'atmosphère et de ma découverte de la climatologie quelques années plus tard. Elles résultent également de diverses opportunités de recherches, comme par exemple la participation à des programmes internationaux tels qu'AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) en début de carrière, ou localement très structurant tels que le programme POPSU (Plateforme d'Observation des Projets et Stratégies Urbaines) ciblé sur Dijon Métropole. Des rencontres et des collaborations pérennes avec des chercheurs dans des domaines variés tels que la médecine, l'épidémiologie, la géographie de la santé ou encore la biostatistique et l'informatique, ont constitué un cadre complet et pluridisciplinaire permettant d'offrir de nouveaux points de vue sur un objet de recherches donné, ici les aérosols troposphériques. L'ensemble de ces éléments, mis en place pas à pas, et avec le temps, m'a semblé essentiel pour façonner des recherches originales permettant d'identifier des zones d'ombre dans la connaissance des interfaces entre aérosols troposphériques et enjeux environnementaux et sanitaires.

Ce mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches a pour objectif de présenter le cheminement scientifique que j'ai adopté ainsi que les pistes explorées permettant de relever ces défis. Il comporte 3 blocs, chacun introduit par un préambule, pour le rappel des connaissances, et une série de questions scientifiques, complétée par des éléments contextuels jugés utiles : **(§II) la télédétection des poussières désertiques (§II)**, étape disciplinaire et préliminaire indispensable au développement de mes recherches à l'interface entre environnement et sociétés ; **(§III) les relations entre poussières désertiques, climat et santé en Afrique**, avec un focus sur les méningites bactériennes dans la Ceinture sahélienne ; **(§IV) la pollution particulaire en milieu urbain**, ouvrant sur les aérosols d'origine anthropique et investissant la très haute résolution spatiale dans des environnements complexes et hétérogènes.

Aujourd'hui, et dans la suite, l'objectif est de poursuivre mes activités dans le domaine des sciences de l'environnement avec pour objet de recherches principal les aérosols troposphériques, et à l'interface entre environnement et sociétés (§VI/Perspectives de recherches).

II. Télédétection des poussières désertiques

Préambule : le climat et les poussières désertiques au Sahel

Le climat sahélien est caractérisé par l'alternance des flux de Mousson pendant l'été boréal et de l'Harmattan pendant l'hiver boréal (Adetunji, 1979). L'Harmattan est un vent chaud et sec de direction nord-est observé en Afrique de l'Ouest. C'est un alizé continental, qui souffle depuis les zones de hautes pressions sub-tropicales vers les zones de basses pressions équatoriales. Les cellules de Hadley (Figure II.1), d'orientation nord-sud, sont dotées d'une branche ascendante centrée sur la Zone Convergence Inter Tropicale (ZCIT). Les vents provenant des deux hémisphères (de direction nord-est dans l'hémisphère Nord et de direction sud-ouest dans l'hémisphère Sud) qui convergent vers la ZCIT sont appelés les alizés. Cette convergence ainsi que le profil vertical instable de cette zone favorisent la convection profonde, assurant ainsi un transport vertical de l'énergie des basses couches vers la tropopause (Peugeot *et al.*, 2011). Au cours de son ascension, l'air devient de plus en plus sec. Les branches horizontales supérieures des cellules de Hadley transfèrent alors de l'énergie sensible (T) et de l'énergie potentielle (Z) des zones équatoriales et tropicales (régions excédentaires) vers des zones de haute pression sub-tropicales (régions déficitaires). La circulation atmosphérique ainsi décrite est fermée et cyclique, formant deux cellules symétriques par rapport à l'équateur.

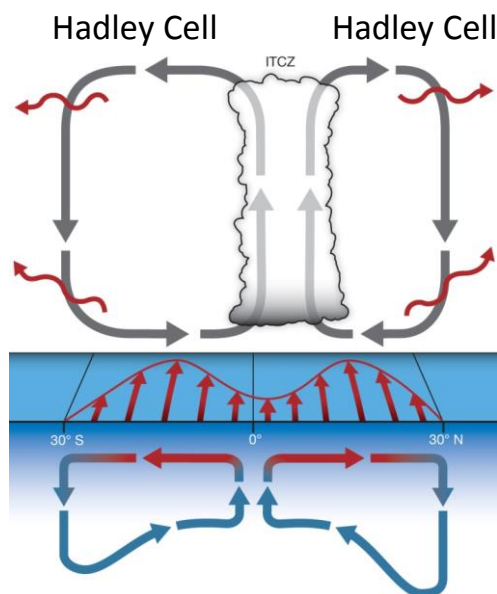


Figure II.1. Représentation des cellules de Hadley.
Figure extraite de Schneider *et al.* (2014).

La ZCIT est une zone de convection de l'air. Elle diffère de la zone de convergence des alizés, qui s'opère en surface, et que l'on nomme Front InterTropical (FIT). ZCIT et FIT peuvent s'avérer distants de plusieurs centaines de kilomètres en été au Sahel (Beucher, 2010). Chaque année, le déplacement de la ZCIT et du FIT du Sud vers le Nord en été puis du Nord vers le Sud en hiver rythme l'alternance entre saison des pluies et saison sèche (Figure II.2). Au Sahel, là où la quantité annuelle de précipitations n'excède pas 600 mm, la saison sèche s'étend d'octobre à mars (Figure II.3). Le régime d'Harmattan commence à se mettre en place à partir d'octobre (« 1-mise en place ») : on peut observer des vents de surface de direction nord-est sur l'ensemble de la bande latitudinale 15-24°N avec des vitesses plus élevées sur la partie Est, au Niger et au Tchad. En novembre et décembre (« 2-intensification »), les vents

d'Harmattan se renforcent et s'étendent vers le sud jusqu'à la latitude 10°N. En janvier et février (« 3-maximum »), ils atteignent leur maximum d'intensité et d'extension spatiale. En mars (« 4-affaiblissement »), les vents diminuent en intensité sur l'ensemble de la zone. En avril (« 5-fin »), le régime d'Harmattan prend fin progressivement et les caractéristiques des vents comparables à aux conditions d'octobre. Avril est souvent considéré comme le mois du début de la transition entre le régime d'Harmattan et le régime de Mousson. C'est au coeur de la saison sèche que se produit le maximum de la saison des poussières désertiques. Le trimestre janvier-février-mars, noté dans la suite JFM, est ainsi caractéristique de grandes quantités de poussières en provenance du Sahara. En effet, le cycle annuel des poussières observé au Sahel est très corrélé à la migration annuelle nord-sud de la ZCIT (Engelstaeder *et al.*, 2007).

Le cycle de vie des poussières désertiques peut être résumé en 3 étapes : émission, transport et dépôt. Les poussières désertiques sont principalement issues des sols les plus secs, dont l'érodabilité est élevée (émission), ici le Sahara, puis ensuite amenées dans des régions plus lointaines telles que le Sahel via l'Harmattan (transport) où elles peuvent terminer leur trajet (dépôt). Pour qu'il y ait émission de poussières désertiques, il faut qu'il y ait érosion des particules du sol, et pour que cela se produise, le vent doit exercer sur le sol une force de friction dépassant localement les forces de cohésion des particules du sol, permettant ainsi leur mise en mouvement (Alfaro *et al.*, 1997). Il existe donc un seuil de vitesse de vent au-delà duquel les particules du sol se mettent en mouvement (Bagnold, 1973). Ce seuil dépend également des caractéristiques du sol, variant ainsi géographiquement (Junge, 1979). Trois processus d'érosion éoliennes des particules du sol sont clairement identifiés : la suspension pour les particules les plus fines (diamètre inférieur à 20 µm), la saltation (ou rebond) pour les particules de taille moyenne (diamètre médian d'environ 100 µm), le creeping (ou déplacement horizontal) pour les particules les plus grossières (diamètre supérieur à 500 µm) (Marticorena & Bergametti, 1995). La saltation est le phénomène d'émission de poussières dominant (Schepanski *et al.*, 2007) ; cependant, ce phénomène de rebond des particules sur le sol finit par induire une diminution de la cohésion de l'agrégat des particules, permettant ainsi à des poussières fines de se libérer (Pye, 1987). Ainsi, la distribution en taille des poussières désertiques est comprise entre 0.1 et 20µm, centrée sur un diamètre moyen de 8µm (Todd *et al.*, 2007).

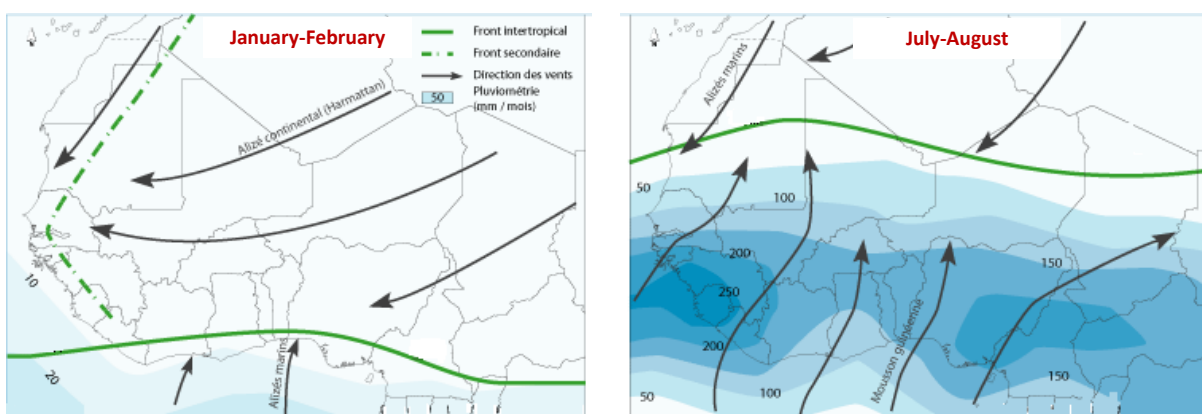


Figure II.2. Position du Front InterTropical en hiver boréal (à gauche) et en été boréal (à droite).
Figure extraite de la thèse de [Deroubaix \(2013\)](#) (Partie B/§4.3).

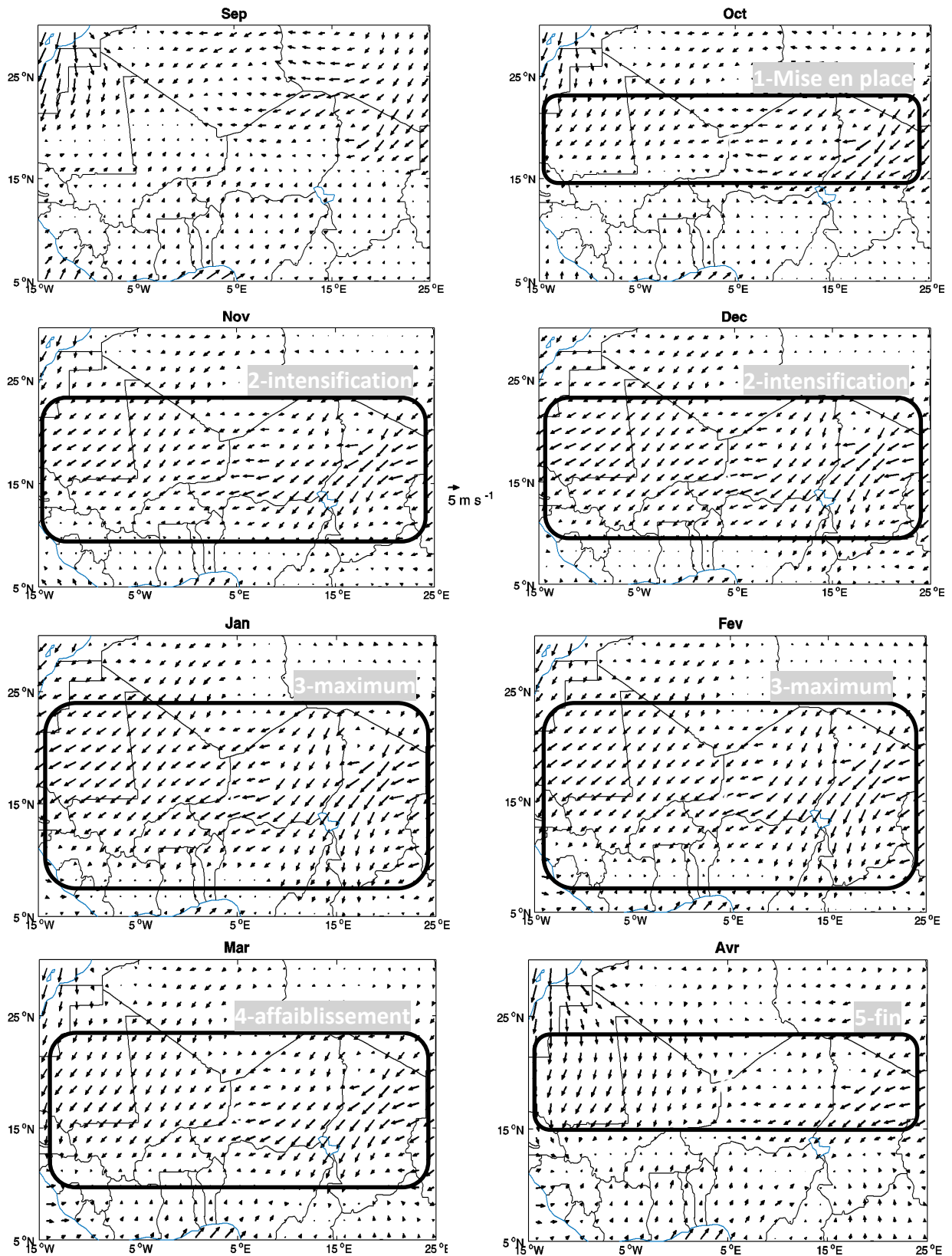


Figure II.3. Cartes mensuelles des vents à 10m de septembre à avril en Afrique de l'Ouest, réalisées à partir des réanalyses ERA-Interim à 0.75° de résolution spatiale sur la période 1979-2013.
Figure adaptée de [Martiny \(2015\)](#) (Partie B/§5.5).

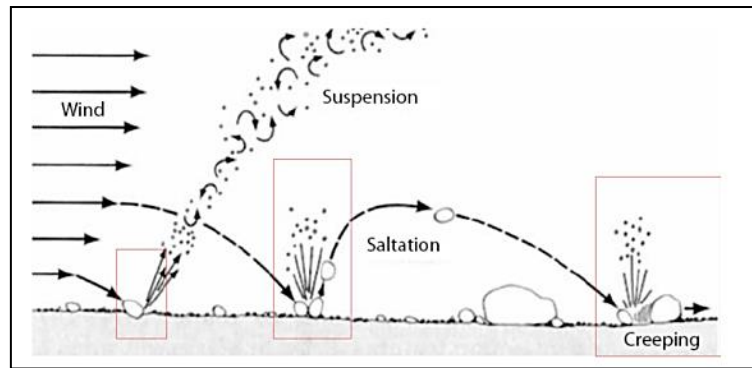


Figure II.4. Les différents processus d'émissions des poussières désertiques selon Marticorena & Bergametti (1995). Figure extraite de Schepanski et al. (2007).

Pendant la saison sèche, la source principale des poussières désertiques est la dépression de Bodélé au Tchad (Goudie & Middleton, 2006) (Figure II.5). Cette source présente la particularité d'être active toute l'année avec un maximum de janvier à mars et un minimum en août (Todd *et al.*, 2007). Localisé entre les massifs du Tibesti et de l'Ennedi, le désert de Djourab est à la sortie d'un couloir large de plusieurs centaines de kilomètres. A la sortie de ce couloir, qui se trouve être dans la direction des alizés, se forme un courant-jet de basses couches, inexistant plus au Nord (Washington, 2005). Cette source décrite dans le travail de [thèse d'Adrien Deroubaix \(2013\)](#), dont j'ai assuré la co-direction (Partie B/§4.3), s'avère également spéciale de par la nature de son sol - les particules le constituant étant des particules sédimentaires très fines, les diatomées (Gasse, 2002). En effet, la région de Bodélé est une dépression géographique qui a été un lac durant l'holocène (Shuzter *et al.*, 2019).

Les poussières désertiques atteignant le Sahel pendant la saison sèche, avec un maximum observé en mars, proviennent donc majoritairement de la source de Bodélé (Marticorena *et al.*, 2010). Ce sont généralement des événements de poussières d'échelle continentale et dont la durée varie entre 1 et 6 jours, avec une moyenne de 2.5 jours. Ces événements sont principalement dus à des incursions de front froid venant du nord de l'Afrique (Jankowiak & Tanré, 1992; Washington *et al.*, 2003; Knippertz & Fink, 2006). Ceci n'exclut cependant pas l'influence d'autres sources de poussières en hiver boréal, aspect abordé un peu plus tard dans ce document (§III.4). En effet, si bon nombre d'études ont focalisé sur les poussières désertiques en période de pré-mousson (Lavaysse *et al.*, 2009) et de Mousson (Konare *et al.*, 2008), un champ d'investigations reste ouvert concernant les poussières désertiques de la saison sèche. Leur télédétection s'avère également complexe et notamment en surface (§II) où ils peuvent jouer un rôle-clé sur la santé humaine (§III).

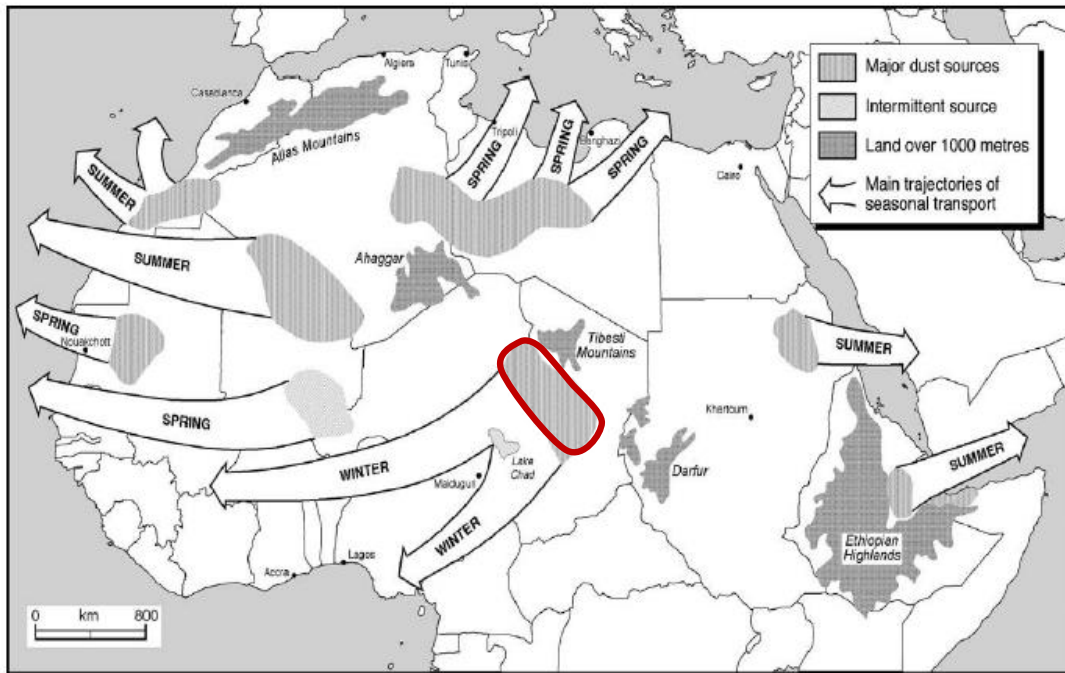


Figure II.5. Saisonnalité des sources sahariennes de poussières désertiques. La source de Bodélé est entourée en rouge sur la figure extraite de Goudie et Middleton (2006).

Questions scientifiques et éléments contextuels

L'un des enjeux fort de mes activités de recherches a été d'exploiter des produits satellitaires aérosols existants afin d'en montrer le potentiel en vue d'études d'impacts sur la santé humaine. En effet, il n'existe pas de mission spatiale spécifiquement dédiée à ces thématiques à l'heure actuelle. Les futures missions spatiales dédiées à l'item générique de la qualité de l'air sont à horizon 2025 : MESCAL pour les particules, suite de la mission CALIOP-CALIPSO dont l'un des objectifs est la spéciation des aérosols sur la colonne atmosphérique et en surface (§II.4), MicroCarb et Merlin pour les gaz à effets de serre (GES) anthropiques (CNES-TOSCA, 2019).

Les années 2010 ont vu l'accroissement considérable de la quantité et de la qualité des observations du système Terre-Atmosphère par satellite et notamment des produits aérosols. L'objectif de la partie II est de faire une synthèse de l'évaluation d'une sélection de ces produits dans le but de documenter l'exposition des populations aux poussières désertiques. La difficulté majeure réside d'abord dans le fait que la plupart des produits aérosols donne une information intégrée sur la colonne atmosphérique. Il s'avère donc indispensable de travailler selon 2 axes : 1. les produits issus des radiomètres imageurs sont-ils des proxys acceptables des concentrations massiques des poussières désertiques en surface? 2. quels sont les apports d'autres produits, issus par exemple de la télédétection LIDAR, qui offre ce type d'estimations en surface, mais dont la fauchée est faible (Figure II.6) ?

Par ailleurs, il existe différents types de produits aérosols intégrés sur la colonne atmosphérique. Dans ce contexte, quels sont ceux qui sont les plus adaptés à l'étude des impacts sanitaires au Sahel (§II.1) ? Nous avons d'une part exploré les potentialités des indices d'absorption des aérosols ou *Absorption Index* en anglais (AI) (Torres *et al.*, 1998 ; Torres *et al.*, 2007) (§II.2) puis celles des épaisseurs optiques des aérosols ou *Aerosol Optical Depth* en anglais (AOD). **Les AI et les AOD sont des indicateurs de la quantité d'aérosols présents sur la colonne atmosphérique.** Nous nous sommes ensuite interrogés sur la différenciation possible des types d'aérosols à partir de MODIS (§II.3) puis sur l'apport des produits issus de CALIOP (§II.4).

La première climatologie des aérosols réalisée dans les années 80 (Tanré *et al.*, 1984) indique, pour cette zone du globe, une dominance de poussières désertiques (AOD moyenne annuelle de 1.9) parmi des aérosols de type continental (AOD de 0.2), urbain (AOD de 0.1) et, dans une très moindre mesure, maritime (AOD de 0.05). Une climatologie actualisée à la fin des années 90 (Tegen *et al.*, 1997) sépare les aérosols rencontrés en hiver de ceux rencontrés en été, et affine leur spéciation en indiquant en plus de la présence de poussières désertiques celle d'aérosols organiques, sulfatés et carbonés (carbone suie). Ces auteurs s'accordent sur la très large contribution des poussières désertiques à l'épaisseur optique totale des aérosols dans cette région du monde (Tompkins *et al.*, 2005). Il est à noter que ces climatologies ont été utilisées de manière opérationnelle dans les forecast ECMWF, respectivement avant et après l'année 2003. Il est à noter qu'à produit aérosol équivalent, les performances ne sont pas les mêmes dépendant de l'algorithme d'inversion utilisé, de la zone considérée ou encore de la saison étudiée (Eymard *et al.*, 2012, Partie B/§5.1). Dans le cas de l'analyse des impacts sanitaires, il fallait faire un choix adéquat vis-à-vis du type d'aérosols ciblés (§III/Préambule), i.e. les poussières désertiques, de la zone d'étude, i.e. la bande sahélienne, et la saison, i.e. une partie de la saison sèche (JFM) ainsi que le trimestre avril-mai-juin noté AMJ dans la suite.

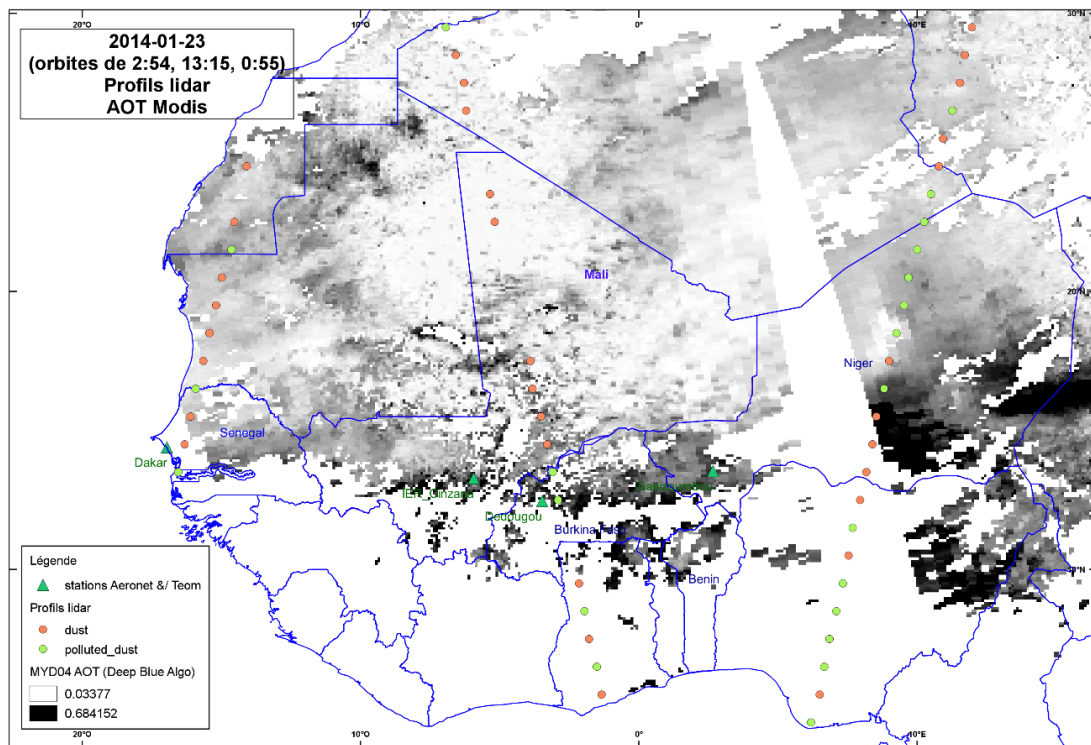


Figure II.6. Carte des AOD MODIS du 23 janvier 2014 avec positionnement des spots lidar et identification du type de poussière : en rouge la catégorie des « dust » et en vert celle des « polluted dust ». Courtesy : J.L. Léon. Figure extraite de [Martiny \(2016b\)](#), Partie B/§5.8.

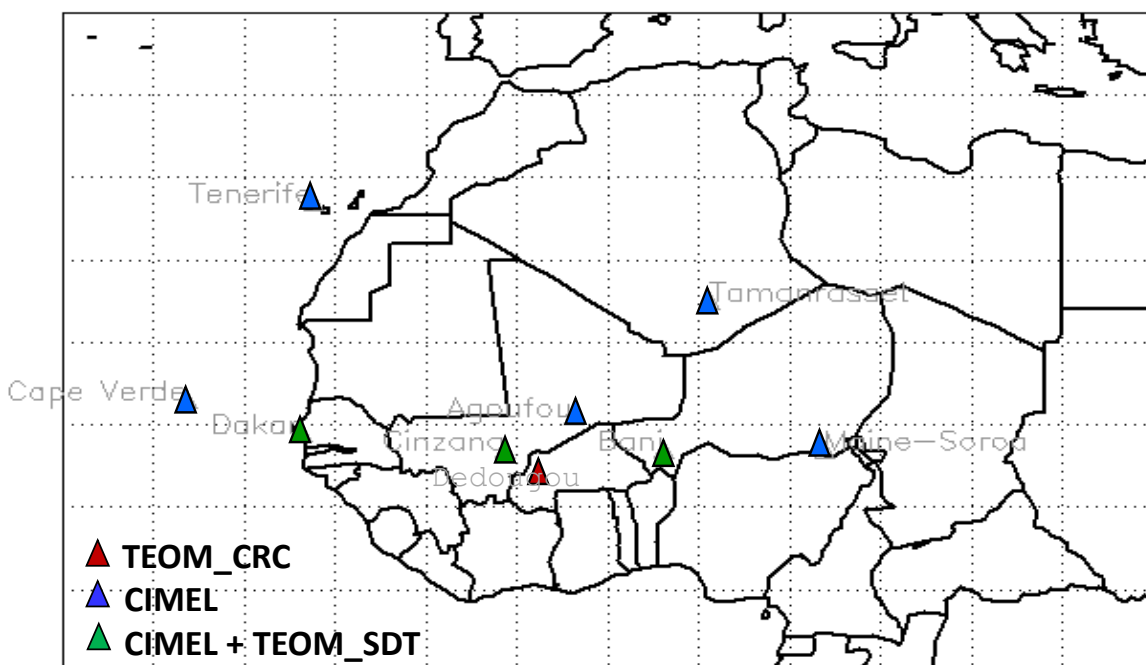


Figure II.7. Carte des sites de mesures in-situ disponibles sur la zone d'étude. Les triangles bleus indiquent les sites CIMEL du réseau AERONET/PHOTONS. Les triangles verts indiquent des sites qui combinent un CIMEL du réseau AERONET/PHOTONS et un TEOM du STD. Le triangle rouge indique le site TEOM implémenté dans le cadre de mes projets de recherches (§Fiche 1). Figure extraite [Martiny et al. \(2015\)](#), Partie B/§5.3.

Il fallait également cibler en priorité les produits dont la profondeur temporelle était la plus longue de manière à les faire coïncider avec les données épidémiologiques disponibles. En effet, même si des cas de méningites bactériennes sont observés chaque année, et des foyers épidémiques relevés très régulièrement dans certaines régions et certains pays, les vagues épidémiques, plus significatives car elles s’expriment à l’échelle régionale, ont une fréquence de l’ordre d’une dizaine d’années (§III/Préambule).

Enfin, il était essentiel de considérer des mesures *in-situ* afin de calibrer et valider (calval) les produits satellitaires aérosols. Ces dernières sont peu nombreuses en Afrique et les séries temporelles, parfois lacunaires, démarrent au milieu des années 90 pour les mesures optiques (instruments CIMEL), avec le développement du réseau AERONET/PHOTONS de la NASA (Holben *et al.*, 2001), et au milieu des années 2000 pour les mesures de concentrations massiques (instruments TEOM), avec la mise en place du Sahelian Dust Transect (SDT) (Marticorena *et al.*, 2010). Dans la suite de ce travail, seront très largement utilisées les mesures *in-situ* issues de quelques sites en particulier, situés en plein cœur du Sahel : Banizoumbou au Niger, Cinzana et Agoufou au Mali (Figure II.7). Le site le mieux documenté est celui de Banizoumbou au Niger (Tableau II.1) avec plus de 20 ans de mesures d’épaisseurs optiques des aérosols (AOD), accompagnées de coefficients d’Angstrom ou *Angstroem Exponent* en anglais (AE), qui correspondent à la dépendance spectrale des AOD. **Les AE donnent des indications précieuses sur la taille des aérosols.** Ils varient entre 0 et 4, un AE nul correspondant à la présence d’aérosols grossiers.

Les instruments TEOM (Tapered Element Oscilating Microbalance) implantés au Niger et au Mali dans des zones peu habitées. En effet, ces mesures sont dédiées avant tout à la compréhension des aérosols en milieu sahélien « naturel ». Ainsi, si les mesures issues de ces instruments sont particulièrement utiles dans le cadre d’un exercice de calval de produits de télédétection, elles ne permettent pas de répondre totalement à la question du lien entre aérosols et méningites bactériennes à l’échelle locale. L’idée d’implanter un nouvel instrument de mesures en Afrique prend alors tout son sens. Un nouveau site de mesures TEOM a été défini au Burkina Faso, en fonctionnement opérationnel depuis 2013 (§Fiche 1). Il permet de renseigner les concentrations massiques des aérosols dont le diamètre est inférieur à 10µm (PM₁₀). Le lieu d’implantation a été réfléchi de manière à combler un manque du point de vue géographique par rapport au SDT mais également et surtout dans le but de renseigner les concentrations des poussières désertiques dans une zone rurale particulièrement touchée par les épidémies de méningites bactériennes, le district de Dédougou (Woringer *et al.* (2018), Partie B/§4.1).

<i>Site</i>	<i>Lat/Lon</i>	<i>Instruments</i>	<i>Période</i>	<i>Paramètres</i>
Banizoumbou NIGER	13.55N ; 2.67E	CIMEL TEOM_SDT	>1995 >2006	AOD, AE [PM10]
Cinzana MALI	13.28N ; 5.93W	CIMEL TEOM_SDT	>2004 >2006	AOD, AE [PM10]
Agoufou MALI	15.35N ; 1.48W	CIMEL	2002-2011	AOD, AE
Dédougou BURKINA FASO	12.45N ; 3.43W	TEOM_CRC	>2013	[PM10]

Tableau II.1. Les principaux sites de mesures *in-situ* localisés au Sahel et leurs caractéristiques. Les instruments CIMEL appartiennent au réseau AERONET/PHOTONS. Les instruments TEOM appartiennent soit au réseau SDT (TEOM_SDT) soit à l’équipe CRC (TEOM_CRC).

II.1 Bilan des produits aérosols présentant un potentiel pour la santé

Ce paragraphe vise à dresser un état des lieux des missions satellitaires présentant un potentiel a priori intéressant pour l'analyse des impacts sur la santé humaine. Ce bilan servira de base pour justifier les choix faits dans la suite de mes activités de recherches visant à l'analyse des relations entre poussières désertiques, climat et méningites bactériennes (§III).

Les produits PARASOL/POLDERS, MSG1-2-3/SEVIRI, AATSR1-2, MODIS, TOMS/OMI et CALIOP/CALIPSO sont emblématiques dans la communauté scientifique en télédétection des aérosols. Ils sont listés dans le tableau II.2 avec leurs principales caractéristiques et leurs spécificités. En théorie, ils présentent chacun des avantages et des limites vis-à-vis de l'analyse des impacts sanitaires ; quels choix opérer alors dans la pratique ?

Les produits PARASOL/POLDERS sont issus de 3 instruments : POLDER-1 à bord de la plateforme satellitaire ADEOS I (novembre 1996-juin 1997), POLDER-2 à bord d'ADEOS II (avril 2003-octobre 2003) et PARASOL à bord du microsatellite CNES/Myriade au sein de la constellation A-train (décembre 2004-décembre 2013). La profondeur temporelle maximale avec PARASOL est de 9 ans, sa résolution spatiale de 6 x 7km² au nadir. Ces instruments sont dotés de plusieurs canaux polarisés et ils peuvent faire des acquisitions multi-directionnelles (jusqu'à 16). L'avantage de la polarisation est de permettre notamment la distinction des différents types d'aérosols en présence et de caractériser, dans le même temps, la phase des nuages (gouttes d'eau, cristaux de glace). Ainsi, il est possible, avec ce type de produit de détecter et de quantifier des aérosols au-dessus de zones nuageuses. Ces produits sont alors particulièrement indiqués dans l'étude des processus d'interactions entre les aérosols et les nuages, clés dans un contexte de variabilité et changement climatiques. Enfin, d'après une étude de Bréon *et al.* (2011), ils sont également plus performants que d'autres produits (notamment MODIS) dans l'inversion du mode fin des aérosols au-dessus des surfaces continentales. Cependant, les poussières désertiques étant des particules dont le diamètre peut excéder 10µm (§II/Préambule), l'utilisation de ce type de produits ne semble pas particulièrement adaptée ici.

Les produits issus de l'instrument SEVIRI à bord de MSG1-2-3, présentent la particularité d'avoir une très haute répétitivité temporelle avec des images acquises toutes les 15mn et une résolution spatiale de 3km au nadir. L'objectif majeur de ces missions est de fournir des observations météorologiques mais la quantité et la qualité des données acquises a permis de focaliser également sur les aérosols. Les premiers algorithmes SEVIRI (Thieuleux *et al.*, 2005) et ceux qui ont suivi donnent accès aux AOD et aux AE au-dessus des océans. Au-dessus des terres émergées, deux algorithmes sont couramment utilisés : le produit SMAOL pour des AOD à 550nm (et des AE) depuis 2012 au pas de temps natif de 15mn (et en quotidien) et le produit AERUS-GEO pour des AOD à 630nm (et des AE) depuis 2014 au pas de temps quotidien. Le produit AERUS-GEO semble particulièrement adapté aux surfaces réfléchissantes de type désertique. Il permet en outre d'obtenir des valeurs d'AOD dans 52.7% des cas contre 20.3% dans le cas de MODIS ; ceci est lié à la très haute répétitivité temporelle des observations (Carrer *et al.*, 2010). Ce produit est donc très intéressant mais au moment du projet CNES TELEPaF, dont j'ai assuré la responsabilité scientifique (Martiny (2017-2019), Partie B/§2.1), la profondeur temporelle disponible des produits AERUS-GEO était de 2 ans (à l'heure actuelle, les produits AERUS démarrent en 2010).

D'autres missions, initialement dédiées à l'observation des températures de surface océaniques telles que AATSR-1 (1991-2000) et AATSR-2 (1995-2011), et estampillées « infrarouge », fournissent également des AOD à 550nm avec une résolution spatiale de 1km au nadir. Cependant, d'après de Leeuw *et al.* (2018), si les variations interannuelles des aérosols sont bien reproduites par les produits AATSR, une sous-estimation des AOD₅₅₀ de l'ordre de 0.1 à 0.2 a été clairement établie comparativement aux produits MODIS. Ceci serait lié aux performances limitées de AATSR au-dessus des surfaces réfléchissantes (Figure II.8). Les AOD₅₅₀ issues de AATSR sont donc très intéressantes si l'on souhaite obtenir de longues séries temporelles moyennant un exercice de recalage de ces dernières, par exemple entre AATSR et MODIS Terra avec un overlap de 2000 à 2011.

Les produits MODIS sont une référence en termes de télédétection des aérosols. Ce sont des produits dits de « moyenne résolution spatiale », avec des pixels de quelques centaines de mètres de côté au minimum (250m à 1km dépendant des bandes spectrales) et une répétitivité quotidienne. Leur profondeur temporelle est d'environ 20 ans. Il existe plusieurs algorithmes d'inversion pour les AOD, parmi lesquels un algorithme adapté aux surfaces réfléchissantes : ce sont les produits Deep Blue, notés DB dans la suite et décrits en §II.3. Au démarrage des études portant sur le lien entre poussières et méningites, un seul inconvénient résidait à l'utilisation de ces produits conjointement aux données épidémiologiques : la disponibilité des données dans les années 90 (§II.3). C'est ainsi que nous avons initialement orienté notre choix vers les produits aérosols TOMS/OMI, décrits en §II.2. Par la suite, nous avons travaillé avec les produits MODIS-DB, offrant une moins bonne profondeur temporelle mais une bien meilleure précision des produits aérosols (§II.3), puis nous avons exploré les produits CALIOP (§II.4), à forte valeur ajoutée pour l'inversion des aérosols en surface.

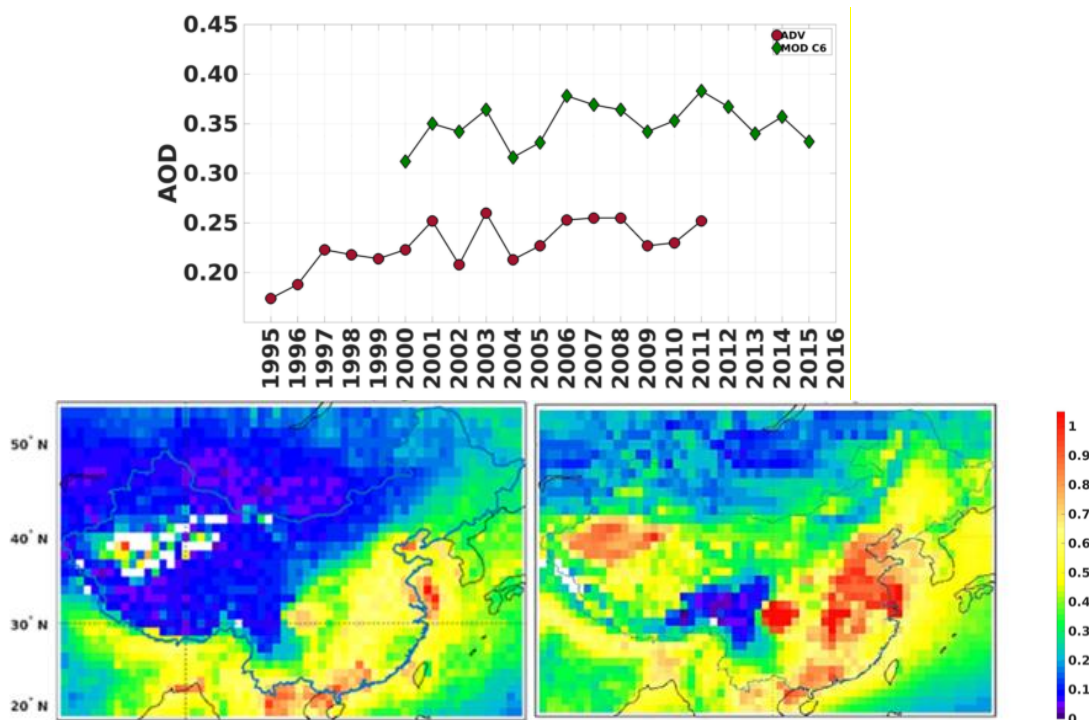


Figure II.8. Comparaison des AOD 550 issues de AATSR et de MODIS en Chine : séries temporelles de 1995 à 2015 (en haut) – en rouge AATSR et en vert MODIS - et moyennes en mars-avril-mai des AOD₅₅₀ de 2000 à 2011 pour AATSR (en bas à gauche) et MODIS (en bas à droite). Figure extraite de de Leeuw *et al.* (2018).

<i>Instrument</i>	<i>Objectifs</i>	<i>Produits</i>	<i>Période</i>	<i>Spécificités</i>	<i>Domaine (µm)</i>	<i>Avantages</i>	<i>Limites</i>
POLDERS/PARASOL Res. Spatiale : 6 x 7 km ²	Nuages Aérosols	AOD550 AE Aerosol altitude ¹	2005-2013	Polarisation Acquisitions multi-angulaires	0.443-0.864 9 canaux : 8 VIS, 1 PIR ³	Précisions dans les AOD et notamment le mode fin	Profondeur temporelle <10 ans
SEVIRI Res. Spatiale : 3km au nadir	Météorologie	AERUS-GEO : AOD630 AE	> 2014 ²	Très haute résolution temporelle (15mn)	0.56-12.4 12 canaux : 2 VIS, 1 PIR, 8 IR	Produit performant sur les surfaces réfléchissantes car inversions via modèle BRDF semi-empirique (<i>kernel-driven</i>) indépendante du modèle d'aérosols	Profondeur temporelle <10 ans
AATSR-1-2 Res. Spatiale : 1km au nadir	Températures de surface	AOD550 AE	1991-2011	Très longue profondeur temporelle à une résolution spatiale kilométrique	0.55-12 7 canaux : 2 visible, 1 PIR, 4 IR	Profondeur temporelle >20 ans et produit disponible dans les années 90	Inversion sur surfaces réfléchissantes
MODIS Res. Spatiale : 250m (B1-2), 500m (B3-7) et 1km (B8-36) au nadir	Aérosols Nuages Surfaces continentales Couleur de l'eau Température atmosphérique Ozone	AOD550 AE SSA	>2002 (Aqua)	Compromis entre résolutions spatiale (MR), spectrale et revisite (quotidienne) Produits issus de plusieurs algorithmes	0.41-14.2 36 canaux : 11 VIS, 7 PIR, 18 IR	Produits performants sur les surfaces réfléchissantes (algorithme <i>Deep Blue</i>) avec une profondeur temporelle ~20 ans	Produit indisponible dans les années 90

TOMS/OMI Res. Spatiale : 24x39km ² – TOMS 24x13km ² – OMI	Ozone Aérosols NO ₂ , HCHO, SO ₂ ⁴	AI ⁵	1996-2006 (TOMS/Earth Probe) >2004 (OMI/Aura)	Indice aérosol semi-empirique inversé à partir du domaine de l'ultraviolet	TOMS/Earth Probe : 0.31-0.38 6 canaux dans l'UV OMI/Aura : 0.27-0.5 3 canaux : 1 VIS, 2 UV	Indice aérosol adapté à la détection des aérosols désertiques, disponible sur une profondeur temporelle > 20 ans incluant les années 90 OMI a été conçu pour assurer la continuité de TOMS avec une meilleure résolution spatiale	Indicateur semi-empirique d'aérosols
CALIOP Res. Horizontale : 335m (0- 8.2km) 5km (30-40km) Rés. Verticale ⁶ : 30m (0-8.2km) 300m (30-40km)	Aérosols Nuages	σ ⁷ AOD PM	>2006	Téledétection LIDAR	0.532-1.064 2 canaux : 1 VIS, 1 PIR	Distribution verticale des aérosols et des nuages Spéciation des aérosols et des nuages Altitude des aérosols et des nuages	Fauchée des images, répétitivité des images, profondeur temporelle < 10 ans

¹ 2020 (<http://www.icare.univ-lille1.fr/parasol/products>)

² Le traitement de l'ensemble des données disponibles depuis 2002 (SEVIRI à bord de MSG-1) n'est pas encore disponible à ce jour

³ PIR entre 0.8 et 2 μ m

⁴ Pour OMI

⁵ Aerosol Absorption Index

⁶ 8 couches au maximum ; résolutions verticales à 532 nm

⁷ Coefficient d'extinction

Tableau II.2. Bilan des missions satellitaires et produits aérosols emblématiques présentant un potentiel pour l'analyse des impacts sanitaires

II.2 Les AI sont-ils représentatifs des poussières désertiques en surface ?

Les produits TOMS (1996-2006) et OMI (>2004) nous ont semblé très intéressants à mobiliser de par leur profondeur temporelle supérieure à 20 ans (en les combinant) et leur disponibilité dans les années 90 (Tableau II.2). En réalité un premier capteur TOMS a été lancé à bord de Nimbus-7 (1978-1992). Nous avons volontairement omis cette période, d'une part lié à l'interruption de 4 ans entre les missions TOMS/Nimbus-7 et TOMS/Earth Probe, d'autre part lié à la résolution spatiale de ce premier capteur TOMS, de 3°, soit environ 300km au nadir, 6 fois plus grossière que celle de TOMS/Earth Probe.

L'objectif premier de ces missions spatiales est d'observer l'atmosphère et en particulier le contenu en ozone sur la colonne atmosphérique afin de caractériser l'étendue spatiale du trou dans la couche d'ozone stratosphérique ainsi que ses évolutions interannuelle et saisonnière, notamment au Pôle Sud. Le domaine spectral le plus adapté à la détection de l'ozone est le domaine de l'ultra-violet (<400nm), qui voit son rayonnement tout ou partiellement absorbé par la présence de ce gaz. C'est pour cette raison que les capteurs TOMS et OMI sont équipés de bandes spectrales dans le domaine de l'UV (Tableau II.2), qui vont s'avérer également utiles à la détection des poussières désertiques, ces derniers étant absorbants dans ce domaine spectral (Linke *et al.*, 2006) et, dans une moindre mesure, aux courtes longueurs d'onde du visible (Haywood & Francis, 2001).

L'absorption des aérosols est difficile à quantifier. Elle dépend en effet du type d'aérosols, et donc du lieu d'étude et de la saison considérée. En outre, elle n'est pas dénuée de biais car elle se fait de manière indirecte, par le biais de l'inversion de l'indice de réfraction des aérosols, dont la partie imaginaire est informative, et de l'albédo de diffusion simple des aérosols ou *Single Scattering Albedo* en anglais (SSA). Une étude récente et se basant sur des échantillons de poussières relevés en 19 sites à travers le monde, en Afrique du Nord, Sahel, Moyen-Orient, Amérique du Sud et du Nord, Afrique du Sud et Australie, indique des valeurs de SSA comprises entre 0.7 et 0.96 à 370 nm, entre 0.85 et 0.98 à 520 nm et entre 0.85 et 0.99 à 950 nm (DiBagio *et al.*, 2019). Cette étude, comme d'autres la précédent mais moins exhaustives, vient confirmer la théorie de Mie qui considère les poussières désertiques comme des aérosols grossiers et sphériques : (i) absorbants dans les UV ; (ii) dont les SSA augmentent généralement avec la longueur d'onde pour atteindre des valeurs proches ou égales à 1 à partir de la longueur d'onde du visible correspondant au rouge (Figure II.9). Au Sahel les auteurs ont trouvé des SSA variant entre 0.81 dans l'UV à 0.97 dans le PIR (Figure II.10).

L'indice d'absorption des aérosols AI est défini à la fin des années 90. Cet indice est basé sur le contraste existant, dans le domaine des UV, entre la luminance mesurée par le capteur satellitaire et la luminance calculée à partir de la théorie de Mie en considérant une atmosphère purement moléculaire, i.e. sans aérosols. La formule de l'AI, défini pour TOMS se base sur les canaux à 340 nm et 380 nm (Torres *et al.*, 1998).

Elle est actualisée pour OMI en se basant sur les canaux à 354 nm et 388 nm (Torres *et al.*, 2007) selon :

$$AI = -100 \log_{10} \left[\frac{I_{354}^{obs}}{I_{354}^{calc} (R^*_{354})} \right]$$

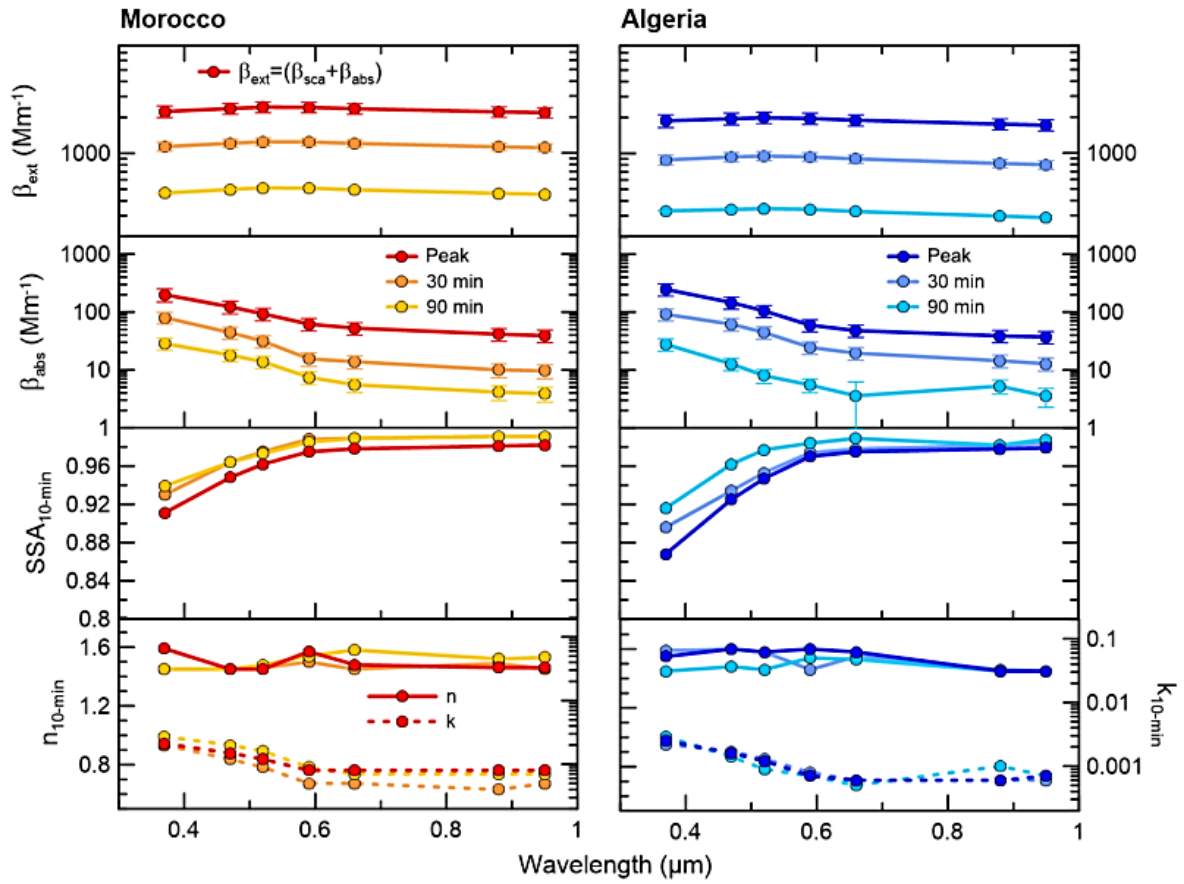


Figure II.9. Propriétés optiques des aérosols désertiques relevés au Maroc et en Algérie. Première ligne : coefficients d'extinction. Deuxième ligne : coefficients d'absorption. Troisième ligne : SSA. Quatrième ligne : indice de réfraction, parties réelle (n) et imaginaire (k).
Figure extraite de DiBagio et al. (2019).

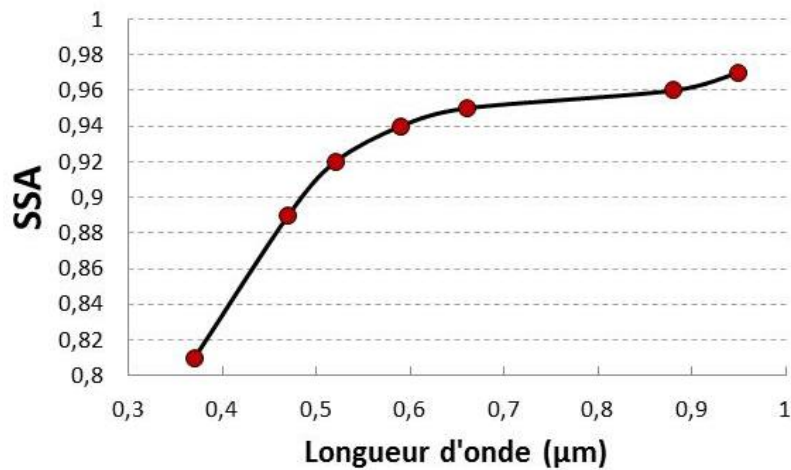


Figure II.10. Dépendance spectrale des SSA des aérosols désertiques relevés au Sahel.
Figure réalisée à partir des résultats de Di Bagio et al. (2019).

I_{354}^{obs} est la luminance au sommet de l'atmosphère, ou *Top-Of-Atmosphere* en anglais (TOA), mesurée à 354 nm, I_{354}^{calc} la luminance TOA estimée à 354 nm avec R_{354}^* , la réflectance équivalente de Lambert à 354 nm, elle-même calculée à partir de la réflectance équivalente de Lambert à 388 nm. La réflectance équivalente de Lambert est la somme entre la réflectance de surface et la réflectance atmosphérique. La réflectance atmosphérique est généralement plus élevée que la réflectance de surface en raison de la présence de nuages et d'aérosols diffusant le rayonnement solaire. Cependant elle peut être largement inférieure si les aérosols en présence sont absorbants : c'est ce comportement qui nous intéresse dans le cas des aérosols désertiques. Ainsi,

- (i) des valeurs positives d'AI sont associées à des aérosols absorbants dans l'UV, ici des poussières désertiques mais aussi des aérosols carbonés ;
- (ii) des valeurs négatives d'AI correspondent à des aérosols non absorbants tels que les aérosols marins.

En résumé, l'AI représente l'erreur d'estimation faite sur la luminance TOA à 354nm à partir de la mesure du capteur satellitaire à 388 nm et en faisant l'hypothèse double d'une atmosphère purement moléculaire et d'une surface Lambertienne dont la signature spectrale est pré-établie.

En Afrique de l'Ouest, les AI sont positifs avec des valeurs variant entre 1 et 2 dans la Ceinture des méningites (§III/Préambule) et des valeurs atteignant 4 sur les zones de source de poussières comme la dépression de Bodélé au Tchad (Figure II.11). Si les AI permettent de détecter les sources de poussières (Prospero *et al.*, 2002), ces indices sont-ils représentatifs des concentrations de poussières en surface ? Ce travail a été initié dans le cadre de la thèse d'Adrien Deroubaix, présenté au programme de l'OMS MERIT (Deroubaix *et al.* (2010), Partie B/§5.5), à l'EGU (Deroubaix *et al.* (2011), Partie B/§5.5), et valorisé dans le cadre du programme AMMA (Eymard *et al.* (2012), Partie B/§4.1). Les AI issus de OMI sont significativement corrélés ($r \sim 0.7$, $p = 0.05$), en quotidien, aux AOD issues du réseau AERONET sur les 4 sites sahéliens du Niger, Mali et Burkina Faso (Figure II.7). La corrélation de Pearson entre les AI et les PM_{10} issus du SDT (Figure II.7) s'avère plus faible ($r \sim 0.3$) mais cette corrélation augmente dès lors que le pas de temps devient hebdomadaire ($r \sim 0.5$) (Figure II.12). La différence de niveaux de corrélation entre AI/AOD et AI/ PM_{10} est en partie due aux changements d'altitude des aérosols, particulièrement à partir d'avril, qui marque le début de la transition entre le régime d'Harmattan et le régime de Mousson (§II/Préambule).

Un shift temporel est également observé dans l'occurrence du maximum d'aérosols dans les PM_{10} (mars), les AOD (avril) et les AI-OMI (juin) (Figure II.13). Cependant, en plein cœur de la saison sèche, en JFM, les AI détectent correctement les événements de poussières et sont capables de reproduire leur variabilité à l'échelle régionale. L'utilisation des AI pour étudier les méningites semble ainsi pertinente, et plus particulièrement pendant le 1^{er} trimestre de l'année, en JFM, lors du maximum de la saison des poussières. Ce résultat a constitué une base solide pour la suite des recherches dédiées aux relations entre aérosols et santé en Afrique de l'Ouest. Nous avons par la suite utilisé les AI issus de TOMS/Earth Probe en complément des AI issus de OMI/Aura afin d'exploiter la profondeur temporelle sans équivalent de ces produits (§III.3).

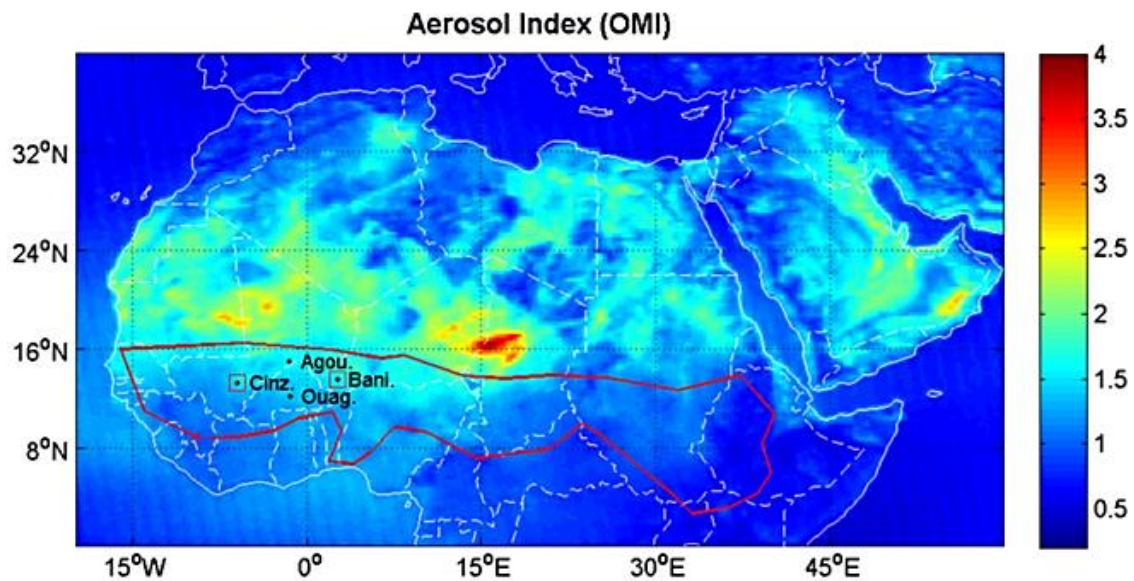


Figure II.11. Moyenne annuelle des AI issus du capteur OMI sur la période 2005-2008 en Afrique nord-équatoriale. La zone rouge indique la localisation de la Ceinture des méningites. Les points encadrés indiquent la localisation des stations de mesures in situ mobilisées pour la validation.

Figure extraite de *Deroubaix et al. (2013)*, Partie B/§4.1.

L'un des points forts de l'AI est qu'il s'avère performant tant au-dessus de surfaces réfléchissantes telles que les déserts, les zones semi-arides ou urbaines qu'au-dessus de surfaces absorbantes telles que l'eau ; ceci est lié à l'albédo des surfaces continentales dans le domaine des UV relativement faible et invariant. Cependant, cet indice aérosols ne varie pas en fonction de la longueur d'onde et donc ne peut permettre d'accéder au type d'aérosols en présence. L'AOD permet de le faire. Le produit OMAERUV issu de OMI inclut également des AOD, qui tombent dans les barres d'erreurs à 380 nm mais semblent au-delà (>0.1 soit $\pm 30\%$ d'erreur) à 440 nm (Zhang *et al.*, 2015) – tests réalisés sur des sites africains. Des études spécifiques portant sur l'estimation de la précision des AOD indiquent, entre autres, la fiabilité des produits MODIS (Sayer *et al.*, 2020).

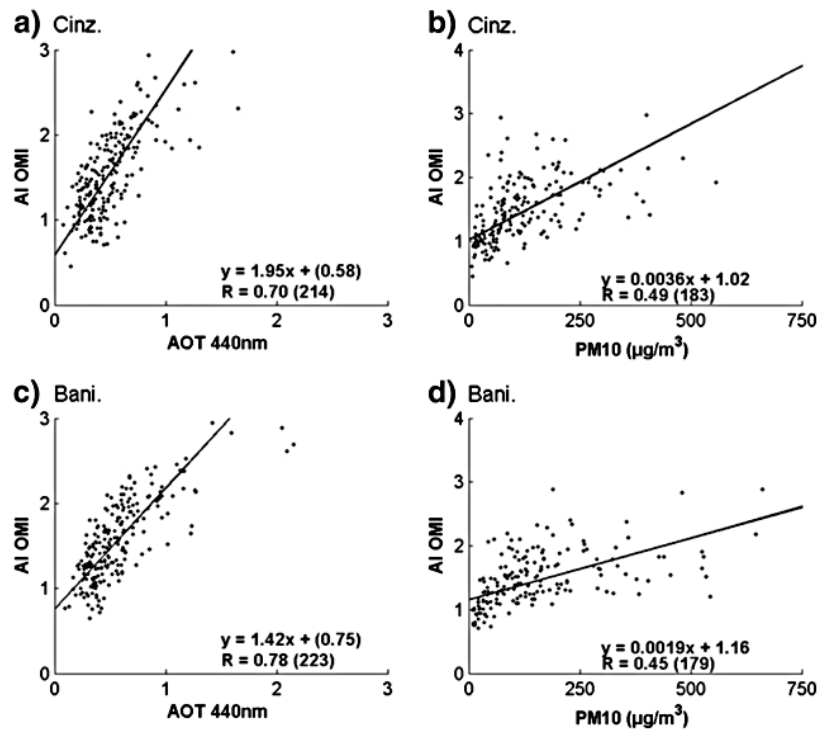


Figure II.12. Comparaison au pas de temps hebdomadaire entre les AI issus de OMI et, d'une part, les AOD à 440 nm issus du réseau AERONET (1^{ère} colonne) et, d'autre part, les mesures de concentrations des PM_{10} (2^{ème} colonne) à Cinzana (Mali) et à Banizoumbou (Niger). La période d'étude s'étend de 2006 à 2009. Figure extraite de Deroubaix et al. (2013), Partie B/§4.1.

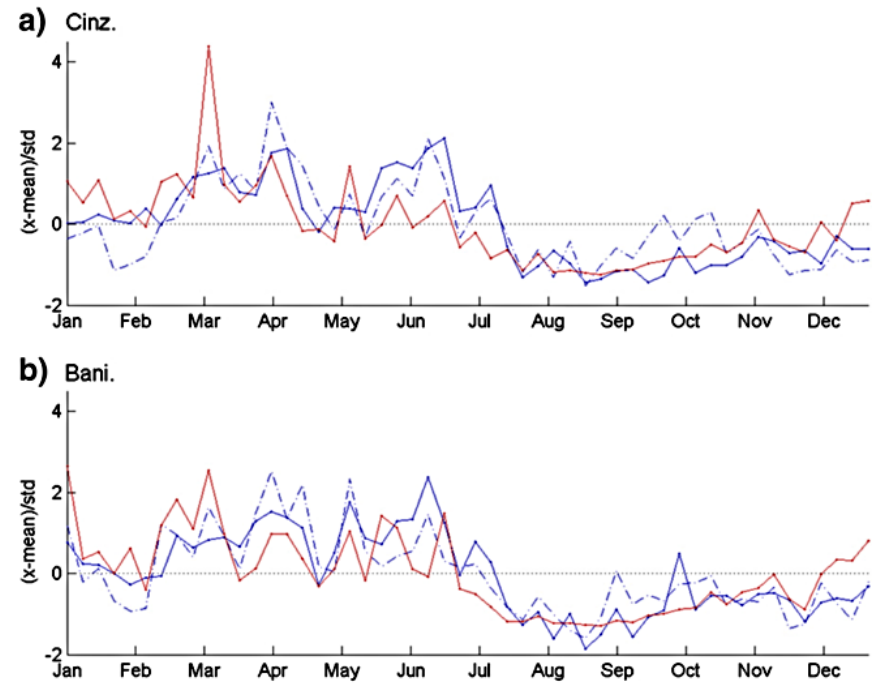


Figure II.13. Comparaison des cycles annuels moyens standardisés des AI issus de OMI (en bleu, trait continu), des AOD à 440 nm issus du réseau AERONET (en bleu, pointillés) et des concentrations en PM_{10} issus du SDT (en rouge) à Cinzana au Mali (en haut) et à Banizoumbou au Niger (en bas). La période d'étude s'étend de 2006 à 2008. Le pas de temps est hebdomadaire. Figure extraite de Deroubaix et al. (2013), Partie B/§4.1.

II.3 Différenciation des types d'aérosols à partir des produits MODIS

Les produits aérosols MODIS sont issus de 2 instruments : MODIS à bord de Terra depuis 2000 (heure locale de passage au-dessus de l'Equateur, 10.30 am, nœud descendant) et MODIS à bord d'Aqua dans la constellation A-train depuis 2002 (heure locale de passage au-dessus de l'Equateur 1.30 pm, nœud ascendant). Le radiomètre imageur MODIS/Terra ayant subi des dégradations à partir de 2007 (Sayer *et al.*, 2015), nous avons uniquement retenu les produits issus de MODIS/Aqua. Ces produits présentent la particularité d'être disponibles tant sur les océans que sur les continents, via l'algorithme Dark Target. Au-dessus des surfaces continentales, c'est l'algorithme Deep Blue qui est le plus couramment utilisé. Quelles sont alors les différences entre ces 2 algorithmes appliqués aux surfaces continentales ? Lequel est-il préférable de mobiliser pour étudier les impacts sanitaires ? La caractéristique commune de ces 2 algorithmes est de décontaminer l'observation satellitaire initiale des effets de surface afin d'inverser de manière la plus précise possible les aérosols. Cependant, les 2 algorithmes ne mobilisent pas la même méthode pour accéder au signal de surface : (i) Dark Target utilise un panel de ratios et de relations entre les canaux 0.47, 0.67 et 2.1 μm , méthode optimale au-dessus des surfaces végétalisées mais qui ne fonctionne pas au-dessus des surfaces réfléchissantes ; (ii) Deep Blue utilise des cartes dynamiques et des bibliothèques de réflectances de surface dans les canaux du bleu, méthode optimale au-dessus des surfaces réfléchissantes fonctionnant aussi sur les surfaces plus absorbantes telles que la végétation.

Plusieurs algorithmes Deep Blue ont été développés délivrant tous les AOD₅₅₀, AE et SSA (Tableau II.2). Nous avons focalisé notre attention sur les produits Deep Blue de MODIS Collection 6, notés DB-C6 (Hsu *et al.*, 2013). Ces produits améliorent les produits Deep Blue Collection 5.1 par le biais d'un schéma de surface prenant en compte la végétation dynamique (par le biais du NDVI). Etant disponibles sur l'ensemble des surfaces continentales, et non plus uniquement sur les surfaces réfléchissantes comme dans leur version précédente, les produits DB-C6 disposent d'une couverture spatiale plus étendue que les produits DB-C5.1. (Figure II.14). La corrélation de Pearson entre les AOD-MODIS et les AOD-AERONET comprenant 9938 points sur 12 sites AERONET situés en Afrique du Nord, de l'Ouest et au Moyen Orient (tous sites confondus) est de 0.90 avec un biais moyen de -0.036 (Sayer *et al.*, 2013). Dans le cadre du projet CNES TELEDM, dont j'ai assuré la responsabilité scientifique (Martiny (2014-2016), Partie B/§2.1), une étude menée en collaboration avec le Laboratoire d'Optique Atmosphérique a permis de confirmer ces résultats pour des sites sahéliens exclusivement, sur l'année entière puis, en particulier, sur le trimestre JFM (Figure II.15). Cette étude, qui portait également sur la capacité de MODIS à retrouver les AE et par là-même à donner des indications sur la taille des aérosols en présence, a également permis de montrer que la dépendance spectrale des AOD était exacerbée dans les produits MODIS. Ainsi, la gamme de variation des AE MODIS est de [0 :1.8] alors qu'elle est de [0 :1.2] dans les AE AERONET. Ainsi, MODIS a tendance à détecter des aérosols plus fins qu'ils ne le sont en réalité (stage de M2 de Nesrine Arab (2014), Partie B/§4.7).

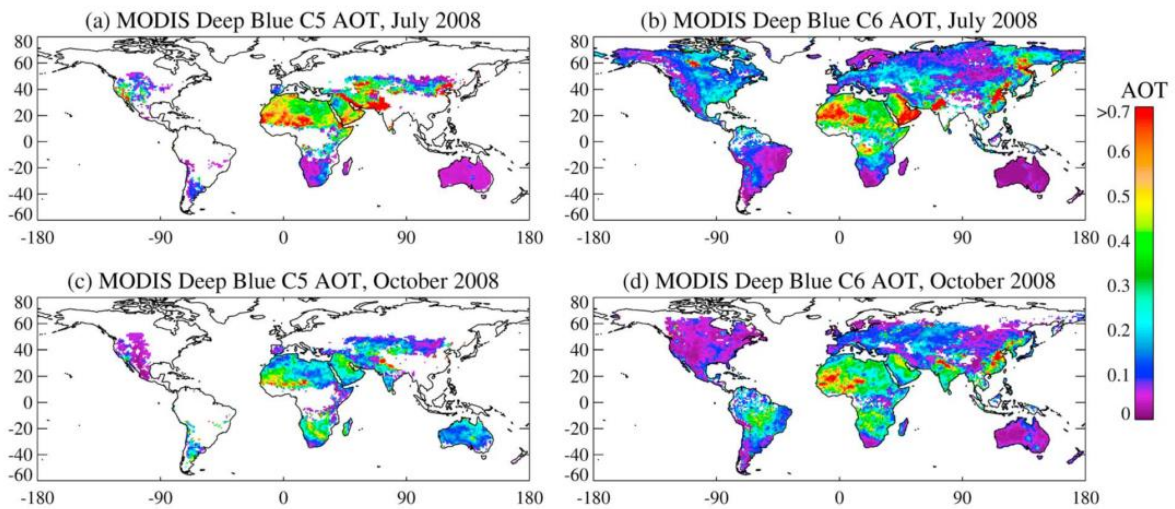


Figure II.14. Comparaison des moyennes mensuelles des AOD MODIS à partir des algorithmes Deep Blue Collection 5.1 (colonne de gauche) et Collection 6 (colonne de droite) pour les mois de juillet (ligne du haut) et octobre 2008 (ligne du bas). Figure extraite de Hsu et al. (2013).

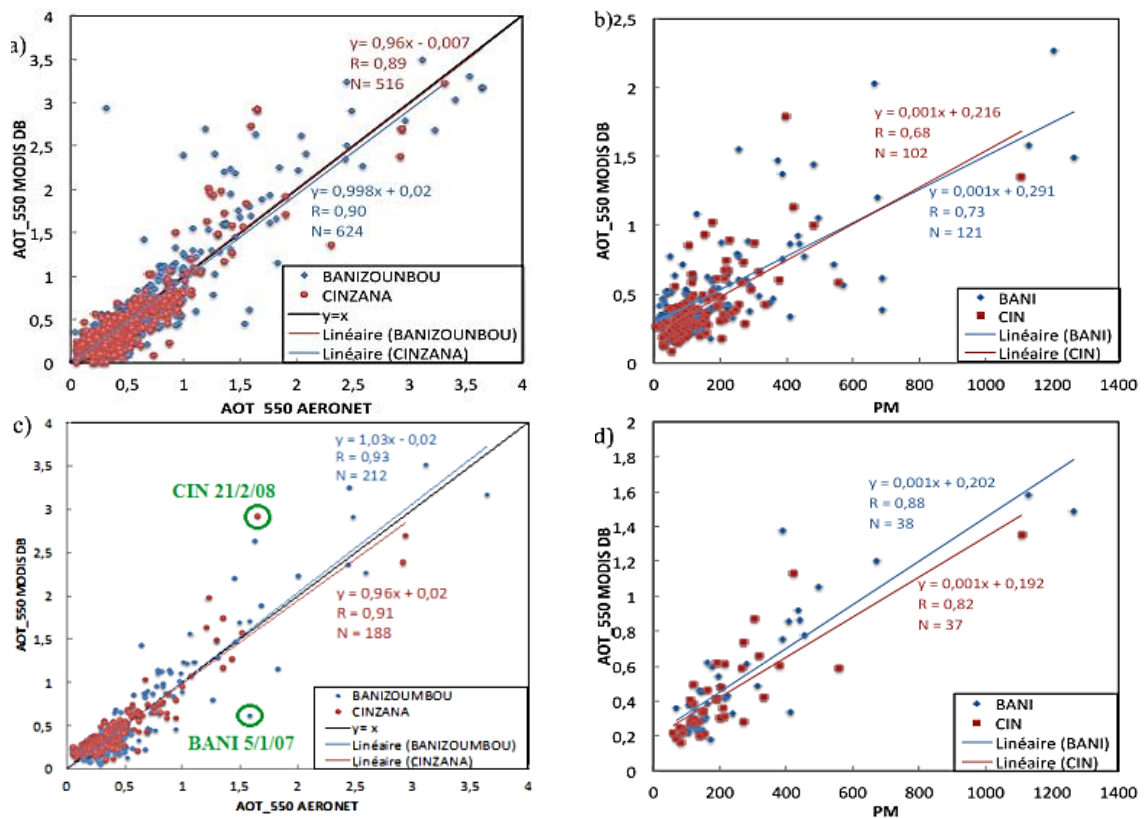


Figure II.15. Comparaison au pas de temps quotidien entre les AOD issus de MODIS et, d'une part, les AOD à 550 nm issus du réseau AERONET (1^{ère} colonne) et, d'autre part, les mesures de concentrations des PM₁₀ (2^{ème} colonne) à Cinzana au Mali (en rouge) et à Banizoumbou au Niger (en bleu) de 2006 à 2008. Les comparaisons ont été réalisées pour toute l'année (ligne du haut) et pour JFM (ligne du bas). Les points entourés en vert indiquent des situations nuageuses relevées dans les données AERONET.

Figure extraite du stage de M2 de Nesrine Arab (2014), Partie B/§4.7.

Malgré cela, le lien entre AOD (indicateur de la quantité d'aérosols) et AE (indicateur de la taille des aérosols) au Sahel semble assez bien reproduit par les produits MODIS ; ceci est essentiel - particulièrement dans cette région du monde qui peut voir l'occurrence d'aérosols carbonés en hiver (Roberts *et al.*, 2009) - car la relation AOD/AE permet de différencier le type d'aérosols en présence. La Figure II.16 présente les AOD₅₅₀ en fonction des AE₄₄₀₋₈₇₀ pour 66 jours sur la période 2004-2014 (stages de M2 de [Papa Massar Niane en 2017 et 2018](#), dont j'ai assuré la co-direction, Partie B/§4.7). La relation trouvée entre les AOD et AE MODIS, même si elle est ici spécifique à l'étude des vagues de chaleur au Sahel, rejoint les résultats obtenus dans des travaux antérieurs sur l'ensemble de l'année et à partir de mesures *in-situ*. Par exemple, pour l'ensemble de l'année 2006, marquée par des événements de poussières de grande ampleur (Marticorena *et al.*, 2010), [Deroubaix *et al.* \(2013\)](#) ont noté, au Niger, et à partir de mesures AERONET sur des sites sahéliens, 3 situations aérosols avec (i) des AOD₅₅₀>1 conjointement à des AE₄₄₀₋₈₇₀~0 (TYPE 1), (ii) des AOD₅₅₀<1 conjointement à des AE₄₄₀₋₈₇₀<0.5 (TYPE2) et (iii) des AOD₅₅₀<0.5 conjointement à des AE₄₄₀₋₈₇₀>1 (TYPE 3). Smirnov *et al.* (2000) ont montré qu'un seuil de 0.5 appliqué aux AE était efficace pour distinguer des situations aérosols avec une dominance de poussières désertiques (AE<0.5).

Ainsi, si ces TYPEs permettent de caractériser des événements particuliers ([thèse de Papa Massar Niane](#), dont j'assure le co-encadrement au Nord, Partie B/§4.1), ils peuvent également être utilisés pour caractériser des situations aérosols moyennes à l'échelle saisonnière ([Martiny & Chiapello, 2013](#), Partie B/§5.1). Ainsi, il est possible d'associer les TYPE1, TYPE2 et TYPE3 à des périodes bien précises de l'année. De janvier à juin, les AOD varient en moyenne entre 0.5 et 1 : ces AOD élevées indiquent des contenus élevés en aérosols dans l'atmosphère (High Aerosol Period, HAP). De juillet à décembre, les AOD moyennes sont inférieures à 0.5 : ces AOD faibles indiquent des contenus faibles en aérosols dans l'atmosphère (Low Aerosol Period, LAP). De janvier à octobre, les AE sont inférieurs ou égaux à 0.5 indiquant que les particules en présence sont plutôt grossières. En février-juin en particulier, les AE sont de l'ordre de 0.2-0.25, donc plus proches de 0, indiquant une dépendance spectrale des AOD faible, et ainsi des particules aux diamètres d'autant plus importants. En combinant les résultats trouvés pour les AOD (Tableau II.3) et les AE (Tableau II.4) il est alors possible d'établir une qualification des situations aérosols rencontrées en moyenne au Sahel (Tableau II.5). L'année se découpe alors selon : (i) Janvier-juin, avec en moyenne des AOD élevées et des particules grossières, ce qui correspond à des situations d'aérosols désertiques purs (« Pure Dust Situation ») ; (ii) Juillet-Octobre, avec en moyenne des AOD faibles et des aérosols grossiers, ce qui correspond à des situations de mélange d'aérosols avec dominance de poussières désertiques (« Mixed Situation with Coarse Aerosols ») ; (iii) Novembre-décembre, avec en moyenne des AOD faibles et des aérosols fins, ce qui correspond à des situations de mélange d'aérosols avec dominance d'aérosols fins (« Mixed Situation with Fine Aerosols »).

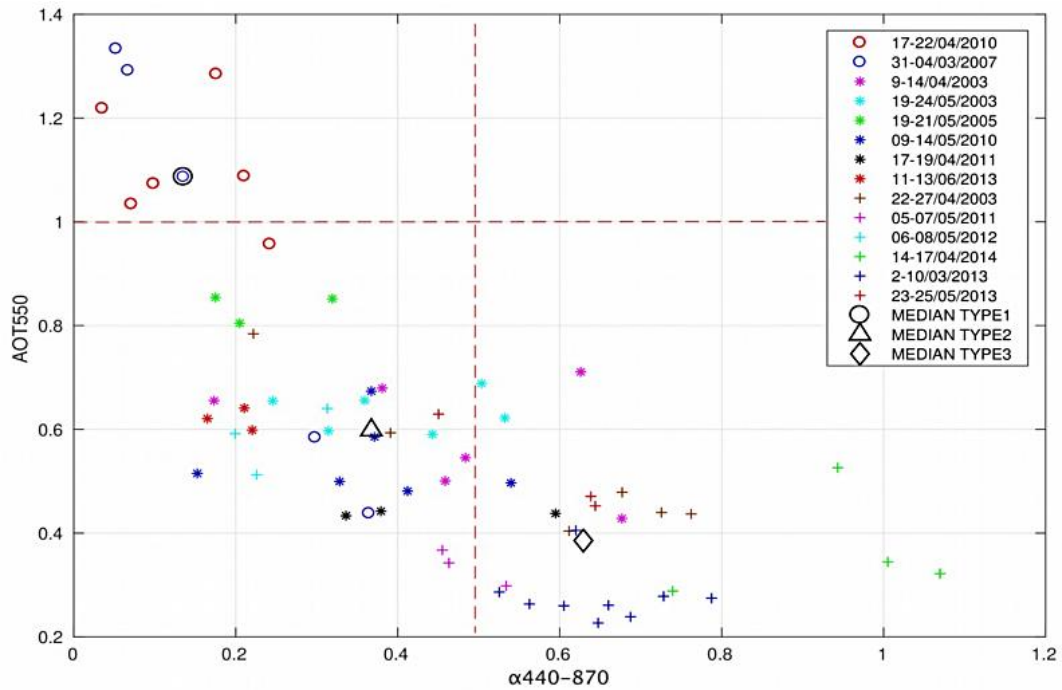


Figure II.16. Relation entre les AOD à 550 nm et les AE₄₄₀₋₈₇₀ issus de MODIS-DB sur une fenêtre sahélienne et durant des jours de vagues de chaleur. La période d'étude s'étend de 2004 à 2014. « MEDIAN TYPE 1 » correspond aux valeurs médianes des AOD et des AE₄₄₀₋₈₇₀ en considérant l'ensemble des jours des vagues de chaleur qualifiées de TYPE 1. Figure extraite d'un article en préparation Niane et al. (in prep.).

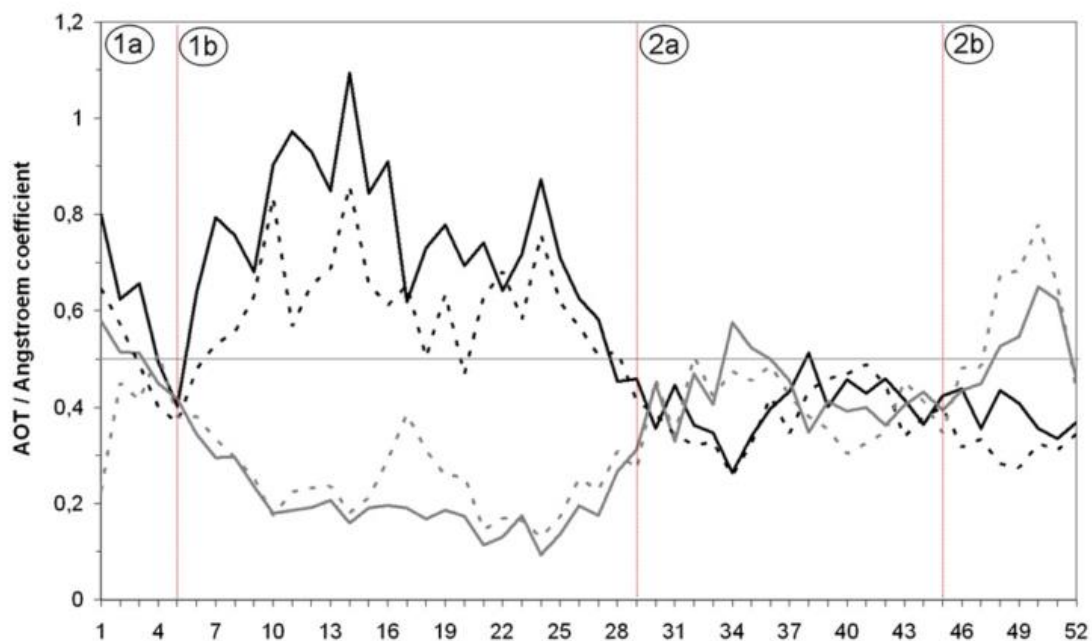


Figure II.17. Les AOD à 440 nm (en noir) et les AE₄₄₀₋₈₇₀ (en gris) issus du réseau AERONET à Banizoumbou au Niger (trait plein) et Cinzana au Mali (pointillés). La période d'étude s'étend de 2004 à 2009. La sous-période « 1a » correspond aux semaines 1 à 4 ; la sous-période « 1b » aux semaines 5 à 28. La sous-période « 2a » aux semaines 29 à 44 et la sous-période « 2b » aux semaines 45 à 52.

Figure extraite de [Martiny and Chiappello \(2013\)](#), Partie B/§5.1.

Période	Janvier-Juin		Juillet-Décembre	
Sous-périodes	S1-4	S5-28	S29-44	S45-52
Banizoumbou	0.64	0.75	0.40	0.39
Cinzana	0.53	0.62	0.40	0.34
Classification AOD	0.5 < AOD ≤ 1		AOD ≤ 0.5	
Qualification AOD	AOD élevées		AOD faibles	
Dénomination	HAP « High Aerosol Period »		LAP « Low Aerosol Period »	

Tableau II.3. Qualification des AOD au Sahel sur la base de mesures in-situ issues du réseau AERONET à Banizoumbou (Niger) sur 2004-2009 et Cinzana (Mali) sur 2005-2009. Chaque semestre a été scindé en 2 sous-périodes, S1-4 correspondant par exemple aux semaines 1 à 4.
Tableau adapté de [Martiny & Chiapello \(2013\)](#), Partie B/§5.1.

Période	Janvier-Juin		Juillet-Décembre	
Sous-périodes	S1-4	S5-28	S29-44	S45-52
Banizoumbou	0.51	0.20	0.42	0.51
Cinzana	0.40	0.25	0.40	0.57
Classification AE	AE ≤ 0.5	AE ≤ 0.5	AE ≤ 0.5	AE > 0.5
Qualification AE	Aérosols grossiers	Aérosols grossiers	Aérosols grossiers	Aérosols fins

Tableau II.4. Idem Tableau II.3 pour les AE.

Période	Janvier-Juin	Juillet-Octobre	Nov-Décembre
Qualification AOD	AOD élevées	AOD faibles	AOD faibles
Qualification AE	Aérosols grossiers	Aérosols grossiers	Aérosols fins
Situation aérosols	TYPE 1 « Pure Dust Situation »	TYPE 2 « Mixed Situation- Coarse Aerosols »	TYPE 3 « Mixed Situation – Fine Aerosols »

Tableau II.5. Situations aérosols moyennes rencontrées au Sahel d'après les mesures in-situ issues du réseau AERONET à Banizoumbou (Niger) et Cinzana (Mali) et les produits MODIS-DB.
D'après [Martiny & Chiapello \(2013\)](#) et [Niane et al. \(in prep.\)](#).

Le TYPE 1 est représentatif de phénomènes intenses de grande extension spatiale (Figure II.18) : 94.7% des pixels de la fenêtre sahélienne considérée sont affectés à des aérosols désertiques en quantité élevée voire très élevée (AOD médiane de 1.1). Les poussières sont dites « d'Harmattan », apportées par les alizés continents de direction Nord/Nord-Est et provenant de sources lointaines (Klose *et al.*, 2010). La contribution d'aérosols fins de type carboné n'est pas dominante, mais peut survenir au sud du Sahel. Les feux qui font de l'Afrique la source principale d'émissions d'aérosols carbonés à travers le monde (Andreae, 1991; van der Werf *et al.*, 2003; van der Werf *et al.*, 2006 ; Giglio *et al.*, 2006) interviennent de septembre à mars (Roberts *et al.*, 2009) ; c'est-à-dire soit en dehors de la période des méningites (de septembre à décembre), soit en plein cœur (de janvier à mars). En conséquence, nous formulons l'hypothèse selon laquelle, de janvier à mars, en période de méningites bactériennes (§III/Préambule), les sites sahéliens peuvent être contaminés par les aérosols carbonés même si on y rencontre une dominance de situations de poussières désertiques pures de TYPE 1. Ce point sera détaillé plus tard dans le document (§III.4).

A titre comparatif, en situation de TYPE 2, 63.79% des pixels enregistrent des $AE < 0.5$, indiquant que 36.1% des pixels sont affectés par des particules fines. En situation de TYPE 3, il y a une majorité des particules fines au sein de la fenêtre, avec 56.2% des pixels concernés. Les caractéristiques spatiales (Figure II.18) apparaissent cohérentes avec les périodes considérées: pour le TYPE2, de juillet à octobre, incluant la fin de la saison des poussières (mois de juillet) et le début de l'occurrence des feux au sud du Sahel (mois de septembre et octobre) ; pour le TYPE3, en novembre-décembre, hors de la saison des poussières (Tableau II.3) et en pleine période de feux (Figure II.19).

Les corrélations de Pearson entre les AOD-MODIS et les PM_{10} sur les sites sahéliens et sur la période 2006-2008 sont de l'ordre de +0.7 au pas de temps quotidien (Figure II.15), score comparable à celui obtenu entre les AI-OMI et AOD-AERONET (Figure II.12). Ces résultats sont améliorés si l'on focalise uniquement sur JFM : ils atteignent alors des valeurs entre 0.82 pour Cinzana et 0.88 pour Banizoumbou. Les AOD-MODIS apparaissent ici concrètement plus quantitatives et représentatives des concentrations massiques des aérosols en surface que les AI-OMI, en particulier sur le premier trimestre de l'année, période-clé pour l'analyse du développement des méningites au Sahel (§III/Préambule). Cependant, comment accéder aux concentrations en PM_{10} à partir des AOD-MODIS spatialisées ? Ce travail nécessite la prise en compte de la distribution verticale des aérosols (Li *et al.*, 2015) ; c'est ainsi que nous nous sommes intéressés à la télédétection LIDAR, et en particulier aux produits CALIOP.

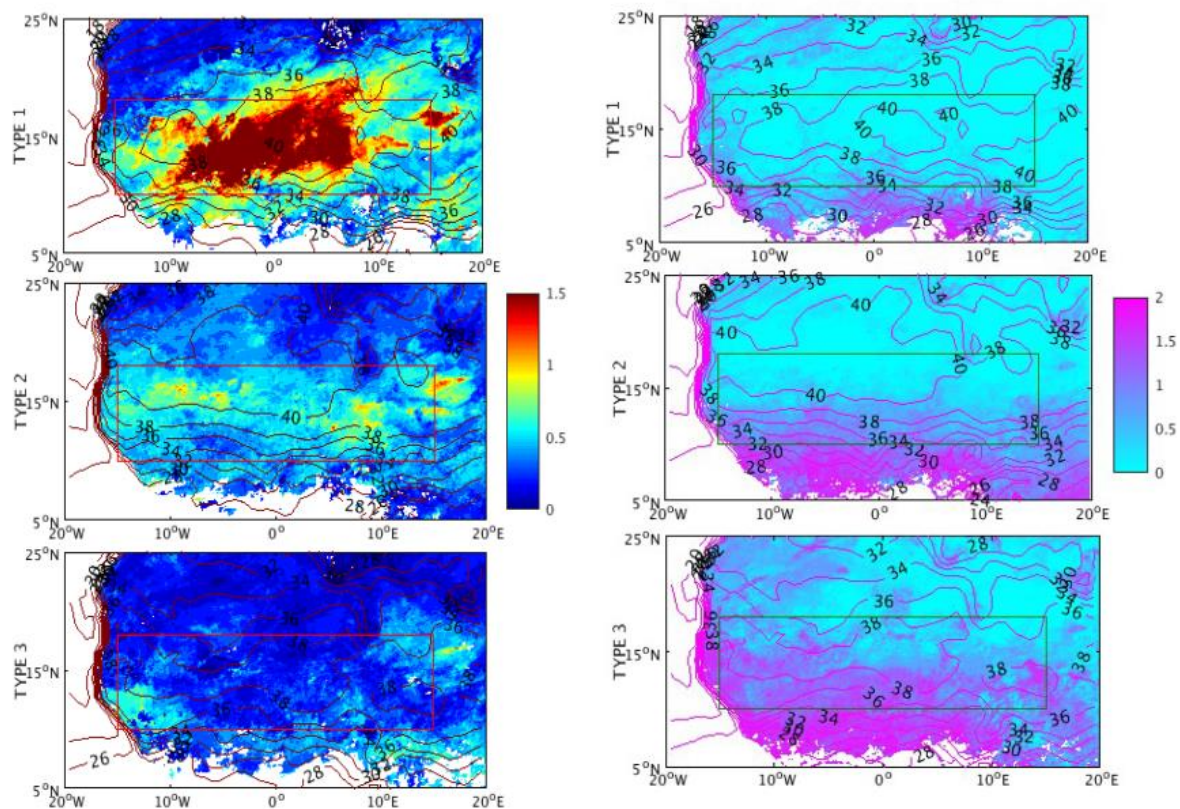


Figure II.18. Les 3 situations aérosols rencontrées au Sahel vues par MODIS. La colonne de gauche présente les AOD₅₅₀. La colonne de droite présente les AE₄₄₀₋₈₇₀. Chaque ligne représente une situation aérosols. Figure extraite de *Niane et al. (in prep.)*.

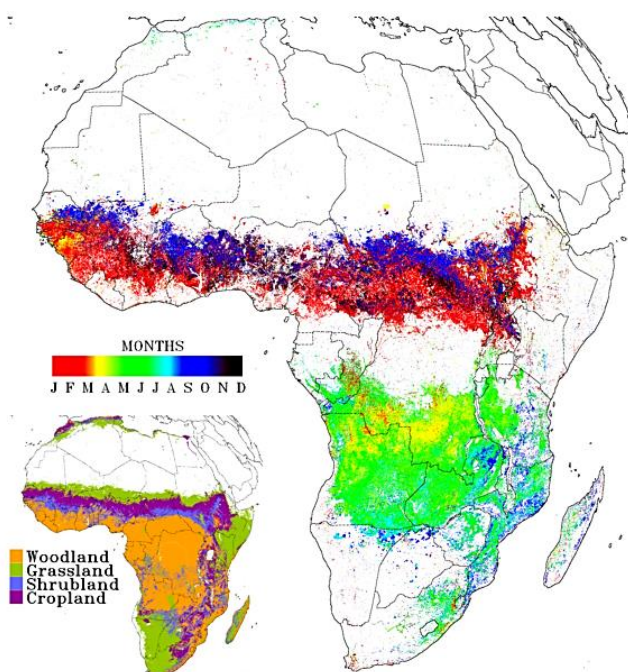


Figure II.19. Détection des feux en Afrique pour l'année 2004 à partir d'observations satellitaires géostationnaires. La carte imbriquée, issue du GLC2000, indique les 4 types principaux d'occupation du sol en Afrique : « Woodland » (forêt), « Grassland » (couverts herbacés), « Shrubland » (couvert arbustif), « Cropland » (zones cultivées). Figure extraite de *Roberts et al. (2009)*.

II.4 Apport de la télédétection active et de la mission CALIPSO

CALIOP, embarqué à bord de la plateforme satellitaire CALIPSO, est le premier LIDAR spatial optimisé pour la mesure des aérosols et des nuages de jour comme de nuit. C'est un LIDAR à rétrodiffusion doté de 2 canaux (Tableau II.2), et sensible à la polarisation à 532 nm. Il fournit des profils verticaux à haute résolution verticale, de 30m pour la couche de surface (0-8.2km au-dessus du niveau moyen de la mer) à 60m pour la couche 8.2-20.2km (Winker *et al.*, 2013). Sa résolution verticale varie aussi en fonction de la longueur d'onde (Tableau II.6). Sa résolution horizontale varie en fonction de l'altitude : 330m en surface et 5km en altitude (couche 30-40km). Partie intégrante de la constellation A-train (Stephens *et al.*, 2002), son orbite est basse (705km), polaire et héliosynchrone. Il passe au-dessus de l'Équateur à 1.30pm heure locale et a un cycle orbital de 16 jours. CALIPSO/CALIOP vole « derrière » MODIS/Aqua au sein de la constellation A-Train, qu'il a rejoint en avril 2006. L'orbite de CALIPSO est légèrement inclinée comparativement à celle de MODIS/Aqua afin d'éviter les effets du « sunglint ».

Les produits CALIOP (Tableau II.7) présentent l'avantage de ne nécessiter aucune hypothèse sur la distribution verticale des aérosols et sur les réflectances de surface, contrairement à la plupart des produits aérosols issus des capteurs passifs de type MODIS. L'algorithme de niveau 2 CALIOP comporte 3 étapes principales (Kim *et al.*, 2013) : la détection des couches atmosphériques diffusantes (Vaughan *et al.*, 2009) suivie de la classification de la scène (Liu *et al.*, 2009) et de l'inversion du coefficient d'extinction (Young & Vaughan, 2009).

Altitude Range, km	Horizontal Resolution, km	532 nm Vertical Resolution, m	1064 nm Vertical Resolution, m
30.1 to 40.0	5.0	300	—
20.2 to 30.1	1.67	180	180
8.2 to 20.2	1.0	60	60
-0.5 to 8.2	0.33	30	60
-2.0 to -0.5	0.33	300	300

Tableau II.6. Résolutions horizontales et verticales de CALIOP.
Tableau extrait de Winker *et al.* (2007).

Data product	Measurement capabilities and uncertainties	
	Aerosols	Clouds
Height	For layers with $\tau > 0.005$	For layers with $\tau > 0.01$
Thickness	For layers with $\tau < 3$	For layers with $\tau < 5$
Extinction profile and optical depth τ	40%*	Within a factor of 2 for $\tau < 5$ **
Ice-water phase		Layer by layer

* For highest layer.

** For constrained retrievals.

Tableau II.7. Premiers produits CALIOP et incertitudes associées.
Tableau extrait de Winker *et al.* (2009).

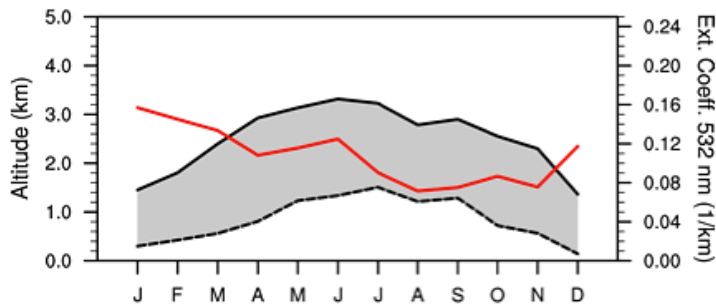


Figure II.20. Saisonnalité de la base, du sommet et du coefficient d'extinction (en rouge) de la couche de poussières en surface à Banizoumbou au Niger. Courtesy J-F. Léon. Figure extraite de [Martiny \(2016b\)](#), Partie B/§5.8.

Dans le cadre du projet CNES TELEPaF ([Martiny \(2017-2019\)](#), Partie B/§2.1), une étude menée en collaboration avec le Laboratoire d'Aérodologie à Toulouse a permis d'analyser la variabilité de l'altitude et de l'épaisseur de la couche des poussières pendant l'année sur un site sahélien (Figure II.20). L'analyse des coupes verticales journalières, via le produit *05kmALay* ([Kittaka et al., 2011](#)), indique, sur la période HAP (Tableau II.3), que l'épaisseur de la couche d'aérosols varie de 1km (en JFM) à 2km (en AMJ) environ. Au premier trimestre, les aérosols sont détectés en surface et en quantités élevées (coefficient d'extinction entre 0.12 et 0.16). En AMJ, les aérosols sont détectés en altitude (de 1 à 3km) et en quantité moindre (coefficient d'extinction entre 0.10 et 0.12). Le lidar CALIOP retrouve au Niger les mêmes résultats qu'au Sénégal ([Léon et al., 2009](#)), à savoir que les poussières désertiques se déplacent plutôt en surface en JFM. La transition entre le régime d'Harmattan et le régime de Mousson est très nettement mise en évidence, à partir d'avril avec le point d'inflexion en août, où l'on constate une descente des poussières en surface conjointement à une augmentation de leur concentration (diminution du coefficient d'extinction à une valeur de 0.08).

Néanmoins, la faible répétitivité des observations CALIOP, en raison de la fauchée faible du LIDAR (Figure II.6), ne permet pas de détecter l'intégralité des événements de poussières en surface ([Léon et al. \(2014\)](#), Partie B/§5.5). Par ailleurs, nous avons pu observer un biais dans l'estimation des AOD, sous-estimées d'environ 30% par rapport aux mesures AERONET (Figure II.21). Cette sous-estimation a également été trouvée par comparaison aux AOD MODIS, avec des différences maximales de l'ordre de 0.3 pour la région saharienne en considérant la période 2006-2011 ([Ma et al., 2013](#)). Ceci est vraisemblablement lié à la valeur du rapport LIDAR utilisé lors du calcul des extinctions. L'estimation de la concentration massique des poussières a ensuite été effectuée sur la base du calcul de l'extinction pour la couche la plus basse avec une valeur de l'extinction spécifique des poussières fixée à 1 m²/g. La variabilité interannuelle des PM₁₀ est ainsi reproduite (Figure II.22) : la comparaison point à point montre une corrélation de $r=0.74$ et une RMSE de 60 µg/m³. La répartition saisonnière des valeurs journalières dépassant 100 µg/m³ est également bien représentée ([Léon et al. \(2016\)](#), Partie B/§5.5). Ces résultats indiquent que l'utilisation de l'altitude de la couche de poussières dérivée de CALIOP améliore significativement le calcul de la concentration massique des PM₁₀ en surface par rapport à une estimation reposant uniquement sur une mesure d'AOD.

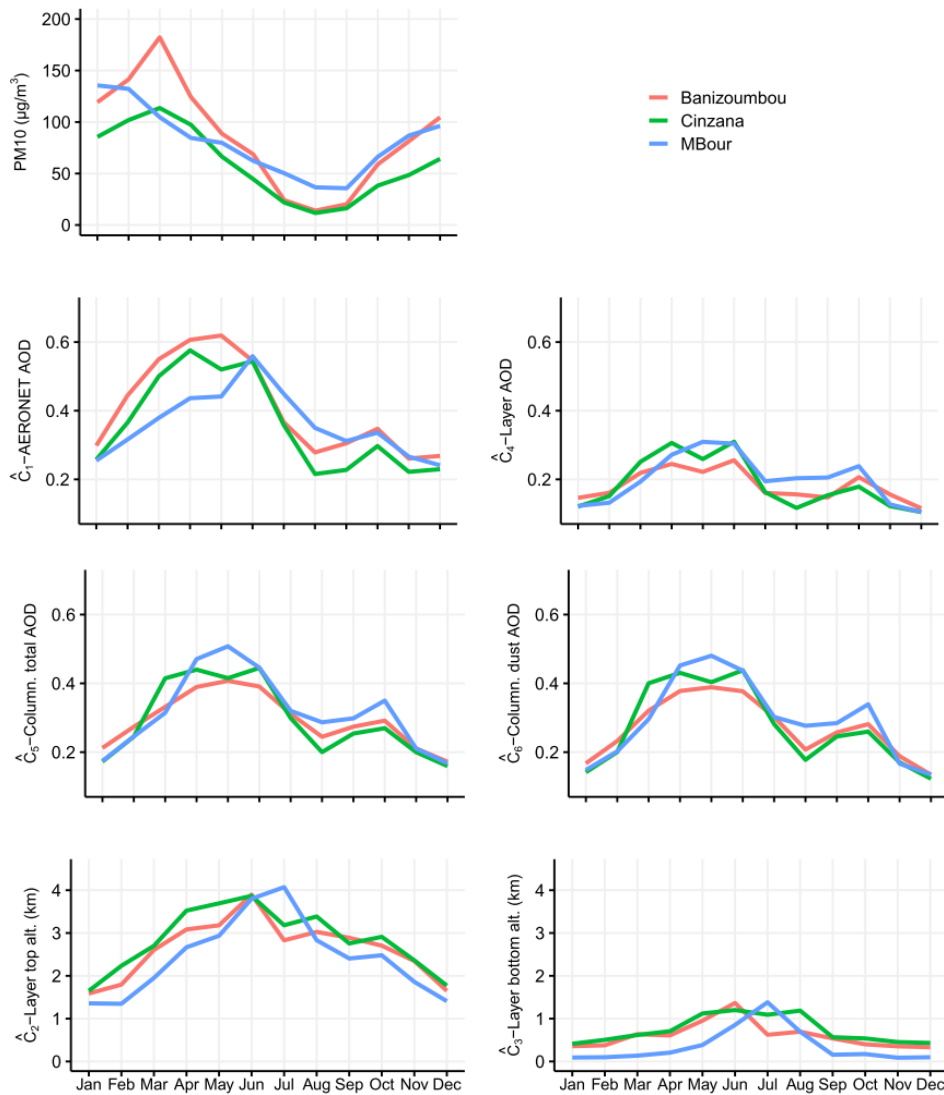


Figure II.21. Saisonnalité sur 3 sites sahéliens des PM_{10} , AOD-AERONET (C_1), AOD-CALIOP totale (tout type d'aérosols) (C_5), AOD-CALIOP des poussières désertiques (C_6), AOD-CALIOP des poussières désertiques de la couche la plus basse (C_4), altitude du sommet (C_2) et de la base (C_3) de la couche de poussières.

Figure extraite de [Léon et al. \(2020\)](#), Partie B/§5.1.

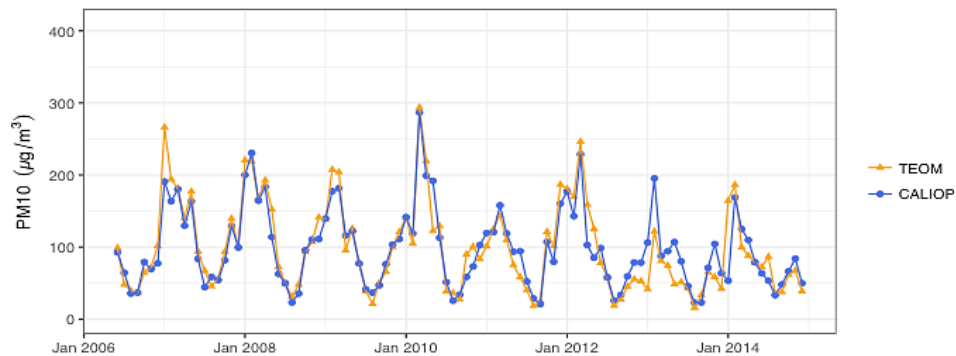


Figure II.22. Moyennes mensuelles des concentrations massiques en PM_{10} dérivées de CALIOP et observées sur le site de Banizoumbou au Niger (mesures en coïncidence). Courtesy J-F. Léon.

Figure extraite de [Martiny \(2016b\)](#), Partie B/§5.8.

Ces résultats préliminaires nous ont amenés à développer un modèle de régression linéaire multiple de type *stepwise* pour les concentrations des PM₁₀ en surface à partir de mesures photométriques d'AOD et des produits CALIOP de niveau 2 extraits aux 3 sites dotés de mesures de PM et d'AOD co-localisées : Banizoumbou (Niger), Cinzana (Mali) and M'Bour (Senegal) (Figure II.7). Le produit CALIOP *05kmALay* a été analysé sur la période 2006-2014 : version 3.01 de juin 2006 à octobre 2011, version 3.02 de novembre 2011 à février 2013, version 3.30 de mars 2013 à décembre 2014. Le modèle s'exprime selon :

$$\log([PM10]) = \beta_0 + \beta_1 \log([AOD]) + \sum_{i=2}^6 \beta_i \hat{C}_i + \epsilon$$

Les prédicteurs initiaux sont : les AOD AERONET à chaque station - cycle saisonnier (\hat{C}_1) ainsi que les produits CALIOP- altitude du sommet de la couche de poussières (\hat{C}_2), altitude de la base de la couche de poussières (\hat{C}_3), AOD de la couche de poussières dans la couche la plus basse (\hat{C}_4), AOD totale (tout type d'aérosols) (\hat{C}_5) et AOD des poussières (\hat{C}_6) sur la colonne atmosphérique.

Le modèle au pas de temps mensuel exclut seulement 1 prédicteur (\hat{C}_5) sur les 6 prédicteurs initiaux (Tableau II.8). Les résultats indiquent que l'introduction des produits CALIOP dans le modèle améliore significativement la modélisation des PM₁₀ moyens mensuels à partir des AOD, le coefficient de corrélation entre PM₁₀ et AOD passant de 0.15 (« AOD only ») à 0.75 (« AOD + CALIOP ») et l'erreur standard résiduelle se voyant diminuer d'un facteur 2. Tous les paramètres inclus sont significatifs. Les coefficients de régression négatifs du sommet et de la base de la couche d'aérosols (\hat{C}_2 et \hat{C}_3) illustrent que le gain en altitude de la couche de poussières pendant l'été impliquent des concentrations plus faibles en surface. Le coefficient de régression positif de l'AOD de la couche d'aérosols (\hat{C}_4) indique que la charge en aérosols sur la première couche de surface vue par CALIOP est corrélée à la concentration des PM₁₀. Ce modèle, basé sur l'année entière, permet de mettre en évidence que l'influence des variations saisonnières de l'altitude et de la charge des poussières sur les concentrations des PM en surface peut être approchée par le ratio LIDAR suivant : AOD de la couche d'aérosols divisé par son altitude (Léon *et al.* (2020), Partie B/§5.1).

L'introduction des observations CALIOP quotidiennes dans un modèle de régression des PM₁₀ améliore de 8% sa performance. Le nombre de points co-localisés diminue dans le même temps de 79%. Le coefficient de corrélation entre AOD et PM₁₀ augmente de 0.24 à 0.61; l'erreur quadratique moyenne diminue de 104 à 83 µg/m³. Cependant, la dispersion des points reste importante, avec peu de différences constatées entre les stations : 26%, 22% et 12% pour M'Bour, Banizoumbou et Cinzana, respectivement. La détection des événements de poussières (ici en appliquant un seuil de 100 µg/m³, cf §III.4 pour la définition d'un événement de poussières selon Martiny *et al.* (2015), Partie B/§5.3), est également pertinente avec 2 fois plus d'événements détectés en utilisant le modèle « AERONET+CALIOP » (soit 2039 jours sur la période 2006-2014) que le modèle « AERONET only ».

	AOD only		AOD +CALIOP	
	coeff.	Std. Err.	coeff.	Std. Err.
Intercept	4.90	0.11	7.88	0.41
AOD	0.71	0.01	0.81	0.09
\hat{C}_1			1.50	0.19
\hat{C}_2			-1.45	0.23
\hat{C}_3			-0.17	0.07
\hat{C}_4			1.57	0.26
\hat{C}_6			-1.87	0.25
Adjusted R^2	0.15		0.75	
Res. std. err.	0.70		0.38	

Tableau II.8. Coefficients des régressions linéaires multiples réalisées : « AOD only », construit seulement à partir des AOD mesurées au sol ; « AOD+CALIOP » construit à partir des AOD mesurées au sol et des produits CALIOP. Tableau extrait de [Léon et al. \(2020\)](#), Partie B/§5.1.

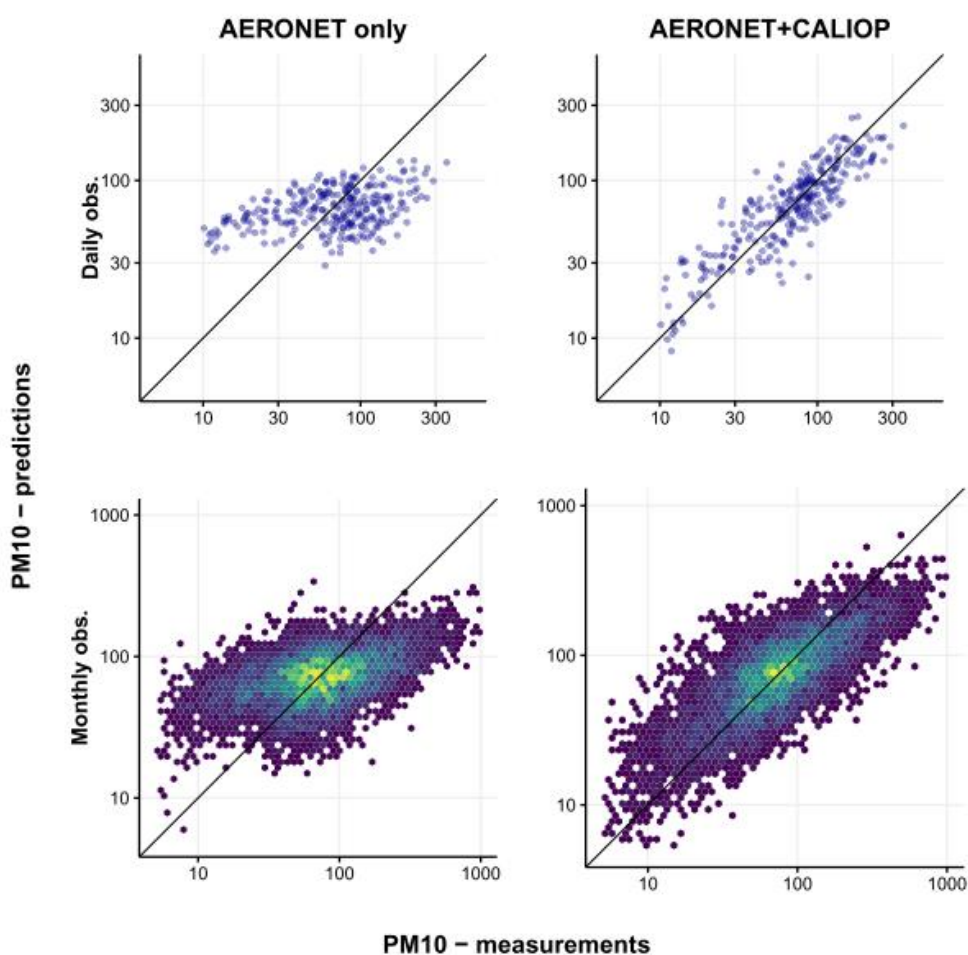


Figure II.23. Nuages de points représentant les PM_{10} modélisés (Y) versus les PM_{10} mesurés (X) sur la base d'un modèle basé sur les AOD seulement (« AERONET only », colonne de gauche) et sur les AOD + les produits CALIOP (« AERONET+CALIOP », colonne de droite) aux pas de temps quotidien (ligne 1, 1335 points co-localisés) et mensuel (ligne 2, 6509 points co-localisés).
Figure extraite de [Léon et al. \(2020\)](#), Partie B/§5.1.

Synthèse de la partie II

L'apport scientifique de la partie II, dédiée à la télédétection des poussières désertiques, est d'évaluer le potentiel de produits satellitaires existants pour mener à bien des analyses d'impacts sanitaires (§II.1). Ceci implique de travailler un peu différemment que dans le cas d'une approche de calval classique de produits de télédétection spatiale. En effet il s'agit de s'intéresser à la performance de produits satellitaires pour les poussières désertiques, en surface, au Sahel et de janvier à juin qui correspond à la saison des méningites bactériennes. Ainsi la saison à considérer recouvre une partie de la saison sèche qui s'étend d'octobre à mars (§II/Préambule), et une partie de la saison des poussières, qui s'étend de janvier à juillet. Nous l'avons découpée en 2 trimestres, JFM (janvier-février-mars), qualifié de maximum ou cœur de la saison des poussières, et AMJ (avril-mai-juin), période de transition entre le régime d'Harmattan et le régime de Mousson ouest-africaine (Figure II.24).

O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S
			<i>Dém</i>	<i>Dém</i>	<i>Pic</i>	<i>Pic</i>	<i>Fin</i>	<i>Fin</i>			

	Saison sèche
	Saison des poussières
	Saison des méningites
	Découpage de la saison des méningites

Figure II.24. Définition des saisons au Sahel. Chaque colonne représente un mois. La saison des méningites est découpée en 3 fois 2 mois : la phase de démarrage et de développement (*Dém.*) en janvier-février, la phase d'intensité maximale (*Pic*) en mars-avril et la phase de décroissante (*Fin*) en mai-juin (§III/Préambule).

Les AI-OMI ont d'abord été mobilisés (§II.2) car ces indices, dits semi-empiriques, permettent de détecter les aérosols absorbants de manière très performante au-dessus des surfaces réfléchissantes telles que les déserts ou les surfaces semi-arides. Par ailleurs, ils permettent de constituer, combinés aux AI-TOMS des séries temporelles de plusieurs décennies et à partir des années 90 (§III.2). Il ressort que les AI-OMI sont pertinents pour étudier les méningites, et plus particulièrement en JFM. Ce résultat a constitué une avancée notable pour la suite des recherches dédiées aux relations entre aérosols et santé au Sahel, en émettant l'hypothèse selon laquelle, sur une période et une zone donnée, les AI peuvent être des proxys acceptables des concentrations massiques des aérosols en surface.

L'AOD est l'un des produits le plus couramment utilisés en télédétection des aérosols car c'est un produit de référence pour inter-comparer les capteurs entre eux. Il est délivré à différentes résolutions spatiales et temporelles (dépendant des caractéristiques des capteurs satellitaires) et peut être calculé (ou inversé) par le biais d'algorithmes diversifiés (Tableau II.2). L'AOD est un produit qui fait consensus car il est spatialisé et indicateur d'une quantité d'aérosols intégrée sur la colonne atmosphérique. Les recherches portant sur les produits MODIS (§II.3) ont permis de mettre en évidence l'intérêt particulier d'utiliser les AOD issus de l'algorithme DB en vue des impacts méningites. D'une part nous avons montré que les AOD-MODIS étaient de bons proxys des concentrations en PM₁₀ en surface sur l'ensemble de l'année, avec de meilleures performances en JFM, mais aussi et surtout qu'ils étaient

capables de correctement reproduire la relation entre AOD et AE dans cette région du monde. Ainsi les produits MODIS permettent de faire la distinction entre 3 types de situations aérosols : les poussières désertiques pures, les mélanges d'aérosols avec une dominance de poussières désertiques, et les mélange d'aérosols avec une dominance d'aérosols fins. La première situation correspond à la période de janvier à juin, i.e. la saison des méningites.

Les produits CALIOP, qui permettent d'avoir accès au profil vertical de différents types d'aérosols sur la colonne atmosphérique, se sont ensuite révélés extrêmement utiles pour accéder, à partir des AOD et de l'altitude des poussières, aux concentrations des PM_{10} en surface (§II.4). Ainsi, un modèle de régression linéaire multiple considérant les produits CALIOP en plus des mesures d'AOD permettrait, aux pas de temps mensuels et quotidiens, de modéliser les variations saisonnières des concentrations en PM_{10} en surface, ce modèle prenant en compte la modification saisonnière de l'altitude de la couche des poussières de 1.5km en janvier à 4km en juin. Nous avons ici mis en évidence le potentiel de la télédétection spatiale pour la documentation de l'exposition des personnes aux particules fines par le biais de la combinaison de produits aérosols. La perspective de cette étude est d'appliquer ce type de modèle aux AOD-DB de MODIS, combinant ainsi les capacités/atouts de chacun des capteurs : la spatialisaton des AOD et les profils LIDAR pour l'obtention de grilles de PM_{10} en surface.

III. Poussières désertiques, climat et santé en Afrique

Préambule : les méningites bactériennes au Sahel

La ceinture des méningites est une bande latitudinale de coordonnées 10-15°Nord qui s'étend d'Ouest en Est du Sénégal à l'Éthiopie (Figure III.1). Cette vaste zone a été définie en 1963 par Léon Lapeyssonnie, médecin militaire devenu expert pour l'Organisation Mondiale de la Santé, sur la base de cas de méningites bactériennes à *Neisseria meningitidis* (*Nm*) recensés sur une période de 23 ans. Il est important de mentionner que la définition de cette zone endémo-épidémique, dont les limites géographiques ne coïncident pas avec les frontières des pays, fait encore référence à l'heure actuelle, et au niveau international, alors que des clusters ou des cas plus sporadiques peuvent survenir à l'extérieur de la ceinture (Agier *et al.* (2017), Partie B/§5.1). C'est le cas par exemple au Togo (Tall *et al.*, 2016), au Ghana (Kwarteng *et al.*, 2017) ou en République Démocratique du Congo (thèse de Serge Mazamay (2019), à laquelle j'ai participé en tant que membre du comité de pilotage, Partie B/§4.3). Les 6 sérogroupes les plus susceptibles de provoquer des épidémies sont les suivants : A, C, Y, X et W135.

Le séro groupe A a été dominant pendant des décennies, et a touché des milliers de personnes. En effet, plus de 450 millions de personnes vivent dans cette zone qui traverse 26 pays d'Afrique. La maladie est en outre très contagieuse et le portage difficile à étudier car asymptomatique (Trotter & Greenwood, 2007). La transmission bactérienne s'opère d'individu à individu (la maladie ne touche que les humains) par le biais de gouttelettes de sécrétions pharyngées. Ainsi, un contact étroit (<1m) et prolongé (>1h) favorise la propagation de la maladie. Cette maladie, qui attaque l'enveloppe du cerveau et la moelle épinière, touche majoritairement les enfants de moins de 15 ans et les jeunes adultes. Le taux de létalité est d'environ 10%. Par ailleurs, 10 à 20% des individus qui survivent à la maladie ont des séquelles graves allant de la perte d'audition ou du langage à un retard mental. L'année 1995 a été particulièrement catastrophique, ce fut la plus grande épidémie enregistrée dans la ceinture avec 250 mille cas recensés et plus de 25 mille décès. Rien que dans le nord du Nigéria 75 mille personnes ont été touchées, et parmi elles, plus de 8000 décès (OMS, 2011). Dès 2010, la mise en place par l'OMS d'une campagne de vaccination massive chez les jeunes de 1 à 29 ans contre le séro groupe A, vaccin conjugué MenAfriVac (LaForce & Okwo-Bele, 2011), au Burkina Faso, Niger et Mali, puis à l'échelle de la Ceinture de manière progressive jusqu'en 2016, a permis de considérablement réduire le nombre de cas total dans cette zone du globe. Au total plus de 217 millions de personnes dans 15 pays ont été vaccinées sur une période de 7 ans. Selon l'OMS, entre 2004 et 2013, le nombre de cas de méningites a été divisé par 10, avec seulement 4 cas de méningites de séro groupe A signalés dans la ceinture en 2013. Cependant, l'efficacité des vaccins est toujours limitée dans le temps et des résurgences de cas d'un même séro groupe peuvent apparaître après 15 ans (Karachaliou *et al.*, 2015). Par ailleurs, d'autres sérogroupes peuvent émerger, le *Streptococcus pneumoniae*, le C et le X étant les 3 agents pathogènes principaux circulant à l'heure actuelle dans la ceinture (OMS, 2020). Depuis 2015, par exemple, des clusters à haute incidence du séro groupe C surviennent chaque année au Niger et Nigeria (Cooper *et al.*, 2019). Ainsi, les méningites bactériennes à *Nm* restent un problème de santé publique majeur au Sahel, à en juger la feuille de route à horizon 2030 publiée par l'OMS en avril 2020.

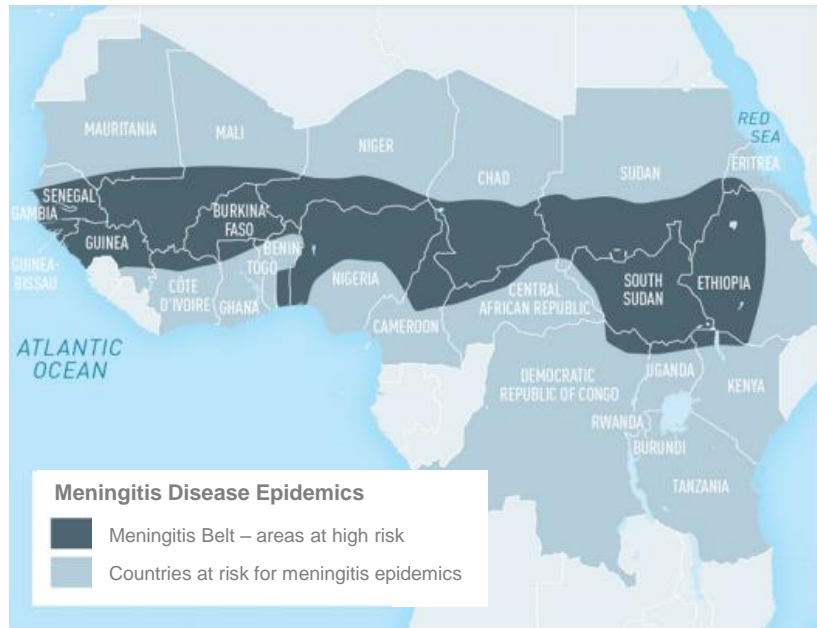


Figure III.1. La ceinture des méningites en Afrique. Carte issue du CDC (Centers for Disease Control and Prevention). Source des données : OMS (2012).

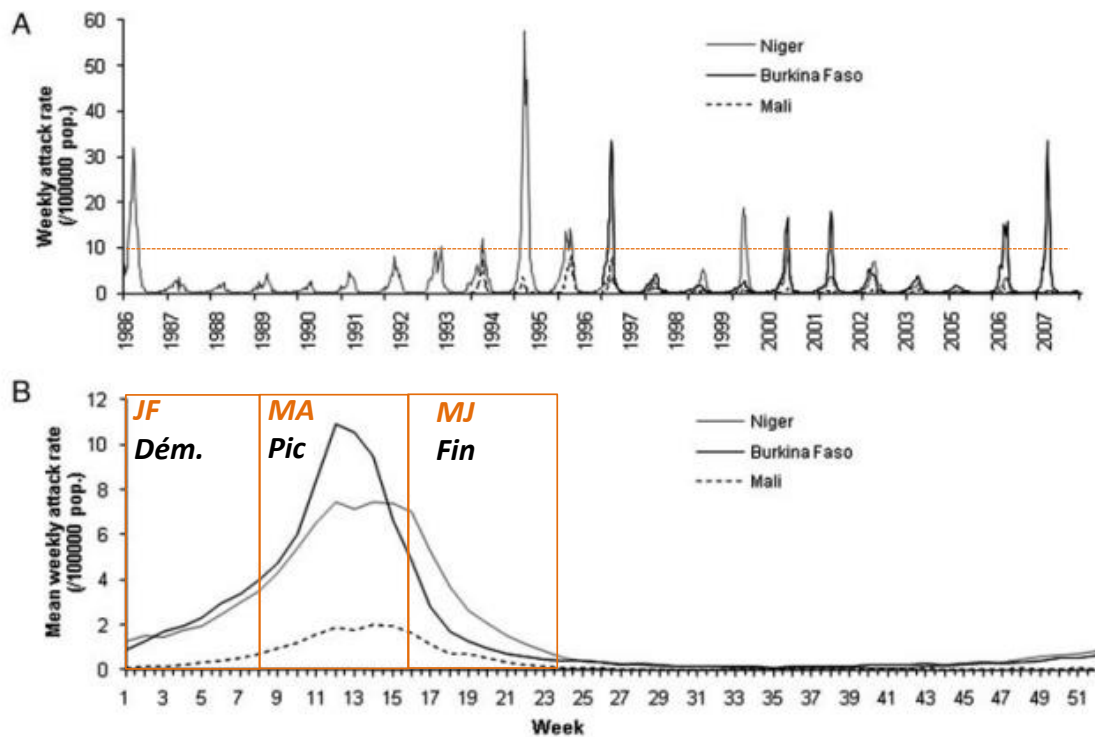


Figure III.2. Les méningites au Niger, Burkina Faso et Mali : A/ variabilité interannuelle - le trait pointillé rouge indique le seuil épidémique à l'échelle d'un pays, fixé à 10 cas pour 100.000 habitants selon OMS (2014); B/ cycle saisonnier moyen sur les périodes 1986-2007 au Niger, 1997-2007 au Burkina Faso, 1994-2007 au Mali – les mois de janvier-février (JF) marque le démarrage et le développement épidémique, les mois de mars-avril (MA) le pic épidémique, et les mois de mai-juin (MJ) la phase de décroissance épidémique.

Figure adaptée de Agier et al. (2013).

Les taux d'attaque (nombre de cas de méningites pour 100.000 habitants) dans la ceinture des méningites figurent parmi les plus importants au monde. Des épidémies, pendant lesquelles l'incidence hebdomadaire (nombre de cas pour 100.000 habitants enregistrés par semaine) dépasse le seuil épidémique sur une période de plusieurs semaines, sont observées de manière récurrente (Figure III.2/A). Les vagues épidémiques, qui concernent plusieurs pays à la fois, sont plus rares avec une périodicité estimée à 10-12 ans (Agier *et al.*, 2013). Le cycle saisonnier moyen des méningites est caractéristique, avec un démarrage et un développement en janvier-février, un pic épidémique plus ou moins étalé en mars-avril, une phase de décroissance en mai-juin (Figure III.2/B). Dans la ceinture, on observe une hiérarchie assez claire des pays touchés par les épidémies, avec en tête pour le Sahel, le Burkina Faso (Figure III.3).

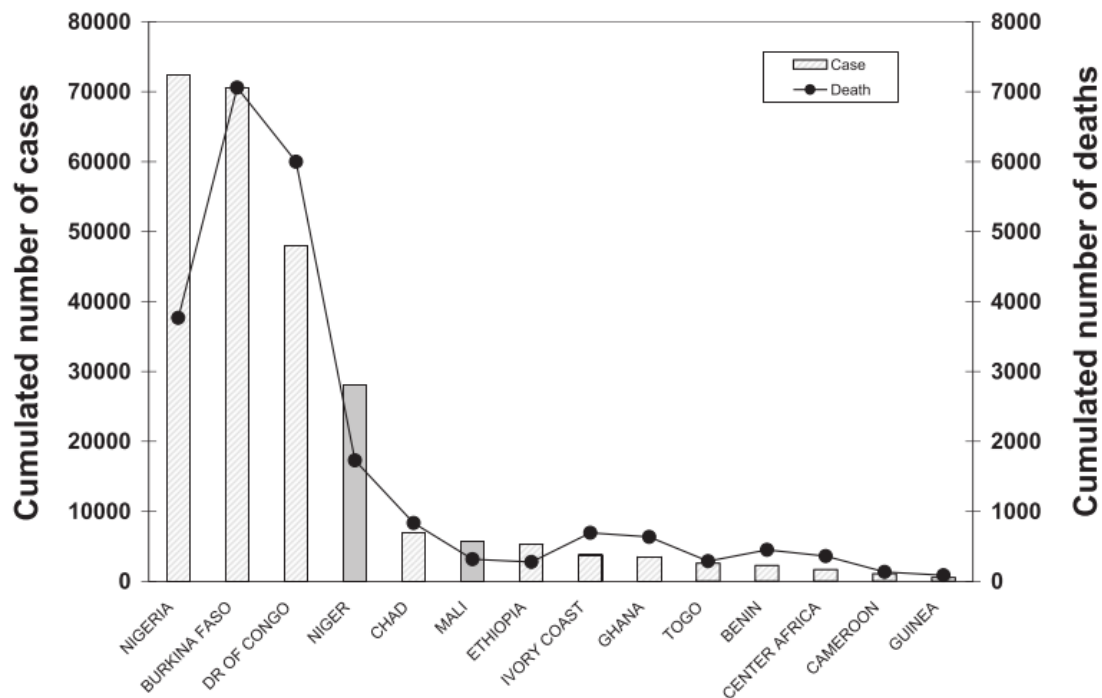


Figure III.3. Nombre de cas cumulés de méningites et nombre de décès dans 14 pays de la ceinture sur la période 2004-2009 (avant Menafrivac, §III/Préambule). Le jeu de données utilisé pour réaliser cette figure est EPI-I (§III.3/Figure III.20). Figure extraite de [Martiny & Chiapello \(2013\)](#), Partie B/§5.1.

Questions scientifiques et éléments contextuels

Comprendre les déterminants de la dynamique de transmission de la maladie reste un pan de recherches important à investir, car il laisse encore de nombreuses zones d'ombres. Quels sont donc les facteurs influençant les épidémies de méningites bactériennes ? Pourquoi observe-t-on une telle variabilité interannuelle ? Une revue multidisciplinaire (Agier *et al.* (2017), Partie B/§5.1) a permis de recenser les méthodes statistiques utilisées (des régressions multiples à la modélisation mathématique) pour expliquer les incidences des méningites à différentes échelles spatiales (pays, région, district, individuelle) et temporelles (année, saison, mois, semaine). Ce bilan a permis d'avoir une vision claire des facteurs de risques des épidémies de méningites saisonnières (Figure III.4), qui surviennent de janvier à juin, des échelles individuelles à synoptiques : facteurs immunitaires des individus et caractéristiques de virulence des bactéries, conjonction de divers facteurs d'ordre médical comme les co-infections (Moore, 1992), sociétal comme le style de vie (Hodgson *et al.*, 2001), démographique comme la densité de population (Maïnassara *et al.*, 2010), climatique comme les conditions de sécheresse (Besancenot *et al.*, 1997) ou encore environnemental comme les aérosols désertiques (Molesworth *et al.*, 2002).

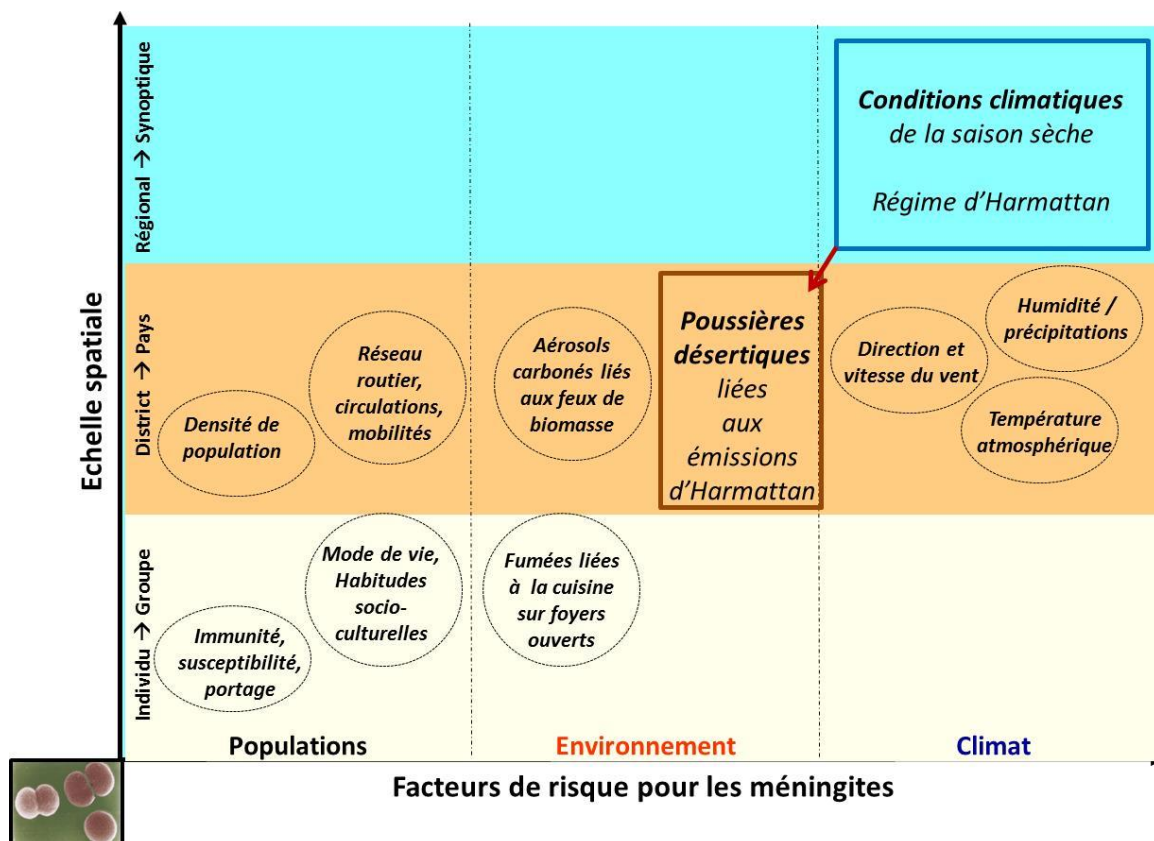


Figure III.4. Les différentes échelles spatiales des facteurs de risque des méningites bactériennes au Sahel. Adapté de Martiny *et al.* (2009), Partie B/§5.5 sur la base de Agier *et al.* (2017), Partie B/§5.1.

Des années 80 à la fin des années 2010, un certain nombre de publications scientifiques ont apporté un éclairage nouveau sur le lien pouvant exister entre méningites et facteurs de risques climatiques et environnementaux (Tableau III.1). Les facteurs impactant le déclenchement et la propagation de la maladie sont ainsi de diverses natures, et surviennent des échelles locales à régionales (Figure III.4). De ce fait, les questions de l'intensité et du calendrier des épidémies sont complexes, et à ce jour, aucun modèle explicatif et/ou prédictif complet (intégrant tous ces facteurs) n'est utilisé en mode opérationnel aux échelles d'intérêt pour les populations (< district sanitaire). Cependant, la méningite bactérienne a été reconnue comme l'une des maladies les plus climato-sensibles du monde (Molesworth *et al.*, 2003), 25% de la variabilité interannuelle des incidences des méningites au Burkina Faso pouvant être expliquée par des facteurs climatiques (Yaka *et al.*, 2008). Les questions concernant le lien entre climat, environnement et méningites font alors de plus en plus sens dans le contexte de la variabilité et du changement climatiques. Par ailleurs, si des liens statistiques sont mis en évidence, ce qui constitue un premier pas dans le diagnostic, qu'en est-il du lien réel existant entre variables climatiques, poussières et déclenchement des cas ? Quelles sont les hypothèses engagées par les épidémiologistes et médecins à ce sujet ? Evoquent-ils le climat et les poussières, si oui dans quelle mesure ? Un dialogue s'avère ici indispensable avec ces communautés.

Le programme AMMA (Analyse Multi-disciplinaire de la Mousson Africaine) a considérablement participé aux échanges entre disciplines et à l'avancement de l'état des connaissances sur le lien entre climat, poussières et santé dans la ceinture des méningites au niveau international (§III.1/Figure III.5). De 2002 à 2007, au sein de la composante française d'AMMA, un groupe de recherches multidisciplinaires à l'interface entre climatologie, géographie et épidémiologie (WP3.2 AMMA Santé France), initie des recherches sur l'association entre climat et méningites (Sultan *et al.*, 2005 ; Yaka *et al.*, 2008). De 2007 à 2012, le WP3.2 évolue (Martiny (2007-2012), Partie B/§2.1) en infléchissant les thématiques vers les poussières désertiques, et en intégrant des télédéTECTEURS, des atmosphériciens, des géographes de la santé, des historiens et des médecins spécialistes des maladies infectieuses (Martiny *et al.*, (2009b), Partie B/§5.5). Des liens se tissent alors avec l'initiative MERIT (Meningitis Risk Environmental Information Technologies, 2007-2012) de l'OMS (Thomson *et al.*, 2013). Le groupe MAMEMA (Multidisciplinary Approach for Meningitis Epidemiology and Modeling in Africa), dont je suis membre co-fondatrice (PartieB/§2.1), est constitué à la suite (sa dynamique durera 4 ans de 2010-2014), rassemblant épidémiologistes, mathématiciens modélisateurs, anthropologues et climatologues (Martiny *et al.* (2010, 2011, 2012, 2013), Partie B/§5.5). Les données épidémiologiques de certains pays particulièrement touchés par les épidémies, et qui n'avaient été que très peu exploitées par la communauté des géophysiciens, deviennent alors, par le biais de ces différents groupes de recherches, accessibles.

La question du rôle des poussières sur les épidémies de méningites devient alors possible à traiter, et centrale. Elle repose sur les connaissances acquises précédemment sur le lien entre climat, poussières et méningites (§III.1) ainsi que sur la détermination du poids de la variable poussières versus les variables climatiques (§III.2). Une fois ces points traités, il est possible d'investir la relation entre poussières et méningites, en s'intéressant d'abord au calendrier : les poussières peuvent-elles jouer un rôle sur le démarrage et développement épidémique, et si oui à quelles échelles spatiales (§III.3) ? Qu'en est-il à l'échelle de la ceinture des méningites (§III.4) ? La partie III de cette Habilitation à Diriger les Recherches résume une dizaine d'années de recherches qui ont permis d'investir ces questions complexes.

First author/year	Location	Period	Epidemiological data	Risk factors investigated	Methods of analysis	Space/time scale
Agier 2013 ⁸⁰	Niger	1986–2007	Suspected cases	Dust, wind direction and force, relative humidity, temperature	Wavelets	District/week
Agier 2013 ³⁹	Niger, Mali, and Burkina Faso	1986–2007	Suspected cases	(<i>Incidence only was investigated</i>)	Cluster analysis, principal component analysis	District/week
Besancenot 1997 ⁶⁸	Benin	1965–1992	Biologically confirmed cases and suspected cases of <i>Nm</i>	Temperature, relative humidity, vapour pressure, dust haze	Simple linear regression	Region/month
Bharti 2012 ¹²⁸	Niger	1995–2004	Suspected cases	Human density, daily rainfall	Cox proportional hazard regression model	District/year
Broutin 2007 ⁷	Mali, Burkina Faso, Ghana, Togo, Benin, Niger, Nigeria, Chad, and Sudan	1939 – 1999	Suspected cases	(<i>Incidence only was investigated</i>)	Wavelet analysis	Country/year
Dukić 2012 ⁷⁹	Navrongo in Ghana	1998–2008	Biologically confirmed cases	Rainfall, temperature, relative humidity, wind speed, dusty days, carbon dioxide emissions from fires	Poisson generalized additive model, possibly with lagged risk factors	Month (no space scale)
Greenwood 1984 ⁶⁷	Zaria area in Northern Nigeria	1977–1979	Biologically confirmed cases of <i>Nm</i>	Temperature, absolute humidity, rainfall, Harmattan intensity	Pearson correlation	Two weeks (no space scale)
Hodgson 2001 ⁷⁵	Kassena-Nankana District in northern Ghana	1997	Suspected cases (case-control study)	Socio-economic factors, housing and household overcrowding, smoking and exposure to smoke, and close contact with a case	Computation of Mantel-Haenszel odds ratios	Odds ratio
Irving 2011 ⁴⁰	(<i>this simulation study did not require real data</i>)	(<i>this simulation study did not require real data</i>)	(<i>this simulation study did not require real data</i>)	Model parameters: (1) rate of progression from asymptomatic carriage to invasive disease is seasonally forced; (2) carriers and cases are infectious, same transmission rate; (3) no immunity, immunity due to disease, immunity due to disease and carriage	Deterministic compartmental model susceptible-carrier-ill-recovered	District-week
Jackou-Boulama 2005 ⁶⁹	Niger	1996–2002	Suspected cases	Rainfall: monthly cumulative rainfall from four meteorological stations	Pearson correlation	Country/month
Maïnassara 2010 ⁷⁷	Niger	2002–2008	Biologically confirmed cases of <i>Nm</i>	(<i>Incidence only was investigated</i>)	Spatial scan statistics	Canton/year
	Niger	2002–2008	Biologically confirmed cases of <i>Nm</i>	Population density	Pearson correlation	Department/year
Martiny 2013 ⁷¹	Niger and Mali	2004–2009	Suspected cases	Dust, absolute humidity	Comparisons between mean standardized annual regimes in dust, absolute humidity, and meningitis; Pearson correlation	Country/week
Molesworth 2003 ⁷⁴	Africa	1841–1999	Meningitis epidemics published (PubMed) and unpublished (institutional reports)	Absolute humidity, absorbing aerosols, rainfall, land-cover type, population density	Principal component analysis, clustering, logistic regression	District (no time scale)
Mueller 2008 ⁷⁶	Bobo-Dioulasso City in Burkina Faso	February to June 2003	Carriers of <i>Nm</i> during hyperendemic period (5 monthly visits: pharyngeal swabs)	Socio-demographic information (medical history, smoke exposure, crowding, etc.), meteorological data	Multivariate mixed Poisson regression	Individual scale
	Three rural villages in Burkina Faso	2006	Carriers of <i>Nm</i> during NmA epidemic period	Socio-demographic information (medical history, smoke exposure, crowding, etc.), meteorological data	Cox proportional hazard model	Individual scale
					Multivariate mixed logistic regression	Individual scale

First author/year	Location	Period	Epidemiological data	Risk factors investigated	Methods of analysis	Space/time scale
Mutonga 2009 ⁴⁷	West Pokot District in Kenya	December 2005–April 2006	Suspected cases (case-control study)	Characteristics of the household, lifestyle, recent travel, exposure to sick people, upper respiratory tract infection, socio-economic status, level of education (<i>Incidence only was investigated</i>)	Conditional multivariate logistic regression	Individual scale
Paireau 2012 ³⁸	Niger	2003–2009	Biologically confirmed cases of <i>Nm</i>		Spatial scan statistics and local Moran's <i>I</i> test for spatial autocorrelation	Health area/year
Philippon 2009 ³⁶	Niger Mali	2003–2009 1992–2003	Biologically confirmed cases of <i>Nm</i> Suspected cases	Distance to road and population density (<i>Incidence only was investigated</i>)	Pearson correlation Cross-correlation of times series of cases	Health area/year Region/week, district/week, and village/week
Raghunathan 2006 ⁴⁷	Burkina Faso, two districts vaccinated against <i>NmA</i> and <i>NmC</i>	2002	5–25-year-olds, carriage and seroprevalence	Demographic information, household conditions, recent medical history, and self-reported previous meningococcal vaccination: exposure to meningitis in the household, travel to Mecca	Logistic regression	Individual scale
Sultan 2005 ⁷³ Tall 2012 ³⁴	Mali Six districts of Burkina Faso	1994–2002 2004–2008	Suspected cases Suspected cases	Winter maximum (<i>Incidence only was investigated</i>)	Linear regression Pearson correlation	Country/week Health centre/week
Thomson 2006 ⁷⁰	Burkina Faso Niger Parts of Mali	1997–2001 1993–2001 1989–1998	Suspected cases	Dust, rainfall, normalized difference vegetation index, cold cloud duration	Multivariate linear regression	District/year
Yaka 2008 ³²	Togo Niger and Burkina Faso	1990–1997 1966–2005	Suspected cases	Wind velocity, surface temperature, specific/relative humidity near the surface	Multivariate linear regression	Country/year

Tableau III.1. Caractéristiques des publications reliant méningites et facteurs de risques climatiques et environnementaux des années 80 à la fin des années 2010. Tableau extrait de Agier et al. (2017), Partie B/§5.1.

III.1 Bref historique du lien entre climat-environnement et méningites

Dans sa revue sur les épidémies de méningites, Greenwood (2006) indique que la première épidémie de méningite bactérienne a été enregistrée en 1840 en Algérie, parmi les troupes militaires de l'armée française (Chalmers & O'Farrell, 1916). Environ 60 ans plus tard, l'hypothèse selon laquelle le climat, et plus précisément l'humidité atmosphérique, impacte la dynamique temporelle et spatiale des épidémies est avancée par la communauté scientifique (Horn, 1908 ; Sicé *et al.*, 1940 ; Waddy, 1957). A cette époque la ceinture des méningites n'a pas encore été définie même si la première épidémie majeure est survenue en Afrique de l'Ouest en 1905 (McGayey, 1905). Il faut attendre les années 60, et les travaux de Lapeyssonnie (1963), pour une définition précise de l'extension spatiale de la zone touchée par les méningites bactériennes en Afrique. Les premières hypothèses concernant la saisonnalité des épidémies émergent alors (Figure III.5, périodes (a) et (b)) : les épidémies saisonnières démarreraient lorsque l'humidité est au plus bas, en plein cœur de la saison sèche, et au moment où les conditions de vent et de poussières désertiques sont à leur maximum ; elles sembleraient s'arrêter avec l'apparition de la Mousson ouest-africaine (Lapeyssonnie, 1963 ; Molineaux, 1969 ; Greenwood *et al.*, 1984 ; Moore *et al.*, 1992 ; Cheesbrough *et al.* 1995). A la fin des années 90-début des années 2000, la variable «aérosols» est considérée à part entière, par le biais de proxy (mesures de visibilité par exemple) et sur des sites spécifiques (Besancenot *et al.*, 1997).

Ainsi, si le climat et les poussières sont suspectés de jouer un rôle sur la dynamique de transmission des méningites en Afrique depuis le début du XX^{ème} siècle (Figure III.5), ce n'est qu'à partir des années 2000 que l'association entre climat, poussières et méningites est testée de manière quantitative à des échelles spatiales larges et avec des méthodologies statistiques avancées ; ceci est lié à la disponibilité de données spatialisées issues de la télédétection spatiale et des réanalyses climatiques avec une profondeur temporelle suffisante, et s'est produit conjointement aux programmes de recherches internationaux tels que AMMA (centré sur la géophysique et traitant notamment des impacts sanitaires) et MERIT (centré sur l'épidémiologie des méningites) qui ont constitué un cadre idéal permettant aux différentes communautés de se rapprocher (§III/Questions scientifiques et éléments contextuels).

Dans les années 2000, on peut scinder l'avancement des recherches entre climat, environnement et méningites en 2 grandes phases : (i) les premières études grande échelle associant de manière statistique les méningites à divers facteurs de risque dont le climat et l'environnement (Figure III.5, phase (c)); (ii) les premières études explicatives de la saisonnalité des méningites (Figure III.5, phase (d)).

Dans la phase (c), Molesworth *et al.* (2003) ont construit un modèle statistique à l'échelle de l'Afrique, qui, sur la base des variables « humidité absolue », « précipitations », « poussières », « type d'occupation du sol » et « densité de population », permet d'identifier les zones à risque pour les méningites. Ce travail, mené à l'échelle du district sanitaire (Figure III.6), a constitué une avancée notable dans le domaine. Quelques années plus tard, Thomson *et al.* (2006) ont adopté une approche similaire, focalisée sur 4 pays, le Burkina Faso, le Niger, le Togo et une partie du Mali, en introduisant des nouvelles variables parmi lesquelles le NDVI (Normalized Difference Vegetative Index) permettant de prendre en compte la dynamique des états de surface. Parmi les variables étudiées, deux d'entre elles semblent ressortir de manière évidente : les précipitations en période pré-épidémique et les aérosols en période post-épidémique.

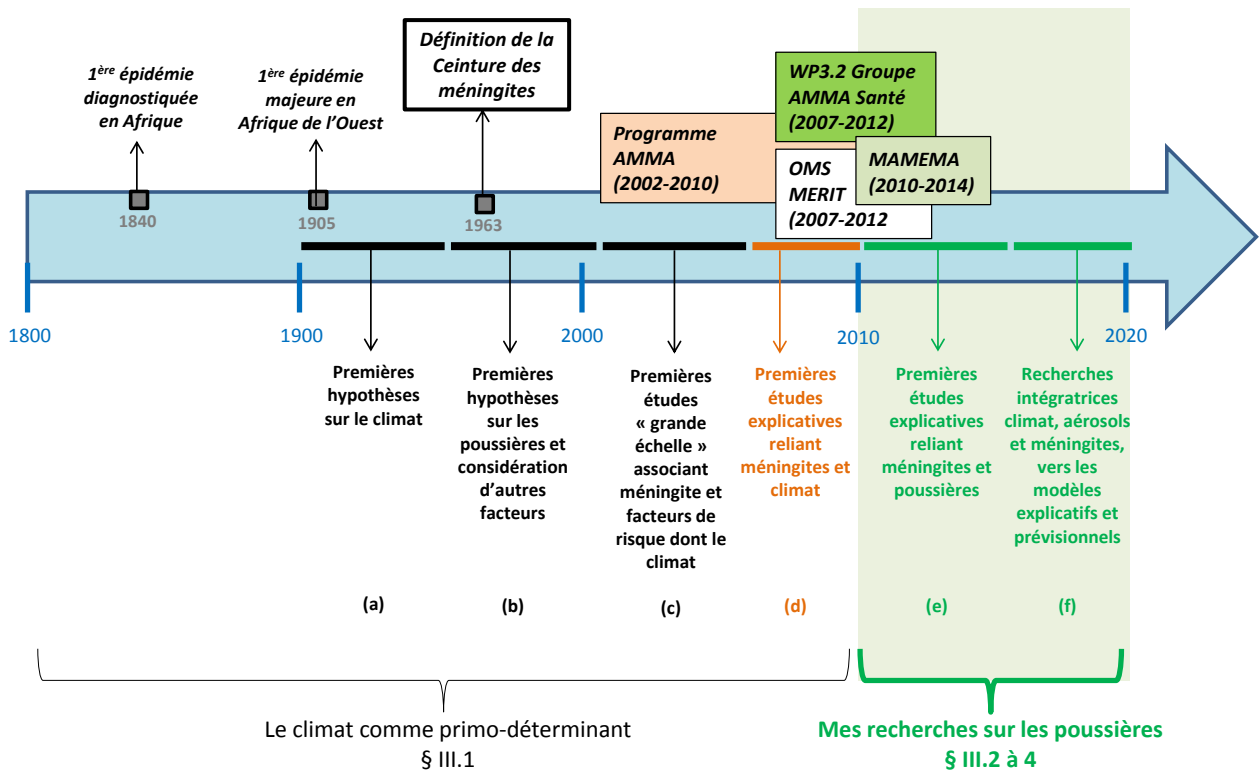


Figure III.5. Frise chronologique retraçant les grandes étapes des recherches portant sur lien entre climat, environnement et méningites bactériennes en Afrique nord-équatoriale. La couleur verte indique les programmes au sein desquels et les périodes pendant lesquelles mon implication a été majeure sur le thème climat, poussières et méningites : PI du WP3.2 AMMA Santé France de 2007 à 2012, membre co-fondatrice de MAMEMA (2010-2014), activités de recherches, d'encadrement doctoral et scientifique, et publications. Figure adaptée de *Martiny on behalf the AMMA consortium (2013)*, Partie B/§5.5.

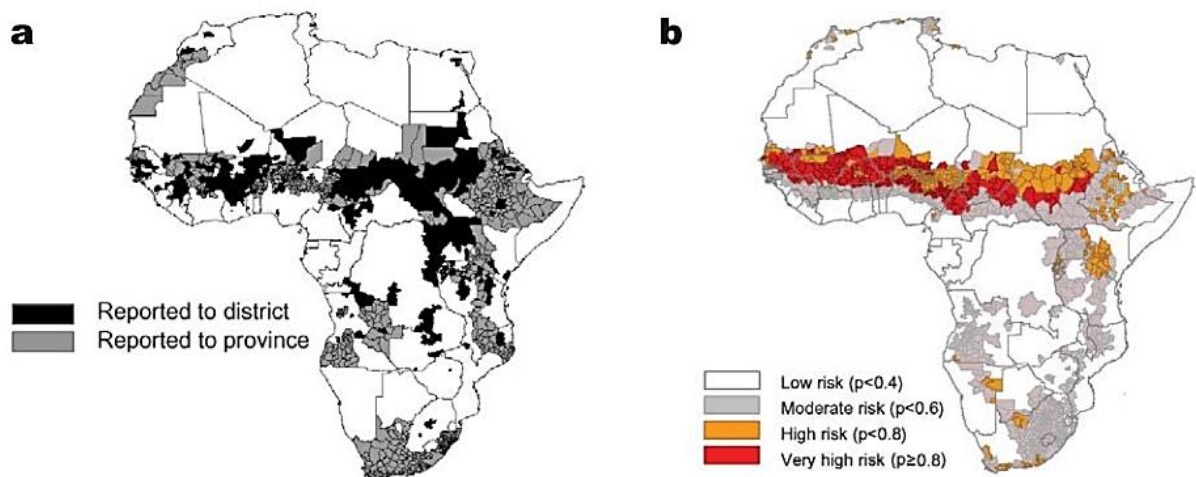


Figure III.6. Distribution spatiale des épidémies de méningites : a) sur la période 1841-1999 à l'aide de données publiées (PubMed) et non publiées (rapports institutionnels) ; b) probabilité d'occurrence des méningites sur la base d'un modèle statistique. Figure extraite de *Molesworth et al. (2003)*.

Ainsi, les auteurs trouvent une incidence plus élevée des méningites, en cas d'anomalies de précipitations négatives en janvier, c'est-à-dire en plein de cœur de la saison sèche, en cas d'anomalies de poussières négatives en avril, soit après le pic épidémique. Que déduire alors de ces résultats, et surtout concernant les poussières : qu'elles ne peuvent pas être utilisées comme variable prédictive des épidémies ? qu'elles ne jouent aucun rôle conjointement aux épidémies ? Si l'approche et les résultats proposés constituent des avancées à première vue intéressantes, ces études ont les limitations suivantes : (i) les données environnementales, et parmi elles, les produits satellitaires aérosols, n'ont pas subi de vérifications particulières, ce qui peut poser des problèmes d'interprétations (§II). Dans ce contexte, comment interpréter les résultats des modèles statistiques et quelle valeur leur accorder ? (ii) par suite, il est difficile de répondre à la question du rôle potentiel de chacun des facteurs testés ; (iii) les modèles construits, qui expliquent (pour les savanes) ~43% des incidences mensuelles des méningites, reposent sur des variables synchrones au prédicteur et difficiles à obtenir en mode prédictif.

D'autres approches, ayant pour objectif d'être explicatives de la saisonnalité des méningites, sont alors entreprises par des géographes climatologues au milieu des années 2000 (Figure III.5, période (d)). L'un des premiers résultats mis en évidence concerne les conditions climatiques d'octobre-novembre, qui se traduit par un renforcement du régime d'Harmattan, sur l'ampleur des épidémies ayant lieu quelques mois plus tard au Niger (Yaka *et al.*, 2008). Les auteurs trouvent ainsi que 25% de la variabilité interannuelle des méningites observées au Niger peut être expliquée par les conditions de vent (direction, vitesse), la température et l'humidité atmosphérique, quelques mois avant le démarrage épidémique.

Nous avons par la suite mis ce résultat en évidence au Burkina Faso, pays parmi les plus touchés au sein de la ceinture (§III/Préambule). Basé sur le taux d'attaque, 7 années ont pu être identifiées comme étant épidémiques au Burkina Faso sur la période 1979-2014 : 1984, 1996, 1997, 2001, 2002, 2006 et 2007 en accord avec Agier *et al.* (2013). Les composites climatiques mensuels (années épidémiques moins l'ensemble des années) mettent en évidence des conditions synoptiques spécifiques en novembre, où l'on peut observer une poussée d'Harmattan en Algérie et au Nord du Mali à 925 hPa. Le signal est également significatif plus au Sud, et notamment au Burkina Faso (Figure III.7). Cette intensification des vents d'Harmattan s'accompagne d'un renforcement des conditions sèches à partir de novembre, qui perdurent jusqu'en janvier (Tompkins *et al.*, 2019), Partie B/§5.4). Ce signal climatique est en réalité associé à une anomalie de subsidence au-dessus de la Méditerranée, observée exclusivement en octobre, entre 30°N et 40°N sur l'ensemble de la colonne d'air (Figure III.8).

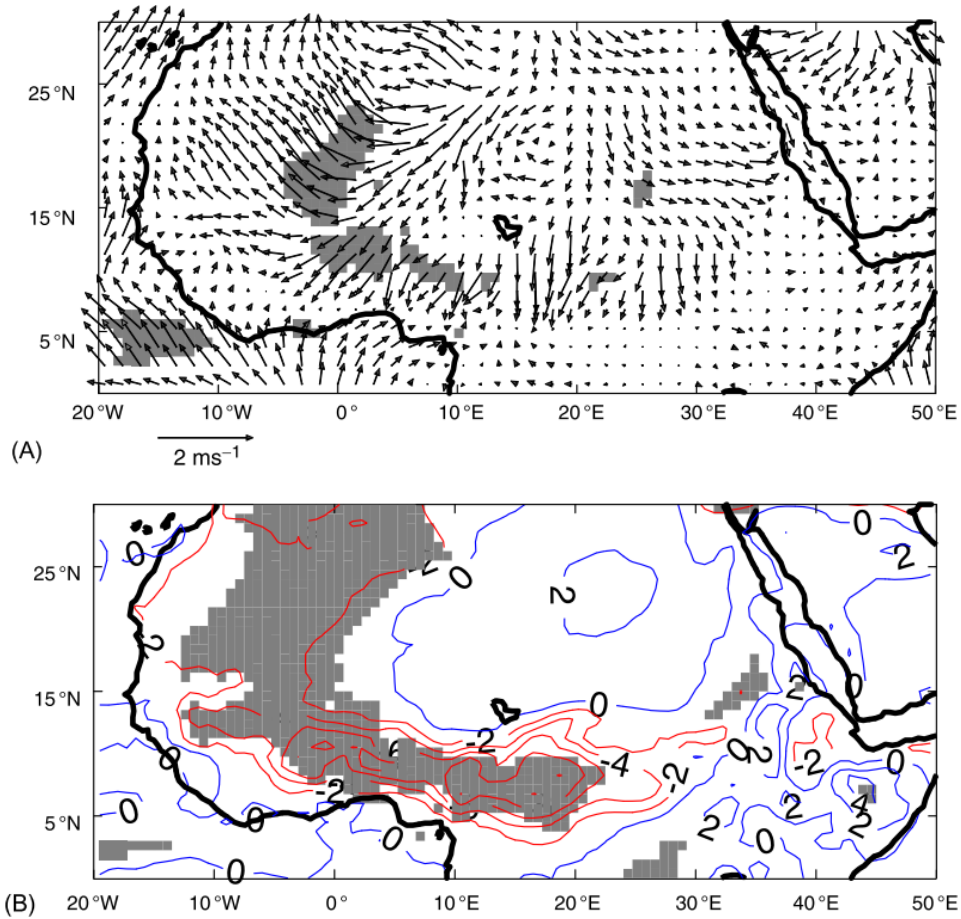


Figure III.7. Anomalies de vent à 10 m (en m/s) (A) et d'humidité relative (en %) (B) entre les années épidémiques détectées au Burkina Faso (1984 ;1996 ;1997 ;2001 ;2002 ;2006 ; 2007) moins l'ensemble des années (1974-2014) pour le mois de novembre. Données issues de ERA-Interim. Aplats gris: Valeurs significatives à $p=0.1$ selon le test de Student. Figure extraite de Tomkins *et al.* (2019), Partie B/§5.4.

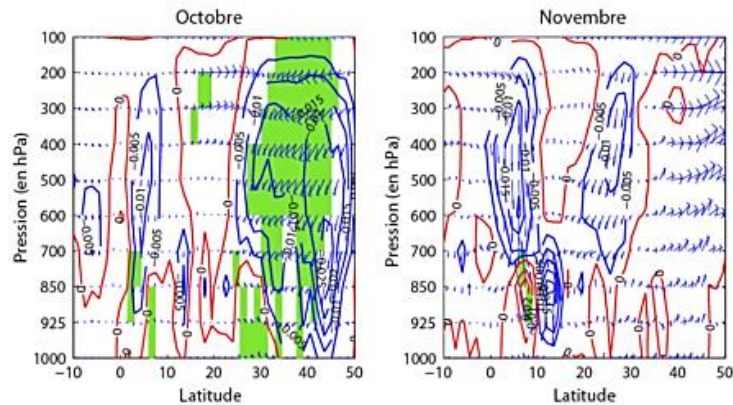


Figure III.8. Anomalies de circulation atmosphérique entre les années épidémiques (1996 ;1997 ;2001 ;2002 ; 2006 ; 2007) et non épidémiques (1991 ;1992 ;1993 ;1994 ;1995 ;2005) au Burkina Faso en considérant la période 1989 à 2010 au pas de temps mensuel. Transect : [-10°W et 30°E]. En vert : Valeurs significatives à $p=0.1$ selon le test de Student. Isolignes rouges : ascendance de vent. Isolignes bleues : subsidence de vent. Figure extraite du stage de M2 d'Elodie Fluck (2012), dont j'ai assuré la co-direction, Partie B/§4.7.

Quelles sont alors les hypothèses engagées en termes de lien entre les conditions climatiques d'octobre-novembre et l'intensité des épidémies survenant quelques mois plus tard ? Yaka *et al.* (2008) avance l'hypothèse selon laquelle ces conditions automnales favoriseraient l'apparition de cas précoces de méningites, qui augmenteraient la taille du réservoir et seraient à relier à l'intensité de l'épidémie (Figure III.9). En effet, les cas précoces peuvent être considérés comme un proxy de l'immunité, de la susceptibilité et du portage de la population. Un plus grand nombre de cas précoces en automne impliquerait également la survenue du pic épidémique plus tôt que d'accoutumée. Ces 2 éléments, bien connus en épidémiologie, sont retrouvés par les modèles mathématiques de type SI (Susceptible-Infected) (Zhou *et al.*, 2006).

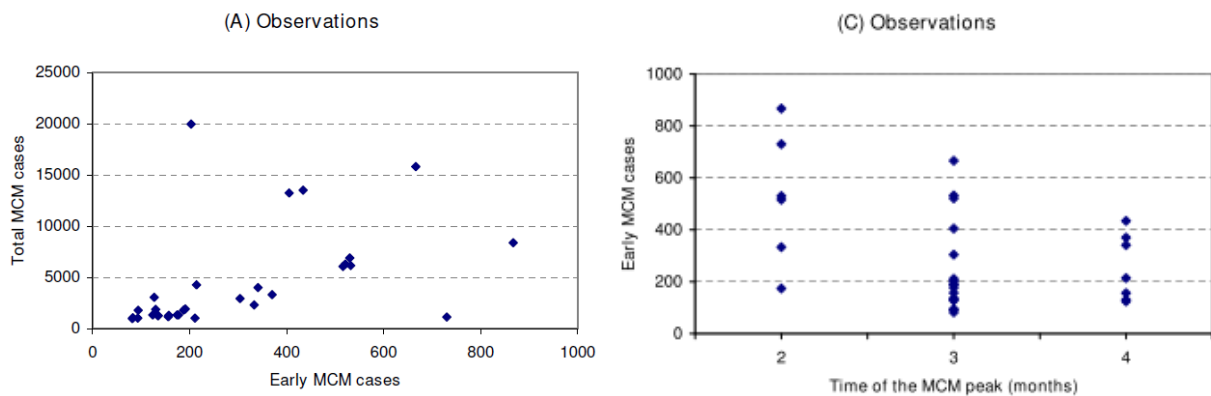


Figure III.9. Importance des cas précoces au Burkina Faso : (A) Relation entre le nombre de cas de méningites pendant le pic épidémique (de janvier à avril) et le nombre de cas précoces (d'octobre à décembre) ; (C) Relation entre le nombre de cas précoces (d'octobre à décembre) et le moment du pic épidémique (en février, mars ou avril). Figures extraites de Yaka *et al.* (2008).

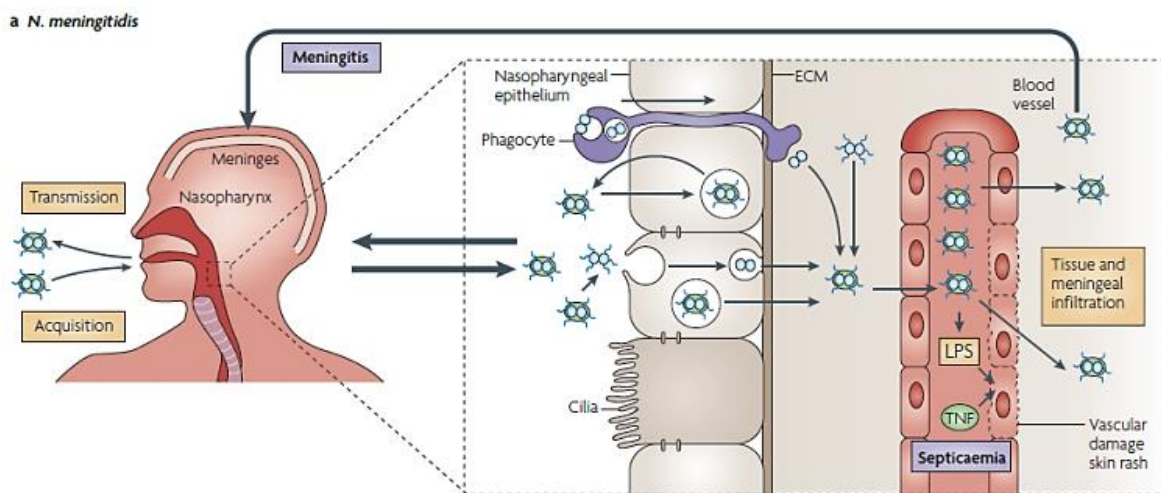


Figure III.10. Les étapes d'acquisition de la bactérie à *Neisseria meningitidis* selon Virji (2009).

Au milieu des années 2010, des modèles statistiques incluant des variables climatiques, des données démographiques, le nombre de cas précoces de méningites ainsi que les poussières en automne sont développés (Perez *et al.*, 2014). Cette étude indique que les cas précoces améliorent les performances des modèles quelle que soit l'échelle spatiale considérée. Les poussières entrent également dans les modèles, soit de manière directe via la variable poussières, soit de manière indirecte via la variable vent. Ainsi, à l'échelle nationale, les 2 meilleurs modèles incluent soit le vent zonal en novembre-décembre et les cas précoces en décembre (pseudo- $R^2 = 0.57$) soit les poussières en novembre-décembre et les cas précoces en décembre (pseudo- $R^2 = 0.55$). A l'échelle du district sanitaire, les performances des meilleurs modèles, qui incluent un plus grand nombre de variables qu'à l'échelle nationale, sont moins notables, avec un pseudo- $R^2 = 0.41$. Ce résultat est en accord avec la plus grande complexité des facteurs de risque à ces échelles plus fines, combinant des variables quantitatives et qualitatives multi-échelles (§III/ Questions scientifiques et éléments contextuels, Figure III.4). Expliquer et modéliser les incidences de méningites à l'échelle du district sanitaire est en cela un vrai défi (§VI/Perspectives de recherches).

Dans les 2 cas, le fait de ne pas considérer les cas précoces fait diminuer la corrélation de Pearson d'environ 0.08 points. Si ce résultat ne prouve pas le rôle des cas précoces, il n'entre pas en contradiction avec les hypothèses précédemment engagées par Yaka *et al.* (2008). Dans leur étude, les auteurs soulignent également l'importance de considérer les concentrations des poussières en surface dans les modèles de méningites plutôt que des indicateurs intégrés sur la colonne atmosphérique ; ceci appuie complètement notre démarche en télédétection qui vise à obtenir des produits représentatifs, voire des concentrations, des aérosols en surface (§II).

Dans ces différentes études, les prédicteurs sont utilisées en octobre, novembre ou décembre afin d'avoir un décalage temporel suffisant avec les épidémies de méningites, ce dans un but essentiellement prédictif. Les éléments expliqués sont alors les incidences saisonnières des méningites. Ainsi, ce type d'études ne permet pas d'atteindre l'objectif des incidences hebdomadaires des méningites sur l'ensemble de la saison en mode prédictif. Ces études mettent également en évidence l'importance du climat, des cas précoces et des poussières, là où les autres études publiées jusque-là soulignaient seulement l'importance du climat à cette période de l'année (en automne).

Ceci va dans le sens des hypothèses engagées par les épidémiologistes spécialistes des maladies infectieuses, à savoir qu'à part la susceptibilité de l'hôte et l'âge (jeunes enfants), d'autres facteurs participeraient à l'accroissement de la vulnérabilité de l'organisme, tels que des lésions physiques de la muqueuse pouvant être dues à des infections respiratoires mais aussi à des conditions atmosphériques sèches ou chargées en aérosols (Muller & Gessner, 2010). En effet, la bactérie *Neisseria meningitidis* est localisée dans la partie haute du système respiratoire (Figure III.10), son seul réservoir connu depuis une centaine d'années (Bratcher *et al.*, 2012).

Nous revenons donc ici à la variable aérosols qui n'a pas encore été étudiée de manière différenciée vis-à-vis des autres facteurs climatiques, et qui pourrait avoir un rôle central dans l'acquisition et la transmission de la bactérie *Nm* (§III.2). Assoir les résultats statistiques concernant les aérosols devient alors primordial afin d'émettre des hypothèses quant à leur rôle sur la variabilité intra-saisonnière des épidémies.

III.2 Les aérosols versus le climat pendant les méningites saisonnières

Tout d'abord, pour avancer sur le lien entre aérosols et méningites à l'échelle intra-saisonnière, il est absolument fondamental de travailler avec des données épidémiologiques les mieux résolues possibles dans l'espace et dans le temps, et dotées d'une profondeur temporelle la plus longue possible afin de les croiser avec les produits « aérosols » (§II) et pouvoir leur appliquer des méthodes statistiques avancées. Par ailleurs, les données épidémiologiques sont lacunaires et de qualité incertaine – elles recensent bien souvent des cas suspects, pouvant entraîner une surestimation du nombre de cas de l'ordre de 40 à 50% pour les mois les plus touchés par les méningites (Paireau *et al.*, 2012). Par suite, les études pluridisciplinaires, impliquant à la fois des scientifiques du domaine de la santé et du climat, et utilisant des données épidémiologiques basées sur des cas confirmés (nécessitant des prélèvements de fluide cérébrospinal) sont relativement rares (Agier *et al.* (2017), Partie B/§5.1). On peut relever par exemple les études menées par Greenwood *et al.* (1984) dans la zone de Zaria au Nigeria, celle de Besancenot *et al.* (1997) au Bénin (mais complétée par des cas suspectés), celle de Dukić *et al.* (2012) dans la ville de Navrongo au Ghana, ou encore celles de Maïnassara *et al.* (2010) et Paireau *et al.* (2012) au Niger.

La dynamique instaurée au sein de la composante française d'AMMA Santé (Martiny (2007-2012), Partie B/§2.1) et du groupe MAMEMA (2010-2014, Partie B/§2.1) a permis l'accessibilité à une base de données épidémiologiques de cas suspectés de grande qualité (Agier *et al.*, 2013), encore très peu exploitée par les scientifiques et pas du tout par les climatologues. Ce sont des incidences hebdomadaires à l'échelle du district sanitaire au Niger (1986-2007), au Mali (1994-2007) et au Burkina Faso (1997-2007) (Figure III.11). Ces incidences présentent l'avantage d'avoir subi un traitement des données manquantes. Elles ont été calculées en prenant en compte les données démographiques recueillies sur plusieurs décennies, comme par exemple au Niger en 1977, 1988 et 2001.

Cette nouvelle mine d'informations a constitué le point de départ pour réaliser une étude reliant variables aérosols et méningites en intégrant de manière concrète des séries de données épidémiologiques dans les analyses. L'objectif cette étude était alors d'évaluer le poids statistique des aérosols versus celui du climat conjointement aux épidémies de méningites saisonnières pour 38 districts au Niger (Figure III.11C). Pour mener à bien cette étude, nous avons besoin, en plus des données épidémiologiques, de séries temporelles les plus longues possibles et représentatives des poussières en surface sur l'ensemble de l'année. En effet, il était question de répondre ici aux limites mises en évidence dans l'utilisation de produits aérosols non validés (Thomson *et al.*, 2006) et amenant à la conclusion suivante concernant les aérosols : ils seraient statistiquement reliés aux incidences de méningites en période post-épidémique. Il apparaissait donc ici essentiel de travailler en amont sur les séries des AI afin de pouvoir valider - ou invalider - l'hypothèse avancée depuis le début du XXème siècle et selon laquelle les poussières joueraient un rôle sur les épidémies (§III.1).

Nous avons utilisé pour cela les séries temporelles des AI issus des capteurs OMI et TOMS (§II.2), auxquelles nous avons appliqué une correction adaptée (thèse d'Adrien Deroubaix (2013), Partie B/§4.3). Ce travail a été réalisé en 3 étapes : (i) analyse de la variabilité des AI issus du capteur OMI conjointement aux mesures sol d'épaisseurs optiques et de PM₁₀ ; (ii) correction des séries temporelles des AI-OMI afin qu'ils soient représentatifs des poussières en surface ; (iii) recalage des séries temporelles AI-TOMS et AI-OMI. Cette méthode, constituant une partie de l'article de Agier *et al.* (2013, Partie B/§5.1), est résumée ci-dessous.

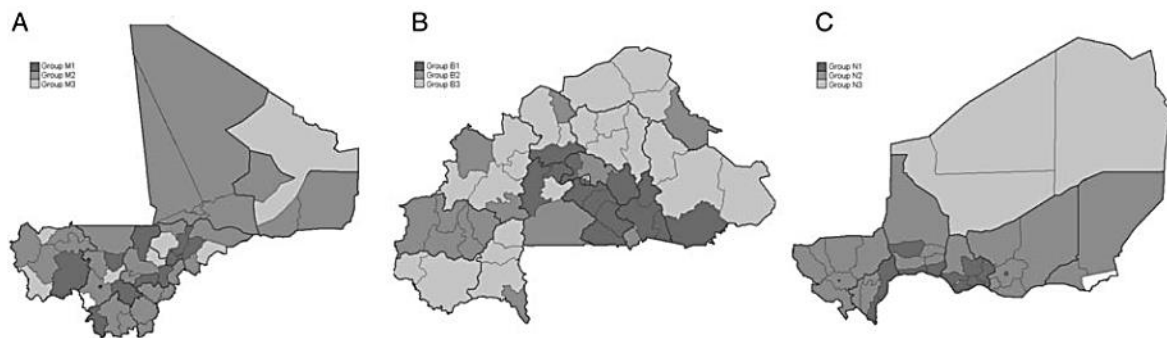


Figure III.11. Carte des districts sanitaires au (A) Mali (52), (B) Burkina Faso (55), (C) Niger (38). Des clusters ont été créés par ordre décroissant d'incidences moyennes (1 : incidences hebdomadaires les plus élevées en gris foncé ; 3 : incidences hebdomadaires les plus faibles en gris clair). Figure extraite de Agier et al. (2013).

Tout d'abord, l'analyse de la variabilité entre AI, AOD et PM_{10} , qui avait été initiée dans la thèse d'Adrien Deroubaix (2013), Partie B/§4.3 (Figure III.12), a permis de faire le constat suivant : la période de maximum des concentrations de poussières correspond au 1^{er} trimestre de l'année (saison sèche) alors que le maximum observé pour les AOD et les AI a lieu au 2^{ème} trimestre (pré-mousson). Ainsi, le ratio « sol/intégré » ou « $PM_{10}/(AOD \text{ ou } AI)$ » se trouve modifié, au Sahel, en fonction de la saison. Ce ratio, qui définit la proportion des poussières contenues en surface pour une certaine quantité de poussières intégrée sur la verticale, semble donc lié aux changements des conditions saisonnières au Sahel. Ainsi, à partir des cycles annuels moyens standardisés des AI, AOD et PM_{10} (§II.2/Figure II.13), il apparaît que de janvier à mars, les produits intégrés (AOD ou AI) sont inférieurs aux PM_{10} , alors que d'avril à juin, les produits intégrés sont supérieurs aux PM_{10} . Ces observations sont valables aux 2 stations étudiées, Cinzana au Mali et Banizoumbou au Niger.

La Figure III.13 présente la variabilité interannuelle au pas de temps hebdomadaire des ratios PM_{10}/AOD et PM_{10}/AI pour ces 2 stations. Les 2 ratios « sol/intégré » ont un cycle saisonnier moyen marqué, avec un calendrier très proche, maximum en saison sèche et minimum en saison humide. Ainsi, sous certaines hypothèses, il a été possible d'extraire une tendance « sahélienne » de ces rapports (c'est-à-dire valable en 2 sites sahéliens distants de 1000km et ainsi jugés représentatifs). Un lissage approprié a été réalisé par le biais d'une fonction de régression locale en supposant un polynôme d'ordre 1. La fenêtre de régression a été fixée à un trimestre car cela permet de reproduire les changements rapides du rapport PM_{10}/AI observés aux deux stations. La valeur du ratio PM_{10}/AI lissé est plus élevée au 1^{er} trimestre (valeur de 147) qu'au 2^{ème} trimestre (valeur de 92), minimale au 3^{ème} trimestre (valeur de 32) et atteint une valeur de 105 en fin d'année.

Le ratio PM_{10}/AI lissé a ensuite été utilisé pour corriger les séries temporelles des AI (Figure III.13) avec, au préalable un recalage entre les séries temporelles TOMS et OMI, indiquant initialement une nette discontinuité, les AI-TOMS étant de 10 à 25% plus élevés que les AI-OMI sur des saisons comparables (Tableau III.2). Le recalage entre TOMS et OMI a été réalisé en considérant que :

$$\frac{(AI_{TOMS} - moy_{TOMS})}{std_{TOMS}} = \frac{(AI_{OMI} - moy_{OMI})}{std_{OMI}},$$

avec moy_TOMS et std_TOMS la moyenne et l'écart-type des AI-TOMS sur la période 1997-2001 ou 2002-2004 et moy_OMI et std_OMI la moyenne et l'écart-type des AI-OMI sur la période 2005-2008. La série temporelle des AI-TOMS a ensuite été recalée par rapport à la référence AI-OMI.

Les séries temporelles des AI corrigés ($= AI \times ratio_lissé$), indicateurs de la concentration des poussières en surface au Sahel, permettent tout d'abord de reproduire les cycles saisonniers des PM_{10} (Figure III.13). L'intensité des pics n'est pas retrouvée mais les dates semblent concorder. Une validation croisée des AI corrigés (Tableau III.2) indiquent ensuite que le coefficient de corrélation entre AI et PM_{10} augmente significativement après correction des AI, passant d'environ 0.5 (Tableau III.3) à 0.75 (Tableau III.4), soit une augmentation de 50% en considérant une période commune TOMS et OMI d'une durée de 3 ans. Avec un coefficient de corrélation de 0.75, c'est plus de 55% de la variabilité des concentrations de poussières au sol qui est reproduite par l'AI corrigé alors que pour l'AI brut, ce pourcentage n'était que de 25%. En examinant chaque validation croisée, on remarque une amélioration de la représentativité des conditions de poussières en surface dans tous les cas (même si c'est dans une moindre mesure en 2006 à Banizoumbou). Ces résultats indiquent la pertinence de cette méthode quant à son utilisation pour d'autres années et d'autres stations sahéniennes.

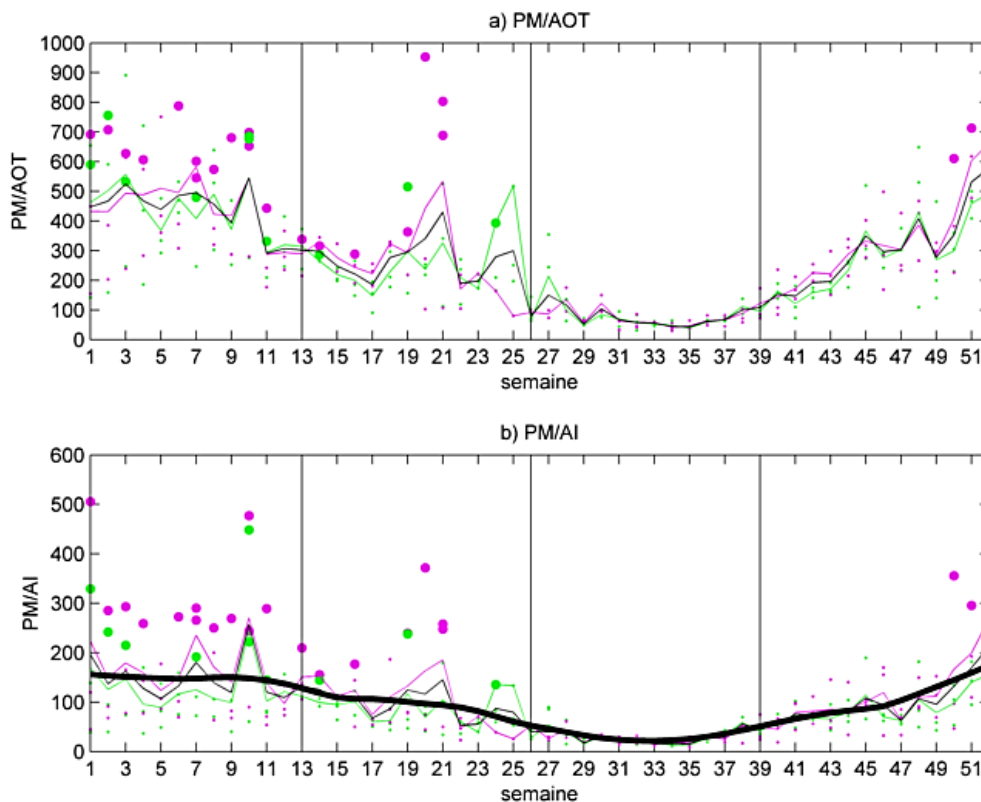


Figure III.12. Ratios « sol/intégré » : a) PM/AOT , b) PM/AI . La couleur violette correspond au site de Banizoumbou au Niger, la couleur verte au site de Cinzana au Mali. Les moyennes sont indiquées en traits pleins. La moyenne des 2 stations est représentée par la ligne noire. La ligne de tendance du ratio PM/AI sahélien est représentée par un trait noir épais. Les gros points de couleur indiquent les valeurs hebdomadaires des ratios associés à des concentrations en $PM_{10} > 300 \mu g/m^3$.

Figure extraite de la thèse d'Adrien Deroubaix (2013), Partie B/§4.3.

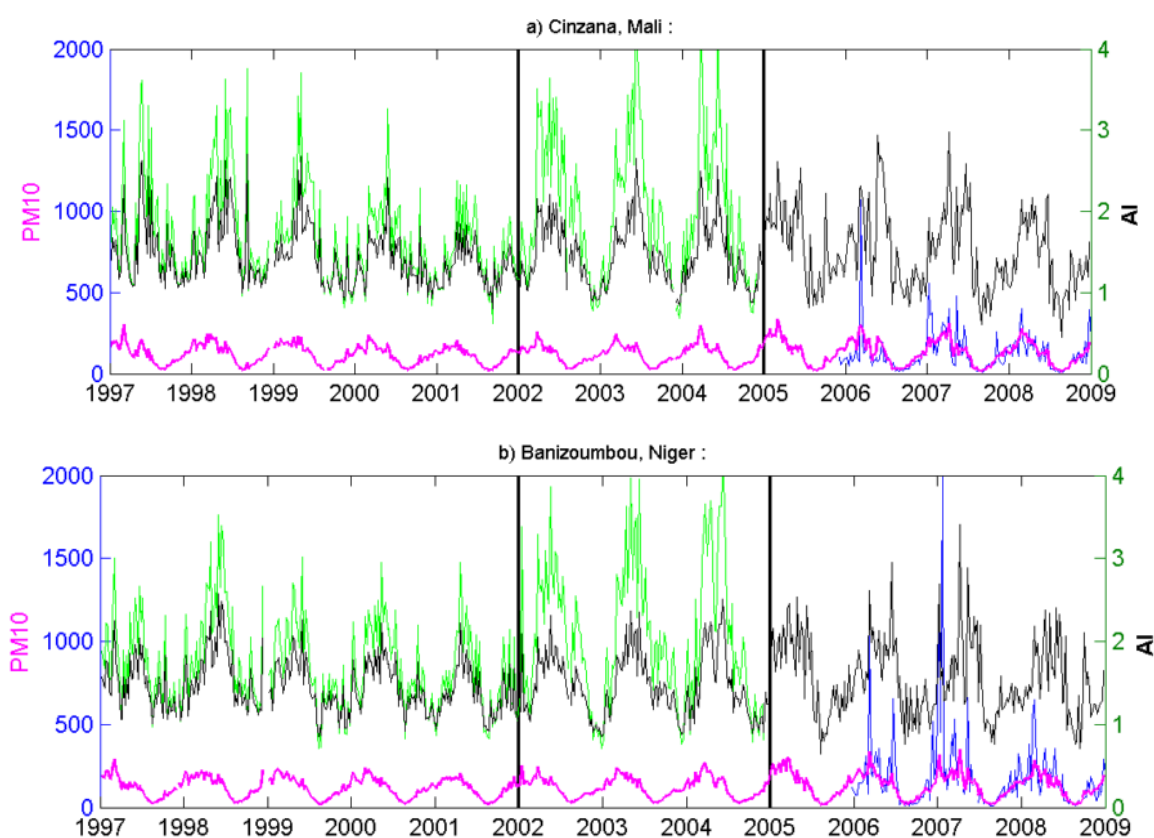


Figure III.13. Obtention d'une série temporelle des AI continue et représentative des conditions de poussières en surface. En vert, les AI bruts issus de TOMS/Earth Probe (1997-2005). En noir, les AI bruts recalés sur la période OMI (> 2005). En bleu, les mesures sol de PM₁₀. En rose, les AI corrigés à l'aide du ratio PM/AI sahélien sur l'ensemble de la période 1997-2009. Figure extraite de [Agier et al. \(2013\)](#), Partie B/§5.1.

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

Tableau III.2. Statistiques des AI issus de TOMS et OMI de 1997 à 2008 à Banizoumbou au Niger et Cinzana au Mali. Tableau extrait de la [thèse d'Adrien Deroubaix \(2013\)](#), Partie B/§4.3.

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

Tableau III.3. Coefficient de corrélation entre AI et PM_{10} sur les 3 ans de mesures disponibles puis pour chaque année. Tableau extrait de la [thèse d'Adrien Deroubaix \(2013\)](#), Partie B/§4.3.

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

Tableau III.4. Validation croisée des AI corrigés (notés ici AI.tr) à Cinzana au Mali et Banizoumbou au Niger. Les colonnes « 2006 », « 2007 » et « 2008 » indiquent les coefficients de corrélations entre les AI corrigés et les PM_{10} , à partir du ratio PM_{10}/AI lissé écartant respectivement les années 2006, 2007 et 2008. Tableau extrait de la [thèse d'Adrien Deroubaix \(2013\)](#), Partie B/§4.3.

Une fois les produits de télédétection aérosols long-terme corrigés afin d'être représentatifs de la surface, et les données épidémiologiques qualifiées sur les périodes correspondantes, il est possible d'envisager l'application de méthodes statistiques permettant de croiser incidences hebdomadaires des méningites, poussières et variables climatiques. Pour ces dernières, nous avons utilisé les réanalyses climatiques ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011) desquelles nous avons extrait, au pas de temps quotidien et à la résolution spatiale de 1.5° , l'humidité relative (RH), la température (TEMP), la force (f) et la direction (Wd) du vent en surface sur la période 1989-2009. Ces variables ressortent en effet comme étant les facteurs de risque climatiques les plus investis dans les études dédiées aux méningites bactériennes en Afrique (Tableau III.1).

Les AI bruts, les AI corrigés et les variables climatiques ont été extraits pour chaque pixel recouvrant les districts sanitaires puis moyennés pour chacun d'entre eux (Figure III.14). Des analyses en ondelettes de Morlet, adaptées à l'analyse bivariée de signaux sinusoïdaux tels que peuvent l'être les séries épidémiologiques et climatiques (Cazelles *et al.*, 2007), ont ensuite été appliquées aux données (Figure III.15). Ces analyses permettent d'avoir accès à la cohérence (un coefficient de cohérence de 1 indique une relation statistique parfaitement linéaire) ainsi qu'à la différence de phase (une distance de 1 représente une corrélation maximale) entre deux séries temporelles. Dans le cas de l'étude des méningites vis-à-vis d'autres facteurs climatiques et environnementaux, les coefficients de cohérence sont tous dominés par une composante périodique d'une année, significative pour l'ensemble de la période d'étude. Lorsque la cohérence est significative, la différence de phase peut être interprétée. Il ressort ainsi que la moyenne des courbes de différence de phase sur les districts (sauf ceux dont la densité de population et les incidences de méningites sont faibles, soit 5 districts au total situés au Nord du Niger) est négative pour les variables humidité, température, direction du vent, et AI bruts (Figure III.15a, c, d, e - colonne de droite). En effet, soit le maximum du cycle saisonnier est atteint après celui des méningites, c'est le cas des AI bruts et de la direction du vent, soit le cycle saisonnier présente deux maxima (minima), c'est le cas la température (humidité), en avril-mai-juin puis en octobre (Figure III.16). Nous verrons en §III.3 que ces 2 dernières variables peuvent s'avérer importante vis-à-vis de la phase croissante et jusqu'au pic saisonnier des méningites (période de janvier à

avril). Pour l'heure, si l'on considère l'ensemble de l'année, seules 2 variables présentent une différence de phase moyenne positive vis-à-vis des méningites : les AI corrigés et la force du vent (Figure III.15b et f - colonne de droite). L'analyse des courbes de différences de phase pour ces 2 variables sur l'ensemble des districts met en évidence une plus grande cohérence entre districts pour les poussières (Figure III.17). **C'est la première fois qu'une étude montre, à l'échelle spatiale du district sanitaire, et sur une période de plus de 10 ans, l'importance et la cohérence des poussières versus les variables climatiques pendant la saison des méningites.** Cet article, en se basant sur des données vérifiées et des méthodes statistiques adaptées, a donc ouvert le champ des possibles concernant le lien entre méningites et poussières à échelle fine. Un autre résultat apparaît innovant ici : le décalage temporel entre les poussières (avec les AI corrigés et donc représentatifs de la surface) et les méningites est assez similaire d'un district à un autre. Ce résultat, conjointement à l'hypothèse selon laquelle les poussières fragilisent les muqueuses nasopharyngées et facilitent l'invasion de la bactérie à *Neisseria meningitidis* dans le système sanguin, renforce notre confiance dans le fait que les poussières jouent un rôle sur les épidémies saisonnières (§III.3 pour les détails).

Nous avons par la suite porté notre attention sur la phase croissante et jusqu'au pic saisonnier des méningites (de janvier à mi-avril, semaines 1 à 14) au Niger, Mali et Burkina Faso à l'échelle du district sanitaire. Sur les 1551 années-districts (11 ans x 18 semaines x 141 districts), 217 ont connu une épidémie (seuil de 15 cas pour 100.000 habitants à l'échelle du district), ce qui représente environ 14% des observations totales. Une Analyse en Composantes Principales a permis de résumer l'information selon 3 axes factoriels explicatifs de 70% de l'information totale (Figure III.18). Le premier axe factoriel explique 40% de l'information, le deuxième 20% et le troisième 10%. Dans le plan principal, toutes les variables ont une qualité de représentation supérieure à 0.5. Les variables structurant l'axe 1 sont les variables climatiques, opposant des situations d'Harmattan (vents forts de direction Nord) en négatif et la saison humide (vents faibles associés à une température et une humidité plus élevées) en positif. L'axe 2, structuré en positif par les incidences de méningites et les AI corrigés, porte le signal du transport de poussières large échelle (depuis Bodélé par exemple). Cet axe 2 est également structuré, dans une moindre mesure, par les températures et l'humidité. L'analyse portant cette fois sur les années épidémiques amène aux mêmes conclusions (Tableau III.5). **On démontre ici, en adoptant cette fois une approche incluant toutes les variables de manière conjointe, et en resserrant la période sur les semaines 1 à 18, que les incidences de méningites sont statistiquement et significativement reliées aux poussières, à la température et à l'humidité relative (Figure III.18).** Cette étude a également permis de préciser que, lors des épidémies :

- (i) **les semaines 1 à 9** (janvier et février), période de démarrage épidémique (nombre de cas < seuil épidémique), sont très contraintes par le climat et les conditions sèches associées aux vents d'Harmattan (axe 1 en négatif) ;
- (ii) **les semaines 10 à 14** (de mars à mi-avril), en maximum épidémique, sont très corrélées aux poussières (axe 2 en positif) ;
- (iii) **les semaines 15 à 18** (de mi-avril à mai), période de déclin épidémique avec un nombre de cas chutant brutalement, sont à nouveau contraintes par le climat, mais cette fois par les conditions d'humidité et de température élevées (axe 1 en positif).

Ce dernier résultat, engageant **l'humidité comme facteur d'arrêt des épidémies de méningites au Sahel**, a été suspecté depuis les années 60 (§III.1) puis confirmé par différents auteurs comme [Martiny & Chiapello \(2013\)](#), Partie B/§5.1 (§III.3) ou [Seefeldt et al. \(2012\)](#), qui évoquent même l'hypothèse d'un seuil d'humidité, 40%, au-delà duquel il n'y aurait plus aucun cas de méningites possibles. L'arrêt des épidémies avec la hausse de l'humidité relative a également été évoqué sur d'autres continents affectés par les méningites, en Inde en particulier ([Sinclair et al., 2010](#)).

Quant aux aérosols, nous avons confirmé par le biais de ces différentes études que des liens statistiques robustes existaient, notamment en période de maximum épidémique (mars-avril), entre méningites et poussières. Nous allons dans la suite présenter les études spécifiquement dédiées à l'étude du lien entre poussières et méningites.

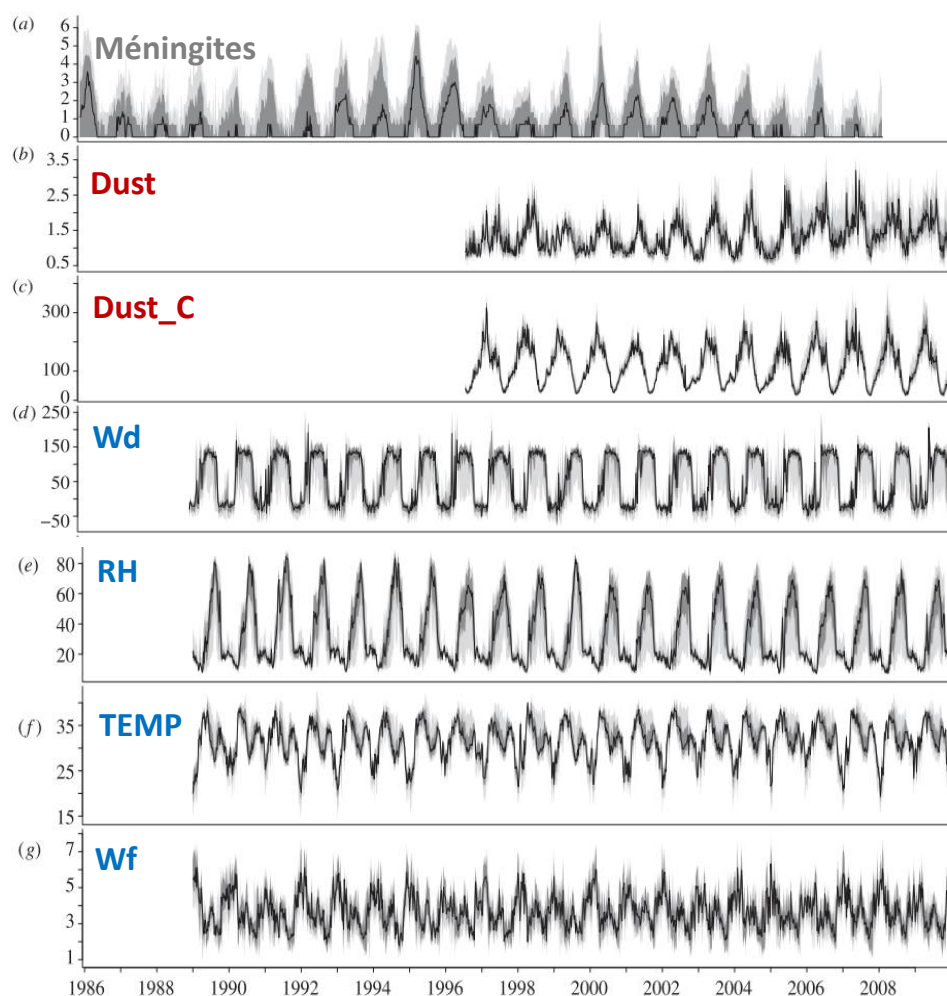


Figure III.14. Séries temporelles des (a) méningites, (b) AI bruts (DUST), (c) AI corrigés (DUST_C), (d) Direction du vent (Wd), (e) Humidité relative (RH), (f) température à 10m (TEMP), (g) force du vent (Wf) de 1986 à 2010. Les incidences des méningites ont subi une transformation logarithmique. La ligne noire représente la médiane des districts. La couleur gris foncé indique la superficie entre les 10^{ème} et 90^{ème} percentiles. La couleur gris clair indique la superficie entre les valeurs minimales et maximales des districts.

Figure extraite de [Agier et al. \(2013\)](#), Partie B/§5.1.

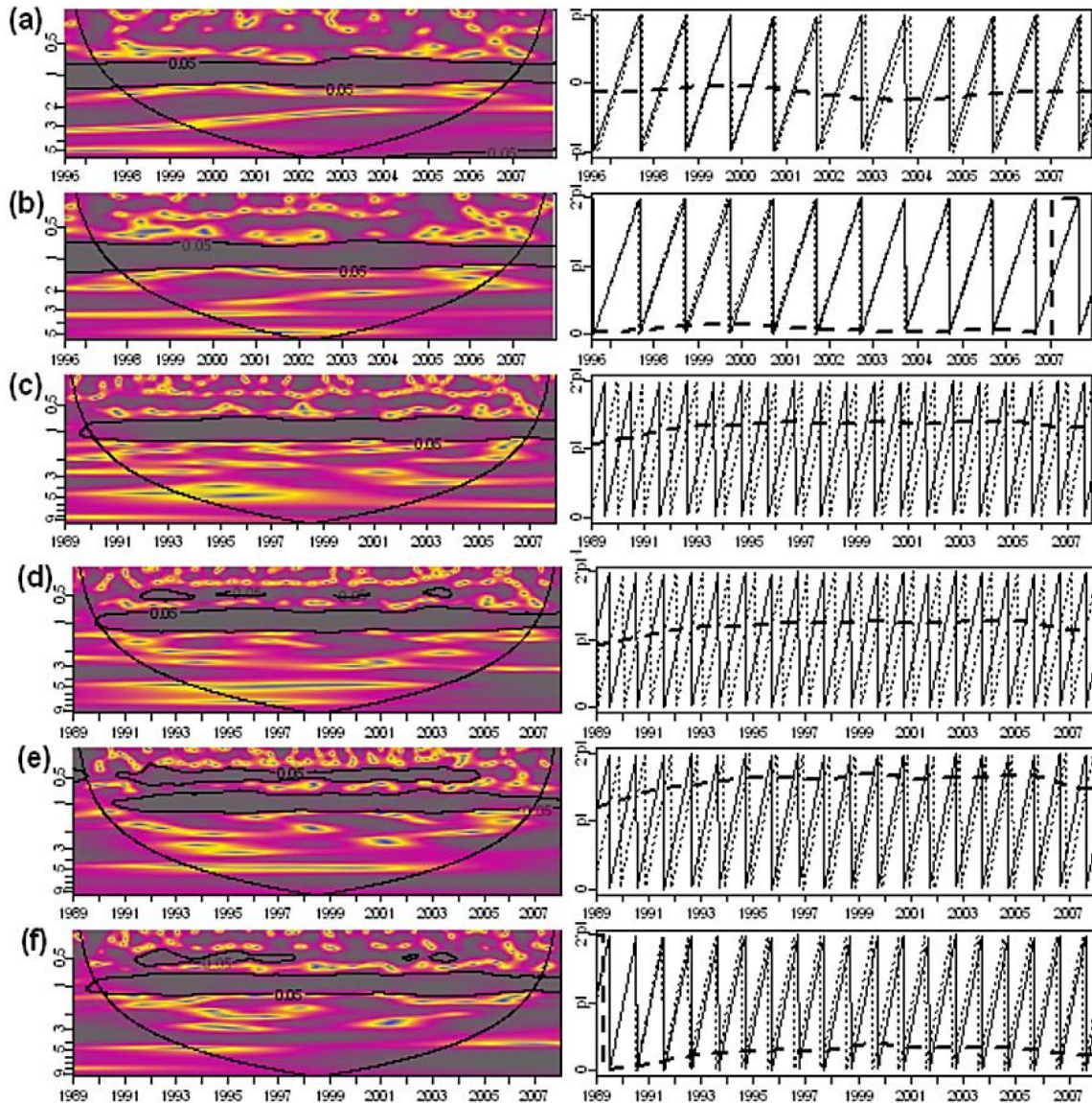


Figure III.15. Analyses en ondelettes bivariées sur le district de Magaria : cohérence (colonne de gauche), et différence de phase (colonne de droite) entre méningites et a) AI bruts b) AI corrigés c) direction du vent d) humidité relative e) température atmosphérique f) force du vent. L'axe des abscisses représente les années. Colonne de gauche : l'axe des ordonnées représente la périodicité du signal (en années), le cône d'influence est représenté en noir, les surfaces significatives à un seuil de 5% sont indiquées par des autres traits noirs, l'intensité du signal est indiquées en couleurs. Colonne de droite : la phase pour les méningites est représentée par un trait plein, la phase pour les variables climatiques et aérosols par un trait en pointillés, la différence de phase (exprimée en radians) est indiquée par un trait en pointillés épais.

Figure extraite de Agier et al. (2013), Partie B/§5.1.

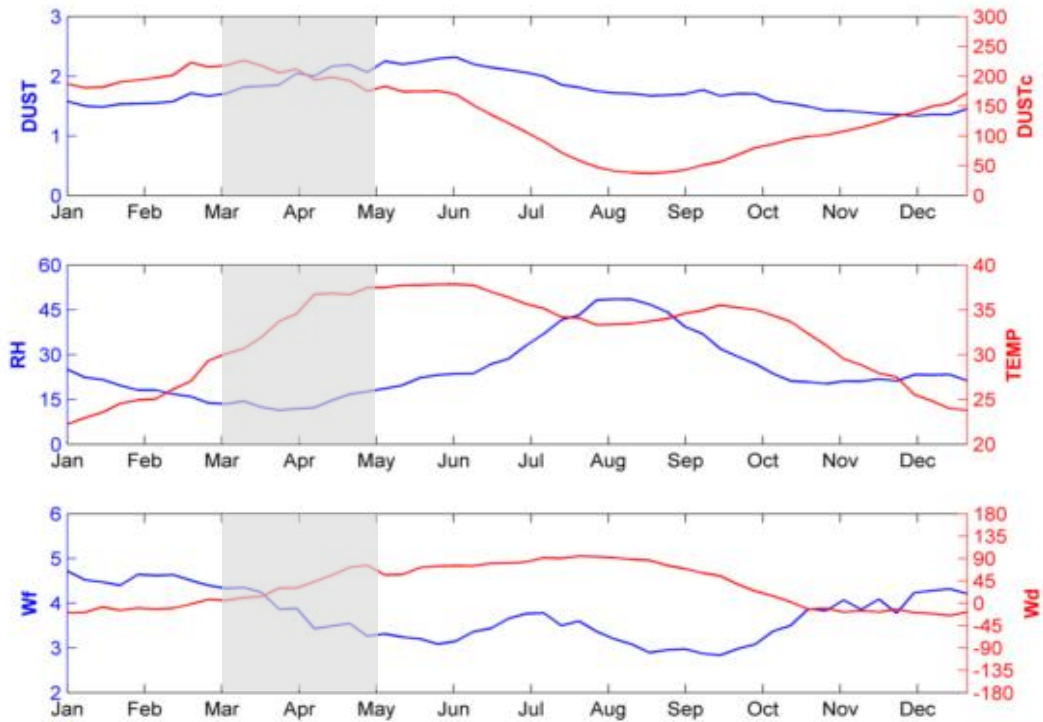


Figure III.16. Cycles annuels moyens des poussières et de différentes variables climatiques au Niger. L'encart gris indique la période du pic saisonnier des méningites. En haut, les AI-OMI bruts (notés DUST, en bleu) et les AI-OMI corrigés (notés DUSTc, en rouge). Au milieu, l'humidité relative (notée RH, en bleu) et la température (notée TEMP, en rouge). En bas, la force du vent (en bleu) et la direction du vent (en rouge).

Figure extraite de Agier et al. (2013), Partie B/§5.1

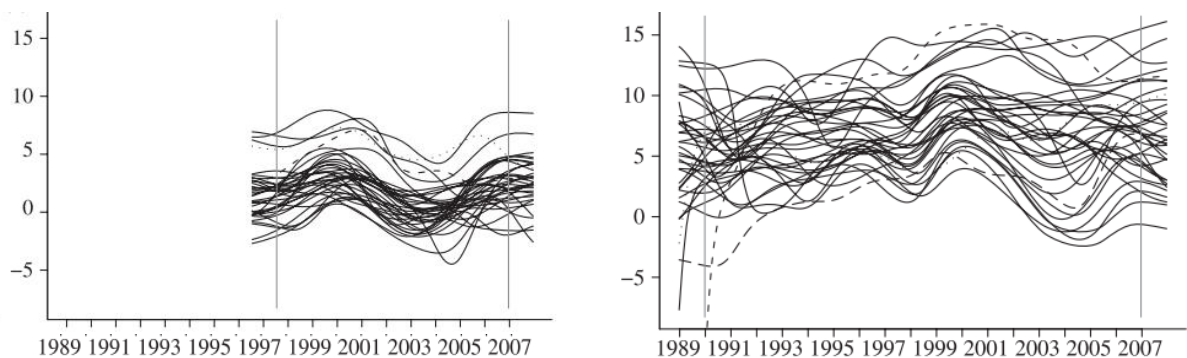


Figure III.17. Courbes de différence de phase pour les 33 districts inclus dans l'étude. A gauche, entre méningites et AI corrigés. A droite, entre méningites et force du vent.

Figure extraite de Agier et al. (2013), Partie B/§5.1.

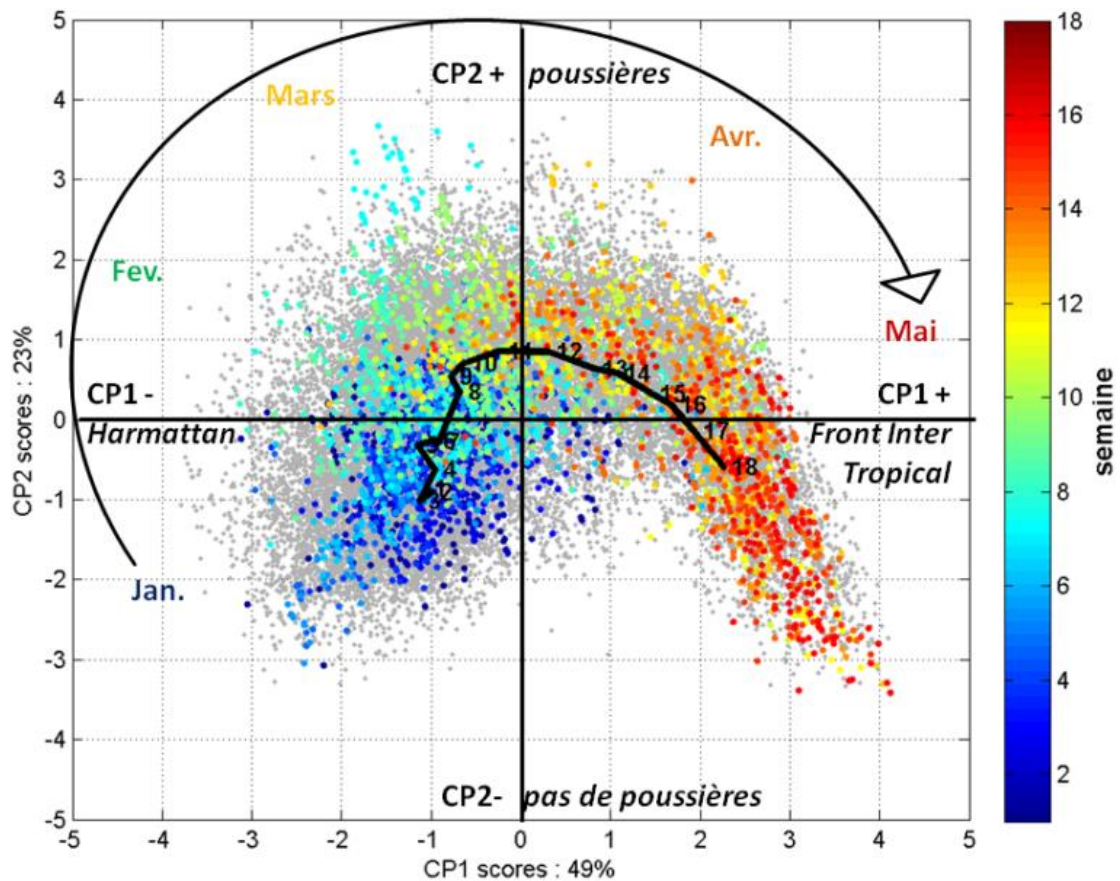


Figure III.18. Analyse en Composantes Principales : projection des observations dans le plan principal, i.e. les semaines 1 à 18 sur la période 1997-2007 dans les 141 districts du domaine. Les points gris sont sans critère de sélection. Les points colorés correspondent aux semaines des années épidémiques (sur une échelle allant du bleu pour la 1ère semaine de l'année au rouge pour la 18ème semaine). La courbe noire est la moyenne hebdomadaire de la CP1 et de la CP2. Figure extraite de la [thèse d'Adrien Deroubaix \(2013\)](#), Partie B/§4.3.

Corrélation(R)	CP ₁	CP ₂	CP ₃	Contribution(%)	CP ₁	CP ₂	CP ₃
	sans critère de sélection				sans critère de sélection		
Incidence	0,24	0,51	-0,79	Incidence	2	21	69
Température	0,7	0,5	0,16	Température	19	20	3
Humidité	0,74	-0,42	0,04	Humidité	22	14	0
Vitesse Vent	-0,83	-0,09	-0,02	Vitesse Vent	27	1	0
Angle Vent	0,84	-0,13	0,14	Angle Vent	28	1	2
AI.tr	-0,17	0,74	0,49	AI.tr	1	43	26
	seuil épidémique dépassé				seuil épidémique dépassé		
Incidence	0,38	0,69	-0,44	Incidence	5	31	28
Température	0,71	0,52	-0,06	Température	19	18	1
Humidité	0,75	-0,47	0,21	Humidité	21	15	7
Vitesse Vent	-0,84	-0,12	-0,12	Vitesse Vent	26	1	2
Angle Vent	0,86	-0,22	0,13	Angle Vent	27	3	3
AI.tr	-0,26	0,7	0,64	AI.tr	2	32	60

Tableau III.5. Coordonnées et contributions des variables sur les 3 premiers axes factoriels de l'Analyse en Composantes Principales sans critères de sélection puis avec critères de sélection des années épidémiques. Les incidences de méningites ont subi une transformation logarithmique. Les AI corrigés (notés ici AI.tr) ont été considérés avec un décalage temporel d'une semaine comparativement aux incidences des méningites.

Tableaux extraits de la [thèse d'Adrien Deroubaix \(2013\)](#), Partie B/§4.3.

III.3 Importance des aérosols au démarrage et développement épidémiques

Les résultats précédemment obtenus incitent à préciser la question du lien entre poussières et méningites. Observe-t-on un décalage temporel identique entre survenue d'événements de poussières et nombre de cas, indépendamment de l'échelle spatiale considérée (pays/district/aire de santé) ? les poussières jouent-elles un rôle au moment du démarrage épidémique, ce signal étant plus difficile à repérer par le biais de méthodes statistiques car le nombre de cas de méningites est encore faible ?

Afin de répondre à ces questions, nous avons d'abord initié une étude à l'échelle nationale au Niger et au Mali. L'objectif de cette étude était d'analyser les cycles saisonniers moyens des méningites conjointement à celui des poussières. Le jeu de données épidémiologiques utilisé dans cette étude a été constitué au Biogéosciences à partir de 2004 à partir des bulletins hebdomadaires de rétro-information sur la méningite cérébrospinale (Figure III.19). La saisie se faisait à la main et le travail était long et laborieux (stage de M2 de [Nicolas Thomas \(2008\)](#), dont j'ai assuré la direction, Partie B/§4.7). Cependant, ce jeu de données (2004-2015 au pas de temps hebdomadaire pour une dizaine de pays de la Ceinture) s'est avéré, bien que comportant de nombreuses valeurs manquantes en période post-épidémique, très complémentaire aux jeux de données épidémiologiques existants : (i) à l'échelle du district, des années 80 à 2010, au pas de temps hebdomadaire et pour 3 pays de la Ceinture, au Niger, Burkina Faso et Mali ([Agier et al., 2013](#)) et (ii) à l'échelle nationale, de 1965 à 2010, au pas de temps annuel et pour l'ensemble des pays de la Ceinture (à l'époque, accessible en ligne sur le site de l'OMS). La comparaison entre les jeux de données épidémiologiques s'est avérée concluante avec des coefficients de détermination variant entre 0.829 en 2005 et 0.999 en 2007 (Figure III.20). Cette vérification faite, nous avons croisé les données épidémiologiques aux aérosols au Niger et au Mali sur la période 2004 à 2009 ([Martiny & Chiapello \(2013\)](#), Partie B/§5.1).

Cette étude montre tout d'abord que l'humidité faible en saison sèche est une condition nécessaire mais pas suffisante pour déclencher une augmentation du nombre de cas et le démarrage de la saison des méningites. Elle montre a contrario que l'arrivée des événements de poussières dès janvier est très étroitement liée à l'augmentation du nombre de cas, et ce, jusqu'au maximum du cycle saisonnier (Figure III.21). Enfin, le nombre de cas chute brutalement lorsque l'humidité augmente avec la mise en place du régime de Mousson dès avril (§III.2). La variabilité observée dans les événements de poussières désertiques (anomalies > 0) de janvier à mars serait donc étroitement liée à celle du nombre de cas de méningites, que l'année soit épidémique ou non. Cela confirme les premiers travaux sur la question, de [Jeanne et al. \(2009\)](#), portant spécifiquement sur le Niger, et selon lesquels un « pic » d'aérosols précède systématiquement un « pic » de nombre de cas (Figure III.22). Plus récemment, dans le cadre du projet TELEDM ([Martiny \(2014-2016\)](#), Partie B/§2.1), d'autres produits aérosols issus de la télédétection ont été utilisés sur des années épidémiques spécifiques. Par exemple, le produit en AOD Deep Blue de MODIS, testée sur l'année épidémique 2006 au Niger, indique 3 événements majeurs de poussières précédant de près 3 pics de méningites (stage de M2 de [Nesrine Arab \(2014\)](#), Partie B/§4.7). Ce résultat est d'autant plus notable que l'année 2006 présente un double « pic » épidémique (double « pic » retrouvé dans les poussières).

Semaine/Week 12 2007

I. SITUATION EPIDEMIOLOGIQUE DE LA SEMAINE 12 2007
EPIDEMIOLOGICAL SITUATION OF WEEK 12 2007

Tableau/ Table 1 : Situation épidémiologique de la semaine 12 (19 au 25 mars 2007)/
Epidemiological Situation week 12 (19 to 25 March, 2007)

Pays	Cas	Décès	Létalité (%)	District en Alerte	District en Epidémie	Complét. (%)	NmA	NmW135	Autres Nm	Pneum	Hib
Country	Case	Death	Letality	District in Alert	District in Epidemic	Complet (%)	NmA	NmW135	Other Nm	Pneum	Hib
Benin	44	5	11.4	1	0	100.0	15	2	0	6	0
Burkina Faso	4 697	300	6.4	8	34	100.0	-	-	-	-	-
Cameroun	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Centrafrique	9	3	33.3	0	0	47.1	-	-	-	-	-
Cote d'Ivoire	8	1	12.5	0	0	40.0	-	-	-	-	-
Ethiopia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ghana	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mali	47	4	8.5	0	0	88.1	2	1	0	0	0
Niger	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nigeria	77	9	11.7	3	0	21.2	-	-	-	-	-
RD Congo**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tchad	141	6	4.3	1	1	48.0	-	-	-	-	-
Togo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	5 023	328	6.5	13	35	25.0	17	3	0	6	0

* Identification par / identification by: PCR, LATEX, CULTURE
** Définition des seuils d'alerte/épidémique non applicable à ce pays situé en dehors de la ceinture de la méningite
Definition of alert/epidemic thresholds not applicable to this country outside the meningitis belt

Figure III.19. Extrait d'un bulletin hebdomadaire de rétro-information sur la méningite cérébrospinale pour 13 pays de la Ceinture. Bulletin disponible en ligne et indiquant le nombre de cas, de décès et le sérotype.

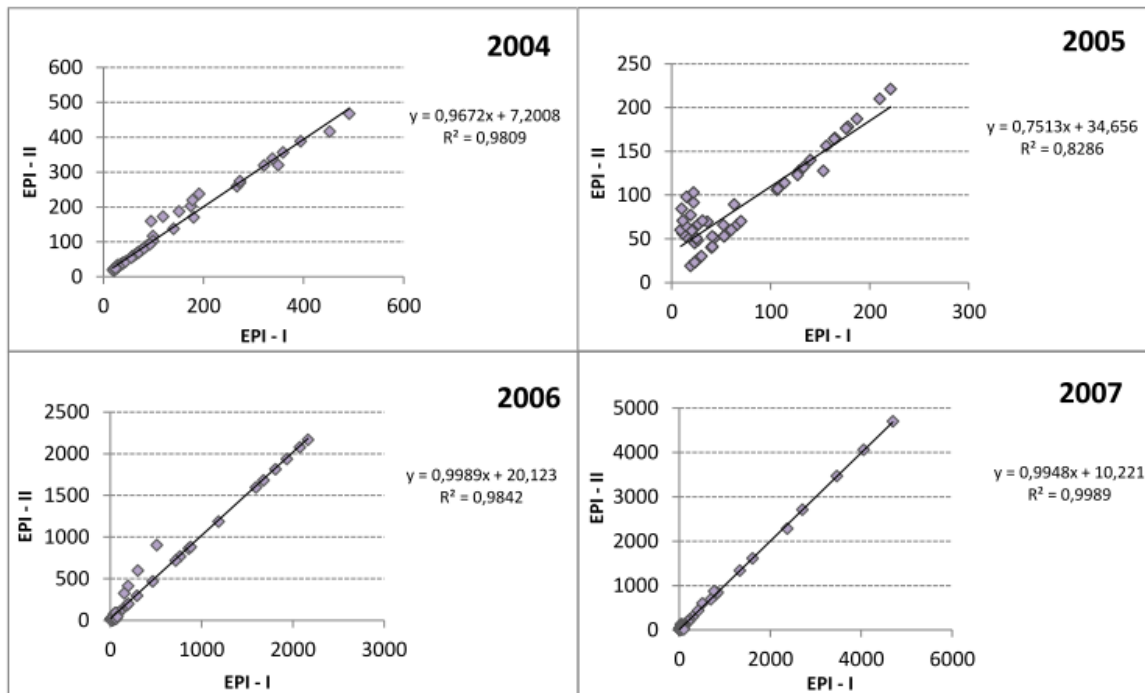


Figure III.20. Comparaison entre les jeux de données épidémiologiques à l'échelle du district sanitaire (noté ici EPI-I, en abscisses) et à l'échelle nationale (noté ici EPI-II, en ordonnées) pour les années communes aux 2 jeux de données, de 2004 à 2007, au Burkina Faso. Figure extraite du stage de Elodie Fluck (2012), Partie B/§4.7.

Les produits CALIOP ont également été testés sur l'année 2007 au Burkina Faso : la détection des premiers événements de poussières dès janvier, et qui pourraient participer au déclenchement épidémique cette année-là, se fait la bonne semaine (Léon *et al.* (2014), Partie B/§5.5).

Ces résultats semblent prometteurs car ils démontrent que **lors d'années épidémiques, et donc particulièrement dévastatrices, les satellites** (tests de nature exploratoires sur plusieurs capteurs et plusieurs produits) **sont capables de détecter un signal dans les poussières. A travers ces études également, il apparaît que les poussières pourraient jouer un rôle sur le démarrage de la saison des méningites, qu'elle soit épidémique ou non.** Le lien entre aérosols et méningites en début d'année, bien que plus difficile à établir (il ne ressort pas dans les études avec une importante profondeur temporelle et incluant l'ensemble de l'année car le signal lié au maximum épidémique prédomine) semble être ici confirmé en moyenne ou pour des années spécifiques, ce qui ouvre concrètement la voie de la télé-épidémiologie pour les méningites (Synthèse du §III). Les poussières joueraient donc un rôle important au démarrage et lors du développement de la saison des méningites.

Quel est alors le décalage temporel existant entre poussières et méningites ? Les études à l'échelle nationale ont montré qu'il existait **un décalage de 1 à 2 semaines entre les événements des poussières** (Martiny *et al.* (2015), Partie B/§5.3) **et l'augmentation du nombre de cas de méningites sur la phase ascendante des méningites, de janvier à mars.** Ceci a été montré à partir des épaisseurs optiques des aérosols (Martiny & Chiapello (2013), Partie B/§5.1) et des AI-OMI (Deroubaix *et al.* (2013b) (Tableau III.6 et III.7), partant du principe qu'à cette période de l'année, au pas de temps hebdomadaire, les produits aérosols issus de la télédétection sont en accord entre eux et représentatifs de la surface (Deroubaix *et al.* (2013), Partie B/§5.1). Les coefficients de corrélation linéaires de Pearson entre le nombre de cas de méningites et la quantité d'aérosols sont élevés et significatifs : par exemple au Niger, $r > 0.70$ avec $p\text{-value} < 0.01$.

A l'échelle du district sanitaire, au Niger, le décalage temporel entre méningites et aérosols (sur les base des AI TOMS/OMI corrigés des effets d'altitude, §III.3) **s'avère être de 1.55 semaines précisément** (Agier *et al.* (2013), Partie B/§5.1), ce qui est en accord avec les résultats obtenus précédemment. Nous avons souhaité ensuite vérifier cette hypothèse à une échelle spatiale plus fine encore, celle de l'aire de santé (environ $1/10^{\text{ème}}$ de la taille du district sanitaire).

Pour cela, nous avons utilisé les données épidémiologiques de 14 aires de santé situées dans 7 districts sanitaires à l'Ouest du Burkina Faso (région des Hauts Bassins, boucle du Mouhoun, Dédougou (§Fiche 1)) et 5 districts sanitaires au Nord et à l'Est (district de Boulas) du Burkina Faso (Figure III.24). Ces districts représentent environ 20% de la surface totale du pays et 3.7 millions d'habitants soit 22% de la population totale du Burkina Faso en 2012. Il est en effet très difficile d'avoir accès à ces données, qu'il faut recueillir sur le terrain et en collaboration avec les organismes de santé en local. Ici, c'est en collaboration avec la Direction de la Lutte contre la Maladie du Burkina Faso que nous avons pu organiser, en partenariat avec l'Institut Pasteur, une mission sur place d'une durée de 3 semaines en janvier-février 2015 (stage longue durée de l'ENS de Maxime Woringer (2015), dont j'ai assuré la co-direction, Partie B/§4.7). Les données recueillies ont ensuite été agrégées spatialement (Figure III.25), puis vérifiées selon la méthodologie de Tall *et al.* (2012).

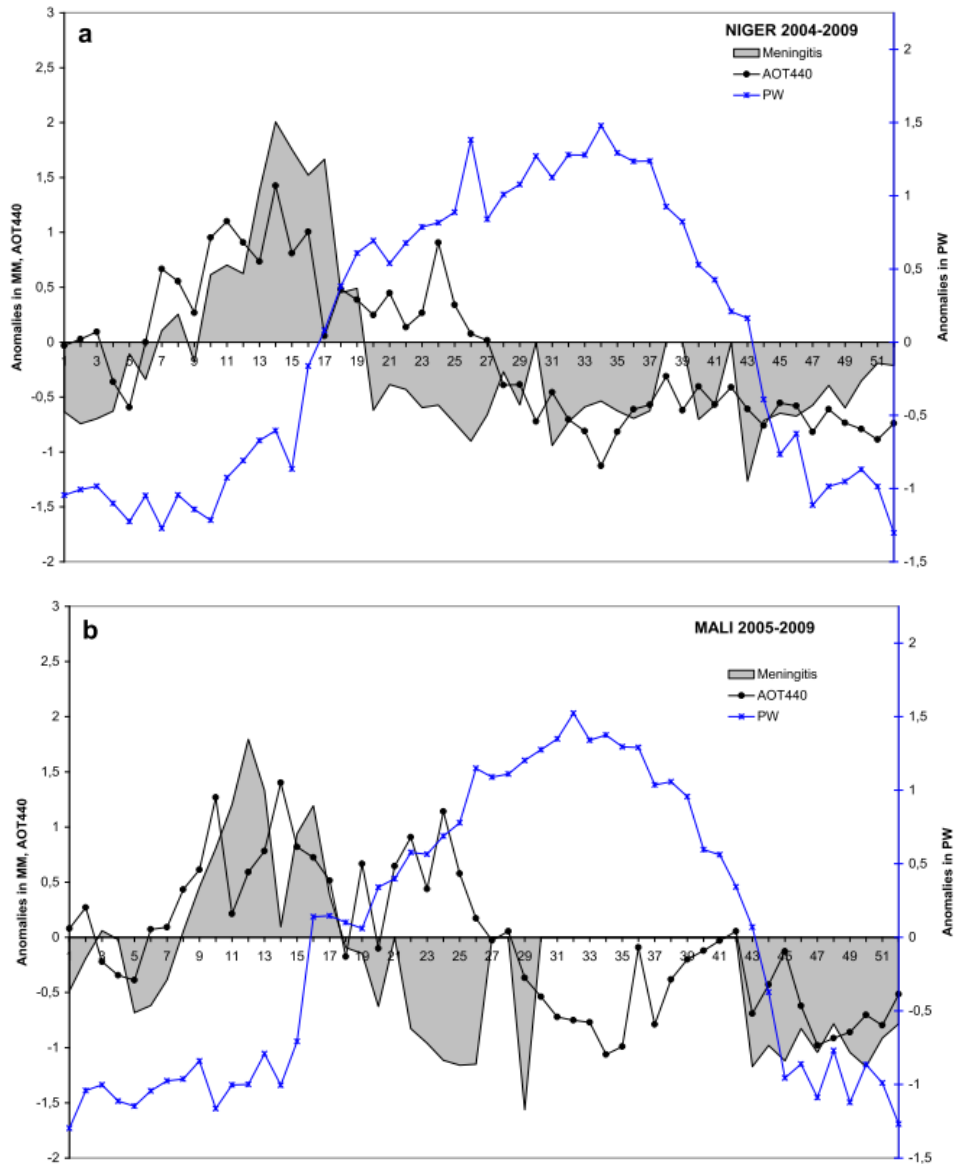


Figure III.21. Comparaison entre les cycles saisonniers moyens standardisés des méningites (en gris), des aérosols (en noir) et de l'humidité spécifique (en bleu) au Niger (a) et au Mali (b). L'axe des abscisses représentent les semaines. Figure extraite de *Martiny & Chiapello (2013)*, Partie B/§5.1.

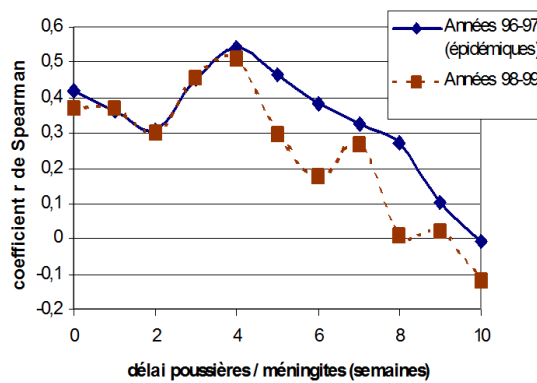


Figure III.22. Etude du décalage temporel existant entre les cas de méningites à l'échelle du district sanitaire au Niger et les poussières. Figure extraite de *Jeanne et al. (2009)*.

Country	Mean AOT ₄₄₀	Cumulated incidence	Simple correlation coefficients			
			Lead-time	C ₁	C ₂	C ₃
Niger	0.77 ^a	18 000	None	0.80¹	0.79¹	0.70¹
			1 week	0.78¹	0.77¹	0.73¹
			2 weeks	0.78¹	0.77¹	0.74¹
Mali	0.60 ^a	3000	None	0.52³	0.42	0.45³
			1 week	0.41	0.42	0.45³
			2 weeks	0.39	0.47³	0.48²

¹Significant correlation with P -value < 0.01; ²Significant correlation with P -value < 0.05; ³Significant correlation with P -value < 0.10.

^a These values are computed for the DS1 period (January to mid-April).

Tableau III.6 Analyse des corrélations entre les AOD et les cas de méningites à l'échelle nationale au Niger et Mali en considérant des décalages temporels de 0 à 2 semaines. La colonne C1 représente la période janvier-mars (période ascendante du nombre de cas de méningites, avant le pic saisonnier). La colonne C2 représente la période janvier-avril (démarrage et pic saisonnier des méningites). La colonne C3 représente la période janvier-juin (l'ensemble de la saison des méningites). Tableau extrait de [Martiny & Chiapello \(2013\)](#), Partie B/§5.1.

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

Tableau III.7. Analyse des corrélations entre les AI-OMI et les cas de méningites à l'échelle nationale au Burkina Faso, Niger et Mali en considérant des décalages temporels de 0 à 4 semaines. La colonne C1 représente la période janvier-mars. La colonne C2 représente la période janvier-juin.

Tableau extrait de [Deroubaix et al. \(2013\)](#), Partie B/§5.1.

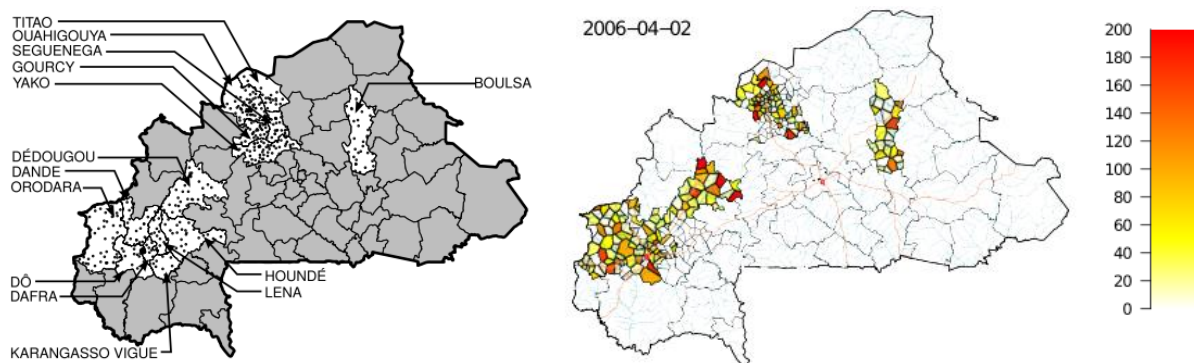


Figure III.23. Les aires de santé étudiées au Burkina Faso. A gauche, carte des districts sanitaires au sein desquels 456 centres de santé sont représentés par des points noirs. A droite, carte des incidences de méningites (0-200 cas pour 100.000 habitants) pour la semaine du 02 avril 2006.

Figure adaptée de [Woringer et al. \(2018\)](#), Partie B/§5.1.

Un total de 362 aires de santé a finalement été généré, à partir de 456 centres de santé initialement. Les aires de santé ont une superficie médiane de 124 km² et rayon médian de 11km. **Comment définir alors les épidémies de méningites localisées, afin de pouvoir les relier à la présence de poussières ?**

Si à l'échelle du district sanitaire, le seuil épidémique est fixé à 10 cas pour 100.000 habitants pour des zones de population entre 30.000 et 100.000 habitants (§III/Préambule), il n'existe pas de standard défini par l'OMS à l'échelle de l'aire de santé. Comment repérer les démarrages épidémiques à ces échelles et définir un seuil épidémique cohérent alors que le nombre de cas est plus faible et les séries statistiques, remplies de 0, difficiles à traiter ? Un travail commun avec des épidémiologistes, biostatisticiens et mathématiciens, et basé sur des études au Burkina Faso (Tall *et al.*, 2012) et au Niger (Maïnassara *et al.*, 2016), a permis de répondre à cette question ambitieuse (Woringer *et al.* (2018), Partie B/§5.1). Le seuil retenu correspond à 40 cas pour 100.000 habitants selon une méthode d'ajustement de population, une sensibilité de 86% et une spécificité de 98.4% (Figure III.25, figure de droite, pointillés noirs).

Concernant les poussières, nous avons utilisé les AOD Deep Blue de MODIS collection 6 (§II.3). Les AOD, initialement à une résolution de 10km x 10km, ont été ré-échantillonnées sur une grille de 1km² et moyennées pour tous les pixels localisés dans et sur les limites géographiques des aires de santé précédemment définies et les jours correspondant à une semaine calendaire (du lundi au dimanche) afin de les recaler sur les données épidémiologiques, sur la période 2004-2010. L'association entre les méningites et les aérosols, testée sur un total de 94 867 aires de santé-semaines, de janvier à avril, s'est avérée très marquée en synchrone au pas de temps hebdomadaire (Figure III.26a). Des indicateurs statistiques ont permis d'affiner les résultats en considérant le pas de temps quotidien, et en conditions épidémiques ou non : ce sont les *Odd Ratio* (OR), souvent utilisés en épidémiologie, et associés à un intervalle de confiance, ou *Confidential Interval* (CI). En synchrone, OR=6.82 et 95% CI =[4.90 : à 9.50], valeurs assez resserrées compte tenu du niveau de significativité, i.e. p-value <0.001. Le décalage temporel moyen observé entre les AOD et les incidences de méningites à l'échelle de l'aire de santé a finalement été estimé entre 2 et 9 jours (plateau) et 5 à 6 jours (valeur maximale indiquée en rouge) (Figure III.27).

Les résultats obtenus aux échelles du pays, du district et de l'aire sanitaires, utilisant différents jeux de données épidémiologiques et différents produits aérosols, semblent concordants entre eux. Avec la descente d'échelle, les résultats statistiques peuvent-ils se rapprocher d'une réalité biologique ? La réponse est positive si l'on se réfère à la période d'incubation de la bactérie *Nm* variant entre 2 et 10 jours (Ala'Aldeen *et al.*, 2006). Les infections invasives, plus rares, se manifestant, elles, dans les 14 jours suivant l'acquisition de la bactérie (Brigham *et al.*, 2009).

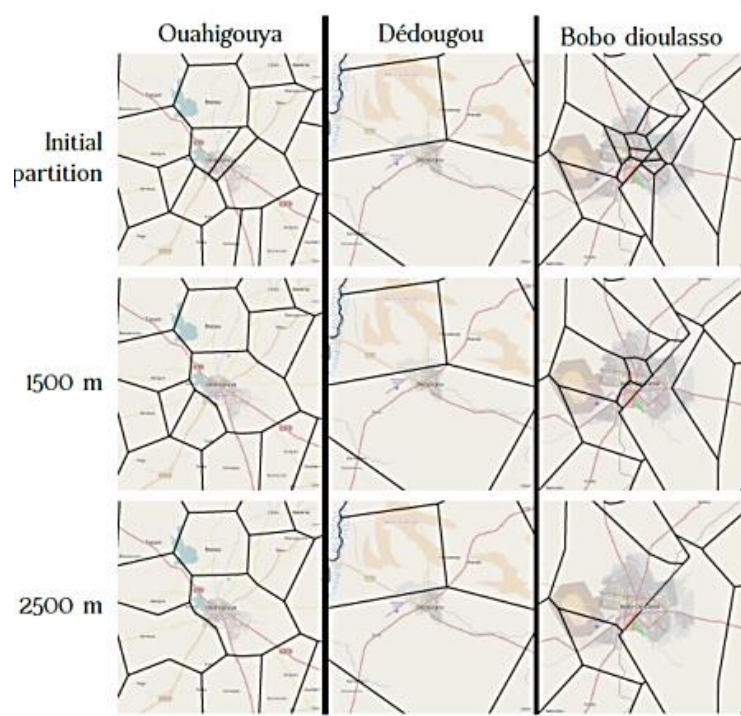


Figure III.24. Partition de Voronoï considérant chaque centre de santé comme un centroïde à Dédougou, Ouahigouya et Bobo-dioulasso. Figure extraite de [Woringer et al. \(2018\)](#), Partie B/§5.1.

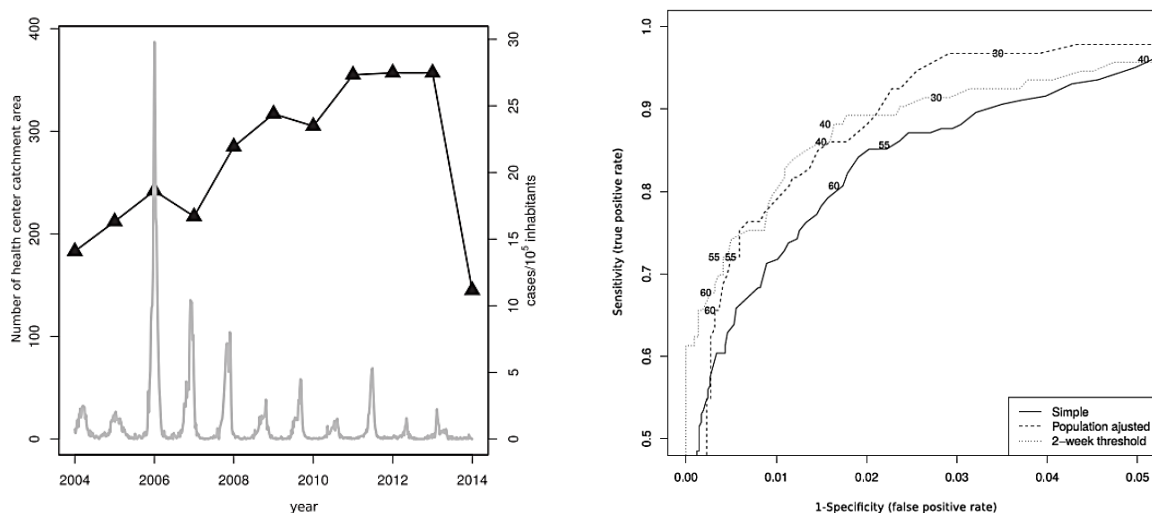


Figure III.25. Les incidences des méningites à l'échelle de l'aire de santé. A gauche, incidences hebdomadaires moyennées sur les 14 aires de santé étudiées au Burkina Faso sur la période 2004-2014 (en gris) et nombre de données recueillies par an (en noir). A droite, courbe de sensibilité versus spécificité (ROC) pour 3 méthodes de classification des aires de santé en tant que zones épidémiques localisées. Les chiffres sur les courbes indiquent les seuils hebdomadaires (cas pour 100.000 habitants). Figure adaptée de [Woringer et al. \(2018\)](#), Partie B/§5.1.

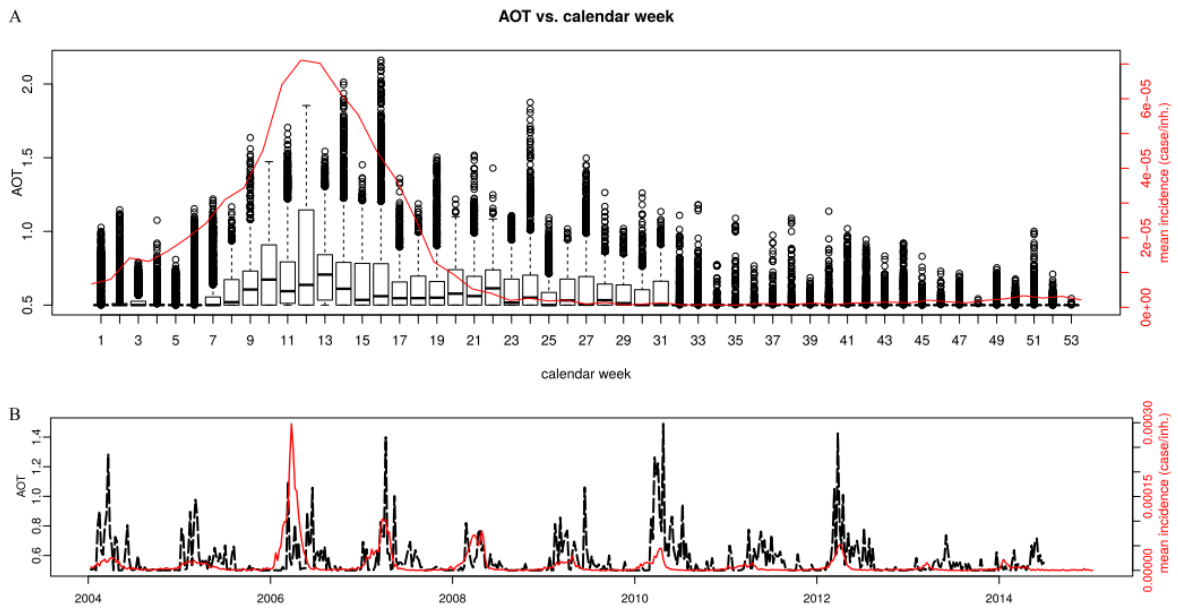


Figure III.26. Variations temporelles des AOD et des méningites à l'échelle de l'aire de santé sur la période 2004-2014 : (A) distribution des AOD moyennes (en noir) et des incidences de méningites (en rouge). Les bornes des boîtes à moustache représentent les 75^{ème} et 25^{ème} percentiles respectivement, et la ligne noire la médiane. Les moustaches supérieures (inférieures) indiquent le premier (troisième) quartile moins (plus) 1.5 fois la variation interquartile. Les points marginaux sont indiqués par des cercles vides. (B) variabilité interannuelle des AOD (en noir) et des méningites (en rouge) au pas de temps hebdomadaire.

Figure extraite de [Woringer et al. \(2018\)](#), Partie B/§5.1.

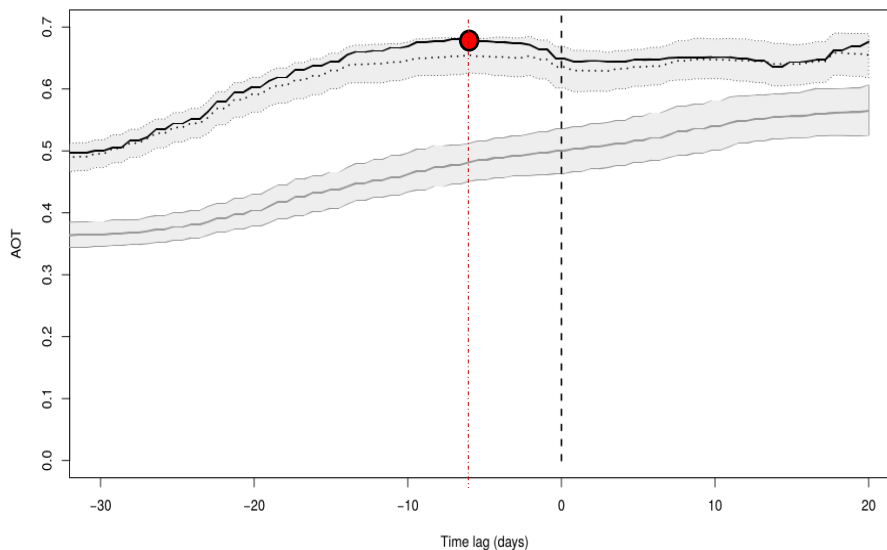


Figure III.27. AOD avant et après le démarrage des épisodes de méningites dans 14 districts sanitaires au Burkina Faso, 2004-2014. La courbe noire représente la moyenne des AOD sur les 292 aires de santé-semaines. La courbe noire en pointillés (et les zones grises associées) représente la moyenne (l'intervalle de confiance 95% CI) des AOD sur les aires de santé-semaines nonépidémiques. Les traits verticaux représentent le jour 0 des incidences de méningites (en noir) et le jour pour lequel on observe un maximum d'AOD (en rouge).

Figure adaptée de [Woringer et al. \(2018\)](#), Partie B/§5.1.

Ainsi, les travaux de recherches entrepris sur le lien entre aérosols et méningites constituent l'apport d'illustrer à l'aide d'informations quantitatives l'hypothèse selon laquelle des conditions de sécheresses extrêmes prolongées combinées à des événements d'aérosols désertiques intenses persistants sur plusieurs semaines en plein cœur de la saison sèche joueraient un rôle sur la susceptibilité de l'hôte, ce qui favoriserait la fragilisation des muqueuses et le passage de la bactérie *Nm* dans le sang (Mueller & Gessner, 2010). Cette hypothèse est d'autant plus solide qu'il a été montré que la bactérie ***Nm* ne survit pas bien à l'extérieur de l'hôte** ; des tests ont été réalisés indiquant que la bactérie pouvait survivre sur des surfaces telles que le verre et le plastique à température ambiante pour une période pouvant aller de plusieurs heures à plusieurs jours (Swain *et al.*, 2007). Même si d'autres bactéries, hautement résistantes, peuvent se trouver dans les poussières (Gonzales-Toril *et al.*, 2020), il est, compte-tenu de ses éléments, très peu probable que la bactérie *Nm* soit apportée par les poussières (Thomson *et al.*, 2009), en étant transportées sur de longues distances, à des températures excédant 30°C et durant plusieurs jours. Enfin, les aérosols désertiques, qui contiennent des quantités non négligeables de nutriments comme le potassium, l'ammonium, les nitrates et les phosphates (Talbot *et al.*, 1986), pourraient aussi apporter du fer (Zhu *et al.*, 1997), nécessaire au développement de la bactérie dans notre organisme (Archibald & DeVoe, 1979). **Les résultats obtenus jusqu'ici sont donc encourageants car ils ne sont pas déconnectés de la connaissance actuelle dans les domaines de l'épidémiologie et de la médecine.** Ils représentent ainsi un diagnostic certes statistique mais cohérent et indispensable pour continuer de faire avancer l'état des connaissances sur le lien entre méningites, poussières et climat, afin, à termes de construire des modèles de méningites (§VI/Perspectives de Recherches). Ils représentent également la condition nécessaire pour aller plus loin et poursuivre les recherches à l'échelle de la Ceinture des méningites.

III.4 Poussières et méningites à l'échelle de la Ceinture

La Ceinture des méningites est traditionnellement définie entre les isohyètes 300 mm au Nord ($\sim 15^{\circ}\text{N}$), qui correspond à des zones très peu densément peuplées (et où la maladie ne circule pas), et 1200 mm au Sud ($\sim 7^{\circ}\text{N}$), qui correspond à des zones plus humides (et où la maladie circule moins) (Figure III.28). Nous avons précédemment montré l'importance des aérosols sur la saisonnalité des méningites à toutes les échelles spatiales considérées : pays, district sanitaire et aire de santé (§III.3). Nos études ont également mis en évidence une certaine cohérence spatiale entre aérosols et méningites à l'échelle des districts sanitaires (§III.3/Figure III.17). Qu'en est-il alors de la distribution spatiale moyenne des poussières au sein de la Ceinture : peut-elle expliquer les disparités géographiques des incidences des méningites ? peut-elle occasionner une nouvelle définition des limites Nord et Sud de cette dernière, en cohérence avec le fait qu'elle soit une maladie de la saison sèche ?

Pour répondre à ces questions, nous avons utilisé les produits Deep Blue de MODIS (§II.3) à partir desquels nous avons caractérisé les poussières de la Ceinture, sur la base des propriétés optiques des aérosols. Nous avons choisi une zone représentative en termes de densité de population, correspondant aux longitudes $[15^{\circ}\text{W} : 25^{\circ}\text{E}]$, excluant ici le Soudan, le Sud Soudan et l'Ethiopie de l'analyse (Figure III.28, partie de la Ceinture entourée en orange). Cette zone, qui constitue environ les 2/3 de la Ceinture des méningites (en partant de son extrémité Ouest), est également très intéressante du point de vue des poussières, car c'est la zone d'Afrique de l'Ouest subissant l'influence des poussières d'Harmattan (§III/Préambule). La période considérée s'étend ici de janvier à avril, afin d'intégrer la phase ascendante ainsi que le maximum de la saison des méningites (§III.2), qui sont les plus sensibles aux aérosols (§III.3).

La réalisation d'une cartographie des AOD et des AE en moyenne sur la période 2004-2014 à l'échelle de la Ceinture, combinée à la classification des AOD (élevée/faible) établie à partir des mesures sol sur des sites sahéliens (§II/Questions scientifiques et éléments contextuels/Tableau II.1), nous ont permis de mettre en évidence :

- (i) **des différences longitudinales dans les AOD** (Figure III.30), avec :
 - Au centre, la **Dust Zone 1 (DZ1)**, coordonnées $[5^{\circ}\text{W} : 15^{\circ}\text{E}]$, très largement influencée par les émissions de poussières provenant de la source de Bodélé à cette période de l'année (§III/Préambule) et rencontrant les AOD les plus élevées, comprises entre 0.5 et 1 ;
 - A l'ouest, la **Dust Zone 2 (DZ2)**, coordonnées $[15^{\circ}\text{W} : 5^{\circ}\text{W}]$, avec des AOD modérées comprises entre 0.4 et 0.7 ;
 - A l'est, la **Dust Zone 3 (DZ3)**, coordonnées $[15^{\circ}\text{E} : 25^{\circ}\text{E}]$, avec les AOD les plus faibles, comprises entre 0.3 et 0.6.

Nous avons fait le choix de représenter la délimitation entre les 3 zones DZ1, DZ2 et DZ3 sous la forme d'un cône d'influence de la source de Bodélé, en accord avec les patterns de vent de direction Nord/Nord-Est à cette période de l'année (§II/Préambule/Figure II.3).

- (ii) **des différences latitudinales dans les AE** (Figure III.31), qui augmentent de 0.2 au Nord à 1.2 au Sud, indiquant des situations de poussières désertiques pures au Nord et des situations de mélange d'aérosols vers le Sud. En effet, de janvier à mars, cette partie de la Ceinture peut subir l'influence des feux (§II.3/Figure II.19).

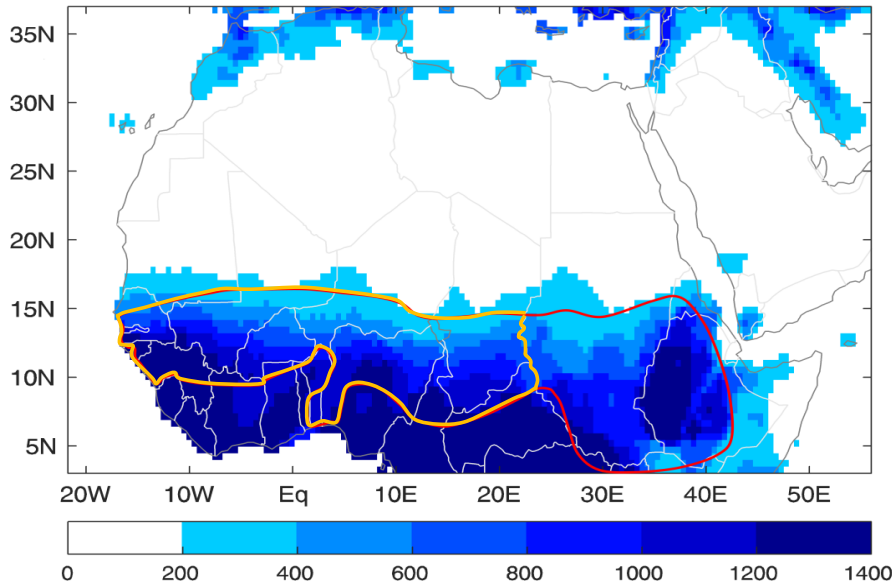


Figure III.28. Cumul annuel moyen de précipitations (exprimé en mm) en Afrique nord équatoriale. Carte réalisée à partir des produits GPCP v6 à une résolution spatiale de 0.5° sur la période 1901-2010. La ceinture des méningites est représentée en rouge. La partie étudiée dans représentée en orange. Figure extraite de [Martiny et al. \(2015\)](#), Partie B/§5.6.

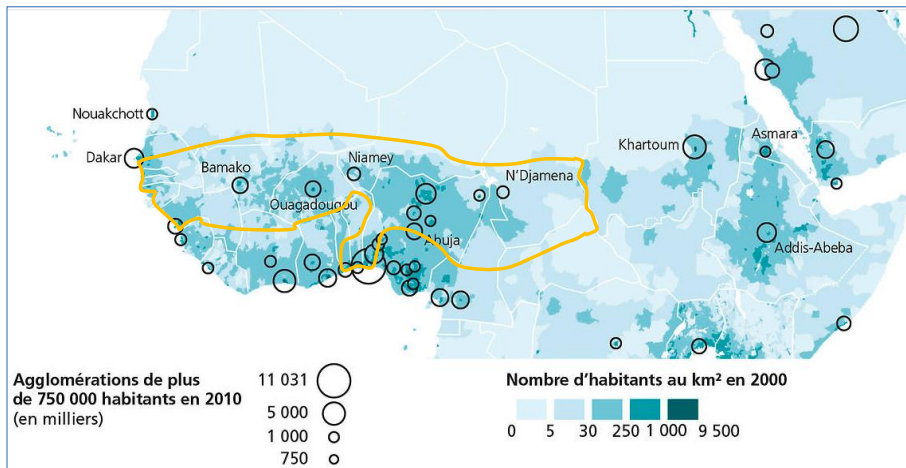


Figure III.29. Carte de la densité de population en Afrique nord-équatoriale en 2000. Sources : Sedac, NASA et Columbia University, Gridded Population of the World and the Global Rural-Urban Mapping Project.

En résumé, de janvier à avril, la zone [5°W : 25°E] de la Ceinture des méningites est envahie de poussières désertiques avec des AOD en moyenne supérieures à 0.5 (élevées), variant entre 0.3 et 1 dépendant de la distance et de la position géographique par rapport à la source dominante de poussières, i.e. Bodélé au Tchad (§II/Préambule); les produits aérosols MODIS Deep Blue montrent l'influence sur toute la partie Sud de la Ceinture des aérosols carbonés (§II.3). Ces analyses ont permis de formuler de manière simple une nouvelle définition de la Ceinture des méningites, en accord avec les recherches menées sur le lien entre aérosols et méningites. Ainsi, **la Ceinture des méningites [5°W : 25°E], sur la période janvier-avril, incluant la phase ascendante et le maximum des méningites (§II/Synthèse/Figure II.24), est contaminée par des quantités d'aérosols élevées au Centre, modérées à l'Ouest et modérées à faibles à l'Est, avec, au Nord, des AE<0.2 représentatifs de poussières désertiques pures et grossières, et au Sud, des AE>1.2 représentatifs d'un mélange fin de poussières désertiques et possiblement d'aérosols carbonés** ([Martiny et al. \(2018\)](#), Partie B/§5.3).

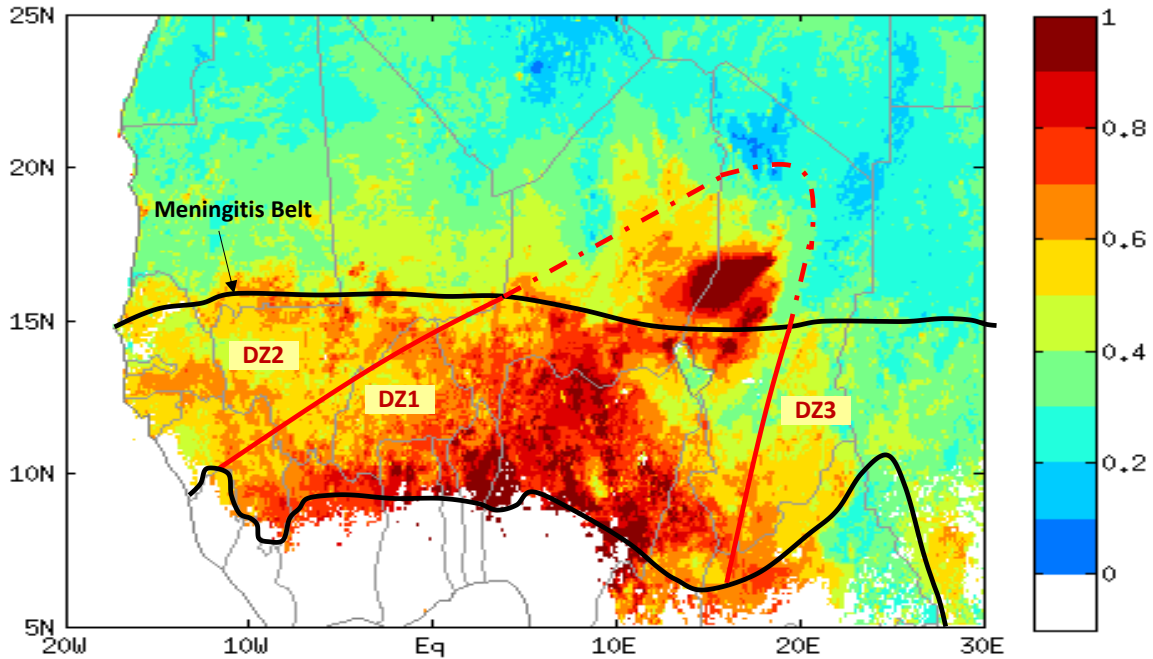


Figure III.30. Les AOD₅₅₀ Deep Blue de MODIS (résolution spatiale 10km) moyennées sur la phase ascendante et jusqu'au pic saisonnier des méningites (de janvier à avril) sur la période 2004-2014. Un filtre sur les coefficients d'Angstroem < 1.2 a été appliqué (pixels blancs). La ligne noire indique la Ceinture des méningites. La ligne rouge indique de manière schématique le cône d'influence de la source de Bodélé réalisé à partir des données de vents ERA-Interim sur la période janvier-avril. DZ1 correspond à Dust Zone 1, DZ2 à Dust Zone 2 et DZ3 à Dust Zone 3. Figure extraite de [Martiny et al. \(2018\)](#), Partie B/§5.3.

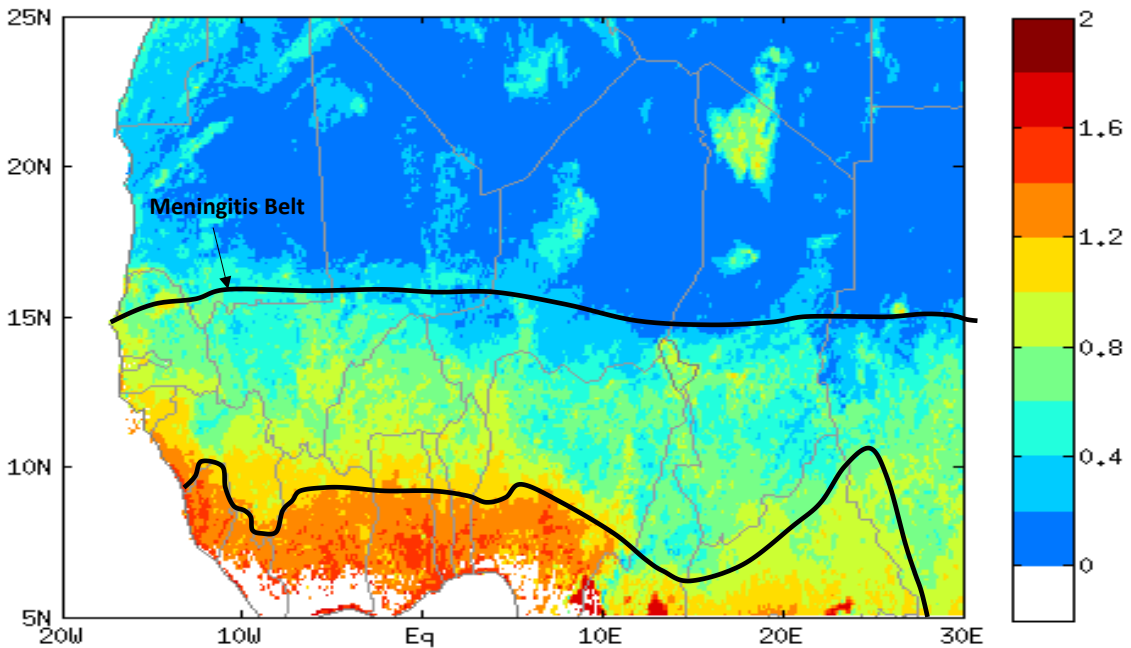


Figure III.31. Les AE Deep Blue de MODIS moyennés sur la phase ascendante et jusqu'au pic saisonnier des méningites (de janvier à avril) sur la période 2004-2014. La ligne noire indique la Ceinture des méningites. Figure extraite de [Martiny et al. \(2018\)](#), Partie B/§5.3.

C'est donc finalement le paramètre AE qui permet de donner une définition pertinente des limites Nord/Sud de la partie de la Ceinture sous influence des poussières désertiques via la source dominante de poussières, i.e. Bodélé au Tchad (§II/Préambule).

L'analyse des données épidémiologiques a ensuite permis de poser un certain nombre d'hypothèses quant aux disparités spatiales observées à l'échelle de la Ceinture (Tableau III.8). Les données utilisées sont issues du jeu de données EPI-I (§III/Préambule/Figure III.3), à l'échelle nationale, sur une période conjointe aux produits MODIS, 2004-2014, et pour 14 pays de la Ceinture des méningites. Le risque sanitaire a été défini dans chaque pays comme étant ELEVE, MODERE ou FAIBLE en fonction du nombre de cas observés par an.

Tout d'abord, les pays les plus touchés par les méningites (sélectionnés selon §III/Préambule, Figure III.3) sont tous situés dans DZ1, c'est-à-dire sous l'influence directe de la source de Bodélé et ainsi exposé à des quantités élevées de poussières désertiques pures. Ces pays indiquent un nombre de cas annuel médian variant entre 1150 pour le Tchad, 1850 pour le Nigéria, 2135 pour le Niger et 5488 pour le Burkina Faso. Le risque sanitaire dans ces pays est donc maximal.

Les pays plus modérément affectés par les méningites (nombre de cas compris entre ~500 et ~1000) rencontrent deux types de situations aérosols :

- (i) situés dans le cône d'influence de Bodélé (DZ1) et exposés à des quantités élevées d'aérosols mais partiellement exposés aux poussières désertiques. C'est le cas du Nord du Cameroun, du Ghana, du Bénin, du Togo et de la Côte d'Ivoire, qui sont exposés à des quantités élevées d'aérosols, mélange de poussières désertiques et potentiellement d'aérosols de feux de janvier à mars. C'est également le cas du Tchad, grand pays, très exposé aux poussières désertiques de Bodélé dans sa partie centrale (comme dit précédemment), et dans une moindre mesure au sud, où ce sont plutôt les aérosols de feux qui prédominent de janvier à mars.
- (ii) situés hors du cône d'influence de Bodélé, à l'ouest (DZ2), et exposés à des quantités modérées de poussières désertiques. C'est le cas du Mali.

Les pays les moins affectés par les méningites (nombre de cas annuel < 500) sont situés hors du cône d'influence de Bodélé, exposés à des quantités modérées à faibles d'aérosols, mélange de poussières et d'aérosols de feux de janvier à mars - c'est le cas dans le sud du Sénégal (le nord étant plutôt exposé à des poussières désertiques en quantité modérée), de la Guinée et de la Gambie à l'extrémité Ouest de la Ceinture (DZ2) et du Nord du centre Afrique à l'est (DZ3).

Ce travail préliminaire et essentiellement descriptif a été examiné par le Committee on Space Research (COSPAR) en 2018, permettant ainsi de donner plus de lisibilité sur un plan international, à la télé-épidémiologie pour les maladies infectieuses non vectorielles. En effet, le fait de percevoir la Ceinture des méningites depuis l'espace, à partir de produits aérosols validés (§II.3), a permis d'en avoir une vision tout à fait innovante (et inaccessible via d'autres variables climatiques telles que le vent ou la température), et dans le même temps de poser deux hypothèses de base :

Hypothèse 1. En situation d'exposition à des poussières désertiques pures, ce sont les pays subissant les plus quantités d'aérosols les plus élevées qui sont les plus touchés par les méningites.

Hypothèse 2. A quantité d'aérosols équivalente, les pays les plus touchés par les méningites sont ceux pour lesquels les aérosols sont des poussières désertiques pures et non des mélanges d'aérosols désertiques et d'aérosols plus fins tels que les carbonés par exemple.

Les aérosols de feux, notés Biomass Burning (BB) dans le Tableau III.8 ont-ils un impact moindre sur la santé ou s'agit-il d'un artéfact engendré par la hausse de l'humidité relative en Avril au sud de la ceinture (§III.2)? Des études dédiées à l'impact des aérosols de feux seuls, sans les poussières et sans le facteur d'humidité seraient ici nécessaires pour trancher ([thèse de Serge Mazamay \(2019\)](#), Partie B/§4.3). Qu'en est-il de l'impact des poussières désertiques en plus faible quantité ? Le cas de l'Ethiopie ou encore celui du nord du Sénégal serait ici très intéressant à étudier (§VI/Perspectives de recherches). Enfin, quelle est l'importance de la composition minéralogique, de la taille et de la forme des aérosols ? Des mesures sol des concentrations massiques des aérosols ainsi qu'une analyse des échantillons de poussières permettraient sans doute d'apporter des éléments de réponse à ces questions (§VI/Perspectives de recherches).

<i>Pays</i>	<i>Période</i>	<i>Méningite</i> ¹	<i>Dust Zone</i>	<i>Aérosols</i>	<i>Risque sanitaire</i>
Burkina Faso	2004-2014	5488			
Niger	2004-2014	2135	DZ1	Pure Dust	ÉLEVÉ (++)
Nigéria	2004-2014	1850		++	
Tchad	2004-2014	1150			
Mali	2004-2014	453	DZ2	Pure Dust +	
Cameroun	2006-2014 ²	771			MODÉRÉ (+)
Ghana	2004-2014	469	DZ1	Dust + BB	
Bénin	2004-2014	396	(Sud)	++	
Togo	2004-2014	379			
Côte d'Ivoire	2004-2014	376			
Sénégal	2012-2014 ³	278	DZ2	Dust + BB	FAIBLE (-)
Guinée	2006-2014 ⁴	195	(Ouest)	+	
Gambie	2012-2014 ³	200			
Cent. Afrique	2005-2014	266	DZ3		

¹ nombre de cas annuel médian

² année 2008 manquante

³ pays inclus tardivement dans la surveillance à l'échelle de la Ceinture

⁴ années 2007 et 2011 manquantes

Tableau III.8. Evaluation du risque sanitaire en fonction des situations aérosols dans 14 pays de la Ceinture des méningites sur la période 2004-2014.

Tableau extrait de [Martiny et al. \(2015\)](#), Partie B/§5.6.

Synthèse de la partie III

Les recherches menées pendant une dizaine d'années sur le lien entre aérosols, climat et santé dans cette zone particulière qu'est la Ceinture des méningites africaine ont permis de mettre en évidence l'importance spécifique des poussières désertiques de la saison sèche sur les méningites saisonnières. Les résultats sont d'autant plus notables qu'ils sont à examiner au regard du caractère multi-factoriel de la maladie, le facteur humain étant primordial (Agier *et al.* (2017), Partie B/§5.1). Les résultats sont d'autant plus fiables qu'ils ont été obtenus en investissant plusieurs échelles spatiales, de la plus fine, l'aire de santé, à la plus large, celle de la Ceinture des méningites, en exploitant des produits aérosols issus de la télédétection spatiale validés voire corrigés (§II) complétés par des mesures sol, et à partir de jeux de données épidémiologiques vérifiés et post-traités. Ces analyses conjointes entre environnement au sens large et épidémiologie n'auraient pu voir le jour sans des programmes de recherches structurants d'envergure internationale (AMMA) et la fédération de chercheurs au sein de groupes pluridisciplinaires ayant le souhait d'avancer en collaboration (AMMA Santé France puis MAMEMA). Voici en résumé les avancées scientifiques principales.

Si le **climat automnal a d'abord été identifié comme étant un primo-déterminant de l'intensité de l'épidémie survenant quelques mois plus tard** (§III.1), il semblerait que ce dernier favorise l'augmentation du nombre de cas précoces de méningites, augmentant ainsi la taille du réservoir de transmission de la maladie très tôt dans la saison, en combinaison de l'occurrence de premiers événements de poussières. Ces résultats peuvent s'avérer utiles dans une optique de prévisibilité des épidémies avec un délai allant de quelques semaines à quelques mois. Cependant, le prédictand est généralement une incidence saisonnière, ou au mieux une incidence mensuelle des méningites. Dans ces 2 cas, les résultats obtenus sont insuffisants pour produire un modèle d'alerte précoce opérationnel sur le terrain à l'échelle du district sanitaire. En outre, ces approches ne sont pas explicatives de la variabilité intra-saisonnière des méningites.

La considération de la variable aérosols en intra-saisonnière et conjointement aux méningites saisonnières nous a semblé alors intéressante à investiguer. **Nous avons mis en évidence dans une étude originale menée à l'échelle du district sanitaire, et sur une période de 10 ans, que les poussières étaient plus explicatives** (d'un point de vue statistique) **des cas de méningites hebdomadaires que les variables climatiques** (§III.2). Des analyses plus détaillées ont ensuite permis de montrer que les aérosols étaient de prime importance de janvier à avril, lors des phases de démarrage et de développement épidémique (jusqu'au maximum saisonnier). Lors de la phase de démarrage, en janvier-février, les conditions sèches associées aux vents d'Harmattan sont également très pregnantes. Lors de la phase de décroissance, de la mi-avril à juin, les aérosols sont de moindre importance face à l'augmentation de l'humidité relative, indicatrice de la fin de la saison des méningites.

Ayant alors resserré la période d'analyse de janvier à avril, nous avons investi la question du décalage temporel existant entre l'occurrence des événements d'aérosols et la survenue des cas de méningites bactériennes (§III.3). Nous avons alors mis en lumière que les **poussières représentent un forçage important sur la dynamique temporelle saisonnière et épidémique des méningites, avec un décalage moyen de 1 à 2 semaines à l'échelle du pays, de 1.55 semaines à l'échelle du district sanitaire et de 5 à 6 jours à l'échelle de l'aire de santé. Ces résultats, utilisant différents jeux de**

données épidémiologiques et différents produits aérosols, sont concordants entre eux mais aussi et surtout avec la réalité biologique. En effet, le délai entre les événements de poussières et l'augmentation du nombre de cas de méningites semble cohérent par rapport à la période d'incubation de la bactérie *Nm* variant entre 2 et 10 jours, les infections invasives, plus rares, se manifestant dans les 14 jours suivant l'acquisition de la bactérie. **Les aérosols semblent donc représenter un facteur explicatif important de la variabilité intra-saisonnière des méningites,** ce qui constitue une avancée scientifique majeure lorsque l'on sait qu'il y a environ 5 ans régnait encore un certain scepticisme au sein de la communauté scientifique sur le lien supposé entre aérosols et méningites. Ceci était dû en partie au fait que les études portant sur les mécanismes biologiques de la maladie étaient rares. Aujourd'hui, même si les méningites restent pour les épidémiologistes, et ce, malgré la découverte des méningocoques il y a plus de 2 siècles, un objet complexe à étudier et à élucider, des campagnes de terrain et des expériences en laboratoire afin de mieux comprendre les processus microbiologiques liant les aérosols à l'acquisition par un hôte de la maladie sont à l'oeuvre. Le maintien des recherches pluridisciplinaires est donc indispensable pour avancer de concert sur la thématique. Ce résultat est aussi à examiner au regard de la pathologie étudiée, qui n'est pas vectorielle, ce qui rend complexe l'analyse de sa dynamique spatio-temporelle. Enfin, d'autres facteurs d'ordre sociétaux jouent un rôle crucial dans la mise en place des épidémies. **Réussir à dégager un signal aérosols dans ce contexte met une nouvelle fois en exergue les avancées significatives et concrètes engagées depuis quelques années.**

Ce diagnostic nous a ensuite permis de poursuivre les recherches à des échelles plus larges, et notamment celle de la Ceinture (§III.4). Les résultats obtenus, bien que descriptifs pour le moment, sont très prometteurs car ils ouvrent la voie à la télé-épidémiologie. Les divers produits aérosols issus de la télédétection spatiale et, entre autres, les AOD Deep Blue de MODIS, ont en effet montré leur potentiel pour l'analyse des impacts sur les méningites. Ils ont permis notamment de poser **l'hypothèse selon laquelle, pendant la saison des méningites, ce sont les poussières désertiques pures en quantité élevée qui sont les plus impactantes pour la santé humaine.** Ils ont également permis de donner une nouvelle définition des limites Nord et Sud de la Ceinture des méningites, en accord avec sa caractéristique première d'être une pathologie de la saison sèche. Cette définition repose non pas seulement sur les AOD mais aussi sur les AE, ce qui vient confirmer l'importance de la taille et du type d'aérosols. En effet, partant du principe que la Ceinture recoupe, sur la période janvier-avril, des poussières en quantité dépassant largement les standards européens, c'est le coefficient d'Angstroem qui s'avère le plus discriminant. Ainsi, **la limite Nord de la Ceinture coïncide avec des $AE < 0.2$, indicateur de poussières désertiques pures, alors que la limite Sud coïncide avec des $AE > 1.2$, indicateur d'un mélange fin de poussières désertiques et potentiellement d'aérosols carbonés.** Ce proxy pourrait s'avérer intéressant dans l'analyse de l'évolution de la Ceinture des méningites s'inscrivant dans la variabilité et le changement climatiques.

Enfin, la télé-épidémiologie offre une possibilité de valoriser les données de télédétection dans un cadre sociétal, créant ainsi du **lien entre recherches fondamentales et opérationnalité, et aussi entre physiciens/climatologues et sciences humaines.** Ceci rejoint l'objectif du pôle THEIA (2013-2014, Partie B/§2.2), auquel j'ai contribué en tant que scientifique du comité TOSCA du CNES (groupe surfaces continentales) et dans le cadre du CES « Risque et maladies infectieuses » (<http://www.theia-land.fr>).

IV. Pollution particulaire en milieu urbain

Préambule : la ville, milieu complexe et hétérogène

Les aires urbaines constituent un milieu original et hétérogène caractérisé par des composants diversifiés tels que les infrastructures de transport, les bâtiments, les parcs urbains, les cours d'eau. Ainsi, chaque ville moderne possède une morphologie bien à elle (Figure IV.1), cette dernière jouant un rôle primordial sur le climat local (Oke, 1973 ; Escourrou, 1991 ; Le Bras & Masson 2015) et la qualité de l'air (Maignant, 2007) à l'échelle d'un quartier (Edussuriya *et al.*, 2011) ou d'une rue (Edussuriya *et al.*, 2015). Par exemple, la hauteur, la taille, la forme et la configuration des bâtiments influencent la circulation du vent à ces échelles spatiales, en contrariant les écoulements laminaires et en générant des turbulences ; ceci peut avoir un impact sur la qualité de l'air d'un lieu donné par le biais d'un phénomène d'accumulation ou de dispersion des polluants. Les différents matériaux de construction utilisés en milieu urbain tels que le bitume, la peinture, les tuiles, l'ardoise etc, qui peuvent générer des ombres portées, interagissent avec le rayonnement solaire via leurs propriétés physiques diversifiées, modulant ainsi l'albédo (Figure IV.2) et le bilan radiatif en ville, ce qui peut également avoir un impact sur la qualité de l'air. Des études portant sur la végétalisation des toits en ville ont par exemple démontré l'amélioration de la qualité de l'air des voies de circulation se trouvant à proximité, et notamment dans les rues canyon (Baik *et al.*, 2012) : l'air plus frais produit par la couverture du toit s'écoule dans la rue, renforçant le flux de canyon, améliorant ainsi la dispersion des polluants en surface. Le mode d'occupation des sols et notamment la présence de végétation en ville, s'avère être également une donnée essentielle pour la qualité de l'air. En effet, les arbres peuvent d'une part influencer le microclimat et la turbulence de l'air et d'autre part faciliter le dépôt de divers polluants gazeux et particulaires à la surface de leurs feuilles (Grote *et al.*, 2016). En résumé, une meilleure circulation de l'air, des températures plus fraîches, la présence de végétation semblent être des facteurs favorisant une bonne qualité de l'air en ville.

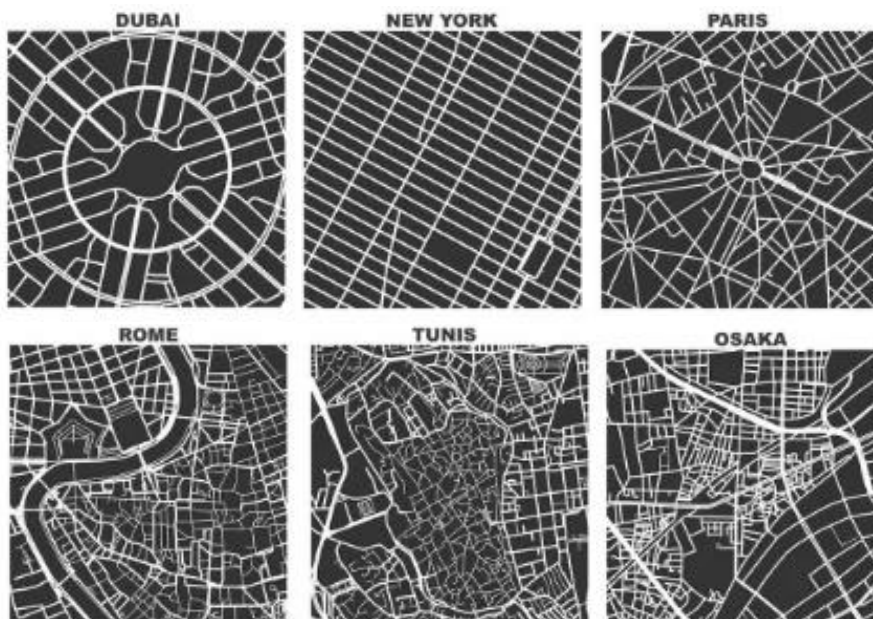


Figure IV.1.
Infrastructures de transport dans 6 villes à travers le monde. Base de données OpenStreetMap. Figure adaptée de Boeing (2019).

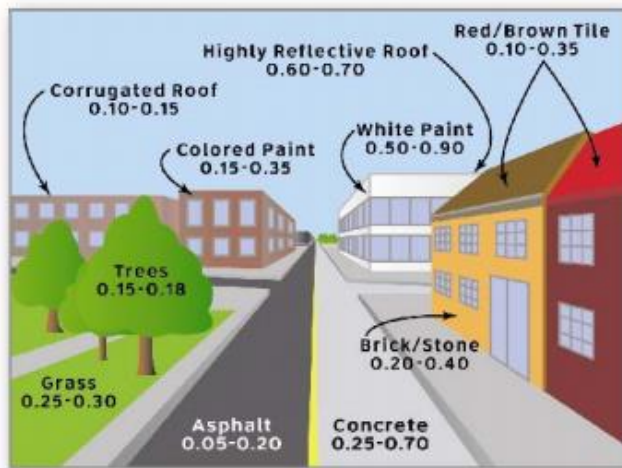


Figure IV.2. Des albédos différenciés en ville. Figure NASA réalisée à partir de de Akbari *et al.* (2008) et Thayer (2008)

La partie IV de cette Habilitation à Diriger les Recherches se concentre sur Dijon, ville-pilote expérimentale dans le domaine de la climatologie et de l'environnement urbain. En 2014, un réseau dense de mesures des températures atmosphériques, composé de 47 stations, y a en effet été déployé par l'équipe CRC (Richard *et al.*, 2018) et des exercices de modélisation du climat urbain ont été initiés. C'est dans ce cadre qu'une représentation de la morphologie urbaine de la ville a été réalisée (Figure IV.3) en se basant sur des données Open Source (Boeing, 2019) et des produits de télédétection Haute Résolution pour la représentation spatiale fine échelle de la végétation (Emery *et al.* (2018), Partie B/§5.4). Ainsi, une carte d'anthropisation ou d'artificialisation (Figure IV.4) a permis, à l'échelle de la ville, et en première approximation, de visualiser les zones susceptibles de disposer d'une meilleure qualité de l'air ; c'est le cas par exemple de la coulée verte qui suit la rivière de l'Ouche sur 2 kilomètres sur un axe Nord-Ouest/Sud-Est, ou encore celui du parc de la colombière situé au Sud-Est de la ville et qui s'étend sur une superficie de 33 hectares. Ces travaux, ainsi que le programme de recherches POPSU PURE (Plateforme URbaine d'Expérimentation de Dijon) lancé en 2019 et financé par Dijon Métropole et le Ministère de la Transition Ecologique et Durable, ont constitué des opportunités de recherches sur le thème de la qualité de l'air à Dijon. De plus, le territoire métropolitain, qui s'étend sur ~240 km² et compte ~254.000 habitants en 2018, est représentatif des villes de taille moyenne à l'échelle européenne, dans lesquelles près de la moitié de la population urbaine est établie (Giffinger *et al.*, 2007). La ville en tant que telle est dite « monocentrique », c'est-à-dire que le centre est représenté par une concentration de la densité de population, avec, à l'est des zones d'agriculture extensives et à l'ouest de larges étendues d'espaces naturels forestiers. Elle apparaît cependant complexe et hétérogène (Figure IV.4), indiquant par exemple la présence de parcs urbains (représentés en vert) au sein de zones denses de bâtis (représentées en rouge).

A ce stade, il apparaît essentiel de considérer des échelles micro-locales permettant de caractériser au mieux la pollution atmosphérique ainsi que ses variations fines et rapides dans le temps.



Figure IV.3. Infrastructures de transport, empreintes au sol des bâtiments et végétation représentée à partir des bases de données OpenStreetMap (en vert clair) et BD TOPO® (vert foncé) à Dijon.
Figure extraite de [Emery et al. \(2018\)](#), Partie B/§5.4.

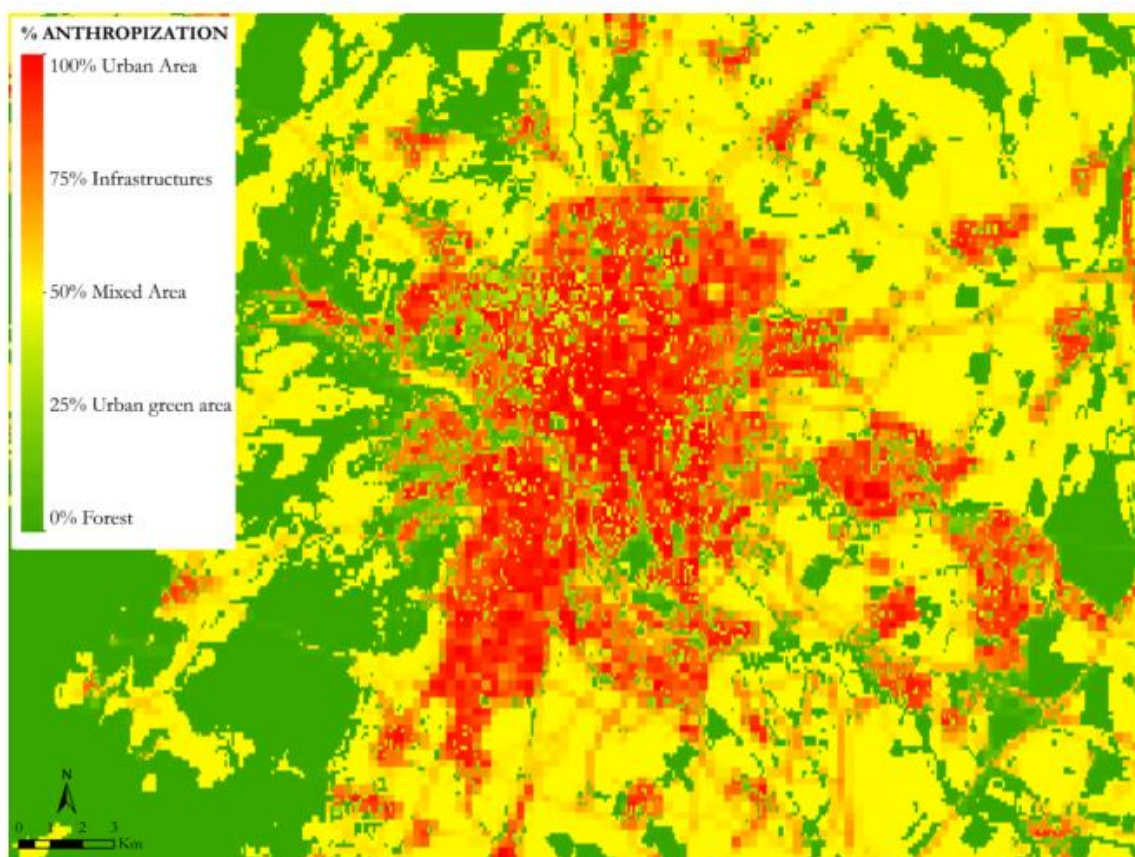


Figure IV.4. Indice d'anthropisation de la ville de Dijon à une résolution spatiale de 30 m. L'indice correspond au rapport entre la surface occupée par du tissu urbain discontinu (évalué en fonction de l'empreinte des bâtiments, des infrastructures routières et des parcs urbains) et la surface totale d'un pixel. Cette carte intègre des produits satellitaires NDVI issus de LANDSAT.
Figure extraite de [Emery et al. \(2018\)](#), Partie B/§5.4.

Contextualisation et questions scientifiques

En ville, l'air est, avec le bruit (Stansfeld *et al.*, 2000), un des facteurs de stress environnementaux le plus important et le plus impactant sur la santé des populations (Münzel *et al.*, 2017). Les polluants atmosphériques sont de 4 types : les métaux lourds (arsenic, cadmium, plomb, chrome, mercure, zinc, nickel, sélénium et cuivre), les Polluants Organiques Persistants (Hydrocarbures Aromatiques Polycyclique, PolyChloroBiphényles, HexaChloroBenzene, dioxines et furannes), les polluants gazeux et les polluants particuliers.

En France métropolitaine, sur la période 1990-2017, le bilan des émissions primaires gazeuses (Figure IV.5) et particulières (Figure IV.6) indique une diminution globale des polluants émis, excepté pour l'ammoniac NH₃ (secteur agricole) (CITEPA, 2019). Nous reviendrons sur l'ozone qui est une pollution secondaire estivale et préoccupante dans le cadre du changement climatique dans la partie perspectives de recherches (§VI/Perspectives de recherches). Pour les polluants gazeux carbonés, Composés Organiques Volatils Non Méthaniques (COVNM) et monoxyde de carbone (CO), on note une diminution d'environ 70% et pour le dioxyde de soufre (SO₂) une diminution d'environ 85% sur 27 ans. Sur la même période, les oxydes d'azote ont connu une diminution de l'ordre de 60%. Quant aux polluants particuliers, la diminution la plus notable est celle du carbone suie (ou en anglais *Black Carbon*, noté BC), dont les émissions sont pour la première fois, en 2017 avec 806 Gg, inférieures aux plafonds Göteborg et National Emission Ceilings (NEC) de 2010 (respectivement de 860 et 810 Gg). Les matières en suspension totales ou en anglais *Total Suspended Particules* (TSP) ainsi que les concentrations en PM₁₀ et en PM_{2,5} ont diminué de moitié de 1990 à 2009 puis connaissent une diminution beaucoup plus lente depuis une dizaine d'années (perte de 5 points pour les PM₁₀ et les PM_{2,5}).

Surveiller et comprendre la pollution particulaire en ville est donc de prime importance, là où les niveaux de concentrations des polluants particuliers restent globalement préoccupants. Les directives européennes indiquent les valeurs limites suivantes : pour les PM₁₀, une moyenne annuelle de 40 µg/m³ et une moyenne journalière à ne pas dépasser plus de 35 jours/an de 50 µg/m³ ; pour les PM_{2,5}, une moyenne annuelle de 20 µg/m³ depuis 2020. Les seuils de l'OMS sont quelque peu différents : pour les PM₁₀, une moyenne annuelle de 20 µg/m³ ; pour les PM_{2,5}, une moyenne annuelle de 10 µg/m³. En prenant l'exemple de l'île de France en 2018, il est aisé de constater que : (i) plus de la moitié des stations du réseau AirParif mesurent des concentrations moyennes annuelles en PM₁₀ supérieures à 20 µg/m³ avec l'ensemble des sites trafic dépassant ce seuil (Figure IV.7) ; ainsi en 2018, plus d'un tiers des franciliens sont concernés par le dépassement de la recommandation OMS (versus 100% en 2007) ; (ii) le dépassement du seuil de recommandation de l'OMS pour les PM_{2,5} est constaté majoritairement le long de certaines voies de circulation (Figure IV.8) ; ainsi en 2018, 10 millions d'habitants sont concernés, soit près de 85% des franciliens (versus 100% en 2007).

Selon l'OMS, la pollution atmosphérique particulaire aux PM₁₀ des 3.200 villes du monde hébergeant plus de 100 000 habitants est responsable de 1.4 à 6 millions de décès annuels. Dans la moitié des cas, la surmortalité est liée à des cardiopathies, entre autres des accidents vasculaires cérébraux, des pneumonies et des cancers des poumons (Lelieveld *et al.*, 2019). En France, elle provoque 48 000 décès par an, devenant la première cause de mortalité environnementale et la seconde cause de mortalité après le tabac et l'alcool (Medina *et al.*, 2016).

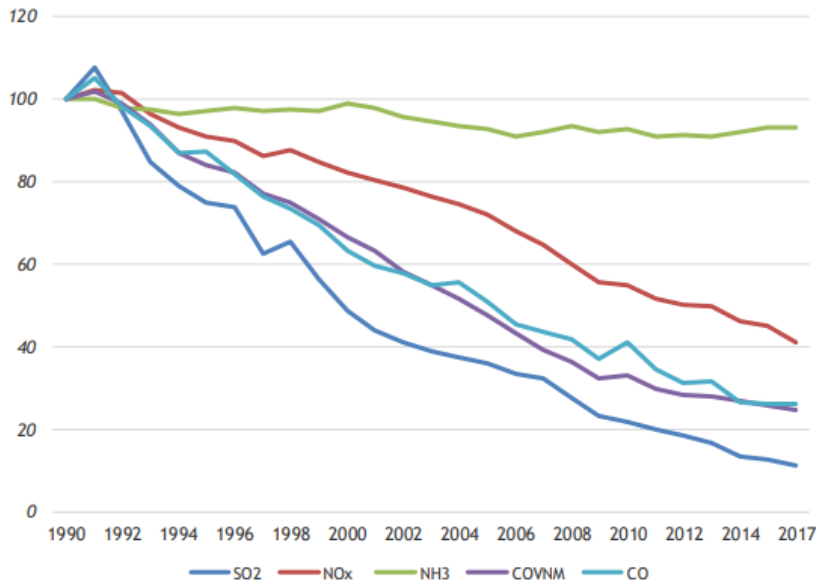


Figure IV.5. Evolution des émissions de polluants gazeux entre 1990 et 2017 (base 100 en 1990). Figure extraite du CITEPA (2019).

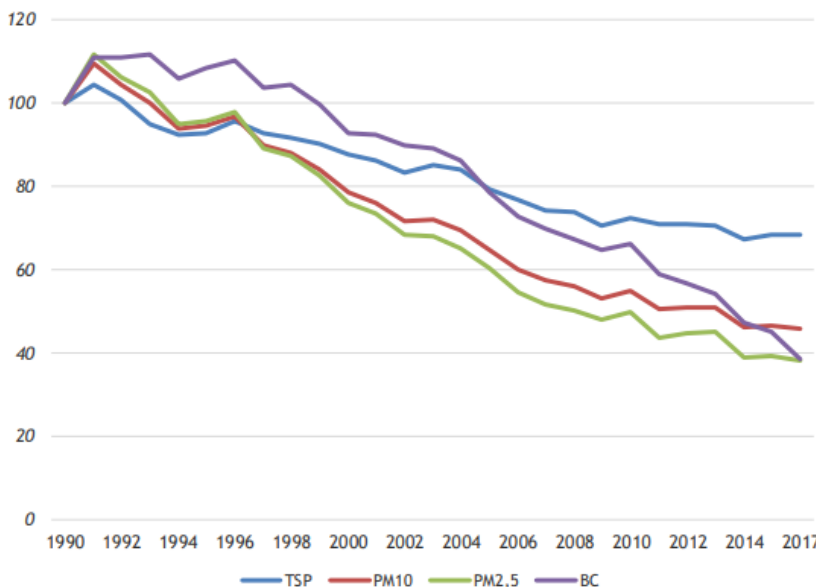


Figure IV.6. Evolution des émissions de polluants particulaires entre 1990 et 2017 (base 100 en 1990). Figure extraite du CITEPA (2019).

La pollution particulaire se caractérise en effet par des composés toxiques et cancérigènes (OMS, 2013). Par ailleurs, si les concentrations mesurées sont plus faibles qu'il y a 10 ans, les individus y sont exposés de manière chroniques et sur de plus longues périodes (Blanchard *et al.*, 2008 ; Elichegaray, 2008).

Il ressort de ces analyses que la pollution aux particules est une préoccupation majeure dans les aires urbaines européennes, et que le trafic contribue de manière significative au dépassement des seuils et normes de la qualité de l'air à la fois pour les PM₁₀ et les PM_{2,5} (§IV.1). Il s'agit d'une pollution de proximité, au plus proche des sources (Figure IV.9), dotée d'une variabilité spatiale micro-échelle et cependant encore mal connue.

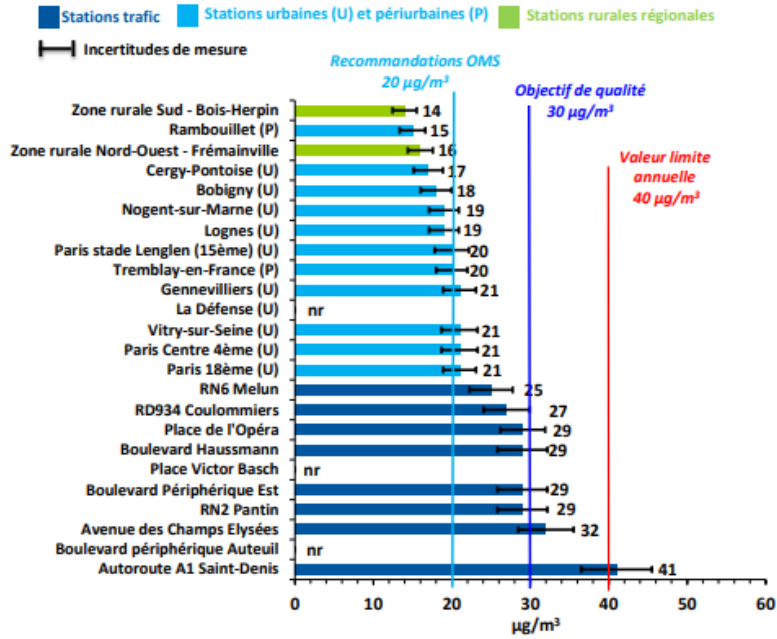


Figure IV.7. Concentrations moyennes annuelles des PM_{10} mesurées en Île de France en 2018. Source : Airparif (2020).

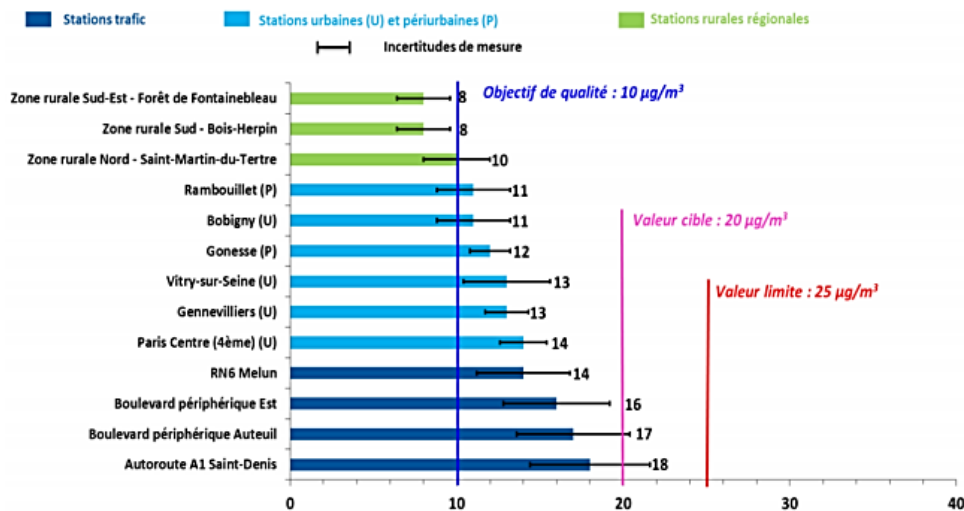


Figure IV.8. Concentrations moyennes annuelles des $PM_{2.5}$ mesurées en Île de France en 2018. Source : Airparif (2020).

Dans ce contexte, et compte-tenu des axes de recherches développés sur la thématique des aérosols dans d'autres zones climatiques et à d'autres échelles spatiales (§III), il m'est apparu naturel d'orienter mes recherches portant sur la **qualité de l'air en ville sur la pollution particulaire** en particulier, et à **très haute résolution**, ce qui représente un défi scientifique de taille, défi méthodologique, en tout premier lieu.

Quelle est alors la méthode la plus efficace pour quantifier, aux échelles fines, la pollution particulaire en ville ? Une approche de **télé-détection à très haute résolution spatiale** (THRS, pixels de quelques dizaines de centimètres à quelques mètres), habituellement mobilisée pour l'analyse des surfaces urbaines, ne serait-elle pas intéressante à adopter pour des applications atmosphériques (§IV.1) ?

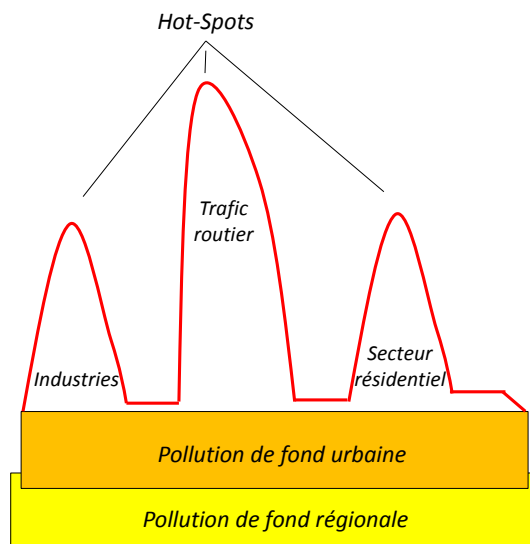


Figure IV.9. L'intégration des échelles dans l'étude de la pollution atmosphérique.
Figure extraite de la [thèse de Justin Emery \(2017\)](#), Partie B/§4.3.

Nous avons tenté l'expérience à partir de l'imagerie Pléiades, via le projet CNES Quali_ThR (Apport de la télédétection Très Haute Résolution Pléiades pour la qualité de l'air en ville) dont j'ai assuré la responsabilité scientifique ([Martiny \(2019-2021\)](#), Partie B/§2.1), en approchant la question de la quantification de la pollution particulaire à Dijon par le biais d'une première étape, celle de l'inversion des épaisseurs optiques des aérosols, AOD. En effet, l'AOD est l'un des produits le plus couramment utilisé en télédétection des aérosols (§II/Synthèse de la Partie II). Il s'agit d'un indicateur d'une quantité d'aérosols intégrée sur la colonne atmosphérique. Une approche de **géosimulation** serait-elle adéquate (IV.2) ? Des recherches pluridisciplinaires, menées notamment dans le cadre de la [thèse de Justin Emery \(2013-2016\)](#), dont j'ai assuré la co-direction, Partie B/§4.3, co-encadrée par les laboratoires ThéMa, le CRC Biogéosciences à l'Université de Bourgogne et l'Unité de Modélisation Mathématique et Informatique des Systèmes complexes (UMMISCO) de l'Institut de Recherches pour le Développement (IRD), ont permis d'éclairer ce point, par le biais de la modélisation des émissions de polluants atmosphériques automobiles. **Comment obtenir alors des concentrations de polluants en surface ?** Les modèles numériques de chimie-transport fournissent une piste intéressante ; cependant la qualité du produit en surface est critiquable, notamment lié à la difficulté de prendre en compte une surface réaliste (morphologie de la ville, albédos, végétation et sa dynamique) (§IV/Préambule) et des processus physico-chimiques complexes. Les modèles sont par ailleurs validés et calibrés grâce à quelques stations de mesures de référence disséminées dans la ville, ce qui peut paraître insuffisant au regard de l'hétérogénéité et de la complexité du milieu (§IV/Préambule). La mise en place d'un **réseau dense de mesures in-situ de concentrations de polluants particulaires** (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1) peut alors constituer un élément de réponse prometteur pour se « raccorder » à la surface, que ce soit à partir des AOD inversées par une approche de télédétection spatiale, à partir des émissions de polluants obtenues à partir d'une approche de géosimulation, ou encore à partir de concentrations modélisées à échelles fines par le biais de modèles de chimie-transport (§VI/Perspectives de recherches). La technologie émergente des micro-capteurs de qualité de l'air (§IV.3) apparaît alors comme une solution pragmatique viable pour le déploiement d'un tel réseau (§IV.4).

IV.1 Potentiel de l'imagerie satellitaire Pléiades

Dès les années 70, des études en télédétection spatiale ont porté sur la qualité de l'air (Lyons & Husar, 1976 ; Todd *et al.* 1979 ; Fraser *et al.*, 1984), en particulier la quantification de l'ozone troposphérique (Fishman *et al.*, 1987), à la fois GES et polluant gazeux secondaire. En effet, comme vu en §I.1, les aérosols peuvent être générés directement dans l'atmosphère (aérosols primaires) ou par le biais de processus chimiques complexes résultant par exemple de l'oxydation des NO_x et du SO₂ (aérosols secondaires). Dans les années 2000, la télédétection est également mobilisée pour suivre les transports longue distance des polluants (King *et al.*, 1999; Lelieveld *et al.*, 2002 ; Fishman *et al.*, 2008). Le dénominateur commun à ces études, menées en troposphère polluée et en troposphère libre, réside dans les résolutions spatiales investies, qui sont généralement basses, allant de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres et avec des images disponibles quotidiennement (Tableau IV.1). Ces produits conviennent pour mener des études en qualité de l'air aux échelles régionale, continentale voire globale et sur du long terme, dans un contexte de variabilité et de changement du climat. A noter que d'autres missions sont spécifiquement dédiées aux GES (estimation du CO₂ notamment) avec les capteurs OCO (2009) et OCO-2 (>2014), programme EOS de la NASA, ou les capteurs IBUKI (>2009), programme GOSAT de la JAXA, ou encore la future mission MicroCarb du CNES prévu au lancement en 2021.

Instrument/ Plateforme	Profondeur temporelle	Résolution spatiale¹ (km²)	Heure de passage à l'Equateur²	Polluants estimés
GOME/ERS-2	1995-2003	320 x 40	10 :30 _d	NO ₂ , HCHO, SO ₂ , O ₃
TOMS/ Earth Probe	1996-2006	24 x 39	10 : 30 _d	O ₃ Dust, BB
MOPITT/Terra	>2000	22 x 22	10 :30 _d	CO
AIRS/Aqua	>2002	14 x 14	1 :30 _a	CO, SO ₂
SCHIAMACHY/ Envisat	2002-2011	60 x 30	10 :30 _d	NO ₂ , HCHO, SO ₂ , CO, O ₃ ³
OMI/Aura	>2004	24 x 13	1:45 _a	NO ₂ , HCHO, SO ₂ , O ₃ ⁴ Dust, BB
TES/Aura	>2004	8 x 5	1:45 _a	CO, O ₃
GOME-2/MetOp	>2006	80x40	9:30 _d	NO ₂ , HCHO, SO ₂ , O ₃
IASI/MetOp	>2006	12 x 12	9:30 _d	CO, O ₃ , N ₂ O, NH ₃

¹ au nadir

² heure locale, orbite descendante notée a ; orbite ascendante notée a

³ complète l'ozone avec d'autres GES tels que H₂O, CO₂, CH₄

⁴ mesure également des polluants stratosphériques tels que les oxydes de brome et de chlore

Tableau IV.1. Missions satellitaires emblématiques pour l'estimation des polluants atmosphériques.

Par ailleurs, les missions spatiales étiquetées « qualité de l'air » sont principalement dédiées aux polluants gazeux, excepté certaines d'entre elles telle que TOMS/Earth Probe et OMI/Aura (précédemment décrits en §II/Tableau II.2) qui incluent des produits spécifiques pour les poussières désertiques et les particules issues de phénomènes de combustion.

Afin de prendre en compte un panel plus large d'aérosols, et embrasser de manière plus complète la pollution particulaire à partir de la télédétection spatiale, il est ici nécessaire de passer par un produit de référence en télédétection, intégrant tout type d'aérosols, les épaisseurs optiques des aérosols ou AOD, définie en §II/Questions Scientifiques. Les principales missions spatiales délivrant ce produit sur du long terme, et permettant d'envisager des études d'impacts sur la santé humaine, ont été listées en §II/Tableau II.2. Elles sont pour la plupart basse et moyenne résolutions spatiales et donc généralement peu adaptées aux thématiques urbaines. Par ailleurs, pour rappel, les AOD sont des indicateurs de la quantité d'aérosols intégrés sur la colonne atmosphérique.

Les études portant sur la pollution particulaire en surface à partir de la télédétection spatiale portent le plus souvent sur des méga-cités en se basant par exemple sur les produits moyenne résolution MODIS (Gupta *et al.*, 2006), ou bien combinent des produits moyenne à haute résolutions spatiales issus par exemple de MODIS/LANDSAT (Alvarez_Mendoza *et al.*, 2019), ou encore différentes sources de données (télédétection, modélisation et mesures *in situ*) (Krzyzanowski *et al.*, 2014). Dans la plupart des cas, les études portent sur des épisodes de pollution particuliers et établissent un lien statistique entre AOD et concentrations des PM en surface à l'échelle d'un pays (Kacenenbogen *et al.*, 2006) ou d'une ville (Retalis & Sifakis, 2010), mais n'inversent pas de manière systématique les concentrations des PM en surface à partir des AOD estimées par satellite. **La spatialisation de la pollution en surface (donc des PM) à partir de données de télédétection spatiale reste donc aujourd'hui encore un vrai défi.** Ainsi, si la qualité et la quantité des observations du système Terre-Atmosphère par satellite se sont considérablement accrues lors la dernière décennie, il n'existe pas de mission spatiale dédiée au risque lié à l'exposition des populations à la pollution. En attendant la future mission spatiale CNES/NASA MESCAL, dont l'objectif principal est la qualité de l'air, il est intéressant d'inverser des AOD à partir des missions existantes, à des résolutions spatiales adaptées au milieu urbain, hétérogène et complexe (§IV/Préambule), pouvant ensuite potentiellement être reliés à la pollution particulaire en surface. En résumé, réussir à obtenir des AOD à haute ou très haute résolutions spatiales constitue en tant que telle une avancée significative pour la qualité de l'air en ville.

On distingue **5 grandes familles de méthodes d'inversion des AOD**, répertoriées dans le cadre du projet CNES TELEPaF (Martiny (2017-2019), Partie B/§2.1), tirant partie des configurations multispectrales des capteurs satellitaires (King *et al.*, 1999). Les AOD sont déduites des réflectances atmosphériques ρ_{atm} , obtenues à partir de l'équation générique suivante :

$$\rho_{TOA} = \rho_{atm} + T_{atm} * \rho_s$$

où ρ_{TOA} désigne la réflectance apparente (ou TOA), ρ_s la réflectance de surface et T_{atm} transmission atmosphérique totale.

Les méthodes d'inversion des AOD font donc nécessairement des hypothèses sur les surfaces, plus difficiles à caractériser sur les terres émergées que sur les océans à cause de leur plus grande hétérogénéité spatiale. Elles ne peuvent pas non plus être appliquée uniformément à toutes les surfaces continentales (expliqué en §II.3 dans le cas de MODIS), ces dernières ayant des propriétés physiques très différentes. Elles ont généralement été développées pour la télédétection basse ou moyenne résolution.

La **méthode DDV** (Dense Dark Vegetation) consiste à inverser les aérosols sur des surfaces sombres telles que par exemple les surfaces de végétation particulièrement absorbantes dans le bleu et le rouge (Kaufman & Sendra, 1988). L'estimation des réflectances de surface peut alors se faire de deux manières. Une première méthode consiste à estimer a priori une valeur de ces réflectances. Une autre technique repose sur l'utilisation d'un rapport empirique, le rapport de Kaufman, entre les valeurs des réflectances de surface dans le visible et le SWIR (de Almeida Castanho *et al.*, 2007). En effet, à partir d'acquisitions MODIS, AVIRIS et LANDSAT, les études de Kaufman *et al.* (1997a, 1997b) ont montré que les réflectances des surfaces sombres sont corrélées dans le domaine réflectif. Ainsi, les aérosols étant globalement transparents dans le SWIR, des mesures autour de 2.1 μm voire de 3.8 μm permettent de détecter si un pixel est sombre ou non, et si c'est le cas, d'inverser la réflectance de surface dans le SWIR afin d'estimer sa valeur dans le rouge (0.66 μm) et dans le bleu (0.47 μm). La réflectance de surface étant alors connue dans le visible, la contribution des aérosols dans ce domaine de longueurs d'onde peut être déduite. A titre indicatif, une erreur de 0.005 à 0.01 sur la réflectance de surface se traduit par une erreur de 0.05 à 0.1 sur les AOD (King *et al.*, 1999). La méthode DDV est optimisée pour des réflectances de surface $\leq 6\%$ (Hernandez *et al.* 2007). Elle ne sera donc pas la plus performante en milieu urbain où les surfaces sombres et la végétation ne sont pas dominantes (§IV/Préambule). Gross *et al.* (2004) ont proposé par la suite une amélioration de la méthode des rapports de Kaufman pour les milieux urbains en définissant de nouveaux coefficients à partir d'images satellitaires hyperspectrales Hyperion de 30m de résolution spatiale, mais aucune étude de validation n'a été présentée pour les AOD.

La **méthode ARIA** (Aerosol Retrieval by Interrelated Abundances), adaptée aux instruments hyperspectraux (Bojinski *et al.*, 2004), a été utilisée en milieu urbain. Cette technique, tout comme la méthode DDV de Kaufman, s'appuie sur une estimation des réflectances de surface dans le visible à partir de mesures de celles-ci dans le SWIR. Son principe consiste à caractériser la surface dans le SWIR par une méthode de démixage à partir d'une base de données de réflectances. Les réflectances des pixels étudiés dans le visible sont alors extrapolées à partir des spectres des surfaces inversées dans l'infrarouge, et ainsi, l'épaisseur optique des aérosols est déterminée à 550nm (pour tous les pixels de l'image) pour un modèle d'aérosols donné. Malheureusement, dans cette étude non plus, aucune validation n'a été réalisée à partir de mesures terrain.

La **méthode multi-angulaire** repose sur l'observation d'une même cible sous différents angles de visée. Elle a été développée pour des capteurs tels que AATSR-2 (Along Track Scanning Radiometer) permettant deux visées (nadir et avant) ou encore MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer) permettant jusqu'à 9 visées (nadir, 4 visées avant et 4 visées arrières). Les estimations des AOD sont réalisées en sélectionnant le modèle d'aérosols, l'épaisseur optique ainsi que la réflectance de surface qui permettent de décrire au mieux les mesures effectuées pour les différentes inclinaisons (Veefkind *et al.*, 1998 ; Martonchik *et al.*, 2004). Avec cette technique, l'inversion des aérosols au-dessus de zones très réfléchissantes est possible. Des précisions de l'ordre de 0.05 à 0.06 sur les AOD ont été obtenues avec l'instrument AATSR (Llewellyn-Jones *et al.*, 2001), et de l'ordre de 0.05 avec l'instrument MISR (Martonchick *et al.*, 1998).

La **méthode basée sur la polarisation de la lumière**, développée pour des capteurs de type POLDER (Leroy *et al.*, 1997), est basée sur les capacités des surfaces terrestres et des aérosols à polariser la lumière. Alors que la lumière réfléchi par le sol a une très faible

polarisation, la lumière diffusée par les aérosols est, elle, fortement polarisée. Par conséquent, la contribution des aérosols au signal détecté au sommet de l'atmosphère est plus importante pour la lumière polarisée. L'utilisation d'un instrument sensible à cette composante permet donc de détecter plus facilement ces particules. Bien que la composante de surface soit faible dans ce cas, il est tout de même nécessaire de l'estimer. Cela est rendu possible en utilisant des bases de données existantes de réflectances bidirectionnelles polarisées de surface (Nadal & Bréon, 1999). Avec cette méthode, des précisions typiques de l'ordre de 0.05 ont été constatées sur l'inversion des AOD (Léon *et al.*, 1999). La limite de cette méthode est qu'elle est peu adaptée à la détection des particules grossières qui polarisent très peu la lumière.

Enfin, la **méthode de réduction de contraste** (Holben *et al.*, 1992), basée sur l'utilisation de données multi-temporelles, présente de nombreux avantages, dont la caractérisation des particules atmosphériques y compris au-dessus de surfaces très réfléchissantes. Cette technique présente également l'avantage de ne pas être contrainte par la résolution spatiale ou la configuration spectrale de l'instrument. Elle se base sur l'observation de deux pixels voisins d'une même image. La différence de réflectance TOA des deux pixels adjacents s'écrit alors de la manière suivante :

$$\Delta\rho_{toa} = \Delta\rho_{atm} + \Delta T_{atm} * \rho_s + T_{atm} * \Delta\rho_s$$

Le terme atmosphérique est considéré identique pour les deux pixels adjacents, impliquant $\Delta\rho_{atm}=0$. Ensuite, une image acquise lors d'une journée claire permet de connaître la différence de réflectance de surface ($\Delta\rho_s$). La différence de réflectance TOA, $\Delta\rho_{TOA}$, ne dépend alors que de la différence de transmissions atmosphériques ΔT_{atm} , qui peut être attribuée à une variation de la quantité d'aérosols et donc des AOD. Les précisions obtenues à l'aide de cette méthode, appliquée par exemple aux données satellitaires AVHRR, donc basse résolution, sont de l'ordre de 0,10 (Holben *et al.*, 1992), ce qui est comparable à la méthode DDV. Cependant, cette technique possède plusieurs inconvénients. Elle nécessite tout d'abord d'avoir à disposition une acquisition réalisée pour une atmosphère dégagée d'aérosols, celle-ci servant de référence. Ensuite, les surfaces pouvant présenter des caractéristiques bidirectionnelles, des précautions sont nécessaires afin de minimiser leurs effets (Tanré *et al.*, 1992). Enfin, et c'est le principal problème posé par cette technique, les surfaces peuvent évoluer au cours du temps et donc perturber les inversions. Cette méthode a été appliquée en zones urbaines, notamment à Athènes, afin d'estimer les AOD à partir de données haute résolution SPOT (Sifakis & Deschamps, 1992 ; Sifakis *et al.*, 2003) et LANDSAT (Sifakis *et al.*, 1998). Ces études ne présentent cependant pas de comparaisons avec des mesures d'épaisseur optique.

C'est sur la base de ces expériences et travaux que nous avons investi, dans le cadre du projet CNES Quali_ThR, la question de l'inversion des AOD à partir de l'imagerie à très haute résolution spatiale à Dijon (Martiny (2019-2021), Partie B/§2.1). Des recherches en collaboration avec l'ONERA-DOTA ont permis en particulier de mener des études exploratoires sur le potentiel du capteur THRS Pléiades (Tableau IV.2) via une **méthode ombre/soleil** par différence. Celle-ci s'inspire de la méthode de réduction de contraste puisqu'elle compare des pixels voisins ; l'élément nouveau est que nous avons proposé de la tester sur des images THRS et non HRS comme cela avait été le cas jusqu'ici (Vincent *et al.*, 2005 ; Vincent, 2006). L'avantage est qu'elle ne nécessite qu'une seule acquisition, en étant

basée sur l'observation de transitions entre des zones à l'ombre et des zones au soleil sur l'image. Les AOD peuvent ainsi être inversées en faisant un minimum d'hypothèses. Cependant, tout comme l'ensemble des méthodes d'inversion des AOD présentées, elle requiert **l'estimation des réflectances des surfaces** (Figure IV.10), ce qui a été une contrainte assez forte pour les études à mener à Dijon (Figure IV.11).

Nous avons choisi **Pléiades** pour plusieurs raisons. Tout d'abord, le capteur Pléiades 1A, lancé en décembre 2011 et son jumeau, Pléiades 1B, lancé en 2012, sont positionnés en opposition de phase sur la même orbite polaire, permettant ainsi une revisite quotidienne en tout point du globe. Cette configuration est particulièrement intéressante dans le cas de capteurs THRS dont la fréquence de revisite excède généralement plusieurs jours voire plusieurs semaines dans certaines régions nuageuses. En plus de cela, les Pléiades sont des satellites légers (~1000 kg) et agiles ; ils peuvent ainsi changer rapidement d'orientation et effectuer des prises de vues dans toutes les directions, ceci peut être intéressant pour des acquisitions en automne aux latitudes tempérées comme celles de Dijon. Enfin, au moment du démarrage de nos recherches sur ce thème, seulement 2 images Pléiades (non exploitées) avaient été acquises à Dijon, l'une en 2015 et l'autre en 2016. Par ailleurs, exploiter ces images, habituellement mobilisées pour des applications « surfaces », que ces dernières soient de nature continentales (Stumpf *et al.*, 2014 ; Dupuy *et al.*, 2020), côtières (Almar *et al.*, 2017), ou urbaines (Hashim *et al.*, 2019 ; Pu *et al.*, 2020), pour inverser des AOD en ville n'était pas une exploitation des plus courantes.

Capteur	Lancement	Orbite	Images /jour	Revisite	Fauchée (nadir)	Canaux	Rés. spatiale ⁵
Pléiades 1A	17/12/2011	Héliosynchrone quasi-circulaire	450 ¹	2 jours	20km ²	4 MS ³	2m
Pléiades 1B	01/12/2012	Alt. 694 km Loc. 10 :15d				1 PAN ⁴	50cm

¹ Les capteurs sont équipés de détecteurs CCD d'une nouvelle génération dotés d'une sensibilité très élevée, ce qui permet de réduire les temps d'exposition pour chaque prise de vue, d'où l'augmentation du nombre d'images acquises par jour

² 100km en mosaïque

³ MS : multispectral (Bleu 430-550nm ; Vert 500-620nm ; Rouge 590-710nm ; PIR 740-940nm)

⁴ PAN : panchromatique (470-820nm)

⁵ La fusion des 2 types de produits permet d'obtenir des images couleur à 50cm de résolution spatiale

Tableau IV.2. Caractéristiques des capteurs Pléiades du programme de coopération franco-italien ORFEO (Optical and Radar Federated Earth Observation)

En 2019, après demande de programmation des images Pléiades à Airbus Defense and Space à Dijon, 4 images Pléiades ont été acquises à Dijon afin d'initier un travail original sur le thème de la qualité de l'air. L'une des 4 images, acquise le 04/08/2019, s'est avérée exceptionnellement claire avec une visibilité de 61km, permettant d'estimer les réflectances de surface spectrales, en l'absence de mesures spectrométriques de terrain à Dijon. Cette image constitue aujourd'hui une image de référence à Dijon, image dite de « Rayleigh ». Les autres images, acquises les 15/02, 20/03 et 12/09/2019, ont permis de tester la méthode ombre/soleil par différence pour la première fois sur des acquisitions THRS.

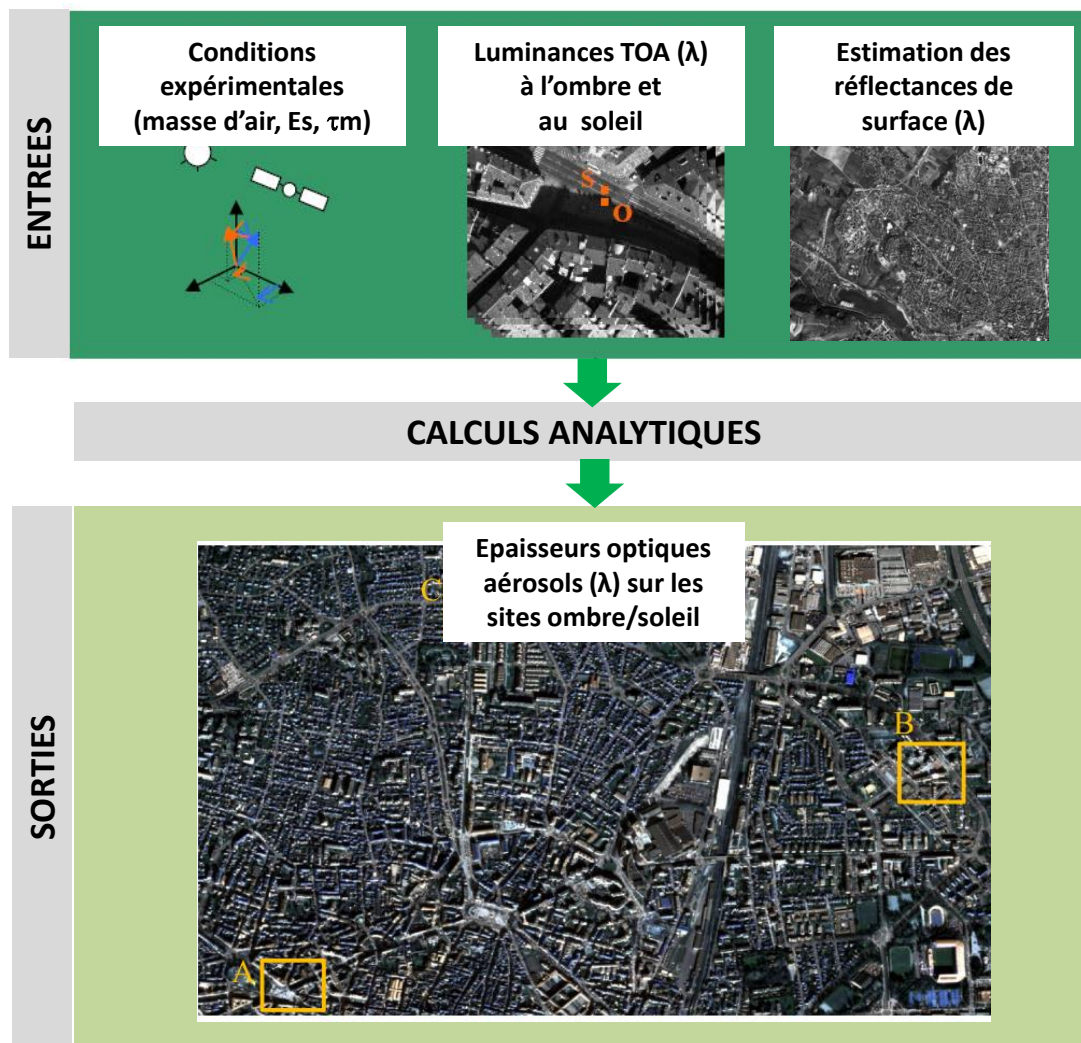


Figure IV.10. Schéma de principe de la méthode ombre/soleil par différence appliquée sur une image Pléiades acquise à Dijon en 2019. Courtesy : X. Briottet. Figure adaptée de l'ONERA-DOTA.

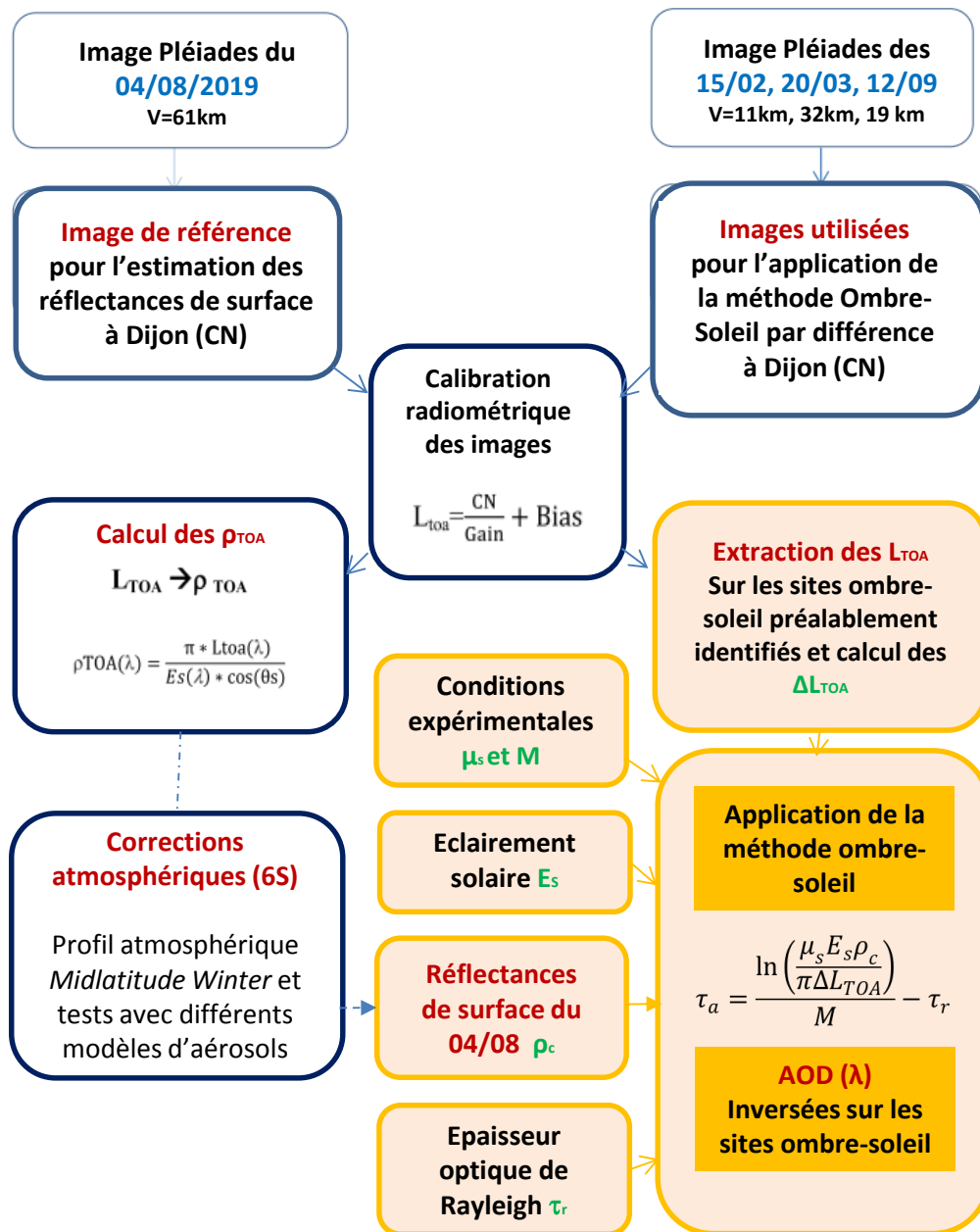


Figure IV.11. Méthodologie d'inversion des AOD à partir de Pléiades à Dijon en utilisant une méthode ombre/soleil par différence.



Figure IV.12. Types de surface des sites ombre/soleil sélectionnés à Dijon et réflectances associées, extraites de l'image Pléiades du 04/08/2019 après corrections atmosphériques.
Figure extraite de stage de M2 de Maha Hidane (2019), Partie B/§4.3.

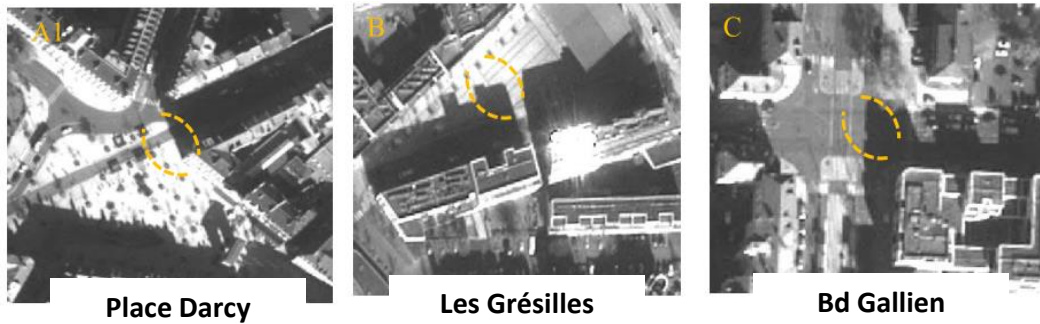


Figure IV.13. Sites sélectionnés pour l'application de la méthode ombre/soleil par différence à Dijon à partir de l'image du 15/02/2019 (Place Darcy : Dalles de comblanchien ; Les Grésilles : Gravier agglomérés ; Bd Gallien : Goudron).
Figure extraite du stage de M2 de [Maha Hidane \(2019\)](#), Partie B/§4.3.

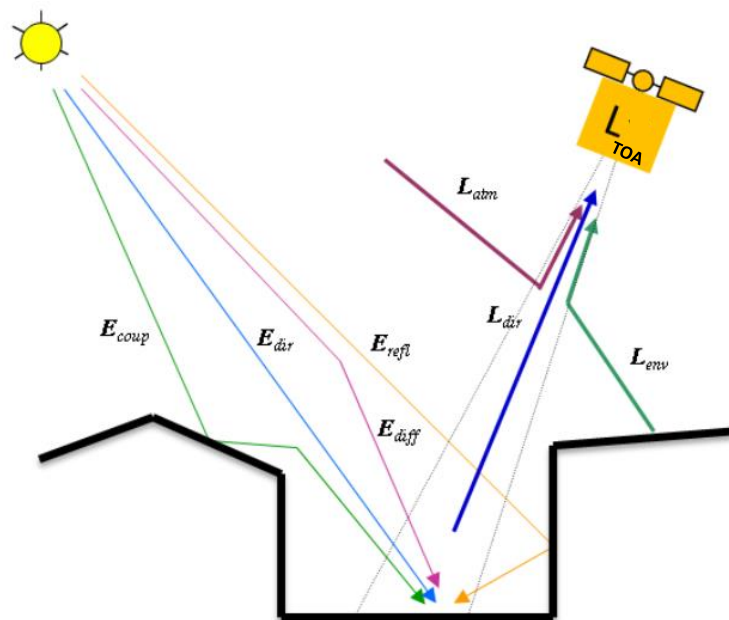


Figure IV.14 Décomposition de la luminance spectrale L_{TOA} reçue par le capteur satellitaire au sommet de l'atmosphère. Figure extraite du stage de M2 de [Maha Hidane \(2019\)](#), Partie B/§4.3.

Cette méthode a pu être testée pour des cibles aux réflectances variées, indiquant des surfaces plutôt réfléchissantes ($\sim 20\%$) ou plutôt absorbantes ($\sim 10\%$) (Figure IV.12). Ces réflectances, extraites de l'image de référence du 04/08/2019 après corrections atmosphériques, ont été comparées avec la bibliothèque spectrale de l'ONERA constituée à Toulouse. Un certain nombre de sites dijonnais a ainsi été identifié pour l'application de la méthode ombre/soleil par différence (Figure IV.13).

La décomposition de la luminance au sommet de l'atmosphère, L_{TOA} , peut alors s'écrire selon :

$$L_{TOA} = L_{atm} + L_{dir} + L_{env} + E_{tot} \frac{\rho_c}{\pi} T_{dir\uparrow}$$

où L_{atm} est la luminance atmosphérique, L_{dir} la luminance directe, L_{env} la luminance d'environnement, E_{tot} l'éclairement total, ρ_c la réflectance de surface de la cible considérée et $T_{dir\uparrow}$ la transmission directe montante (Figure IV.14).

Après mise en équation de la méthode ombre/soleil, soit le calcul de $\Delta L_{TOA} = L_{TOA}$ (au soleil) – L_{TOA} (à l'ombre), l'AOD, notée τ_a , peut être exprimée, pour chacun des sites préalablement défini, selon :

$$\tau_a = \frac{\ln\left(\frac{\mu_s E_s \rho_c}{\pi \Delta L_{TOA}}\right)}{M} - \tau_r$$

avec μ_s le cosinus de l'angle zénithal solaire, M la masse d'air totale, E_s l'éclairement solaire au sommet de l'atmosphère, ρ_c la réflectance de surface de la cible considérée, ΔL_{TOA} la différence entre les luminances spectrales TOA à l'ombre et au soleil, et τ_r l'épaisseur optique moléculaire. Les AOD spectrales ainsi obtenues ont été comparées à des mesures d'AOD réalisées avec des photomètres solaires portatifs de type CALITOO. Les résultats préliminaires indiquent des écarts atteignant +0.04 entre les AOD Pléiades et les AOD CALITOO pour des sites dont les réflectances de surface sont de l'ordre de 20% (stage de M2 de [Oumaima Zazza \(2021\)](#), Partie B/§4.3). Les résultats sont moins cohérents pour des sites aux réflectances plus faibles. Ceci est en complet accord avec les résultats de Vincent (2006), d'après des tests réalisés sur des acquisitions Quickbird (résolution spatiale de 2,4m en mode multispectral), avec des précisions obtenues de l'ordre de $\pm 0,04$ sur les AOD (comparaison avec AERONET) sur des sites dont les réflectances sont supérieures à 15%.

Ces recherches préliminaires réalisées notamment par le biais de 2 stages de M2 de [Maha Hidane \(2019\)](#) et [Oumaima Zazza \(2021\)](#), dont j'ai assuré la direction, Partie B.§4.3, ont permis de faire la preuve de la méthode d'inversion des AOD basée sur la méthode ombre/soleil par différence sur des images de résolution spatiale de 2.8m en multispectral, en plusieurs points de la ville de Dijon. Elles ouvrent ainsi la voie à la caractérisation et au suivi de la pollution particulaire en ville à partir de la télédétection haute et très haute résolutions. Il s'agira par la suite de spatialiser les AOD à THRS, puis de les relier aux mesures des concentrations particulières en surface en tenant compte de la variabilité de la relation entre AOD et PM à ces échelles (§VI/Perspectives de recherches). Cela implique en réalité de pouvoir bénéficier d'un réseau de mesures de qualité de l'air le plus dense possible (§IV.3-4). Ceci implique également de caractériser de manière rigoureuse, à l'aide de campagnes de mesures spectroradiométriques, les réflectances de surface sur le sol dijonnais. Si la méthode ombre/soleil semble performante, elle s'avère en effet particulièrement sensible à la qualité de l'image en réflectance de surface utilisée comme référence pour calculer les AOD. Ces recherches ouvrent la voie à de nouvelles collaborations (§IV/Perspectives de recherches).

Ces recherches en méthodes physiques en télédétection s'avèrent complémentaires aux développements méthodologiques très récemment investis sur le territoire dijonnais dans le domaine de la qualité de l'air, approches de géosimulation de type SMA (§IV.2).

IV.2 La SMA pour la pollution atmosphérique automobile

La pollution particulaire en ville, par principe de subsidiarité, peut être vue comme la superposition d'une pollution à l'échelle urbaine (niveau de pollution de fond) et d'une pollution de proximité (hot-spots de pollution), source d'émission dont l'intensité peut à son tour jouer un rôle sur les niveaux de fond urbain (Keuken *et al.*, 2011). La pollution de proximité en ville est très fortement influencée par le trafic routier ; par ailleurs, la proximité automobile primant sur le fond urbain n'est ni un phénomène exclusivement hivernal, ni uniquement lié aux jours ouvrés. C'est ainsi que le travail s'est porté naturellement **sur l'estimation de la pollution, en particulier particulaire, en lien avec le trafic routier**. Ces recherches ont été réalisées dans le cadre de la [thèse de Justin Emery \(2013-2016\)](#), dont j'ai assuré la co-direction, Partie B/§4.3, co-encadrée par les laboratoires Théma, le CRC Biogéosciences à l'Université de Bourgogne et l'UMMISCO de l'IRD.

La démarche scientifique adoptée dans le cadre de cette thèse se situait à l'interface entre géographie (modélisation du trafic routier), informatique (développement d'un modèle de simulation multi-agents) et physique de l'environnement (pollution atmosphérique). L'objectif était d'obtenir les émissions des polluants au plus proche de la source « trafic » (§IV/Contextualisation et questions scientifiques), à partir d'une méthode de géocomputation (Openshaw & Abrahart, 2000), domaine de recherches à l'interface entre la géographie, l'informatique et les statistiques, qui cherche à résoudre les problèmes du monde réel en insistant sur leur inscription spatiale et temporelle (Miller, 2015). Parmi les approches de **géosimulation**, outil largement investi par les géographes pour la représentation de dynamiques spatio-temporelles (Benenson & Torrens, 2004), la **Simulation Multi-agents** (SMA) (Boman & Holm, 2004 ; Sanders, 2007 ; Banos, 2013) permet d'obtenir des résultats au plus proche de la réalité. En effet, cette approche est guidée par les données, concept **data-driven** initié en réponse aux flux massifs de données issues des systèmes de capteurs et des individus (Miller & Goodchild, 2014). Bien que n'étant pas intervenue sur les aspects géosimulation de la thèse, je donne ci-après un résumé du travail réalisé en SMA afin de mieux comprendre comment les interactions entre le modèle SMA et le module d'émissions de polluants ont été construites. Cette approche sera par la suite mobilisée pour des applications dans le domaine de la santé (§VI/Perspectives de recherches).

En effet la SMA fournit un cadre expérimental de modélisation qui permet d'étudier un système réel. Dans le cadre de la thèse de [Justin Emery \(2016\)](#), Partie B/§4.3, le cadre réel était le trafic routier dans la ville de Dijon. La SMA est rendue possible sur ce territoire car Dijon dispose d'un réseau exceptionnellement dense de capteurs électromagnétiques fixes (>150) sur du long terme (>2001) et à un pas de temps fin (15mn). La SMA est également apparue adaptée car elle s'inscrit dans une démarche de modélisation parcimonieuse, s'inscrivant dans le cadre de la théorie des **systèmes complexes** (Mitchell & Newman, 2002), et permettant ainsi de formaliser et de conceptualiser le trafic routier autour des éléments les plus simples le définissant, c'est-à-dire le réseau routier et les véhicules (Figure IV.15). Ce n'est pas le cas des approches dites classiques de modélisation en géographie des transports dont la formulation en quatre étapes est la plus connue (Bonnell, 2002) et dont les estimations du trafic en ville résultent d'hypothèses sur la demande des usagers potentiels du système de transport, sur l'offre de transport et leurs interactions. Par ailleurs, la simulation multi-agents du trafic routier permet une représentation spatio-temporelle du trafic bien plus avancée que les modèles actuels qui sont souvent plus agrégés autant dans le temps que dans

l'espace. Ces modèles dynamiques permettent ainsi une représentation très fine des conditions de circulation routière.

La chaîne de traitement développée dans le cadre de cette thèse s'appuie sur 3 étapes (Figure IV.16) :

- (i) Etape 1. La quantification du trafic en ville en utilisant les données issues d'un réseau de comptages routiers ;
- (ii) Etape 2. La simulation multi-agents des dynamiques spatiales et temporelles du trafic routier à partir de l'étape de quantification précédente ;
- (iii) Etape 3. Le calcul des émissions de polluants automobiles en se rattachant aux référentiels nationaux utilisés par les AASQA (Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air).

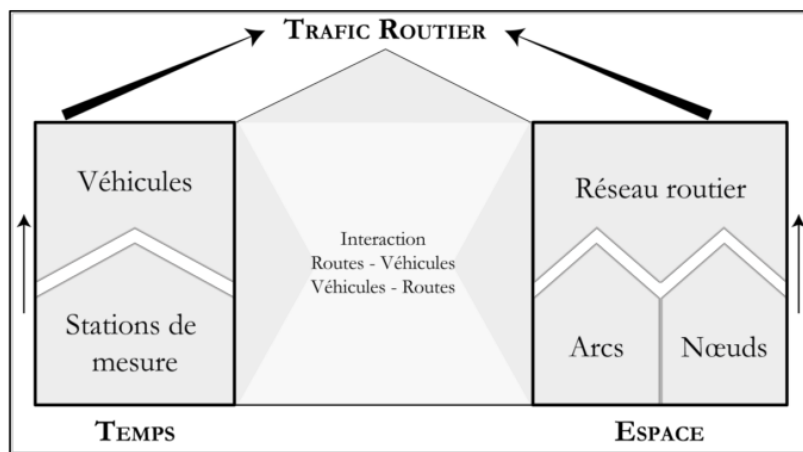


Figure IV.15. Conceptualisation du trafic routier tel qu'envisagée dans la thèse de Justin Emery (2016), Partie B/§4.3.

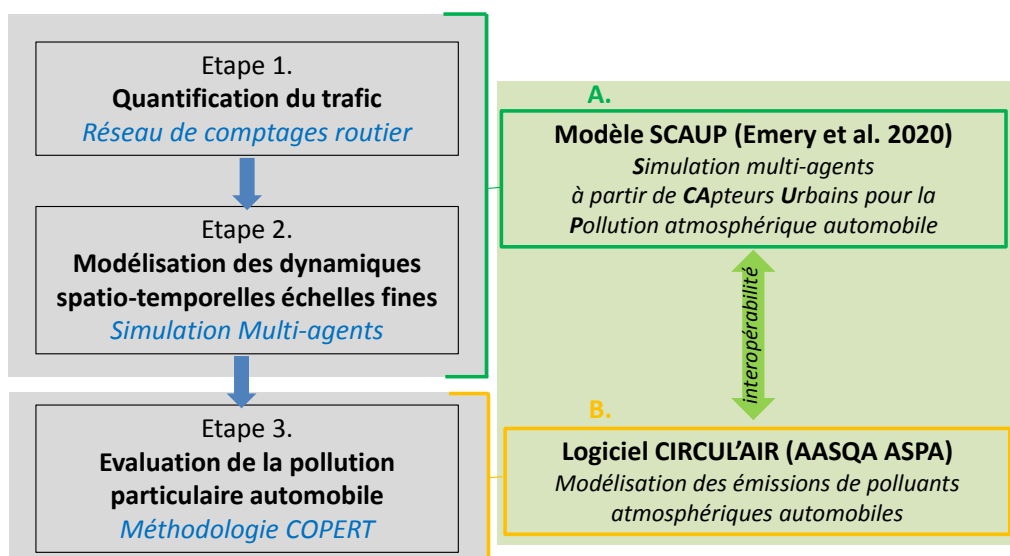


Figure IV.16. Méthodologie d'évaluation de la pollution atmosphérique en ville telle que développée dans la thèse de Justin Emery (2016), Partie B/§4.3.

Les étapes 1 et 2 ont été traitées via le développement du **modèle SCAUP** (Simulation multi-agents à partir de Capteurs Urbains pour la Pollution atmosphérique automobile) (Emery *et al.* (2020), Partie B/§5.1). L'étape 3 a été traitée via l'interopérabilité entre SCAUP et le logiciel CIRCUL'AIR développé par l'ASPA (Association pour la Surveillance et l'Étude de la Pollution Atmosphérique en Alsace) depuis les années 1990 et aujourd'hui utilisé par toutes les AASQA françaises pour modéliser les émissions de polluants atmosphériques automobile. Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'AASQA locale ATMOSF'AIR BOURGOGNE (aujourd'hui ATMO-BFC, Bourgogne Franche Comté).

Tout d'abord, le modèle SCAUP permet de visualiser la fréquentation des véhicules sur les infrastructures de transport d'un espace urbain en direct. La démarche se construit sur une approche générative du trafic routier se structurant autour d'un environnement fixe (réseau routier constitué d'axes et d'intersections) généré à partir d'un SIG (fichiers de forme linéaire) et d'agents (comptages routiers issus d'un réseau de capteurs urbains) permettant de générer des véhicules dynamiques (Figure IV.17). L'un des gros avantages de la simulation du trafic routier avec SCAUP est qu'elle nécessite peu de données en entrée.

L'ensemble s'appuie sur la plateforme de simulation multi-agents GAMA (Grignard *et al.*, 2013). Le modèle SCAUP a ensuite été calibré (Figure IV.18), pas à pas, par validation croisée, en analysant la capacité du modèle à conserver la mesure exacte associée à un axe routier équipé d'un capteur ; en effet, de la qualité de la simulation du trafic routier dépend ensuite celle des émissions de polluants atmosphériques.

Le modèle SCAUP permet de reproduire un trafic routier émergent sur une journée complète à une granularité temporelle très fine : la minute. Le trafic s'avère ainsi simulé de manière réaliste sur un réseau de taille modéré, constitué d'un total de 48 axes, point de départ essentiel avant de passer à l'estimation de la pollution. L'interopérabilité entre le modèle SCAUP et le logiciel CIRCUL'Air est alors devenue possible.

CIRCUL'Air a besoin, en entrée (Figure IV.19), du parc automobile (Figure IV.20), des profils temporels (Figure IV.21) et du trafic simulé par tronçon, fourni ici par SCAUP (Figure IV.22). L'évaluation des émissions de polluants atmosphériques, gazeux et particulaires, repose sur la méthodologie européenne COPERT (COmputer Programme to calculate Emissions from Road Transport) (Ntziachristos & Zissis, 2009), basée sur la définition d'une loi d'émission valable pour un polluant donné $E_{s,t}$ et selon la formule suivante (Chanut & Chevallier, 2012):

$$E_{s,t} = \sum_j A_{j,t} * (f_{ij,t} * n_{j,t}) \quad \text{avec } N = \sum_j n_j$$

Cette formule tient compte d'un temps donné t d'une substance polluante s pour un trafic routier N dont on distingue K sous-groupes de n_j ($j \in [1,K]$) types de véhicules (catégories, normes EURO). Le facteur d'émission est noté f .

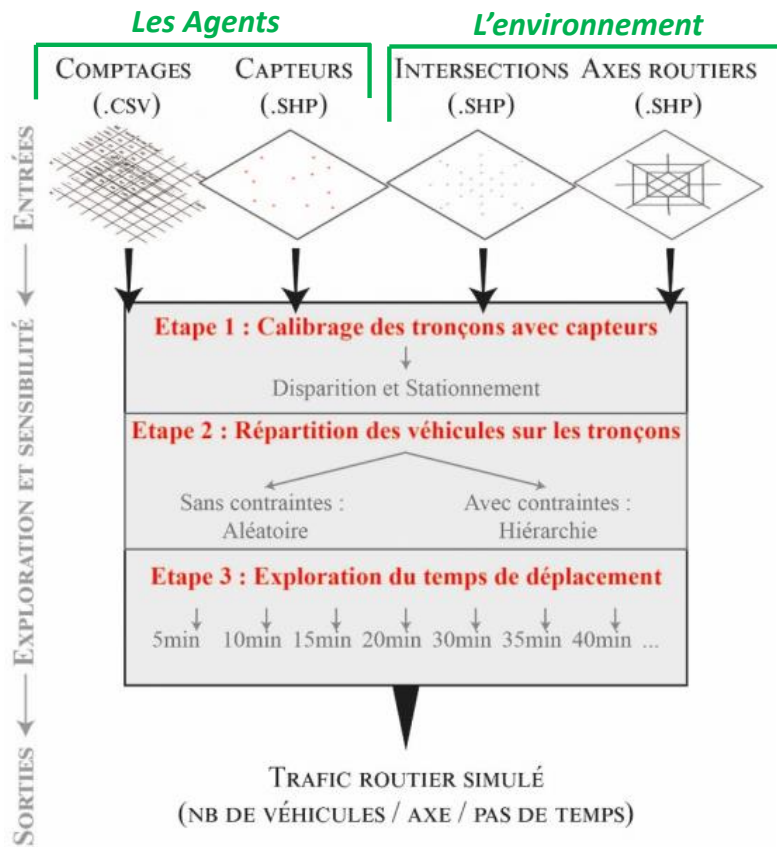


Figure IV.17. Les paramètres du modèle SCAUP. Figure adaptée de Emery et al. (2020), Partie B/§5.1.

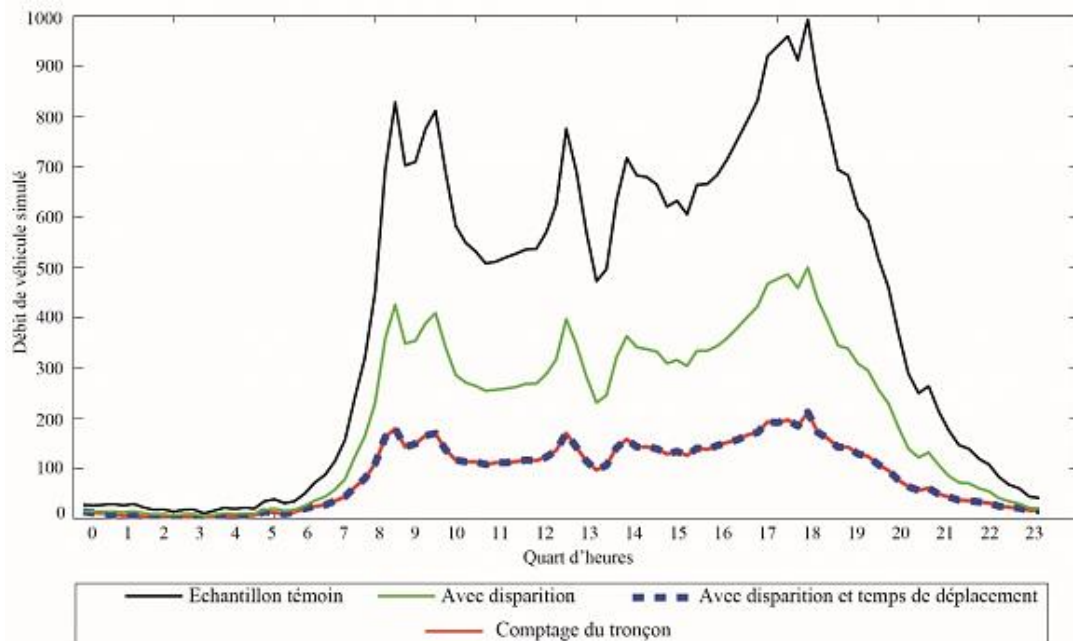


Figure IV.18. Calibrage des axes possédant des stations de mesure (moyenne des 15 axes équipés de capteurs). En noir, la simulation est réalisée sans disparition et sans temps de déplacement (témoin). En vert, la disparition des véhicules est introduite. En rouge, un temps de déplacement limité à 30mn est introduit. Figure extraite de Emery et al. (2020), Partie B/§5.1.

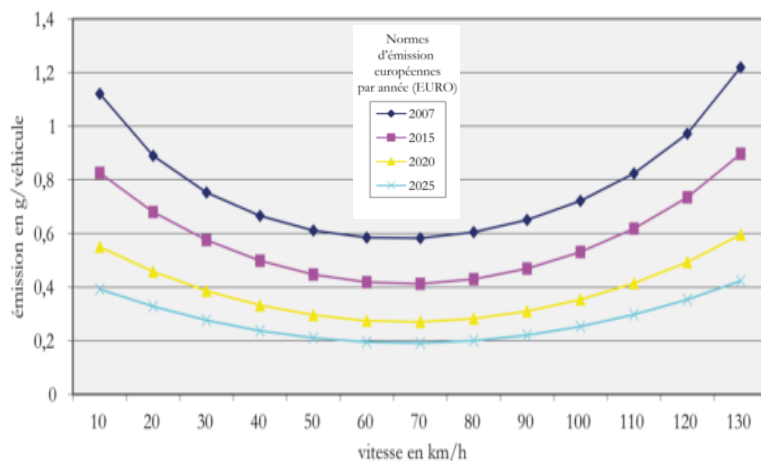
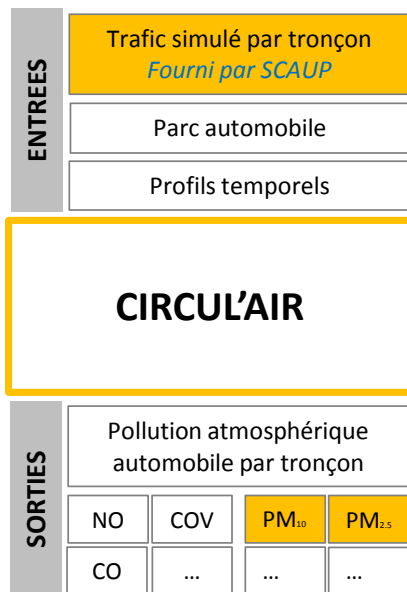


Figure IV.19. Interopérabilité entre le modèle SCAUP et le logiciel CIRCUL'AIR (à gauche) et exemple des émissions d'oxydes d'azote pour les véhicules légers en fonction de la vitesse de circulation (à droite). Figures adaptées de la thèse de Justin Emery (2016), Partie B/§4.3.

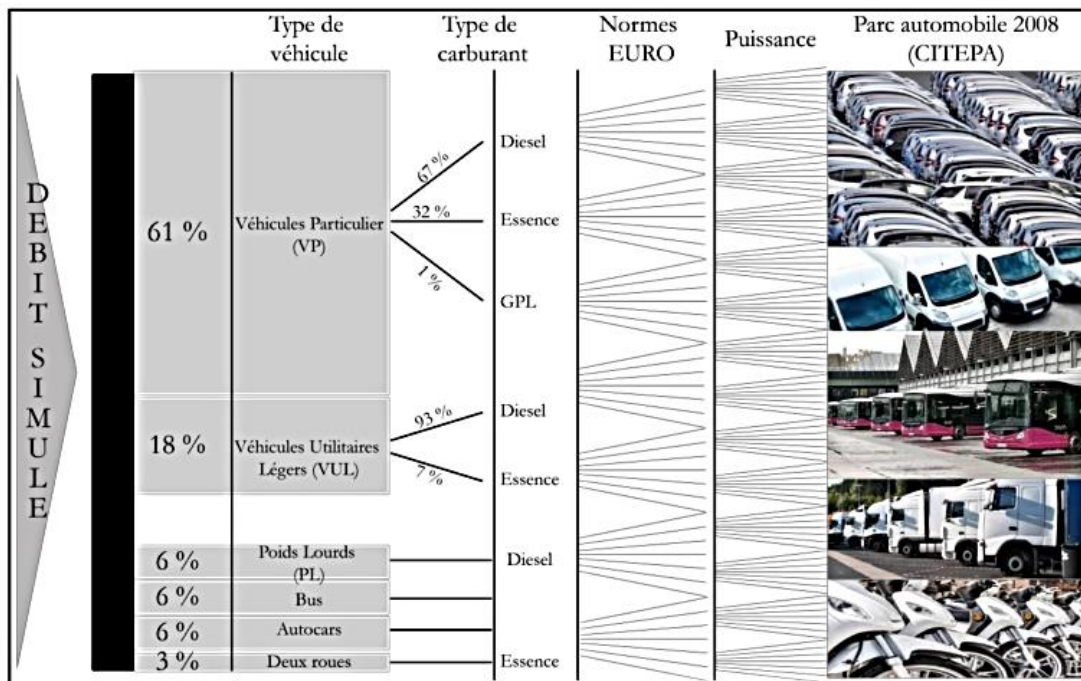


Figure IV.20. Processus de ventilation du parc automobile sur les données de trafic routier simulé dans CIRCUL'AIR. Figure extraite de la thèse de Justin Emery (2016), Partie B/§4.3.

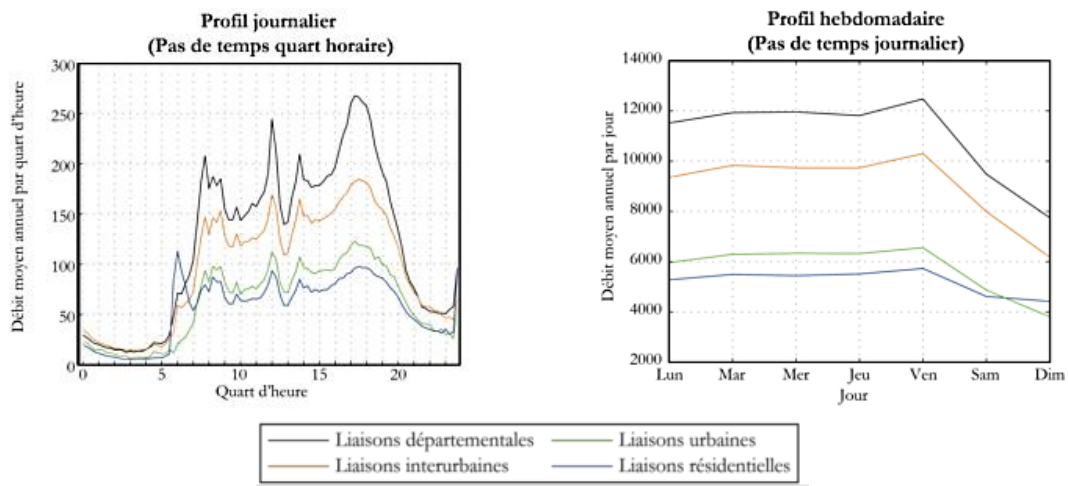


Figure IV.21. Profils types de la fréquentation des axes routiers en journalier et hebdomadaire et selon la hiérarchie des voies issues de la BD TOPO pour l'année 2008. Figure extraite de la thèse de Justin Emery (2016), Partie B/§4.3.

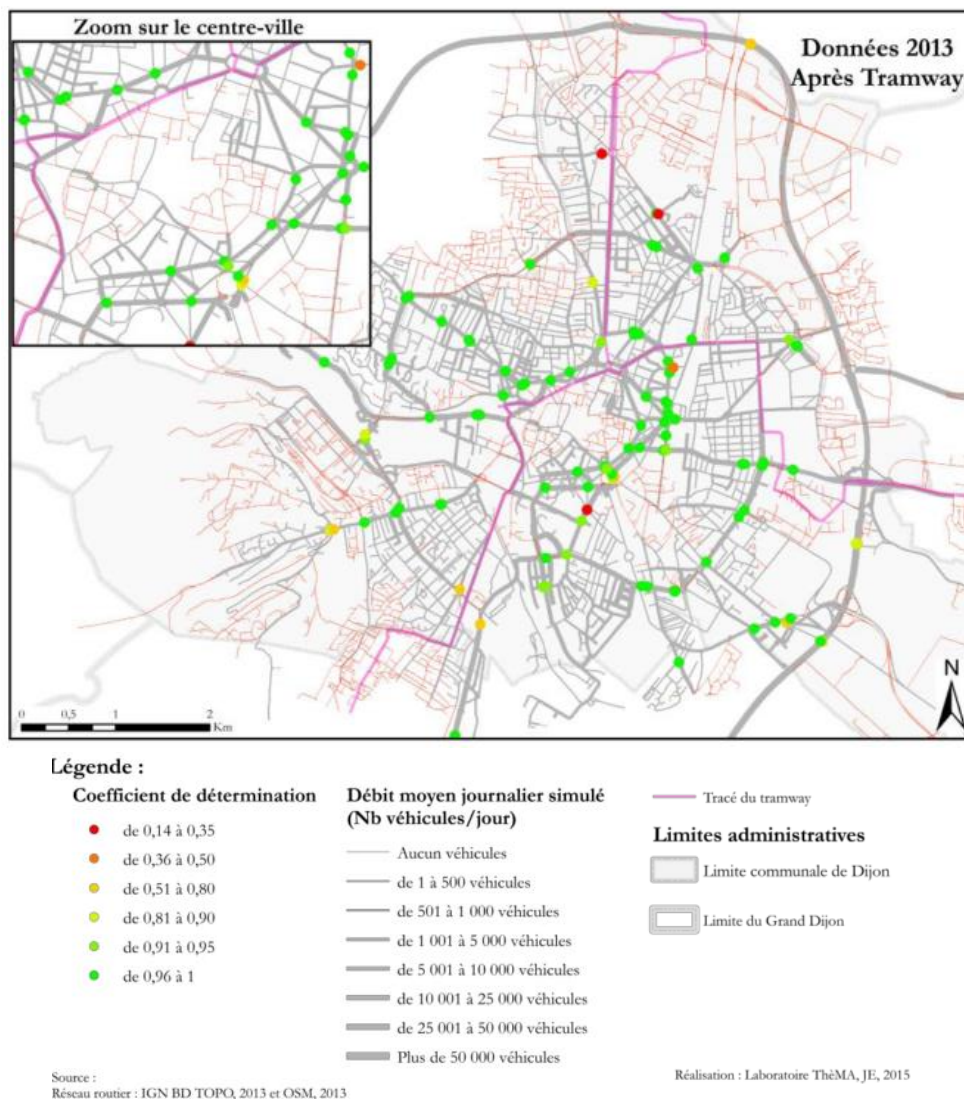


Figure IV.22. Trafic routier simulé par tronçon à Dijon après l'implantation du Tramway. Figure extraite de la thèse de Justin Emery (2016), Partie B/§4.3.

COPERT permet de calculer les émissions des polluants (exemple des oxydes d'azote en Figure IV.16) en fonction des évolutions technologiques des véhicules (par exemple norme EURO), des types de véhicules et de leur vitesse. L'apport de SCAUP dans CIRCUL'AIR réside dans l'intégration de valeurs de débit de trafic simulé au pas de temps de la minute et au niveau des tronçons. Ainsi, la démarche SCAUP permet d'affiner les estimations de polluants, notamment à l'échelle des quartiers résidentiels qui sont généralement peu pris en compte lors des études d'impact du trafic routier, alors qu'elles constituent des zones essentielles (les individus y étant, dans la pratique, bien plus présents).

Les résultats obtenus sur la ville de Dijon (Emery (2016), Partie B/§4.3) permettent de visualiser les émissions de polluants atmosphériques par axe routier. La confrontation des émissions simulées aux mesures de l'AASQA locale ATMO-BFC indique, pour les 4 polluants principaux du trafic routier, les NO_x, le CO, les PM₁₀ et les PM_{2.5} une répartition relativement analogue (Figure IV.18). Pour les émissions de NO_x et de CO, on remarque la présence d'un grand nombre de valeurs marginales. Ceci indique une grande hétérogénéité des émissions selon les axes routiers, avec des axes aux émissions relativement faibles (situées entre 1 et 10 kg de polluants par mètre linéaire) et des axes concentrant les valeurs d'émissions les plus importantes (au-delà de 10 kg/m d'émissions de NO_x et au-delà de 18 kg/m pour le CO). Les émissions de particules, PM₁₀ et PM_{2.5}, sont beaucoup plus homogènes que celles des polluants gazeux : elles sont estimées entre 0 et 0.5 kg/an pour les PM₁₀ et entre 0 et 0.3kg/an pour les PM_{2.5}. Ces résultats sont en accord avec les estimations d'ATMO-BFC (Figure IV.23). Au moment de ce travail de thèse, il est à noter que la version du logiciel CIRCUL'AIR utilisé indiquait des problèmes techniques ; problèmes résolus avec la version v3.0. Par ailleurs, une méthode *offline* a été développée, basée sur l'utilisation directe du logiciel COPERT, en *open source*, plutôt que du logiciel CIRCUL'AIR. Le calcul des émissions unitaires a alors été spatialisé sous la forme d'une grille permettant de calculer et de visualiser l'évolution des niveaux de pollution pendant et après le processus de simulation du trafic routier. Cette nouvelle chaîne de traitement a été appliquée sur le quartier du Gueliz à Marrakech (Emery *et al.* (2017a), Partie B/§5.6) à l'occasion de la COP22. Le processus de simulation a alors été présenté sous la forme d'un atelier interactif permettant d'observer les effets du trafic sur la pollution par le biais d'une maquette 3D du quartier de Gueliz, un vidéoprojecteur et une tablette tactile (Figure IV.19). Tout utilisateur peut tester, via une application dédiée, différents scénarii en fonction de la proportion thermique/électrique, diesel/essence ou encore de l'âge du parc automobile. L'idée a ensuite été reprise pour Dijon (Exposition Observerville, POPSU PURE (2021), que j'ai co-organisée avec les collègues du laboratoire ThéMa, Partie B/§2.8) car le concept, testé dans différents cadres, dont celui de la Nuit des Chercheurs 2017 (Partie B/§2.8), s'avère particulièrement efficace à la fois pour sensibiliser les citoyens, et communiquer voire alerter les pouvoirs publics (outil d'aide à la décision).

En résumé, la méthodologie développée pour l'estimation des émissions de polluants à échelles fines en ville se révèle particulièrement novatrice car elle est basée sur une approche data-driven dans un modèle de simulation multi-agents mais aussi parce qu'elle prend en considération l'interopérabilité entre SMA et module d'émissions de polluants. Le travail développé dans la thèse de Justin Emery (2016), Partie B/§4.3), a ainsi permis d'ouvrir de nouvelles pistes de développement en géographie, en informatique et en qualité de l'air, au premier rang desquelles le couplage de la démarche SCAUP avec la méthodologie COPERT.

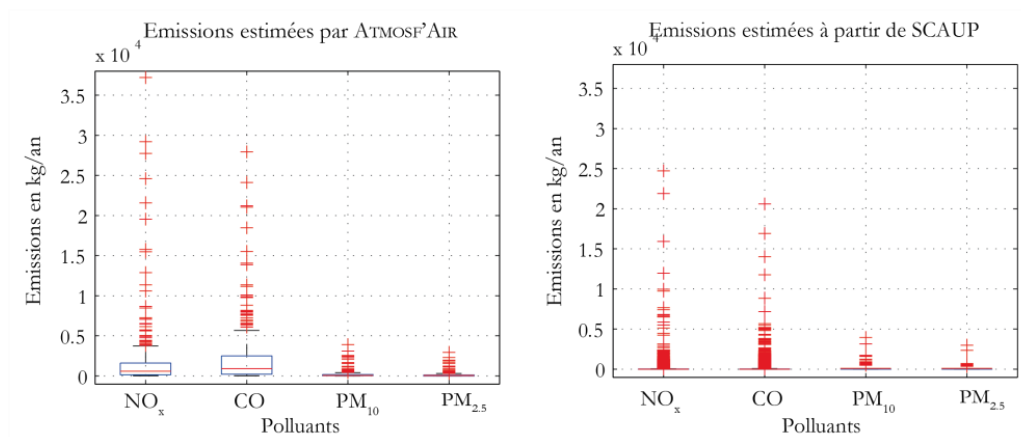


Figure IV.23. Comparaison des émissions estimées par l'AASQA locale ATMO BFC (à gauche) et des émissions simulées avec SCAUP (à droite) par type de polluants.
 Figure extraite de la [thèse de Justin Emery \(2016\)](#), Partie B/§4.3.

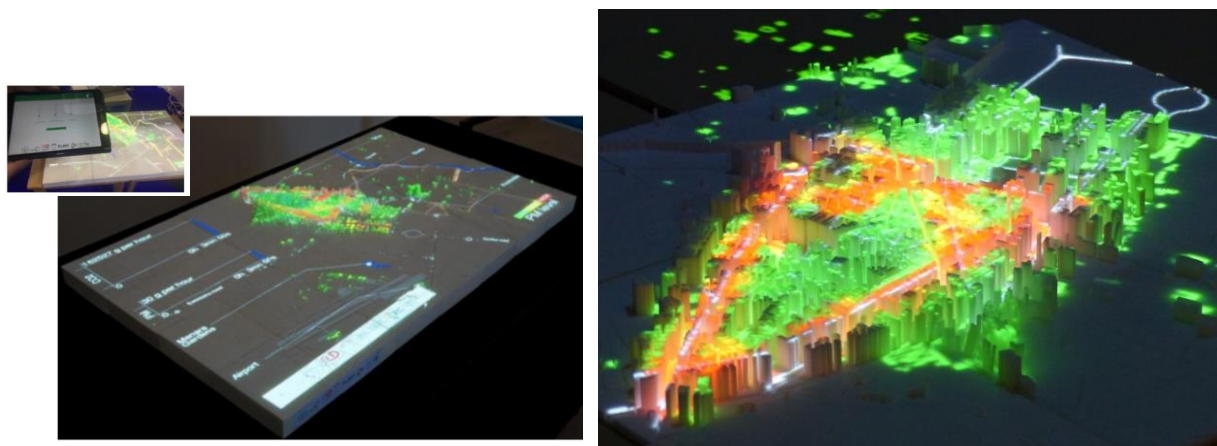


Figure IV.24. Projet Marrak'air : vue d'ensemble du dispositif (à gauche) avec présentation de l'application sur tablette et projection des niveaux de polluants particuliers sur le quartier du Guéliz (Marrakech) en 3D.
 Figures extraites de [Emery et al. \(2017\)](#), Partie B/5.6.

Les premiers résultats obtenus sont prometteurs en termes de modélisation du trafic routier à échelles fines dans le temps et dans l'espace ([Emery et al. \(2020\)](#), Partie B/§5.1) ainsi qu'en termes d'émission de polluants ([Emery et al. \(2017b\)](#), Partie B/§5.6). **Le gain majeur est ici l'accès à des émissions tronçon par tronçon (routier) des polluants au pas de temps très resserré de 15mn.** Le passage aux concentrations est alors possible en intégrant au modèle de SMA des mesures des PM en différents points de la ville. Ces dernières, issues de 3 analyseurs de référence gérés par l'AASQA ATMO-BFC, se sont cependant révélées insuffisantes pour caler avec robustesse l'approche SCAUP/COPERT à Dijon. La nécessité d'un réseau dense de mesures de PM est alors devenue incontournable tout comme dans le cadre de la démarche « télédétection » précédemment adoptée (§IV.1).

IV.3 Le concept QameleO

Les approches de télédétection (§IV.1) et de géosimulation (§IV.2) ont mis en évidence le besoin de recourir à un réseau de mesures de PM ; respectivement pour relier les indicateurs intégrés d'aérosols de type AOD à la surface et pour relier les émissions des polluants à leurs concentrations.

L'idée de déployer un **réseau dense de qualité de l'air à Dijon** est alors parue évidente. Cette idée ne pouvait être soutenue que sur la base d'instruments *low-cost*, qui par ailleurs faisaient l'objet d'un nouvel engouement à l'échelle internationale (Castell *et al.*, 2015; Snyder *et al.* 2013; Kumar *et al.*, 2015; Jovasevic-Stojanovic *et al.*, 2018), bien que la technologie des micro-capteurs existe depuis les années 70. Ces instruments peuvent en effet constituer un support des réseaux de qualité de l'air conventionnels en apportant une densité d'informations spatio-temporelles inédites (Heimann *et al.*, 2015; den Bossche *et al.*, 2015).

Les micro-capteurs présentent l'avantage conséquent d'être de petite taille et légers. Ils consomment de fait peu d'énergie, ce qui les rend facilement transportables, notamment dans les zones où les appareils conventionnels ne peuvent pas être déployés (Castell *et al.*, 2017). Ils sont peu onéreux, la cellule de mesure des concentrations particulières en tant que telle ne coûte que quelques dizaines d'euros, comme c'est le cas par exemple du système Plantower PMS-7003 (Figure IV.25). Ils peuvent mesurer pollutions gazeuses et particulières. Différents systèmes de mesures existent (Borrego *et al.*, 2016) : compteurs optiques de particules ou *Optical Particle Counter* en anglais (OPC), capteurs semi-conducteurs à oxyde métallique ou *Metal Oxide Semiconductor* en anglais (MOS), électrochimiques ou *ElectroChemical* en anglais (EC), infrarouge non-dispersifs ou *Non Dispersive InfraRed* en anglais (NDIR) ou encore de détection de photo-ionisation ou *Photoionization* en anglais (PID). Pour les mesures des concentrations particulières en particulier, c'est le principe de diffusion et d'absorption de la lumière par les particules qui est utilisé via un capteur de type OPC (Munir *et al.*, 2019).

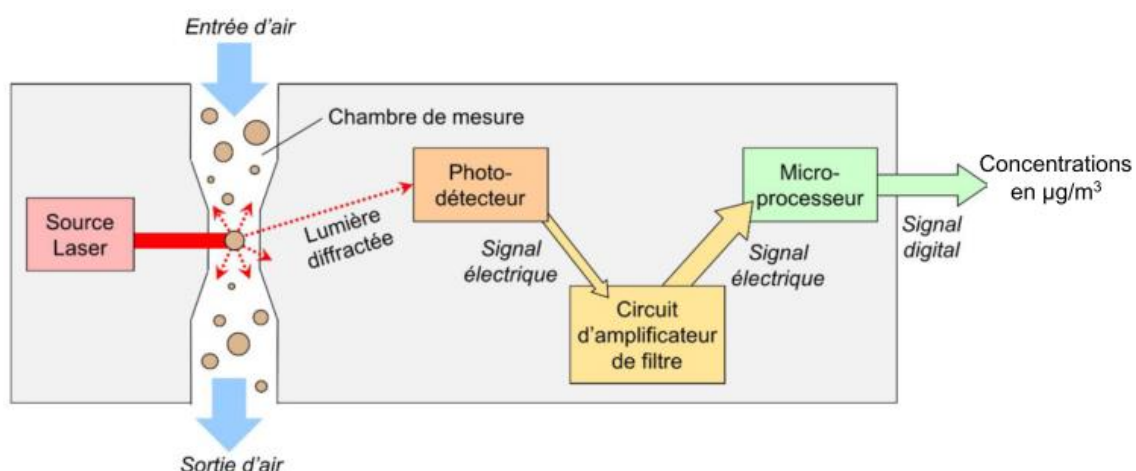


Figure IV.25. Schéma de mesure de concentrations en PM du Plantower PMS-7003, basé sur un système optique de comptage de particules. Figure extraite du stage de M2 de [Lola Canovas \(2019\)](#), Partie B/§4.7.

En France comme à l'étranger, de nombreuses utilisations des micro-capteurs ont été menées ces dernières années. Elles concernent parfois uniquement la pollution gazeuse (Popoola *et al.*, 2013 ; Mead *et al.*, 2013) ou bien intègrent pollutions gazeuses et particulaires (Borrego *et al.*, 2016 ; Hamm *et al.*, 2016). Dans tous les cas, les expériences sont relativement courtes dans le temps et localisées pour répondre à des questions spécifiques et opérationnelles. Popoola *et al.* (2013) ont par exemple proposé une expérience focalisée sur les oxydes d'azote à l'aéroport de Heathrow à Londres à partir de 17 micro-capteurs sur une période 5 semaines en 2012. Borrego *et al.* (2016) ont mené une analyse des concentrations en CO, NO_x, O₃, SO₂, PM₁₀ et PM_{2.5} à Aveiro au Portugal sur une période de 2 semaines en octobre 2014 afin de mener une étude comparative entre 9 technologies différentes de micro-capteurs. Cette étude est particulièrement intéressante car elle montre que les coefficients de détermination entre micro-capteurs et analyseurs de référence sont spécifiquement élevés pour l'ozone (0.12-0.77) et le monoxyde de carbone (0.53-0.87), plus aléatoires pour les dioxydes d'azote (0.02-0.89), et plutôt faibles pour le dioxyde de soufre (0.09-0.20) et les particules fines (0.07-0.36). Ainsi, les auteurs concluent que les réseaux de mesures de qualité de l'air basés sur la technologie des micro-capteurs sont prometteurs, que la qualité des mesures varie d'un type de micro-capteur à un autre et d'un polluant à un autre, ce qui nécessite la mise en place d'outils de correction et de post-traitement adaptés. C'est un des axes que nous avons investi pour les PM par la suite (§IV.4).

Devant tant de disparités d'un instrument de mesures à un autre, et profitant d'un partenariat de longue date avec l'IRD de Bondy (§IV.2, cadre de la [thèse de Justin Emery \(2016\)](#), Partie B/§4.3), l'équipe CRC de Biogéosciences a développé, en partenariat avec l'UMMISCO, un prototype de micro-capteur de pollution atmosphérique permettant de mesurer les concentrations en PM₁₀, PM_{2.5} et PM₁. L'instrument de mesures était initialement contenu dans un boîtier de 15cm de côté en PVC avec une aspiration d'air par le dessous (Figure IV.26). Il était alimenté sur secteur et enregistrait les données sur une carte SD. Ce tout premier prototype a été mis au point en janvier 2018 et a subi des tests en laboratoire à l'IRD à Bondy, et en grandeur nature à Dijon de janvier à juin 2018 avec implantation des micro-capteurs sur les sites des stations d'ATMO-BFC (Figure IV.27) ; ces expériences ont été notamment menées dans le cadre du [stage de M2 de Louis Jouandanne \(2018\)](#), dont j'ai assuré la direction, Partie B/§4.7).

En juillet 2018 (Figure IV.28), via ATMO-BFC, un micro-capteur UB/IRD est envoyé en campagne d'évaluation pour la surveillance de la qualité de l'air en site fixe. Cette inter-comparaison de micro-capteurs sur le terrain, EA μ C (Crunaire *et al.*, 2018 ; Redon *et al.*, 2019), a été conduite à l'échelle nationale par l'Ineris et l'Institut Mines Télécom Lille Douai (IMT Lille Douai) en tant que membres du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA). Les résultats concernant le micro-capteur UB/IRD, diffusés à Biogéosciences en mai 2020, se sont révélés très encourageants. Il a en effet été établi que l'instrument de mesures est léger et facile à mettre en œuvre, ce qui est somme toute conforme aux attentes d'un micro-capteur. La dynamique temporelle des PM est bien suivie, et la corrélation avec les mesures de référence est de 0.73 pour les PM_{2.5} (avec un écart moyen de 2.95 μ g/m³) et de 0.84 pour les PM₁ (avec un écart moyen de 5.86 μ g/m³). Les points limitants du système semblaient plutôt relever du manque de système de fixation, du manque d'alimentation autonome, et de la récupération des données sur carte SD (qui nécessite l'ouverture du boîtier). Ce dernier point était en cours de tests en environnement réel. Par ailleurs, le système, tel que conçu à ce stade, n'était pas encore prévu pour une installation et une utilisation prolongée en extérieur.



Figure IV.26. L'un des premiers micro-captteurs UB/IRD installé sur la station de mesures de Péjoces d'ATMO-BFC en 2018. Le micro-captteur est indiqué par la lettre a. La tête PM de l'analyseur de référence est indiquée par la lettre b. Figure extraite du stage de M2 de [Lola Canovas \(2019\)](#), Partie B/§4.7.

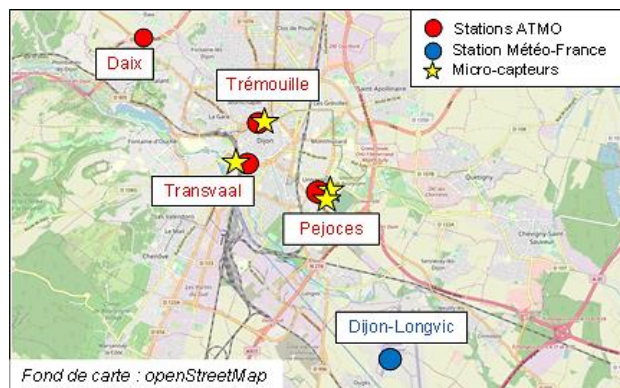


Figure IV.27. Carte des premiers micro-captteurs UB/IRD installés à Dijon en juillet 2018 (étoiles) sur les stations de mesures de pollution particulaire d'ATMO-BFC (cercles rouges). Figure extraite du stage de M2 de [Lola Canovas \(2019\)](#), Partie B/§4.7.

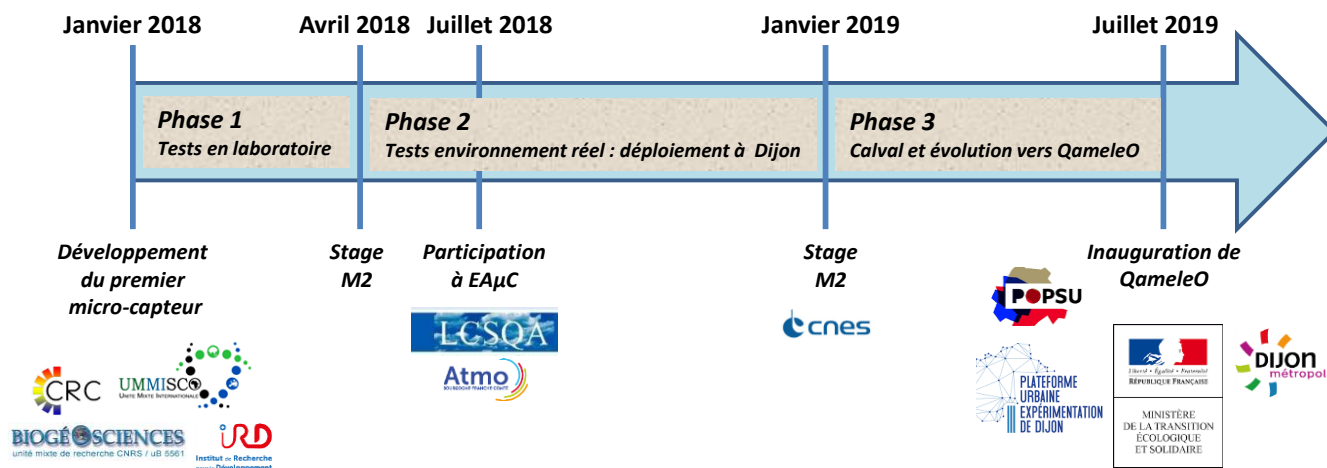


Figure IV.28. Frise chronologique indiquant les phases de développement du concept QameleO. Figure extraite du [Cahier POPSU \(2022\)](#), Partie B/§2.8.

En parallèle de EA μ C, une campagne de mesures intensives a été mise en place sur le site de Péjoces à Dijon, du 27 juin au 09 juillet 2018. Trois micro-capteurs, nommés PMuCap1, 2 et 3, ont alors été implantés et comparés entre eux (Figure IV.29). Il en ressort que les concentrations moyennes en PM₁₀, PM_{2.5} et PM₁ pour chaque micro-capteur sont proches. Par exemple, pour les PM_{2.5} les valeurs moyennes calculées sur la période sont de 7.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le PMuCap 1, 8.90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le PMuCap 2 et 9.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le PMuCap 3. Chaque capteur indique une dynamique temporelle similaire : les corrélations, toutes significatives (Bravais-Pearson, $p=0.01$), varient entre 0.77 et 0.96. Les biais sont faibles quel que soit le polluant considéré, avec des valeurs comprises entre 0.78 et 3.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Enfin, si les comparaisons avec l'analyseur de type BAM d'ATMO-BFC indiquent une légère surestimation (<3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de la mesure des micro-capteurs pour les PM_{2.5}, le constat est inverse pour les PM₁₀. Les moyennes et les écarts-types sont comparables quels que soient le capteur et le polluant, et en accord avec l'analyseur de référence (Figure IV.30). Cette campagne de mesures couplée à EA μ C permet de placer le micro-capteur dans des performances en cohérence avec les instruments existants (Borrego *et al.*, 2016).

La campagne de mesures intensives à Dijon s'est révélée particulièrement instructive car en une dizaine de jours, les conditions météorologiques ont été très variables avec : (i) des journées ventées (rafales de 30 à 40km/h en journée) caractérisées par des conditions anticycloniques et des températures dans les normes saisonnières (>15°C la nuit et <30°C le jour) ; (ii) des journées caniculaires avec des températures supérieures à 32°C en journée et ne descendant pas en-dessous de 20°C la nuit ; (iii) des journées pluvieuses, accompagnées parfois d'orages (avec rafales de vent atteignant 50 km/h), sous un contexte dépressionnaire et un taux d'humidité relative > 95% ; (iv) des journées estivales « standard », caractérisées par une absence de vent, de pluie ou de températures supérieures à 30°C en journée.

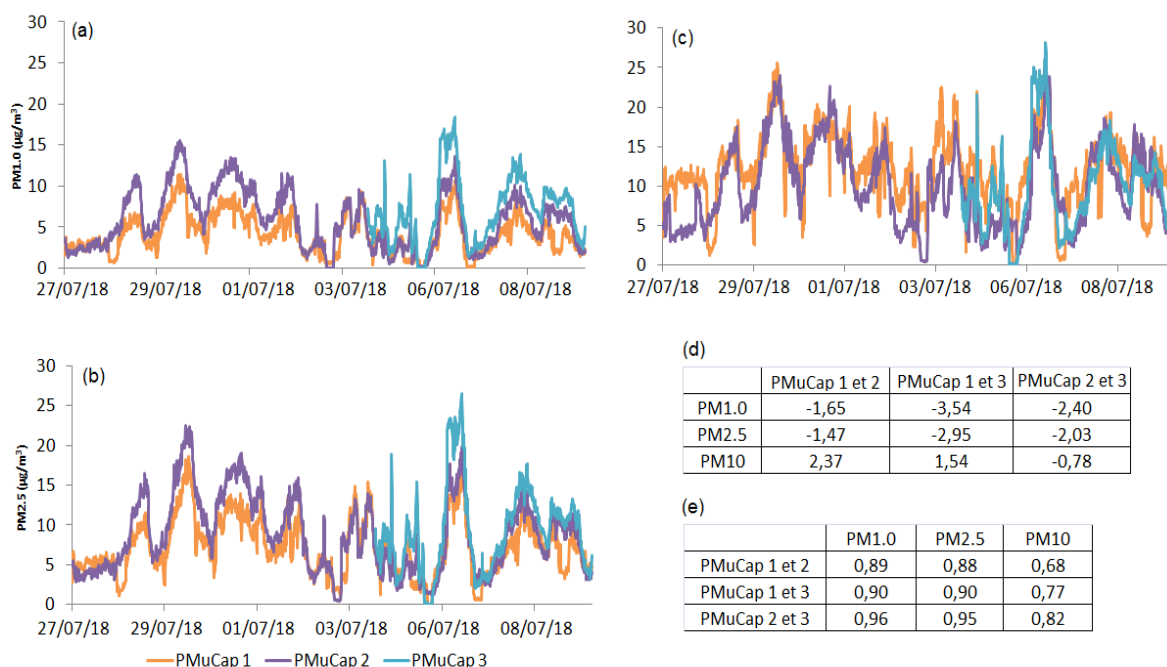


Figure IV.29. Concentrations en a) PM₁, b) PM_{2.5}, et c) PM₁₀ mesurées par les trois micro-capteurs pendant la campagne de mesures intensives de juillet 2018 à Péjoces avec d) un tableau des biais moyens et e) un tableau des corrélations entre chaque micro-capteur. Figures extraites du stage de M2 de Louis Jouandanne (2018), Partie B/§4.7.

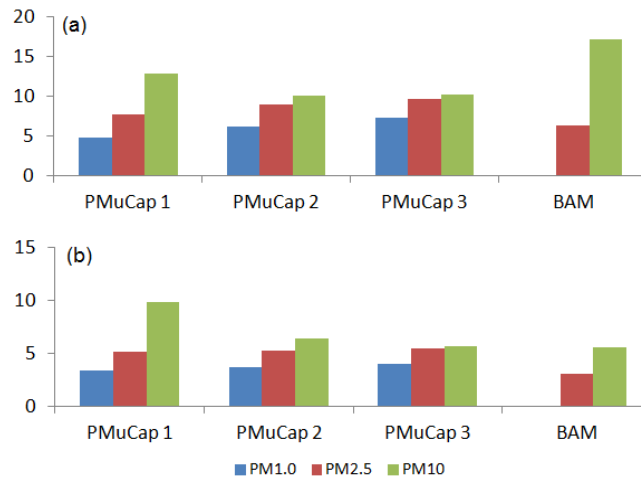


Figure IV.30 Statistiques des mesures de pollution particulaire (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1) lors de la campagne de mesures intensives de juillet 2018 à Dijon : a) moyenne sur la période ; b) écart-type sur la période ; c) étendue des valeurs pour chaque micro-capteur et chaque polluant. Figure extraite du stage de M2 de [Louis Jouandanne \(2018\)](#), Partie B/§4.7.

Nous avons alors pu commencer à mettre en évidence une **certaine sensibilité des mesures des micro-capteurs** à ces conditions extérieures, en particulier dans le cas des PM_{10} ([stage de M2 de Louis Jouandanne \(2018\)](#), Partie B/§4.7). Trois autres micro-capteurs ont par la suite été implantés à Transvaal, Trémouille (en octobre 2019) et Nuits Saint Georges (décembre 2019), stations d'ATMO-BFC équipées d'un analyseur de référence (Figure IV.27). Ces 3 micro-capteurs étaient alors déjà des versions améliorées des premiers prototypes en étant connectés via GSM. Le but de l'expérience était de tester les micro-capteurs dans des environnements urbains variés, plutôt influencés par la pollution de fond (exemple de Péjoces) ou au contraire en proximité trafic (exemple de Transvaal ou de Nuits Saint Georges), et sur une période suffisamment longue pour être représentative de conditions météorologiques variées comprenant la pluie et le brouillard en automne, le froid et les épisodes neigeux en hiver. Ceci donnera lieu au développement d'une méthodologie de calibration-validation (calval) des capteurs (§IV.4).

Parallèlement à ces recherches, des essais métrologiques ont été réalisés en laboratoire afin de faire évoluer la première version des micro-capteurs vers une solution autonome et modulable. Ainsi, en juin 2019, la première version de QameleO (Quality of Air Module for Environmental Learning Engineering and Observation) est achevée.

Le concept QameleO est né, micro-station de mesures originale, basée sur un concept *low-cost*, modulable en termes de variables mesurées (température, humidité, polluants gazeux), d'autonomie (100% secteur, 100% batterie, ou solution hybride) et de connexion (GSM, Lora, Wi-fi notamment). Son design s'adapte à son environnement, ou aux réseaux déjà en place, par soucis de cohérence et d'homogénéité. Le premier QameleO déployé à Dijon a été inauguré le 5 juillet 2019, en présence d'élus et de chercheurs (Partie B/§2.8), sur le site du Port du Canal et dans le cadre de l'événement « Regards croisés » du programme POPSU PURE (Figure IV.31). Le boîtier, pour l'occasion, a été entouré d'ailettes blanches (Figure IV.32), à l'image des abris météorologiques des sondes du réseau MUSTARDijon (Richard *et al.*, 2018). Ce jour-là, QameleO a fait l'objet d'une démonstration : fonctionnement, transmission et visualisation des données via un QR code. Le logo QameleO

a été présenté (Figure IV.33). Un premier flyer descriptif de la micro-station de mesures a également été réalisé par Biogéosciences et UMMISCO, premier support de communication vers le Grand Public et les collectivités (Figure IV.34).

Dans le cadre du programme POPSU PURE, **20 micro-stations QameleO** (Figure IV. 35) **sont prévues à l'implantation à Dijon d'ici à 2022** (§Fiche 2). Ces instruments de mesures seront répartis sur une superficie d'environ 100 km², ce qui représente, dans un premier temps, une densité suffisante (1 instrument par parcelle de 5 km²) pour documenter la variabilité de la pollution particulaire à l'échelle d'un quartier (projet CNES Quali_ThR, [Martiny \(2019-2021\)](#), Partie B/§2.1). Les sites d'implantation ont été choisis sur la base de critères scientifiques, tels que la morphologie locale, représentée par le *Sky View Factor* (Oke, 1981), la proximité aux voies de circulation, afin de qualifier le site (proximité trafic ou non), la présence de végétation afin d'en étudier l'impact sur la qualité de l'air. Des critères sur la densité de population ont également été pris en compte afin de définir par la suite des indices d'exposition à la pollution (§VI/Perspectives de recherches). Enfin, nous avons choisi des sites suffisamment éloignés des parkings et des arrêts de bus (buffer de quelques centaines de mètres) sur la base des recommandations des AASQA. Un indice d'implantation théorique des micro-stations QameleO a ainsi été défini. L'étape de confrontation avec la situation de terrain est ensuite menée en collaboration avec la Métropole, puis les supports des micro-stations, des candélabres urbains, sont préparés sur le plan technique. Enfin, l'implantation concrète des micro-stations est réalisée par Biogéosciences et UMMISCO au fur et à mesure de leur fabrication, en FABLAB à l'IRD de Bondy, créée spécifiquement en septembre 2020.



Figure IV.31 Inauguration du premier QameleO le 5 juillet 2019 sur le site du Port du Canal à Dijon en présence d'Hélène Peskine (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire) et Pierre Pribetich (Dijon Métropole). Présentation du capteur par N. Martiny (Université de Bourgogne) et N. Marilleau (Institut de Recherches pour le Développement).



Figure IV.32 Première micro-station environnementale QameleO : le boîtier PVC est ici entouré d'ailettes blanches.
Photo © N. Martiny.



Figure IV.33 Logos de la micro-station de mesures environnementales QameleO, dépôt et obtention de la marque et du visuel UB/IRD en 2021.
Logos. N. Marilleau/N. Martiny

UMR CNRS 6282 BIOGÉOSCIENCES
Centre de Recherches de Climatologie
Université de Bourgogne Franche Comté
Dijon France

UMI 209 UMMISCO
Institut de Recherches pour le Développement
Sorbonne Université
Bondy France

D'où vient son nom?

QameleO (Quality of Air Module for Environmental Learning Engineering and Observation) est complètement modulable tel un caméléon qui s'adapte à son environnement. Elle peut intégrer « à la carte » d'autres microcapteurs de mesures environnementales. Elle peut également transmettre l'information via différents systèmes de communication tels que le wifi, CPL, LORA, etc. QameleO s'adapte à des sites isolés puisqu'il peut être 100% autonome avec des panneaux solaires.

Quelle est sa spécificité?

QameleO, a un faible coût unitaire et il a fait l'objet de tests métrologiques approfondis. Le microcapteur de qualité de l'air a été étalonné et ses mesures de concentrations particulières validées scientifiquement, ce qui nous permet de le déployer en réseau.

Pourquoi un réseau?

D'ici la fin de l'année 2019, un total de 20 QameleO sera installé à l'échelle de Dijon Métropole. Ce maillage spatial fin permettra de mieux comprendre les variations de la qualité de l'air et son lien avec le climat dans l'espace et dans le temps.

A quoi et à qui servent ces mesures?

Contacts :
Nadège Martiny nadège.martiny@u-bourgogne.fr 03 80 39 38 21
Nicolas Marilleau nicolas.marilleau@ird.fr 01 48 02 79 01

Contacts :
Nadège Martiny nadège.martiny@u-bourgogne.fr 03 80 39 38 21
Nicolas Marilleau nicolas.marilleau@ird.fr 01 48 02 79 01

Figure IV.34. Extrait du premier flyer descriptif du concept de QameleO réalisé en juillet 2019 à l'occasion de l'inauguration du premier capteur implanté à Dijon dans le cadre de l'événement « Regards croisés » du programme POPSU PURE.

Avec le **réseau QameleON** (QameleO Network), Dijon est l'une des premières villes françaises en passe d'être dotée de 20 sentinelles connectées dans le domaine de la qualité de l'air, ancrée dans une logique de réseau d'observation pérenne (Hamm *et al.*, 2016 ; Feinberg *et al.*, 2018), avec un accès grand public et en temps réel à l'information (actualisée toutes les 3h), s'inscrivant ainsi pleinement dans la mouvance Smart City (Batty, 2013).

Par ailleurs, le concept QameleO a fait l'objet d'une **déclaration d'invention en 2019**, avec une co-propiété UB/IRD. QameleO est **sous Licence depuis 2020** : Creative Commons BY NC ND pour la partie tutoriels et CERN OHL W pour la partie logiciel. L'idée est de s'inscrire dans une logique de capteurs et de données *open source* (§VI/Perspectives de recherches). **La marque QameleO** accompagnée de son visuel (logo) a été validée en 2021 (Figure IV.33). L'autre originalité du réseau QameleO est qu'il offrira des mesures de pollution de qualité scientifique, pour les PM₁₀, les PM_{2.5} et les PM₁, via une méthode de calval prenant en compte des variables météorologiques (§IV.4). Ceci ouvre le champ de la recherche scientifique en qualité de l'air : les premières exploitations des mesures des QameleO à Dijon a permis de mettre en évidence l'impact des confinements liés à l'épidémie de COVID-19 du 17 mars au 11 mai puis du 30 octobre au 15 décembre 2020 sur la qualité de l'air ([stage de M1 de Sarah Marion \(2021\)](#), dont j'ai assuré la direction, Partie B/§4.7). Ceci ouvre également des perspectives inédites d'amélioration des systèmes d'alerte en ville en partenariat notamment avec ATMO-BFC en local (§VI/Perspectives de recherches).

IV.4 Des mesures « low-cost » de qualité scientifique

Les micro-capteurs de qualité de l'air utilisés en air extérieur fournissent des mesures pouvant être entachées d'incertitudes (Kelly *et al.*, 2017). Nous avons en particulier constaté, dans le cadre de recherches exploratoires (§IV.3) que les mesures des micro-capteurs pouvaient être sensibles aux conditions météorologiques. Par exemple, certaines conditions de vent ne favorisent pas les flux d'air entrant dans le capteur en raison de son entrée monodirectionnelle. D'autres auteurs ont investi la question de l'humidité relative, qui en augmentant, pourrait jouer un rôle sur les particules elles-mêmes, notamment leur taille et leur masse – phénomène d'accroissement hygroscopique – modifiant ainsi leurs propriétés d'absorption et de diffusion (Pan *et al.*, 2019). Par exemple, un aérosol de pollution mélangé à un aérosol d'origine océanique voit son coefficient de diffusion augmenter de plus de 4.4 fois s'il est placé à 90% d'humidité (Hervo, 2013). Ainsi, les mesures des concentrations particulières des micro-capteurs semblent être moins pertinentes en condition d'humidité relative élevée. Crilley *et al.* (2018) ont mis en évidence une surestimation significative des concentrations mesurées par des micro-capteurs de type OPC au-delà d'une humidité relative de 85% (Tableau IV.3).

		PM ₁₀				PM _{2.5}			
		OPC6	OPC8	OPC10	OPC11	OPC6	OPC8	OPC10	OPC11
ALL	TEOM	2.6 (0.64)	2.8 (0.68)	2.5 (0.64)	3.5 (0.67)	3.3 (0.7)	3.1 (0.74)	2.9 (0.7)	3.9 (0.72)
	GRIMM	3.7 (0.66)	3.6 (0.69)	3.2 (0.66)	4.4 (0.68)	3.8 (0.71)	3.7 (0.74)	3.4 (0.71)	4.6 (0.72)
< 85 % RH	TEOM	1.4 (0.82)	1.4 (0.83)	1.2 (0.83)	1.7 (0.83)	1.3 (0.79)	1.4 (0.8)	1.1 (0.79)	1.6 (0.79)
	GRIMM	1.8 (0.83)	1.9 (0.84)	1.6 (0.84)	2.2 (0.84)	2.0 (0.89)	2.1 (0.89)	1.7 (0.9)	2.4 (0.88)

Tableau IV.3. Pentes des droites de régression entre concentrations des PM mesurées par des instruments de référence (TEOM ou GRIMM) et micro-capteurs de types OPC aux Royaume-Uni. Le coefficient de corrélation est donné entre parenthèses. Tableau extrait de Crilley *et al.* (2018).

D'autres auteurs ont estimé ce seuil à 80% (Badura *et al.*, 2018). Plus récemment, Tagle *et al.* (2020) ont défini 2 seuils, un seuil de 75% au-delà duquel les concentrations mesurées par les micro-capteurs étaient surestimées et un seuil de 50% en-deçà duquel les concentrations étaient au contraire sous-estimées. En réalité, selon le constructeur et le modèle, les micro-capteurs peuvent être plus ou moins sensibles aux conditions météorologiques (Castell *et al.*, 2017). Par ailleurs ces études ont été menées dans des zones au climat très différent : Royaume-Uni (Crilley *et al.*, 2018), Pologne (Badura *et al.*, 2018), Chili (Tagle *et al.*, 2020).

Ces études montrent qu'il est indispensable d'apporter une vérification, voire une correction aux mesures des micro-capteurs avant exploitation scientifique. Certaines méthodes se basent uniquement sur les mesures des analyseurs de référence indiquant par exemple une amélioration, après correction, des statistiques de base. Ainsi, Cavaliere *et al.* (2018) présentent les résultats d'une campagne de calibration menée à Florence pendant 6 mois, de novembre 2016 à avril 2017, et indiquent, par exemple, pour les PM_{2.5} une diminution notable du biais moyen (de 4.39 à 0.04 µg/m³) et de la RMSE (de 7.96 à 4,06 µg/m³). Cette approche classique est indispensable, et l'utilisation de mesures de référence incontournable pour calibrer des micro-capteurs de qualité de l'air. Cependant, compte-tenu de leur

sensibilité avérée aux conditions météorologiques, ces corrections seront-elles stables dans le temps ? C'est la question qui nous a semblé pertinente à investir dans le cadre du projet QameleO. Nous avons ainsi réalisé un état des lieux des méthodes de correction existantes, encore peu nombreuses, reposant sur la prise en compte de variables météorologiques, dans le cadre d'un travail de stage de Master 2^{ème} année Sol Eau Milieux Environnement (stage de M2 de [Lola Canovas \(2019\)](#), dont j'ai assuré la direction, Partie B/§4.7).

Il ressort que la plupart des auteurs ont mis en place des équations de corrections basées exclusivement sur l'humidité relative (Streibl, 2017 ; Crilley *et al.*, 2018 ; Di Antonio *et al.*, 2018), d'autres, plus rares, y ayant ajouté la température (Zheng *et al.*, 2018). Ces études montrent que l'ajustement des mesures des micro-capteurs par l'humidité relative améliore leurs performances en diminuant les erreurs moyennes de 25% à environ 10%. Ce constat est plus ou moins vrai selon les sites. En effet, dépendant du pays, de la ville et du site d'implantation du micro-capteur, le climat et les conditions météorologiques, en particulier les niveaux d'humidité et leurs variations saisonnières, seront très différents. Par ailleurs, en fonction du site choisi, les polluants particuliers sont plus ou moins proches des sources (qui peuvent, elles aussi, être de nature différente). Ainsi, les particules mesurées sont différentes d'un site à un autre (composition, taille, densité et forme), impliquant une variété dans les propriétés physico-chimiques et hygroscopiques, ce qui peut avoir un impact sur la qualité des mesures des micro-capteurs (Karagulian *et al.*, 2019).

L'hypothèse qui semble alors pertinente à adopter est la suivante : déployer des micro-capteurs de qualité de l'air en réseau nécessite, en premier lieu, de **développer une méthode de calibration-validation offrant des mesures de pollution particulaire de qualité scientifique, en se basant à la fois sur les mesures des analyseurs de référence et des variables météorologiques**. Quelles variables météorologiques faudra-t-il prendre en compte pour la correction des mesures des micro-capteurs implantés dans une ville au climat tempéré ? Les corrections à apporter seront-elles équivalentes pour chacun des polluants, PM₁₀ et PM_{2.5}? Dépendront-elles des niveaux de concentrations mesurés ? Quelles sont les méthodes de correction les plus adaptées ? Les équations trouvées seront-elles site-dépendantes ?

Nous avons d'abord défini les équations de corrections pour les 2 polluants particuliers subissant des normes européennes (PM₁₀ et PM_{2.5}) sur la base de mesures réalisées par 4 micro-capteurs installés sur 3 sites d'ATMO-BFC: 2 sur la station de Péjoces (pollution de fond), 1 sur la station de Transvaal (proximité trafic), 1 sur la station de Trémouille (intermédiaire). La période de mesures est de longue durée, allant de 2 à 6 mois dépendant des sites.

La première étape a consisté à évaluer la relation statistique existant entre les mesures des micro-capteurs et les analyseurs de référence (Figure IV.35). Les coefficients de corrélation simple obtenus pour les PM_{2.5} sont élevés, significatifs et stables d'un site à un autre, leurs valeurs s'échelonnant entre 0.86 et 0.88. Pour les PM₁₀, les valeurs sont moins élevées, bien que significatives au seuil de 99%, et un peu moins stable d'un site à un autre, indiquant des valeurs entre 0.68 et 0.77. Les droites de régression pour les sites de Péjoces, Transvaal, et Trémouille présentent toutes des pentes supérieures à 1, quel que soit le polluant considéré (PM_{2.5} ou PM₁₀). Ces résultats sont en cohérence avec la littérature scientifique (Tableau IV.3) en milieu urbain tempéré (Crilley *et al.*, 2018).

Deux approches correctives des mesures de PM ont été développées sur la base de méthodes statistiques (Figure IV.36) : l'approche 1 en « type de temps » et l'approche 2 par « variables météorologiques ». L'approche 1 repose sur la l'analyse du lien statistique entre les concentrations particulières mesurées par les micro-capteurs et les concentrations mesurées par les analyseurs de référence en fonction de classes météorologiques définies en amont, via une méthode de classification hiérarchique ascendante. Pour Dijon et la période juillet 2018-février 2019, 4 classes ont été retenues. Chacune de ces classes, chaque polluant (PM₁₀ et PM_{2.5}) et chaque site dispose d'un modèle de régression linéaire simple du type **$PM_{micro\text{-}capteur} = a * PM_{analys_ref} + b$** . L'approche 2 est basée sur la sélection de variables météorologiques indépendantes entre elles et explicatives des différences de mesures entre micro-capteur et analyseur de référence. Pour cette approche, chaque polluant et chaque site dispose d'un modèle de régression linéaire multiple du type **$(PM_{micro\text{-}capteur} - PM_{analys_ref}) = a_1 * Var_1 + a_2 * Var_2 + \dots + b$** . Les mesures des micro-capteurs sont alors corrigées en utilisant ces 2 approches afin de les comparer entre elles.

Les résultats obtenus sont révélateurs de plusieurs éléments. Tout d'abord, les corrections modifient très peu les coefficients de corrélation obtenus entre mesures des micro-capteurs et mesures des analyseurs de référence ; ces derniers étaient déjà élevés et significatifs sans correction, quel que soit le polluant considéré. Par exemple, pour les PM₁₀ et le site de fond de Péjoces (Figure IV.37), les coefficients de corrélation sont de 0.82 pour l'approche 1 alors qu'il était de 0.84 initialement. Les résultats obtenus sur le site de proximité trafic de Nuits Saint Georges indiquent un coefficient de corrélation maintenu dans le cas de l'approche 1 (0.77 au lieu de 0.76 sans correction) mais fortement diminué dans le cas de l'approche 2 (coefficient de 0.64). Le biais est quant à lui amélioré dans tous les cas, sauf celui de Nuit St Georges approche 2, où au contraire il est dégradé (de 9.46 sans correction à 7.26 avec l'approche 1 et 18.07 avec l'approche 2). L'approche 1 permet également de voir les pentes se rapprocher de 1 pour le site de pollution de fond (0.998) mais s'en éloigne un peu (1.22) pour le site de proximité trafic en créant ici une surestimation des micro-capteurs. Pour les PM_{2.5}, une amélioration peut également être constatée, quelle que soit l'approche considérée, même si elle est moins flagrante car les biais étaient déjà faibles sans correction. Les biais (non montrés) diminuent de 2.91 à 2.62 µg/m³ sur un site de pollution de fond, et de 4.47 à 2.61 µg/m³ sur un site de proximité trafic. Quant aux pentes, elles sont toujours proches de 1 avec cette fois une légère sous-estimation des micro-capteurs (pente ~0.90-0.97).

Les 2 approches statistiques développées et validées (soit sur les mêmes sites mais en considérant d'autres périodes, soit sur la même période mais sur d'autres sites à l'attribution similaire, trafic par exemple) sont prometteuses à plusieurs titres. Tout d'abord, elles permettent de **conserver la dynamique temporelle des polluants**, au pas de temps de 15mn, mesurée par les micro-capteurs **tout en diminuant les biais moyens quel que soit le type de polluant (PM₁₀ et PM_{2.5}), et le site considéré (fond et trafic)**. Pour les PM_{2.5}, les performances des micro-capteurs sont comparables quelle que soit l'approche choisie : les biais moyens sont de l'ordre de 2.6 µg/m³ et les coefficients de détermination approximativement de 0.83. Pour les PM₁₀ par contre, les performances des micro-capteurs sont préférentiellement améliorées avec l'approche 1, en type de temps; les biais trouvés sont plus élevés que dans le cas des PM_{2.5} et les sites de proximité trafic (biais maximal de 7.26 µg/m³). Par ailleurs, si les pentes sont relativement proches de 1, les coefficients de détermination sont inférieurs à 0.75. Ainsi, les corrections apportées pour les PM₁₀ restent insuffisantes pour satisfaire les métriques récemment établies (Karagulian *et al.*, 2019).

Les méthodes de correction développées constituent donc une première étape dans la calval des micro-capteurs développés à l'UB/IRD. Elles indiquent des **résultats viables pour les PM_{2,5}**, tant pour la dynamique temporelle fine des polluants que pour la détection des pics de pollution (Figure IV.38). Les pics de pollution aux PM_{2,5} sont caractérisés par le dépassement de la valeur cible pour la protection de la santé humaine, ie 20 µg/m³ en moyenne annuelle. Ce seuil n'est généralement pas dépassé pour les PM_{2,5} à Dijon (en tout cas pour les sites du réseau historique d'ATMO BFC), où l'on trouve des moyennes annuelles de 7 µg/m³ (site de Péjoces, fond urbain) à 13 µg/m³ (site de Trémouilles, proximité trafic) par exemple pour l'année 2019 (stage de M1 de Sarah Marion (2021), dont j'ai assuré la direction, Partie B/§4.7). Cependant, l'objectif de qualité, qui est de 10 µg/m³ en annuel, est, lui, dépassé pour les sites exposés aux sources de pollution (proximité trafic, zones résidentielles en période hivernale par exemple), autrement dit pour une majorité de sites en milieu urbain.

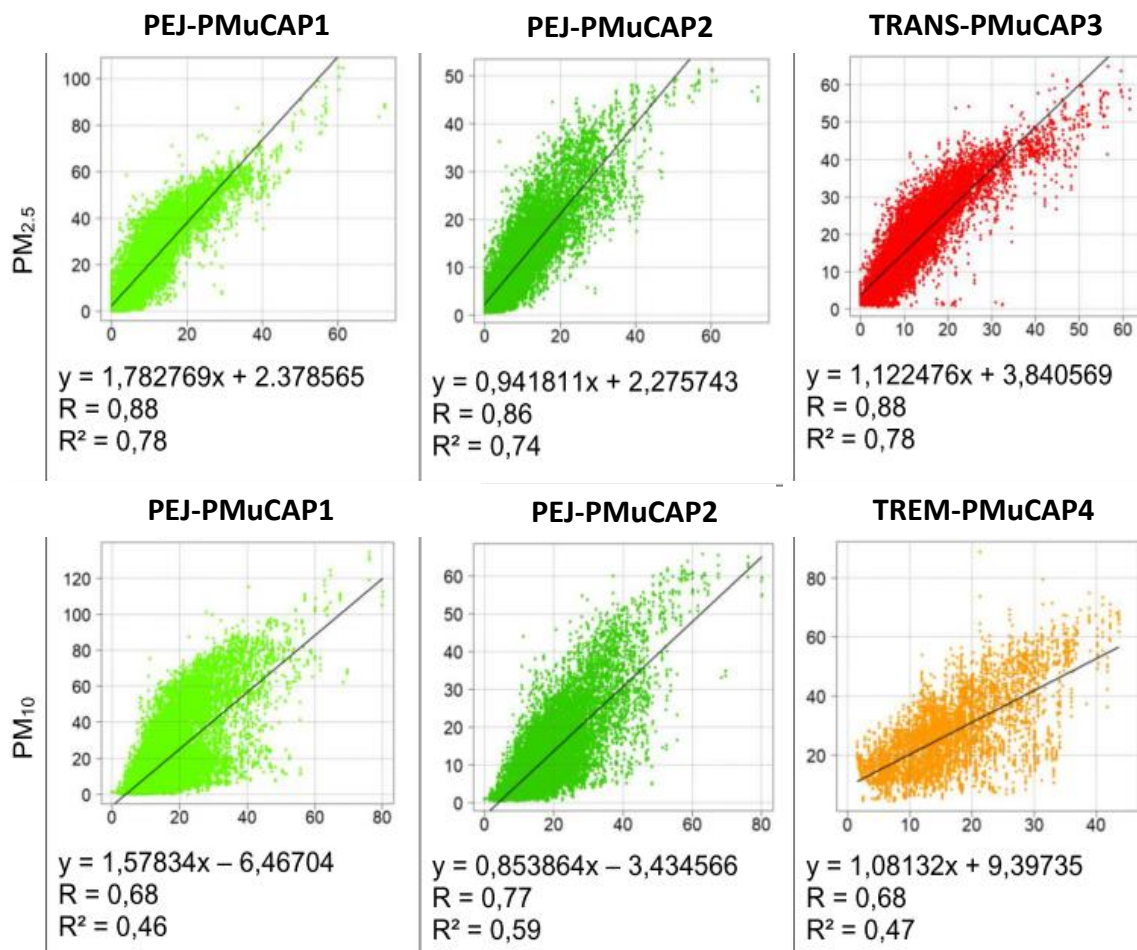


Figure IV.35. Régressions linéaires entre les micro-capteurs et les BAM pendant la phase de calibration de juillet 2018 à février 2019 au pas de temps de 15 minutes pour les PM_{2,5} (ligne du haut) et les PM₁₀ (ligne du bas). Les sites étudiés sont Péjoces (PEJ), Trémouille (TREM), Transvaal (TRANS), dont la localisation est présentée en Figure IV.27 (§IV.3). Figure extraite du stage de M2 de Lola Canovas (2019), Partie B/§4.7.

Le chemin à parcourir pour atteindre l'objectif de qualité fixé pour les particules fines, à savoir 10 µg/m³ en moyenne annuelle, est encore long. Un réseau dense de qualité de l'air aux mesures de qualité scientifique tel que QameleON (§IV.3) permettra sans doute d'améliorer la surveillance de la qualité de l'air à un maillage fin et ainsi d'identifier les *hotspots* de pollution aux particules fines à l'échelle d'un quartier. Ceci est un résultat fort étant donné l'impact des particules fines sur la santé. Concernant les PM₁₀, les méthodes seront encore à améliorer, peut-être sur la base de types de temps définis à l'échelle de la France métropolitaine (Cantat & Savouret, 2014), de modèles statistiques non linéaires (Cavaliere *et al.*, 2018), de méthodes géostatistiques (Schneider *et al.*, 2017), bayésiennes (Carruthers *et al.*, 2019), ou encore de débiaisages très souvent mobilisés pour les modèles climatiques (Castell *et al.*, 2017). Par ailleurs, les avancées dans le domaine de la métrologie des micro-capteurs de qualité de l'air sont rapides et d'autres cellules de mesures peuvent être plus performantes que les Plantower utilisées pour développer les 2 approches correctives précédemment présentées. Les *Next-PM* développés par TERA sensor, ont ainsi été testés en 2020 dans les micro-stations QameleO en environnement réel à Dijon, sur 4 sites, 2 en fond urbain et 2 en proximité trafic. Il ressort, de manière très préliminaire, que les mesures, notamment des concentrations en PM₁₀, nécessiteront peut-être des corrections moins ambitieuses.

Enfin, au-delà de la calval classiquement utilisée en télédétection, les approches adoptées permettent de mieux comprendre **l'influence des conditions météorologiques sur la mesure des PM** à l'aide de micro-capteurs. Les premiers résultats obtenus semblent indiquer que les variables météorologiques jouant un rôle sur la sensibilité des micro-capteurs sont la température maximale horaire, l'humidité relative minimale horaire et la visibilité moyenne horaire. Ainsi, sur la période d'août 2018 à février 2019, et pour les PM₁₀ mesurées à Dijon, il a été estimé que lorsque la température maximale passe en-dessous de 15°C, l'humidité minimale dépasse les 70% ou la visibilité horizontale devient inférieure à 2km, les micro-capteurs ont plutôt tendance à surestimer les mesures de référence, cette surestimation étant supérieure à 20%. Cette surestimation peut atteindre 50% en plein hiver lorsque les températures sont proches de 0°C, l'humidité relative proche de 100%, et la visibilité horizontale de quelques mètres seulement. Si les effets de la température de l'air et de l'humidité relative sont bien documentés dans la littérature scientifique, ce n'est pas le cas de la visibilité horizontale. A Dijon, c'est cependant la variable météorologique qui est choisie en priorité dans les modèles statistiques explicatifs des concentrations des polluants particuliers. Ces résultats, s'ils sont à consolider, notamment en considérant une année entière, et en utilisant les micro-capteurs de type *Next-PM*, mettent en évidence la nécessité d'adopter des approches correctives des mesures de polluants particuliers dépendant des conditions météorologiques locales. En effet, ces éléments semblent adaptables à l'ensemble des sites étudiés, qu'ils soient de fond urbain ou de proximité aux sources de pollution. QameleO étant une micro-station de mesures environnementales de type « multi-prise » la nécessité d'associer aux mesures de qualité de l'air des mesures météorologiques, basées sur la technologie des micro-capteurs, devient alors un élément important à considérer dans le projet (§IV/Perspectives de recherches).

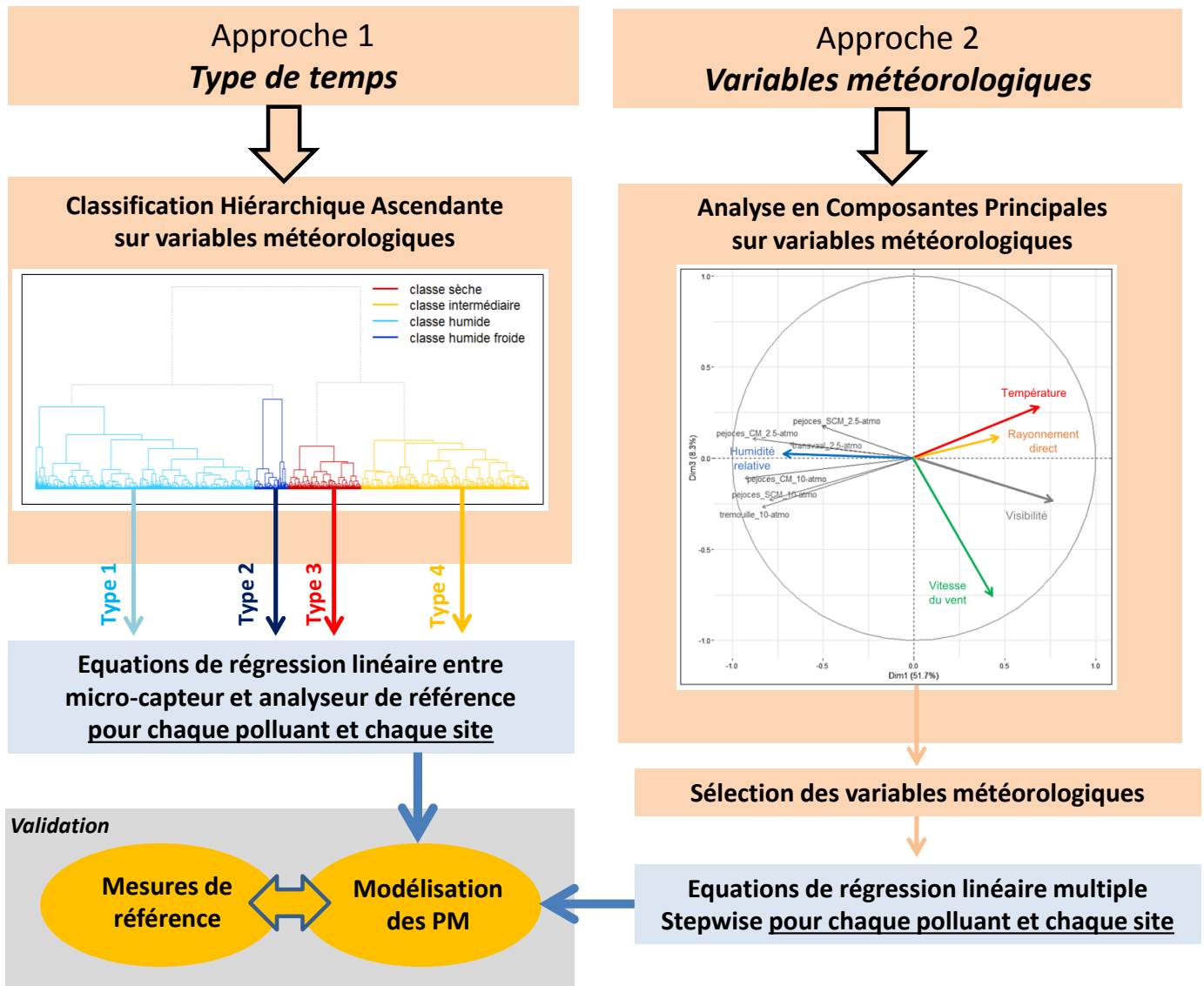


Figure IV.36. Les 2 approches correctives des mesures de PM des micro-capteurs testées à Dijon en 2018-2019. Figure adaptée du stage de M2 de [Lola Canovas \(2019\)](#), Partie B/§4.7

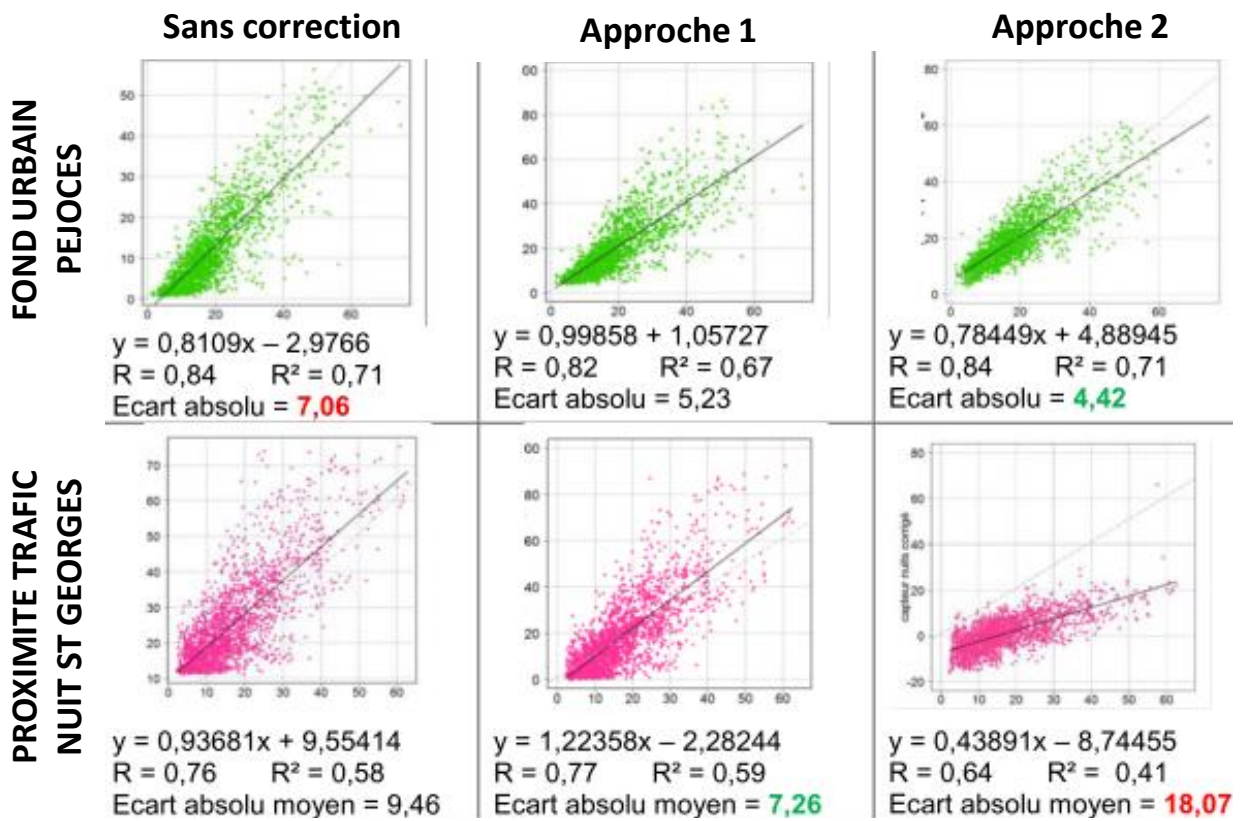


Figure IV.37. Comparaison des 2 méthodes correctives pour les PM_{10} .
 Figures extraites du stage de M2 de [Lola Canovas \(2019\)](#), Partie B/§4.7.

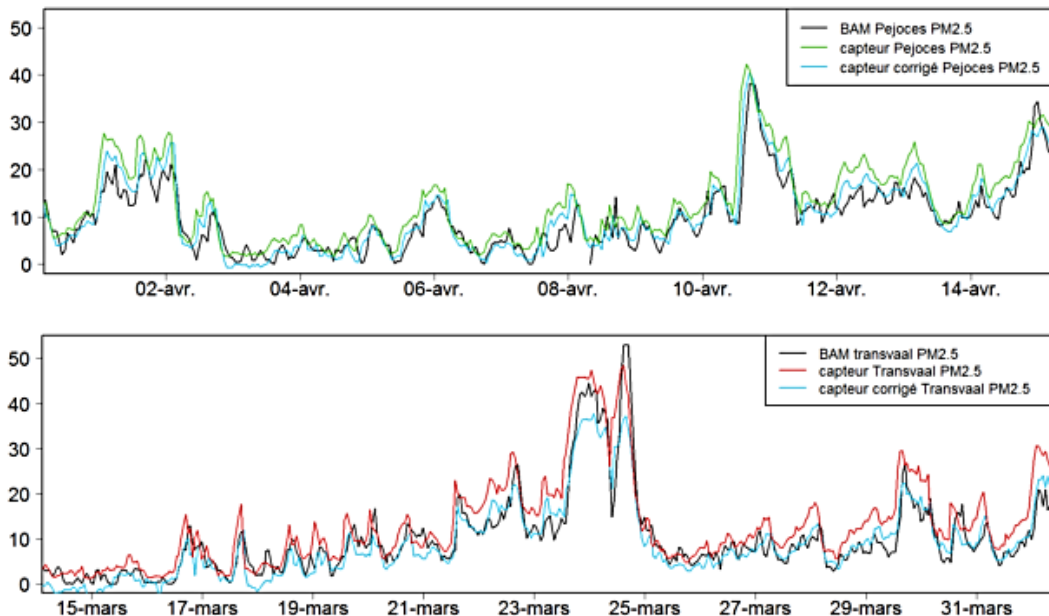


Figure IV.38. Performance des micro-capteurs UB/IRD dans la mesure des $PM_{2.5}$ après application de la méthode de correction la plus favorable : a) sur un site de pollution de fond ; b) sur un site de proximité trafic. Figure extraite du stage de M2 de [Lola Canovas \(2019\)](#), Partie B/§4.7.

Synthèse de la partie IV

Les recherches menées dans le domaine de la pollution particulaire en milieu urbain ont démarré en 2012. Elles ont été amorcées grâce à une thèse de doctorat, celle de [Justin Emery \(2012-2016\)](#), Partie B/§4.3, ayant pour objectif de modéliser la pollution particulaire automobile en ville. Cette thèse a permis de créer un quatuor solide de partenaires sur le thème de la qualité de l'air, constitué des laboratoires Biogéosciences (climatologues) et ThéMa (géographes) à l'UB, UMMISCO (informaticiens et métrologistes) à l'IRD et l'AASQA ATMO-BFC (mesures et surveillance de la qualité de l'air en Bourgogne Franche Comté). L'ONERA-DOTA à Toulouse ainsi que le LOA à l'Université de Lille (§VI/Perspectives de recherches) sont ensuite venues agrandir le consortium pour la partie télédétection à très haute résolution spatiale (§IV.1). Les recherches sont centrées sur la métropole de Dijon. Elles se sont intensifiées depuis 2018. Elles n'auraient pu voir le jour sans les supports financiers du Ministère de l'Ecologie et du développement durable, le Ministère de la cohésion sociale et Dijon Métropole (programme POPSU PURE). Elles ont également pu bénéficier de financements régionaux (Plateforme GEOBFC) et nationaux (CNES).

Les recherches présentées dans la partie IV incluent chacune une part d'**originalité** voire d'**innovation** ; elles sont essentiellement d'ordre **méthodologiques** et représentent un défi en tant que tel, l'information portant sur la qualité de l'air (concentrations des polluants atmosphériques en surface) aux échelles ciblées n'existant tout simplement pas à l'heure actuelle. Ces travaux peuvent être vus comme une première étape ayant pour objectif à terme de caractériser et de comprendre les variabilités spatio-temporelles de la qualité de l'air à haute et très haute résolutions en milieu urbain (§VI/Perspectives de recherches). Les principaux résultats obtenus sont de 3 ordres et se complètent.

Tout d'abord, la méthodologie développée pour l'estimation des émissions de polluants à échelles fines à Dijon basée sur une approche data-driven (données de comptages routiers organisées en réseau d'une centaine de capteurs) dans un modèle de simulation multi-agents (SCAUP) couplé à un module d'émissions de polluants (COPERT), a permis d'ouvrir de nouvelles pistes de développement, à l'interface entre géographie, informatique et qualité de l'air. De plus, si les premiers résultats obtenus sont prometteurs en termes de modélisation du trafic routier à échelles fines dans le temps et dans l'espace, ils le sont également en termes d'émission des 4 polluants atmosphériques du trafic routier que sont les NO_x, le CO, les PM₁₀ et les PM_{2.5}. En particulier, les émissions en PM₁₀ et en PM_{2.5} sont estimées entre 0 et 0.5 kg/an et entre 0 et 0.3kg/an, respectivement. Ces résultats sont en accord avec les estimations d'ATMO-BFC. **Le gain majeur de l'approche SCAUP/COPERT est la quantification des émissions de polluants tronçon par tronçon et au pas de temps très resserré de 15mn.** Le passage aux concentrations est alors possible en intégrant au modèle de SMA des mesures des PM en différents points de la ville. Ces dernières, issues de 3 analyseurs de référence gérés par ATMO-BFC, se sont cependant révélées insuffisantes pour caler avec robustesse l'approche SCAUP/COPERT à Dijon.

L'approche de télédétection spatiale adoptée ensuite pour l'inversion des épaisseurs optiques des aérosols a permis de **faire la preuve de la méthode ombre/soleil par différence** appliquée à des images Pléiades très haute résolution (pixel de 2.8m en multispectral) en plusieurs points de la ville de Dijon, alors que cette méthode est plutôt d'ordinaire appliquée à des images haute résolution (pixel de quelques dizaines de mètres). Il est à noter que les images Pléiades ont été programmées à Dijon en 2019 (projet CNES Quali_ThR) afin de renseigner une certaine variabilité saisonnière (hiver, printemps et été) tout en respectant

des contraintes fortes d'acquisition (faible nébulosité et conditions géométriques viables). Il s'agissait des premières images Pléiades régulières acquises à Dijon, les premières étant en date de 2015 et 2016. Les AOD spectrales (dans le bleu, le vert et le rouge) inversées sur les 2 sites ombre-soleil sélectionnés à Dijon pour les images de février, d'août et de septembre sont réalistes. Un début de validation a pu être effectué grâce à quelques mesures d'AOD réalisées avec un photomètre solaire portatif de type CALITOO : les écarts entre AOD Pléiades et AOD CALITOO atteignant ± 0.04 pour des sites dont les reflectances de surface sont de l'ordre de 20%, ce qui est en cohérence avec la littérature scientifique. Bien que préliminaires, ces résultats ouvrent la voie à la caractérisation et au suivi de la pollution particulaire en ville (§VI/Perspectives de recherches). En effet, l'AOD est un paramètre clé en télédétection (§II), complexe à inverser, et d'autant en ville lorsque le milieu est très hétérogène. **Réussir à obtenir des AOD à partir d'images Pléiades constitue donc en soi une avancée significative** pour l'état des connaissances sur les particules en ville. L'étape suivante consiste à spatialiser les AOD à très haute résolution spatiale puis à les transformer en concentrations de polluants particulaires en surface.

Les conclusions obtenues après développement des méthodes basées d'une part sur la modélisation informatique des émissions de polluants (§IV.2) et d'autre part sur la télédétection des AOD (§IV.1) ont clairement mis en évidence la nécessité de la mise en place d'un réseau dense de mesures de PM à Dijon afin de se raccorder à la surface. Le développement du **concept QameleO** (§IV.3-4) permet d'envisager l'aboutissement des deux axes de recherches précédemment présentés tout en ouvrant de nouvelles perspectives.

QameleO est une micro-station de mesures environnementales développée par Biogésociences à l'UB et UMMISCO à l'IRD en 2018-2019. **Une déclaration d'invention** a été déposée en 2019, **une licence logiciel** en 2020 puis **la marque avec visuel (logo)** en 2021. Le développement fut donc extrêmement rapide. QameleO est « low-cost » ce qui permet de l'implanter en réseau dense mais la micro-station est avant tout modulable ce qui permet d'envisager une **mesure multi-polluants**. Aujourd'hui, elle mesure les concentrations en particules fines, mais demain peut-être aussi les NO_x, l'ozone, ou encore le CO₂. Son autre innovation est qu'elle fournit une mesure de **qualité scientifique** de par sa méthode d'implantation en réseau (§IV.3) mais aussi grâce à une méthode originale de calval non seulement basée sur des mesures de référence mais aussi sur la prise en compte de conditions météorologiques locales (§IV.4). Tous ces points différencient QameleO des micro-capteurs de qualité de l'air que tout à chacun peut se procurer à moindre coût dans le commerce ou sur Internet. QameleO dispose d'un système de transmission de la donnée en temps réel, c'est une **micro-station connectée**. Elle est de plus pourvue d'un QR code et d'un site Web permettant au grand public de consulter les indices de qualité de l'air au plus proche de chez soi (horizon 2022). Ceci permet d'envisager des ouvertures vers les sciences participatives. Enfin, la dimension **open source** de QameleO permet d'envisager la mise en place de projets pédagogiques avec des lycées ou des collèges mais aussi la collaboration avec des collectivités, des bureaux d'études, des PME, ou encore des grands groupes (§VI/Perspectives de recherches) ; le projet QameleO permet donc à la fois des actions de vulgarisation, de communication et de formation mais aussi des actions de transfert technologiques.

QameleO déployé à Dijon (20 micro-stations de mesures à horizon 2022) a permis de tester le dispositif en grandeur réelle. Les sites d'implantation ont été choisis sur la base de critères scientifiques (morphologie locale, proximité aux sources de pollution, densité de population entre autres), puis les candélabres urbains préparés pour accueillir les micro-

stations de mesures. L'implantation concrète des micro-stations est ensuite réalisée par les chercheurs à Biogéosciences et UMMISCO au fur et à mesure de leur fabrication, en FABLAB à l'IRD de Bondy, créée spécifiquement en septembre 2020. Aujourd'hui cette **approche-réseau pour des micro-capteurs de qualité de l'air est tout à fait originale et généralisable à d'autres environnements urbains** ; QameleO ainsi que son déploiement en réseau représente donc une innovation à portée internationale (§VI/Perspectives de recherches).

V. Conclusion générale

Les aérosols troposphériques constituent un objet de recherche central car ils affectent le bilan radiatif de la planète, impactent de manière significative les environnements terrestres ou océaniques et enfin jouent un rôle sur les sociétés, notamment sur la santé humaine. Ils sont cependant difficiles à quantifier en environnement réel (naturel ou anthropique) de par leurs caractéristiques intrinsèques complexes (diversité de propriétés physico-chimiques, optiques et hygroscopiques) et parce qu'ils sont dotés d'une grande variabilité dans l'espace (diversité des sources d'émissions et des quantités émises), dans le temps (durée de vie variant de quelques minutes à quelques jours) et sur la colonne atmosphérique (présence en surface ou en altitude dépendant notamment de la taille des aérosols ainsi que des conditions météorologiques mais aussi des apports extérieurs).

Mes activités de recherches s'articulent depuis 20 ans autour des aérosols troposphériques. Elles ont pour **objectif principal d'améliorer leur quantification, leur caractérisation et la compréhension de leur dynamique spatio-temporelle en surface, à partir de méthodes physiques en télédétection et d'approches de terrain, comme élément essentiel de validation, afin de servir des thématiques sociétales comme celle de la santé humaine.**

Elles s'organisent en **3 axes** :

- L'axe 1, « **Télédétection des aérosols en surface** », pour lequel 2 types de méthodologies ont été mises en œuvre : l'évaluation du potentiel de produits satellitaires existants (c'est le cas des poussières désertiques au Sahel, §II) et l'application de méthodes physiques en télédétection (c'est le cas des aérosols urbains, §IV.1) ;
- L'axe 2, « **Poussières désertiques et méningites bactériennes** », mené au Sahel, dans la bande latitudinale 10-15°N très communément appelée « Ceinture des méningites », visant à établir un diagnostic solide des relations entre climat, environnement et santé et ainsi investir le domaine de la télé-épidémiologie ;
- L'axe 3, « **Pollution particulaire** », mené en milieu urbain, investissant des échelles nécessairement plus fines dans des milieux plus complexes et hétérogènes, et pour lequel les approches de télédétection sont complétées par des méthodes de géosimulation et des protocoles de mesures de terrain originaux.

L'axe 1 est l'axe-phare, long-terme, méthodologique de mes activités de recherches (Figure V.1). Il est à la fois en lien avec mon domaine de spécialité initial, la télédétection du point de vue des méthodes physiques, constitue un outil majeur pour la climatologie que je suis devenue, et permet de répondre aux questions de recherches posées sur les aérosols troposphériques, qu'ils soient d'origine naturel comme les poussières désertiques (axe 2) ou d'origine anthropique (axe 3). Une voie parallèle, intrinsèquement liée à l'axe 1, notée Axe 1b « **Mesures** », relève de la mise en place de stations de mesures fixes sur le territoire français (Arcachon et Dijon) ou à l'international (Burkina Faso), en station isolée (§Fiches 1 et 2) ou en réseau (§Fiche 3). Ces pilotages de site ont jalonné l'ensemble de ma carrière, permettant ainsi la production de bases de données originales, à des endroits où les mesures étaient lacunaires voire inexistantes, et donc à la fois essentielles pour la calval des données spatialisées (axes 1 et 2) et constituant une voie d'amélioration indéniable des produits satellitaires et de divers jeux de simulation (axes 2 et 3).

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Axe 1 Télédétection															
Axe 1b Mesures															
Axe 2 Poussières Santé															
Axe 3 Pollution Ville															

Figure V.1. Chronologie des recherches menées depuis 2007 dans les 3 axes principaux, Axe 1 « Télédétection des aérosols en surface », Axe 1b « Mesures », Axe 2 « Poussières désertiques et méningites bactériennes », Axe 3 « Pollution particulaire ». Les nuances de bleu indiquent les priorités des recherches engagées, le bleu plus soutenu indiquant une priorité 1.

La dynamique de l'axe 1 a essentiellement été créée au niveau national : collaborations avec le Laboratoire d'Optique Atmosphérique, le Laboratoire d'Aérodologie et l'ONERA-DOTA à Toulouse, notamment par le biais des projets CNES TELEDM, TELEPAF et Quali_ThR (Partie B/§2.1). Les approches adoptées se basent sur des produits aérosols-phare tels que les AI et les AOD pour la télédétection passive et les coefficients d'extinction issus des LIDAR spatiaux. Elles visent à se raccrocher à la surface afin de répondre à des questions de santé.

Le premier volet de l'axe 1 vise à évaluer le **potentiel de produits satellitaires aérosols existants pour des analyses d'impacts sanitaires dans la Ceinture des Méningites** (§II). Il ne s'agit donc pas ici de mener à bien des études de calval classiques en télédétection, qui se limitent bien souvent à la vérification de l'inversion des épaisseurs optiques des aérosols. Dans le cas du travail mené sur les poussières désertiques, il s'est agi de regarder la performance des produits satellitaires pour ce type d'aérosols aux propriétés physico-chimiques et optiques spécifiques, en surface, au Sahel et de janvier à juin qui correspond à la saison des méningites bactériennes. Les recherches conduites ont permis de mettre en évidence les résultats suivants. Tout d'abord, les AI (Absorption Index), indices aérosols semi-empiriques, issus des séries long terme des missions TOMS puis OMI (depuis le milieu des années 90) sont des proxys satisfaisants des concentrations massiques des aérosols en surface sur la période correspondant au démarrage et au maximum de la saison des méningites, à savoir le premier trimestre de l'année, JFM (Deroubaix *et al.* (2013), Partie B/§5.1). Ceci est très prometteur pour étudier ensuite le lien entre aérosols et méningites sur de longues périodes temporelles, avec et sans le biais de la vaccination, le tout dans le contexte de la variabilité et du changement climatiques (thèse d'Adrien Deroubaix (2009-2013), Partie B/§4.3). L'AOD, produit de référence pour intercomparer les capteurs satellitaires entre eux, est un indicateur d'aérosols intégré sur la colonne atmosphérique. Les recherches portant sur les produits MODIS ont permis de mettre en évidence l'intérêt particulier d'utiliser les AOD issus de l'algorithme Deep Blue en vue des impacts sur les méningites. Ainsi, les AOD MODIS sont de bons proxys des concentrations en PM₁₀ en surface sur l'ensemble de l'année, avec de meilleures performances en JFM que les AI, mais ils sont aussi et surtout capables de correctement reproduire la relation entre AOD et coefficient d'Angstroem dans cette région du monde (Niane *et al., in prep*). Ainsi les produits MODIS permettent de faire la distinction entre 3 types de situations aérosols : les poussières désertiques pures, les mélanges d'aérosols avec une dominance de poussières désertiques, et les mélange d'aérosols avec une dominance d'aérosols fins parmi lesquels les aérosols carbonés (thèse de Papa Massar Niane (2019-2022), Partie B/§4.3). La première situation correspond à la période de janvier à juin, i.e. la saison des méningites. Enfin les produits CALIOP, qui permettent d'avoir accès au profil vertical de différents types d'aérosols, se sont

révélés extrêmement utiles pour accéder, à partir des AOD et de l'altitude des poussières, aux concentrations des PM₁₀ en surface (CDD de Sébastien Merlet, dont j'ai assuré la direction, Partie B/§4.5). Ainsi, un modèle statistique considérant les produits CALIOP en plus des mesures d'AOD semble permettre, aux pas de temps mensuels et quotidiens, de modéliser les variations saisonnières des concentrations en PM₁₀ en surface (Léon *et al.* (2020), Partie B/§5.1). **Ces recherches ont permis de mettre en évidence le potentiel de la télédétection spatiale pour la documentation de l'exposition des personnes aux particules fines, en particulier les poussières désertiques, par le biais de la combinaison de produits satellitaires aérosols, issus des radiomètres imageurs grand champ et des lidars spatiaux.** Les approches sont sans doute perfectibles notamment par manque de mesures de terrain ; cependant, pour l'heure, aucune mission spatiale dédiée ne répond à cet objectif.

L'autre volet de l'axe 1, plus récemment investi, porte sur la **télédétection des aérosols urbains (§IV.1)**. L'objectif est d'inverser des épaisseurs optiques aérosols à partir de l'imagerie THRS Pléiades (pixel de 2.8m en multispectral), produits inexistant à l'heure actuelle. Ces recherches exploratoires en méthodes physiques en télédétection, menées en collaboration avec l'ONERA-DOTA à Toulouse, ont permis de faire la preuve de la méthode ombre/soleil par différence appliquée à des images Pléiades en plusieurs points de la ville de Dijon, alors que cette méthode est plutôt d'ordinaire appliquée à des images haute résolution (pixel de quelques dizaines de mètres). Ceci **constitue en soi ainsi une avancée prometteuse dans le domaine de la télédétection de l'atmosphère à très haute résolution spatiale**. La méthode, très sensible aux réflectances de surface, demande désormais à être consolidée via la mise en place de campagnes de mesures spectroradiométriques à Dijon (§VI/Perspectives de recherches).

Les recherches menées dans l'axe 2 revêtent une portée internationale grâce au programme AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine, 2002-2010) qui a considérablement participé aux échanges entre disciplines et à l'avancement de l'état des connaissances sur le lien entre climat, poussières et santé dans la ceinture des méningites. A partir de 2007 et jusqu'en 2012, le groupe climat-santé du programme AMMA-France évolue (Martiny (2007-2012), Partie B/§2.1) en infléchissant ses thématiques vers les poussières désertiques, et en intégrant des télédétecteurs, des atmosphériciens, des géographes de la santé, des historiens, des épidémiologistes et des médecins spécialistes des maladies infectieuses. Des liens se tissent alors avec l'initiative MERIT (Meningitis Risk Environmental Information Technologies, 2007-2012) de l'OMS et le groupe MAMEMA (Multidisciplinary Approach for Meningitis Epidemiology and Modeling in Africa), dont je suis membre co-fondatrice, se constitue (sa dynamique durera 4 ans de 2010-2014), élargissant le groupe à des mathématiciens modélisateurs et des anthropologues. Les données épidémiologiques de certains pays particulièrement touchés par les épidémies (tels que le Niger, le Burkina Faso et le Mali), et qui n'avaient été que très peu exploitées par la communauté des géophysiciens, deviennent alors, par le biais de ces différents groupes de recherches, accessibles. Le trio de partenaires Biogéosciences pour les aérosols et la climatologie, MIVEGEC à Montpellier et l'Institut Pasteur EHESP à Paris pour l'épidémiologie de la maladie constitue les bases d'un réseau à l'international et pluridisciplinaire, toujours solide à l'heure actuelle.

Il est important de mentionner que **le lien entre poussières désertiques, climat et méningites bactériennes (§III), bien que suspecté depuis les années 60, était au**

début d'AMMA plutôt sujet à controverse. Peu de recherches scientifiques quantitatives avaient investi cette question. La raison première est le caractère non vectoriel de la maladie puis à son asymptotisme, rendant complexe la compréhension du portage et de la transmission de la maladie. Ainsi les études portant sur les mécanismes biologiques des méningites étaient rares. Il apparaissait donc essentiel de démontrer en premier lieu que la méningite bactérienne pouvait être considérée comme une **maladie climato- ou environnement-sensible** au même titre que d'autres pathologies vectorielles telles que le paludisme ou la dengue (Tompkins *et al.* (2019), Partie B/§5.4). Le point de départ des recherches fut le climat, d'abord confirmé comme étant en octobre-novembre un primo-déterminant de l'intensité de l'épidémie (nombre de cas total sur une saison des méningites) survenant quelques mois plus tard. Les recherches ont ensuite consisté à l'analyse plus précise de la variabilité intra-saisonnière des méningites (au pas de temps hebdomadaire) en lien avec les poussières désertiques. Les avancées scientifiques ressortant des études menées sur la période 2010-2020 sont énoncées ci-dessous.

Tout d'abord, **les poussières désertiques semblent de prime importance de janvier à avril, lors des phases de démarrage et de développement épidémique, jusqu'au maximum saisonnier** (Martiny & Chiapello (2013), Partie B/§5.1). Il est à noter que lors de la phase de démarrage, en janvier-février, les conditions sèches associées aux vents d'Harmattan sont également très pregnantes mais ne sont pas statistiquement reliées à la variabilité intra-saisonnière des méningites, au contraire des poussières. Lors de la phase de décroissance, de la mi-avril à juin, les aérosols sont de moindre importance face à l'augmentation de l'humidité relative, indicatrice de la fin de la saison des méningites. Une étude menée à l'échelle des districts sanitaires au Niger, grâce à un jeu de données épidémiologiques de l'OMS post-traité par des biostatisticiens, et à un produit aérosols long-terme tel que l'AI calé sur les PM mesurés en surface (Deroubaix *et al.* (2013), Partie B/§5.1), a permis de mettre en évidence la cohérence des poussières désertiques versus les autres variables climatiques (Agier *et al.* (2013), Partie B/§5.1). Ayant resserré la période d'analyse de janvier à avril, **un décalage moyen de 1 à 2 semaines à l'échelle du pays, de 1.55 semaines à l'échelle du district sanitaire et de 5 à 6 jours à l'échelle de l'aire de santé** (Woringer *et al.* (2018), Partie B/§5.1) a pu être montré entre poussières et méningites. Au-delà du fait que ces résultats, utilisant différents jeux de données épidémiologiques et différents produits satellitaires aérosols, soient concordants entre eux, ils apparaissent **en accord avec la réalité biologique**. En effet, le délai entre les événements de poussières et l'augmentation du nombre de cas de méningites semble cohérent par rapport à la période d'incubation de la bactérie *Neisseria meningitidis* variant entre 2 et 10 jours, les infections invasives, plus rares, se manifestant dans les 14 jours suivant l'acquisition de la bactérie. Il est à rappeler ici que la bactérie *Nm* ne peut survivre en environnement réel sur les aérosols ; elle est en réalité présente dans les voies respiratoires supérieures de l'être humain. La respiration de poussières désertiques peut ainsi entraîner la fragilisation de l'appareil nasopharyngé, ce qui faciliterait le passage de la bactérie dans le sang (§III.3). **Les aérosols semblent donc représenter un facteur explicatif important de la variabilité intra-saisonnière des méningites, ce qui constitue une avancée scientifique majeure** lorsque l'on sait qu'il y a environ 5 ans régnait encore un certain scepticisme au sein de la communauté scientifique sur le lien supposé entre aérosols et méningites. Aujourd'hui, même si les méningites restent pour les épidémiologistes, et ce, malgré la découverte des méningocoques il y a plus de 2 siècles, un objet complexe à étudier et à élucider, des campagnes de terrain et des expériences en laboratoire afin de mieux comprendre les processus microbiologiques liant les aérosols à

l'acquisition par un hôte de la maladie sont à l'oeuvre. Le maintien des recherches pluridisciplinaires est donc indispensable pour avancer de concert sur la thématique. Ces résultats sont aussi à examiner au regard du caractère multi-factoriel de la maladie (Agier *et al.* (2017), Partie B/§5.1) : **réussir à dégager un signal aérosols dans ce contexte met une nouvelle fois en exergue les avancées concrètes engagées**. Ils ouvrent des perspectives concrètes en télé-épidémiologie à l'échelle de la Ceinture des méningites (Martiny *et al.* (2018), Partie B/5.3) mais aussi sur le développement de modèles explicatifs statistiques (thèse d'Adrien Deroubaix (2009-2013), Partie B/4.3) ou basés sur la SMA et permettant de reproduire la dynamique saisonnière de transmission de la maladie à des échelles plus fines (thèse de Papa Massar Niane (2019-2022), Partie B/§4.3). Le travail semble être également transposable à d'autres maladies telles que les infections respiratoires aiguës (Mueller *et al.* (2017), Partie B/§5.1). En résumé, l'ensemble de ces recherches a permis de proposer des hypothèses solides à propos du lien entre poussières, climat et méningites **sur la base de méthodologies statistiques**; elles soulèvent maintenant de nouvelles questions scientifiques (§VI/Perspectives de recherches).

Les recherches conduites dans l'axe 3, dédié à la pollution particulaire en ville (§IV), ont permis un ancrage local et ouvrent sur des perspectives doubles, en national et à l'international sur du long terme (§VI/Perspectives de recherches). Elles ont été amorcées en 2012 (thèse de Justin Emery (2013-2016), Partie B/§4.3) dans le but de modéliser la pollution particulaire automobile en ville. Cette thèse a permis de créer un quatuor solide de partenaires sur le thème de la qualité de l'air, constitué des laboratoires Biogéosciences (climatologues) et ThéMa (géographes) à l'UB, UMMISCO (informaticiens et métrologistes) à l'IRD et l'AASQA ATMO-BFC (mesures et surveillance de la qualité de l'air en Bourgogne Franche Comté). Les recherches sont centrées sur la métropole de Dijon. Elles se sont intensifiées depuis 2018. Elles n'auraient pu voir le jour sans les supports financiers du Ministère de l'Ecologie et du développement durable, le Ministère de la cohésion sociale, Dijon Métropole (programme POPSU PURE, Partie B/§2.2) et l'obtention de financements régionaux (Plateforme GEOBFC, Partie B/§2.2). Les recherches présentées dans cet axe incluent chacune une part d'**originalité** voire d'**innovation** ; elles sont essentiellement d'ordre **méthodologiques** et représentent un défi en tant que tel, l'information portant sur la qualité de l'air (concentrations des polluants atmosphériques en surface) aux échelles ciblées n'existant tout simplement pas à l'heure actuelle. Ces travaux peuvent être vus comme une première étape ayant pour objectif à terme de caractériser et de comprendre les variabilités spatio-temporelles de la qualité de l'air à haute et très haute résolutions en milieu urbain.

Tout d'abord, la méthodologie développée pour l'estimation des émissions de polluants à échelles fines basée sur une approche data-driven (données de comptages routiers issues d'un réseau d'une centaine de capteurs) dans un modèle de simulation multi-agents (SCAUP) couplé à un module d'émissions de polluants (COPERT), a permis d'ouvrir de nouvelles pistes de développement, à l'interface entre géographie, informatique et qualité de l'air. **Le gain majeur de l'approche SCAUP/COPERT (Emery *et al.* (2020), Partie B/§5.1) est la quantification des émissions de polluants tronçon par tronçon et au pas de temps très resserré de 15mn**. L'approche de téledétection adoptée ensuite sur les images THRS Pléiades, et résumée ci-dessus dans l'axe 1, permet l'accès aux AOD, indicateurs de la quantité d'aérosols présents sur la colonne atmosphérique. Cette approche permet également d'ouvrir à **tout type d'aérosols urbains**, qu'ils proviennent du trafic automobile ou de toute autre source de pollution urbaine. Finalement, quelle que soit la méthode mobilisée, en

géosimulation ou bien télédétection, l'étape suivante consiste à spatialiser l'information à très haute résolution puis à la transformer en concentrations de polluants particulaires en surface. Ceci est rendu possible en intégrant aux différentes approches des mesures de PM en plusieurs points de la ville. Ces dernières, issues de 3 analyseurs de référence gérés par ATMO-BFC au moment des différents projets mis en oeuvre, se sont cependant révélées insuffisantes pour caler avec robustesse les approches SCAUP/COPERT puis Pléiades à Dijon.

Le concept QameleO développé depuis 2018-2019 par Biogéosciences à l'Université de Bourgogne et UMMISCO à l'IRD de Bondy semble pouvoir permettre, à terme, l'aboutissement des deux approches de recherches précédemment présentées, tout en ouvrant de nouvelles perspectives. Les recherches portant sur QameleO peuvent être qualifiées d'innovantes, ayant fait l'objet d'une [déclaration d'invention UB/IRD](#) en 2019, d'une [licence logiciel Creative Common](#) en 2020 ainsi que de l'obtention de la [marque QameleO](#) avec un visuel (logo) en 2021 (Partie B/§2.5). Le développement fut donc extrêmement rapide et très suivi et soutenu par la cellule de valorisation de l'IRD à Bondy. Ceci peut être expliqué par le fait de proposer, avec ce concept, une mesure **multi-polluants de qualité scientifique** ([Martiny et al., in prep](#)), une information transmise en temps réel, la micro-station étant **connectée**, et **accessible au grand public**, via un QR code ou un site Web (horizon 2022). Enfin, la dimension **open source** de QameleO permet d'envisager la mise en place de projets orientés vers les sciences participatives et de projets pédagogiques en partenariat avec des lycées ou des collèges. QameleO peut intéresser les collectivités souhaitant accorder une place plus importante à l'environnement et la qualité de vie des espaces urbains. Enfin, QameleO peut être une opportunité pour des bureaux d'études, des PME, ou encore des grands groupes d'installer des réseaux de surveillance de qualité de l'air à moindre coût et de développer des services autour de ces réseaux. Les limites du concept relèvent du manque de recul sur les micro-capteurs implantés dans la micro-station de mesures, et d'autant plus pour les polluants gazeux. La maintenance de telles micro-stations implantées en réseau demande de la ressource et du temps. Par ailleurs, les évolutions technologiques des cellules de mesures sont extrêmement rapides et la tentation de remplacer les cellules de mesures par de meilleures options est forte, quid de la stabilité du réseau.

Pour l'heure, le réseau QameleO déployé à Dijon, constitué de 20 micro-stations (horizon 2022), permet la mesure conjointe 24h/24 de 3 polluants particulaires, les PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁ au pas de temps de 15mn. Le réseau vient compléter le réseau historique d'ATMO-BFC (3 analyseurs de pollutions particulaires) et s'inscrit complètement dans la mouvance *Smart City* souhaitée par Dijon Métropole; les mesures de pollution feront ainsi partie d'un *Data Lake* comportant des données de la ville (éclairage public, trafic routier, etc). Ce type de réseau est émergent en France et la dimension pérenne des observations lui confère un statut spécifique, quand la plupart des expériences en Europe et dans le monde liées aux micro-capteurs de qualité de l'air sont assez courtes dans le temps (quelques semaines à quelques mois) et localisées dans des quartiers spécifiques (éco-quartiers, écoles de la ville, etc) ou participatifs (peu de solidité scientifique pour la donnée recueillie). En résumé, **l'approche-réseau proposée pour les QameleO semble présenter une certaine originalité et ainsi avoir sa place dans les méthodologies de mesures de la qualité de l'air en ville; elle a de plus été imaginée pour être généralisable à d'autres environnements urbains.** (§VI/Perspectives de recherches).

VI. Perspectives de recherches

Deux axes de recherches sont clairement identifiés pour les 10 prochaines années, l'axe « Pollution en Ville » (§VI.1), envisagé comme prioritaire car des projets structurants ont d'ores et déjà démarré, et l'axe « Poussières et Méningites en Afrique » (§VI.2).

VI.1 L'axe « Pollution en Ville »

Les aérosols troposphériques, qu'ils soient de nature anthropique ou naturelle comme les poussières désertiques, peuvent considérablement altérer la qualité de l'air que nous respirons, des échelles régionales à urbaines, de manière directe, par le biais de concentrations aux particules fines élevées, ou indirecte, via des effets sur le rayonnement UV, impliquant des réactions photochimiques en présence de pollution azotée (NO_x) et une production d'ozone troposphérique. Par ailleurs, les concentrations des polluants particulaires mesurées en surface dépendent à la fois des sources de pollution et des conditions météorologiques. Dans le contexte du changement climatique, il apparaît ainsi pertinent de se pencher sur la question de la dégradation de la qualité de l'air en lien avec la plus grande occurrence des vagues de chaleur en été. En effet, à cette saison, et dans les villes au climat tempéré, l'occurrence de conditions anticycloniques, de températures atmosphériques élevées, de vent et d'humidité faibles, qui favorisent la formation des îlots de chaleur urbain, peut conduire à la production d'ozone troposphérique mais aussi à des phénomènes d'accumulation de pollution particulaire. La pollution aux particules fines est ainsi l'un des sujets importants à explorer dans les futures études en environnement urbain. Par suite, les **polluants qui semblent préoccupants pour les prochaines décennies sont d'une part l'ozone troposphérique en été et les particules fines à l'année**, qui peuvent dépasser les normes européennes en été (conditions météorologiques), en automne et en hiver (périodes de chauffe) ainsi qu'au printemps (influence des activités agricoles). Certaines conditions météorologiques telles que les inversions thermiques, généralement observables d'octobre à mars en Bourgogne, sont également intéressantes à étudier car elles favorisent l'accumulation des particules fines en surface.

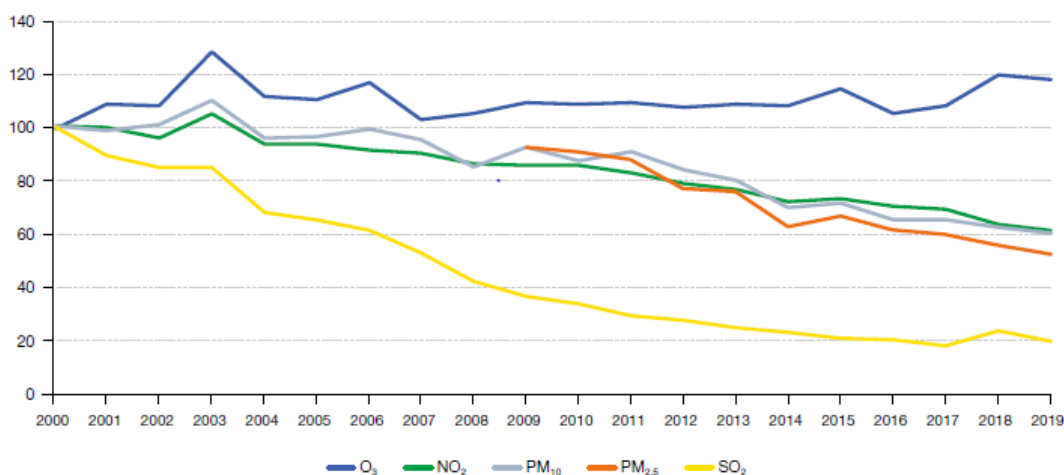


Figure VI.1. Evolution des concentrations moyennes annuelles des polluants gazeux O_3 , NO_2 et SO_2 et particulaires PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$ en fond urbain entre 2000 et 2019 en France métropolitaine hors Corse (base 100 en 2000, en 2009 pour les $\text{PM}_{2.5}$). Les concentrations moyennes d'ozone ont été calculées du 1^{er} avril au 30 septembre. Source : Géod'Air, juin 2020. Traitements : SDES, 2020.

La pollution particulaire n'a pas encore livré tous ses secrets et son impact sanitaire est jugé inquiétant, notamment sur les jeunes (OMS, 2018), et ce, même si les concentrations moyennes annuelles des particules (PM₁₀) sur le territoire français ont diminué de l'ordre de 40% sur la période 2000 à 2019 (Figure VI.1). Ainsi, en 2016, 4.2 millions de décès prématurés sont imputables à la pollution de l'air extérieur dans les zones urbaines et rurales. Cette mortalité est due à l'exposition aux particules d'un diamètre de 2.5 microns ou moins, qui provoquent des maladies cardiovasculaires et respiratoires, et des cancers. Des études se basant sur les concentrations massiques indiquent clairement par ailleurs qu'il n'y a pas de seuil en-dessous duquel les particules ne sont pas nocives (AirParif, 2020).

Les enjeux actuels et à venir sur le thème de la qualité de l'air ainsi que la dynamique récente de mes activités de recherches sur la pollution particulaire en ville (§IV) et l'expertise acquise de l'analyse des liens entre aérosols et santé (§III) se rejoignent ici. Ainsi, une partie des recherches pour les 5 prochaines années sera poursuivie sur Dijon Métropole et une autre partie se développera à l'international dans des villes africaines au climat tropical. L'instrument qui permet entre autres de combiner les 2 est la micro-station QameleO. Ci-dessous, **2 projets d'envergure internationale** ayant démarré en 2020 et 2021 vont constituer un cadre idéal pour ces recherches.

Le projet « H2020 Villes et communautés intelligentes » RESPONSE (2020-2025) est un projet européen (<https://www.metropole-dijon.fr/Grands-projets/Projet-Response-H2020>) porté par Dijon Métropole et les équipes locales d'EDF visant à développer des solutions innovantes en faveur du déploiement de quartiers à énergie positive en Europe d'ici à 2025. C'est un projet qui s'appuie sur un réseau de 53 partenaires européens issus de 13 pays et des partenaires locaux tels que l'Université de Bourgogne. Le projet est centré sur 2 « villes phares » : Dijon en France et Turku en Finlande. Les solutions et expériences dijonnaises et finlandaises ont vocation à être dupliquées dans 6 autres villes européennes, dont Bruxelles. Au sein de ce projet, Biogéosciences a proposé, pour le volet qualité de l'air (Partie B/§2.2), d'utiliser les mesures des micro-stations QameleO déployées à Dijon Métropole afin d'améliorer les cartes de pollution particulaire produites par l'AASQA ATMO-BFC. Cette proposition s'inscrit dans la continuité des recherches menées dans le but de spatialiser la qualité de l'air en ville, à très haute résolution spatiale, par le biais d'approches en télédétection (§IV.1) et en géosimulation (§IV.2). Ainsi, dans le projet H2020 RESPONSE, il est question de produire, en partenariat avec ATMO-BFC, et à l'aide des mesures des QameleO, **des cartographies réalistes de la pollution aux particules fines (PM₁₀ et PM_{2.5}), à une échelle décamétrique, pour la veille (j-1), le jour-même (j0) et le lendemain (j+1).** Par la suite, il sera question d'appliquer la méthodologie aux polluants gazeux en ajoutant des micro-capteurs de NO_x et d'ozone dans les micro-stations QameleO (**financements régionaux de la plateforme GeoBFC acquis en 2020**, Partie B/§2.2). Il sera alors possible de construire des **indicateurs de qualité de l'air complet**, de type ATMO, basés sur les concentrations en particules, ozone et oxydes d'azote à très haute résolution spatiale (10m). Il sera également possible d'analyser les **liens entre les concentrations de polluants à ces échelles et le climat urbain.** En effet, un autre groupe de travail à Biogéosciences produit des sorties climatiques, et parmi elles, la température atmosphérique. Enfin, un troisième thème de recherches investi dans H2020 est celui de la **projection du climat et de la qualité de l'air d'ici à 2050.** Le polluant ciblé est ici l'ozone en été. Ces travaux seront également réalisés en partenariat avec l'AASQA locale ATMO-BFC avec qui les liens seront de fait consolidés. Des **financements régionaux de la plateforme GeoBFC reçus en 2019** (Partie B/§2.2) ont permis l'acquisition d'un analyseur de référence MP101M pour

mesurer les concentrations des PM₁. L'instrument a été installé et sera maintenu dans un local de l'AASQA ATMO-BFC moyennant un échange de données entre organismes. [Un projet de thèse en partenariat UB/ATMO-BFC](#) est actuellement en cours de montage prévoyant une étude comparative de la pollution aux PM dont les PM₁ entre Dijon Métropole et le Pays de Montbéliard. Cet appareil permettra par la même occasion de calibrer les mesures des PM₁ réalisées par les QameleO – il est important de rappeler ici qu'aucune norme européenne n'existe sur ce polluant. Enfin, des [financements régionaux de la plateforme GeoBFC reçus en 2018](#) (Partie B/§2.2) ont permis l'acquisition d'un micro-aéthalomètre AE-51 pour mesurer les concentrations des particules carbonées. Les mesures mobiles, mobilisées dans des modules d'enseignements au niveau Master 1 et 2, ont également été utilisées pour réaliser un diagnostic environnemental d'un futur écoquartier de Dijon ([stage de M1 de Antoine Bayssari \(2021\)](#), que j'ai co-encadré, Partie B/§4.7). Les résultats sont encourageants et indiquent un lien fort entre occupation du sol et qualité de l'air d'une part, et occupation du sol et températures atmosphériques d'autre part ; ils seraient intéressants de les approfondir.

Le projet AIRQALI-4-ASMAFRI est une ANR (2021-2024) (<https://anr.fr/Projet-ANR-20-CE36-0012>) pilotée par le LPED (Laboratoire Population Environnement Développement) dont l'objectif est d'analyser la relation entre la pollution atmosphérique et la santé dans des zones urbaines d'Afrique de l'Ouest, où pollutions anthropiques et naturelles sont combinées. La capitale économique du Bénin, Cotonou, particulièrement polluée (NO_x, PM, COV, HAP), est ainsi un laboratoire à ciel ouvert où 60 QameleO sont prévus à l'implantation dès 2021-2022. Le FABLAB de l'IRD de Bondy permettra de mettre les micro-stations en fabrication dans les délais souhaités. Biogéosciences est impliqué dans ce projet avec l'UMMISCO de l'IRD (Partie B/§2.2). La méthodologie mise en place à Dijon sera ainsi dupliquée, les micro-stations de mesures étant, dans le cadre de ce projet, prévues à l'implantation devant des établissements scolaires. L'objectif est en effet de réaliser un diagnostic du lien entre la pollution de l'air et l'asthme chez les adolescents de moins de 15 ans. Ce projet permet d'élargir le type d'impacts santé étudiés jusqu'ici à une maladie non transmissible majeure et sous-diagnostiquée dans cette région du monde. Il fait logiquement suite aux recherches menées sur les méningites bactériennes (§III) car il porte sur les poussières, mais fait aussi un lien avec les activités menées en qualité de l'air, approche réseau de mesures (§IV). D'autres projets de surveillance et de modélisation de la qualité de l'air sont en cours à Dakar au Sénégal (**DAK'AIR**) et à Abidjan en Côte d'Ivoire (**Club Abidjan Ville durable**). Il y est question dans chaque cas d'implanter des réseaux de mesures QameleO. Biogéosciences est impliqué en tant que partenaire dans ces projets avec l'UMMISCO de l'IRD à Bondy (Partie B/§2.2).

Le concept QameleO devrait également être utile pour développer des axes de recherches futurs en télédétection des aérosols (§II). Un PSPC (Projet de recherche et développement Structurants Pour la Compétitivité) est par exemple en cours de montage avec ORANGE et DIGINOVE, spécialiste des traitements d'images satellitaires et démographie. L'objectif de ce projet est de modéliser la pollution particulaire dans des villes européennes et africaines, à partir des mesures fixes au sol QameleO, des produits satellitaires issus du programme COPERNICUS de l'Union Européenne et des données de santé (OMS, enquêtes de santé locales notamment). Ces données pourraient être reliées à des indicateurs de mouvements de population à partir de l'analyse fine des données issues du réseau mobile (Flux Vision, la solution innovante d'Orange). Des tests ont déjà réalisés en France avec l'application Sobloo : <https://sobloo.eu/data/donn%C3%A9es-mobiles>. En parallèle, une

analyse pourra être menée pour identifier les liens entre vision globale donnée par les radiomètres imageurs satellitaires de type Sentinel-5 et les micro-stations de mesures locales telles que QameleO. Ce lien entre produits aérosols intégrés sur la colonne atmosphérique et concentrations des particules en surface sera également investi à très haute résolution spatiale à l'aide de l'imagerie Pléiades et de VenùS dans le cadre d'un projet CNES faisant suite à Quali_ThR, en partenariat avec une équipe du LOA à Lille (à partir de 2022).

La qualité de l'air est un sujet auquel les citoyens sont généralement sensibles. Cependant, l'information diffusée apparaît d'une trop grande complexité et manque de lisibilité. QameleO devrait permettre de progresser sur ces aspects par le biais d'une action-phare, celle de la « recherche participative ».

Les expériences de recherches participatives fleurissent un peu partout en France. Par exemple, les projets Checkbox à Grenoble et Ambasad'Air à Rennes mettent en place un réseau de micro-capteurs portés par des citoyens volontaires afin de surveiller leur exposition personnelle, et ce dans un but de sensibilisation de la population à la qualité de l'air en ville. Le projet Pollutrack à Lille prévoit l'installation de micro-capteurs de particules sur le toit des tramways ou des voitures. Ces projets participatifs permettent à la fois de multiplier les zones d'analyses et de compléter et affiner la cartographie modélisée de la ville. Ils permettent parfois de détecter des événements de pollution très locaux non captés par les stations de référence, et ainsi mettent en évidence les très fortes disparités spatiales et temporelles de la pollution particulaire. Dans ces projets la technologie des micro-capteurs est complémentaire à celle des analyseurs de référence ; elle ne pourrait en aucun cas les remplacer. QameleO se positionne de manière légèrement différente comparativement à ces projets et propose des actions de sciences participatives en 3 volets. Le volet 1 porte sur **l'acquisition d'un QameleO à monter soi-même**, la micro-station de mesures étant *open source*. L'idée serait d'accompagner cette action en fournissant un tutoriel « Grand Public ». La micro-station serait alors installée selon des critères recommandés puis les mesures viendraient alimenter celles du réseau QameleO mis en place dans la ville. Le volet 2 consisterait en **l'implantation de QameleO réalisée par l'Université de Bourgogne et l'UMMISCO en fonction des demandes des citoyens** (Figure VI.2), ceci pouvant se faire en lien étroit avec les formations que nous portons au Département de Géographie (étudiants de L3 au M2). Le volet 3 consiste à **la mise en place de chaînes pédagogiques** ayant déjà été initiée à Dijon en 2019, notamment avec le Lycée professionnel Antoine Antoine de Chenôve. Une journée de formation au montage d'un QameleO avait été organisée à Biogéosciences à l'intention du directeur délégué aux formations professionnelles et technologiques, et de son équipe pédagogique du Baccalauréat Professionnel « Systèmes Numériques ». Deux types de tutoriels ont été développés à cette occasion, l'un à l'intention des enseignants et formateurs, l'autre à l'intention des élèves. Une présentation du projet de recherches associé (POPSU PURE), a également été faite au lycée Hippolyte Fontaine de Dijon afin d'initier un dialogue avec d'autres lycées en Bourgogne Franche Comté et ainsi continuer de travailler sur la chaîne de formation université-lycée sur le thème de la qualité de l'air. Des idées d'ordre techniques peuvent également émerger des différents discussions et échanges organisés. Ces actions seraient intéressantes à étendre à des publics plus jeunes tels que les collégiens dans un but de sensibilisation aux thématiques environnementales.

Ainsi, le réseau QameleO déployé à Dijon, enrichi de mesures participatives alimentées par les citoyens, les lycées, les collégiens, venant compléter le réseau de surveillance historique de

l'AASQA ATMO-BFC, et combiné au réseau de mesures des températures atmosphériques MUSTARDijon, permet de nourrir **l'ambition d'un observatoire environnemental intelligent et participatif à Dijon Métropole**. Un volet « influence de la végétation sur la qualité de l'air » pourrait également y être intégré si le projet de Laboratoire Commun WAQATALI porté par UMMISCO et la société URBASENSE, et auquel Biogéosciences participe, et dont le site-pilote est Dijon, voit le jour (à partir de 2022). Ces actions de recherches participatives pourraient par la suite être déclinées sur d'autres territoires, notamment en Afrique via l'UMMISCO de l'IRD.

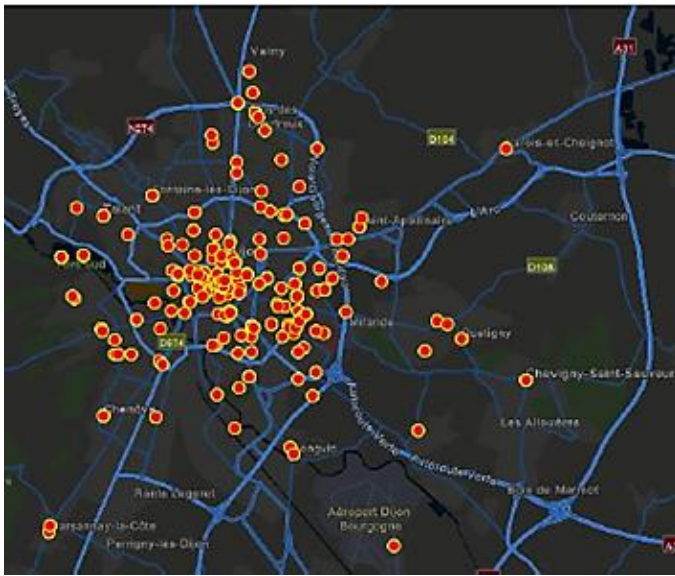


Figure VI.2 : Carte de la sensibilité environnementale déclarée par la population dijonnaise lors de la Nuit des Chercheurs 2019 organisée sur le campus de l'Université de Bourgogne. Source : [Cahier POPSU \(2022\)](#), Partie B/§2.8

VI.2 L'axe « Poussières et Méningites en Afrique »

Les méningites bactériennes à *Neisseria meningitidis* restent un **problème de santé publique majeure au Sahel**, à en juger la feuille de route à horizon 2030 publiée par l'OMS en avril 2020. L'ensemble des recherches menées sur les méningites bactériennes dans la Ceinture africaine des méningites (10-15°N) a permis de faire progresser l'état des connaissances du complexe poussières, climat et méningites, étape de diagnostic et de compréhension indispensable avant de pouvoir passer à la modélisation des phénomènes, voire à leur prévision. Ainsi, **l'un des 2 défis importants à relever** d'ici aux 2 à 3 prochaines années réside dans l'utilisation des connaissances acquises sur le lien climat et méningites d'une part puis sur le lien poussières et méningites d'autre part afin de mettre au point un **modèle explicatif des incidences des méningites** au pas de temps hebdomadaire et à l'échelle du district sanitaire.

La [thèse d'Adrien Deroubaix \(2009-2013\)](#), Partie B/§4.3) a permis d'avancer sur cette question en proposant une série de modèles statistiques, régressions linéaires multiples de type *stepwise*, construits à l'échelle nationale puis à l'échelle du district sanitaire. Ils font ressortir à chaque fois les variables Température et Poussières en 1^{ère} et 2^{ème} position. La dynamique temporelle des méningites au pas de temps hebdomadaire est alors correctement retrouvée et, plus intéressant encore, la date de dépassement du seuil épidémique de 5 cas pour 100 000 habitants par semaine à l'échelle nationale est en accord avec l'observation (Figure VI.3).

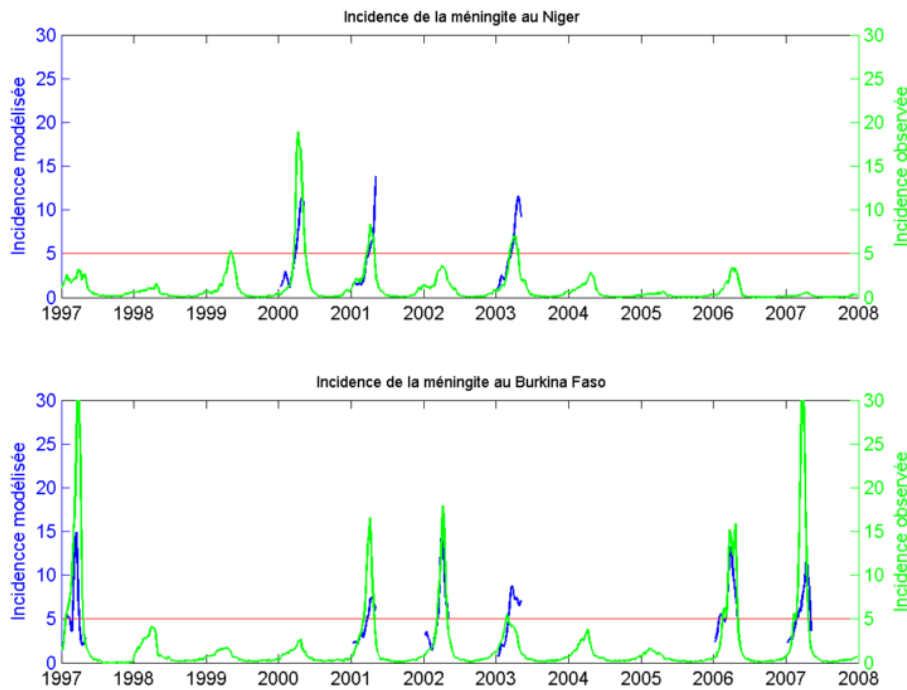


Figure VI.3. Séries temporelles de l'incidence des méningites observée (en vert) et modélisée (en bleu) à l'échelle nationale pour le Niger et le Burkina Faso. La ligne horizontale (en rouge) est le seuil épidémique sur la période 1997-2007. Figure extraite de la [thèse de Adrien Deroubaix \(2013\)](#), Partie B/§4.3.

Ces recherches ont permis de mettre en évidence, en période épidémique, que les températures et les poussières intégrées sur une période de 2 semaines et décalées d'une semaine avec la maladie permettaient d'expliquer 33% de la variabilité des incidences hebdomadaires des méningites à l'échelle du pays, et 20% de cette dernière à l'échelle du district sanitaire. Cependant, le nombre de cas des méningites n'est pas correctement retrouvé : il semble alors primordial d'ajouter des variables de nature différente aux modèles (§III/Contextualisation est questions scientifiques). Pour cela il apparait indispensable d'avoir recours à d'autres types de modèles que les modèles statistiques, notamment les modèles informatiques basés sur la SMA qui ont par ailleurs fait leur preuve dans le domaine de la qualité de l'air (§IV.1) mais aussi dans le domaine de la santé. La thèse de Wajdy Zaatour, co-dirigée par UMMISCO et BIMS à Tunis, et à laquelle j'ai contribué en tant que membre du comité de pilotage, a permis de développer un modèle de SMA pour la leishmaniose en Tunisie ([Zaatour et al. \(2021\)](#), Partie B/§5.1).

La [thèse de Papa Massar Niane \(2019-2022\)](#), co-tutelle France/Sénégal, co-dirigée au Sud au Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et au Nord en binôme IRD et Biogéosciences, Partie B/§4.3) a pour objectif de construire un modèle de SMA, en intégrant les résultats des recherches sur le lien entre méningites, poussières et climat (Figure VI.4) ainsi que des variables de mobilité. Cette thèse devrait permettre de construire un modèle à échelle spatio-temporelle fine, celle du district sanitaire, échelle d'action de l'OMS, en intra-saisonnier au pas de temps hebdomadaire, et à visée double : reproduction de la dynamique temporelle au même titre que les modèles statistiques précédemment établis et compréhension de la dynamique spatiale de la maladie (par le biais de tests et différents scenarii) dont la complexité n'est plus à démontrer ([Woringer et al., soumis en 2021](#), Partie B/§5.2).

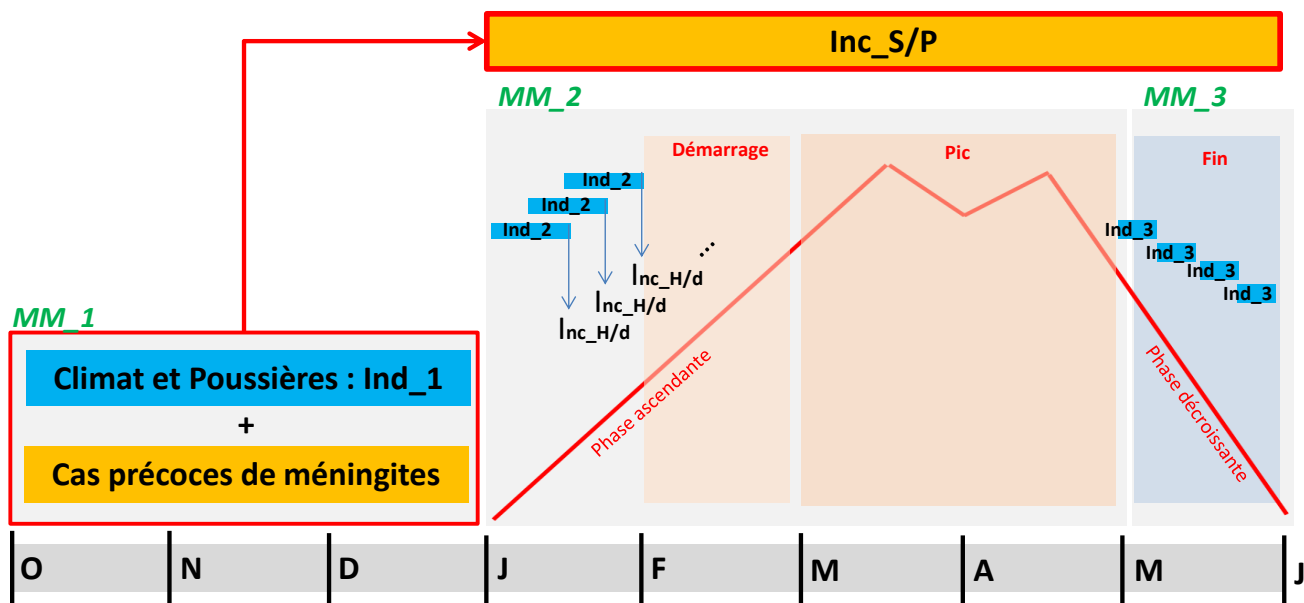


Figure VI.4. Schéma conceptuel d'un modèle prenant en compte les résultats des recherches sur le lien entre méningites, poussières et climat. MM_1 représente la modélisation des incidences saisonnières des méningites à l'échelle d'un pays, $Inc_{S/P}$, à partir d'un premier indicateur climat-poussières, Ind_1 , représentatifs des premiers événements de poussières d'Harmattan et des cas précoces de méningites. MM_1 permet de détecter si l'année sera épidémique ou pas. MM_2 représente la modélisation des incidences hebdomadaires des méningites à l'échelle du district sanitaire, $Inc_{H/d}$, à partir d'un second indicateur climat-poussières, Ind_2 , représentatifs de la persistance sur plusieurs semaines des températures élevées et des événements de poussières intenses. MM_2 permet de détecter le démarrage et le pic épidémique. MM_3 représente la modélisation de l'arrêt de la saison ou de l'épidémie des méningites à partir d'un troisième indicateur, Ind_3 , basé sur l'humidité relative.



Figure VI.5. De la collecte d'un filtre de collection des poussières sur l'instrument TEOM au Burkina Faso (à gauche) aux premières analyses en laboratoire à Dijon (à droite). Illustrations extraites de [Martiny et al. \(2014\)](#), Partie B/§5.7.

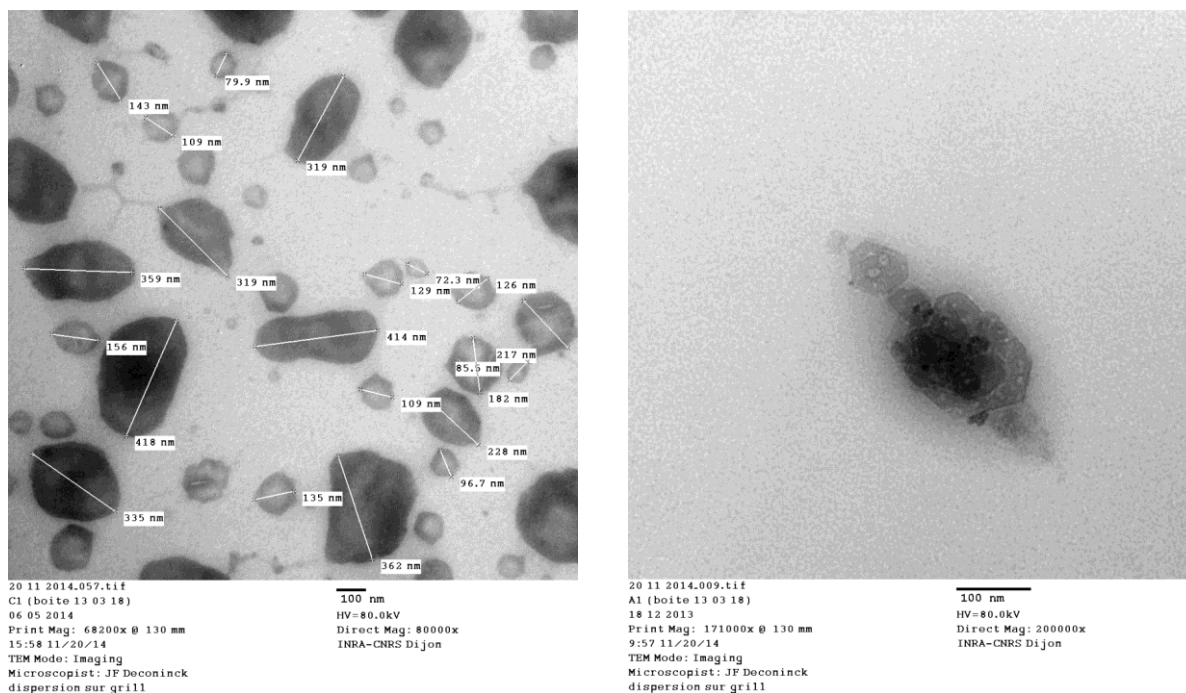


Figure VI.6. Analyse de la granulométrie des poussières recueillies sur les filtres de collection du TEOM de Dédougou en novembre 2014. Figures fournies par l'équipe SEDS de Biogéosciences.

L'autre défi majeur, à plus long terme, relève de la compréhension de la maladie à l'échelle de la Ceinture des méningites (§III.4) et au-delà de la Ceinture des méningites, dans le contexte de la variabilité et du changement climatiques. Les questions qui se posent aujourd'hui sont les suivantes :

- (i) Pourquoi observe-t-on un gradient est-ouest des méningites au sein de la Ceinture ? est-ce lié à la quantité d'aérosols, à leur type ? à leur minéralogie ?
- (ii) La taille des particules jouent-elles un rôle ?
- (iii) Observe-t-on une extension de la Ceinture vers le Sud ? Si oui pourquoi, et quels sont les facteurs mis en cause ?

Implanté en juillet 2012, le TEOM de Dédougou au Burkina Faso (§Fiche 1) mesure des concentrations massiques de PM_{10} au pas de temps quart-horaire. A partir de 2014, une fois la preuve faite de l'opérationnalité du site de mesures, l'analyse des filtres de collection des particules (Figure VI.5) a été mise en place (techniques de diffraction des rayons X, microscopie à transmission électronique et à balayage) en partenariat avec l'équipe SEDS de Biogéosciences, et dans le cadre d'un projet financé par l'OSU THETA (Martiny *et al.* (2014), Partie B/§5.7).

Contrairement à ce que nous imaginions les **poussières recueillies à Dédougou sont fines**, n'excédant pas quelques centaines de nanomètres (Figure VI.6, à gauche), indiquant des particules pénétrant plus facilement et donc plus profondément dans l'appareil respiratoire avec un impact potentiellement plus néfaste sur la santé. Par ailleurs, leur forme **peut s'avérer particulièrement abrasive** (Figure VI.6, à droite). Enfin, si les analyses minéralogiques indiquent la présence d'illite et de kaolinite, en cohérence avec les argiles couramment présents dans les poussières désertiques, certains échantillons indiquent la présence de smectite. Ces compositions minéralogiques constituent des éléments-clés pour identifier l'origine des particules (sources). La smectite semble par exemple être un indicateur de poussières provenant de sources algériennes. Dans ces conditions, à quantité de poussières équivalentes, quelles sont les poussières les plus impactantes pour la santé des populations ? La smectite étant utilisée dans les traitements anti-diarrhéiques des enfants, ce pourrait-il que **les poussières contenant de la smectite, et provenant vraisemblablement de sources au nord / nord Ouest** (Mauritanie, Lybie, Algérie), **soient moins impactantes pour la santé** que les poussières provenant de Bodélé (Tchad, Niger)? Ces premiers constats indiquent que les analyses minéralogiques des filtres du TEOM associées à des simulations de rétrotrajectoires de vents et de poussières (identification des sources) peuvent permettre de **poser de nouvelles hypothèses** quant à la compréhension du rôle des poussières sur les cas de méningites et déboucher sur une valorisation originale de mesures fixes issues d'une station au sol en Afrique.

Concernant enfin **les épidémies de méningites observées au Sud de la Ceinture**, des travaux ont récemment été initiés en Côte d'Ivoire ([stage de M1 de Regina Koutouan, \(2021\)](#), dont j'ai assuré la direction, Partie B/§4.7). Ils ont permis de caractériser l'épidémiologie des méningites dans le pays, à l'échelle du district sanitaire, à partir d'un jeu de données inédit sur une période récente (2015-2020) et de montrer que les épidémies n'étaient pas cantonnées dans le nord du pays comme semblaient l'indiquer les bulletins de l'OMS des années 2004-2015. Le cycle saisonnier moyen de la maladie y semble en outre conforme à celui observé dans les pays de la Ceinture. Ceci pourrait être lié à des intrusions d'Harmattan plus au sud ([projet CNES IHACA \(2020-2022\)](#), piloté par l'IGE à Grenoble et auquel je suis associée, Partie B/§2.2). Ces résultats préliminaires sont suffisamment prometteurs pour envisager une suite, sur la base d'un nouveau cadre collaboratif, celui du LMI NEXUS « Climat-Eau-Energie-Agriculture en Afrique de l'Ouest et Services climatiques » spécifiquement dédié à la Côte d'Ivoire. Par ailleurs, cette **question de l'extension, ou du glissement de la Ceinture des méningites vers le Sud** est intéressante à investir, elle interroge les épidémiologistes qui se basent sur la définition géographique et endémo-épidémique de la maladie en date des travaux du célèbre médecin de l'OMS Lapeyssonnie (1963). Par ailleurs, il y a une cruelle absence de données de méningites pour les pays se trouvant en dehors de la Ceinture, rendant complexe une étude diagnostique solide. Du point de vue des climatologues, la question éveille également la curiosité. En effet, les variables climatiques et les poussières désertiques, identifiées comme des facteurs de risque des méningites, sont sans aucun doute amenées à subir des modifications dans les 50 prochaines années dans cette zone du globe. Une scénarisation du changement climatique en Afrique pourrait être une voie de recherches à investir afin de répondre aux questionnements disciplinaires, en climatologie et en épidémiologie, et également à l'interface entre climat, aérosols et santé.

Liste des figures

- Figure I.1. Mécanismes de formation des aérosols et schématisation de leur distribution en taille selon le nombre, la masse, la surface et le volume des aérosols. Figure extraite de Buseck et Adachi (2008) P4
- Figure I.2. Moyenne annuelle du forçage radiatif des aérosols au sommet de l'atmosphère (exprimé en W/m^2). La période considérée est 1750-2010. FF représente les combustibles fossiles et les biocarburants, BC le Black Carbon ou carbone suie, POA les aérosols organiques primaires, SOA les aérosols organiques secondaires et BB les Biomass Burning ou aérosols de combustion de la biomasse. Figure extraite de Boucher et al. (2013) dans IPCC-AR5 (2013) P5
- Figure II.1. Représentation des cellules de Hadley. Figure extraite de Schneider et al. (2014) P9
- Figure II.2. Position du Front InterTropical en hiver boréal (à gauche) et en été boréal (à droite). Figure extraite de la thèse de Deroubaix (2013) (Partie B/§4.3) P10
- Figure II.3. Cartes mensuelles des vents à 10m de septembre à avril en Afrique de l'Ouest, réalisées à partir des réanalyses ERA-Interim à 0.75° de résolution spatiale sur la période 1979-2013. Figure adaptée de Martiny (2015) (Partie B/§5.5) P11
- Figure II.4. Les différents processus d'émissions des poussières désertiques selon Marticorena & Bergametti (1995). Figure extraite de Schepanski et al. (2007) P12
- Figure II.5. Saisonnalité des sources sahariennes de poussières désertiques. La source de Bodélé est entourée en rouge sur la figure extraite de Goudie et Middleton (2006) P13
- Figure II.6. Carte des AOD MODIS du 23 janvier 2014 avec positionnement des spots lidar et identification du type de poussière : en rouge la catégorie des « dust » et en vert celle des « polluted dust ». Courtesy : JL. Léon. Figure extraite de Martiny (2016b), Partie B/§5.8 P15
- Figure II.7. Carte des sites de mesures in-situ disponibles sur la zone d'étude. Les triangles bleus indiquent les sites CIMEL du réseau AERONET/PHOTONS. Les triangles verts indiquent des sites qui combinent un CIMEL du réseau AERONET/PHOTONS et un TEOM du STD. Le triangle rouge indique le site TEOM implémenté dans le cadre de mes projets de recherches (§Fiche 1). Figure extraite Martiny et al. (2015), Partie B/§5.3 P15
- Figure II.8. Comparaison des AOD 550 issues de AATSR et de MODIS en Chine : séries temporelles de 1995 à 2015 (en haut) – en rouge AATSR et en vert MODIS - et moyennes en mars-avril-mai des AOD550 de 2000 à 2011 pour AATSR (en bas à gauche) et MODIS (en bas à droite). Figure extraite de de Leeuw et al. (2018) P18
- Figure II.9. Propriétés optiques des aérosols désertiques relevés au Maroc et en Algérie. Première ligne : coefficients d'extinction. Deuxième ligne : coefficients d'absorption. Troisième ligne : SSA. Quatrième ligne : indice de réfraction, parties réelle (n) et imaginaire (k). Figure extraite de DiBagio et al. (2019) P22
- Figure II.10. Dépendance spectrale des SSA des aérosols désertiques relevés au Sahel. Figure réalisée à partir des résultats de Di Bagio et al. (2019) P22
- Figure II.11. Moyenne annuelle des AI issus du capteur OMI sur la période 2005-2008 en Afrique nord-équatoriale. La zone rouge indique la localisation de la Ceinture des méningites. Les points encadrés indiquent la localisation des stations de mesures in situ mobilisées pour la validation. Figure extraite de Deroubaix et al. (2013), Partie B/§4.1 P24
- Figure II.12. Comparaison au pas de temps hebdomadaire entre les AI issus de OMI et, d'une part, les AOD à 440 nm issus du réseau AERONET (première colonne) et, d'autre part, les mesures de concentrations des PM10 (deuxième colonne) à Cinzana (Mali) et à Banizoumbou (Niger). La période d'étude s'étend de 2006 à 2009. Figure extraite de Deroubaix et al. (2013), Partie B/§4.1 P25

- Figure II.13. Comparaison des cycles annuels moyens standardisés des AI issus de OMI (en bleu, trait continu), des AOD à 440 nm issus du réseau AERONET(en bleu, pointillés) et des concentrations en PM10 issus du SDT (en rouge) à Cinzana au Mali (en haut) et à Banizoumbou au Niger (en bas). La période d'étude s'étend de 2006 à 2008. Le pas de temps est hebdomadaire. Figure extraite de [Deroubaix et al. \(2013\)](#), Partie B/§4.1 P25
- Figure II.14. Comparaison des moyennes mensuelles des AOD MODIS à partir des algorithmes Deep Blue Collection 5.1 (colonne de gauche) et Collection 6 (colonne de droite) pour les mois de juillet (ligne du haut) et octobre 2008 (ligne du bas). Figure extraite de [Hsu et al. \(2013\)](#) P27
- Figure II.15. Comparaison au pas de temps quotidien entre les AOD issus de MODIS et, d'une part, les AOD à 550 nm issus du réseau AERONET (première colonne) et, d'autre part, les mesures de concentrations des PM10 (deuxième colonne) à Cinzana au Mali (en rouge) et à Banizoumbou au Niger (en bleu) de 2006 à 2008. Les comparaisons ont été réalisées pour toute l'année (ligne du haut) et pour JFM (ligne du bas). Les points entourés en vert indiquent des situations nuageuses relevées dans les données AERONET. Figure extraite du stage de M2 de [Nesrine Arab \(2014\)](#), Partie B/§4.7 P27
- Figure II.16. Relation entre les AOD à 550 nm et les AE440-870 issus de MODIS-DB sur une fenêtre sahéenne et durant des jours de vagues de chaleur. La période d'étude s'étend de 2004 à 2014. « MEDIAN TYPE 1 » correspond aux valeurs médianes des AOD et des AE440-870 en considérant l'ensemble des jours des vagues de chaleur qualifiées de TYPE 1. Figure extraite d'un article en préparation [Niane et al. \(in prep.\)](#) P29
- Figure II.17. Les AOD à 440 nm (en noir) et les AE440-870 (en gris) issus de AERONET à Banizoumbou au Niger (trait plein) et Cinzana au Mali (pointillés). La période d'étude s'étend de 2004 à 2009. La sous-période « 1a » correspond aux semaines 1 à 4 ; la sous-période « 1b » aux semaines 5 à 28 ; la sous-période « 2a » aux semaines 29 à 44 et la sous-période « 2b » aux semaines 45 à 52. Figure extraite de [Martiny and Chiappello \(2013\)](#), Partie B/§5.1 P29
- Figure II.18. Les 3 situations aérosols rencontrées au Sahel vues par MODIS. La colonne de gauche présente les AOD550. La colonne de droite présente les AE440-870. Chaque ligne représente une situation aérosols. Figure extraite de [Niane et al. \(in prep.\)](#) P32
- Figure II.19. Détection des feux en Afrique pour l'année 2004 à partir d'observations satellitaires géostationnaires. La carte imbriquée, issue du GLC2000, indique les 4 types principaux d'occupation du sol en Afrique : « Woodland » (forêt), « Grassland » (couverts herbacés), « Shrubland » (couvert arbustif), « Cropland » (zones cultivées). Figure extraite de [Roberts et al. \(2009\)](#) P32
- Figure II.20. Saisonnalité de la base, du sommet et du coefficient d'extinction (en rouge) de la couche de poussières en surface à Banizoumbou au Niger. Courtesy J-F. Léon. Figure extraite de [Martiny \(2016b\)](#), Partie B/§5.8. P34
- Figure II.21. Saisonnalité sur 3 sites sahéens des PM10, AOD-AERONET (C1), AOD-CALIOP totale (tout type d'aérosols) (C5), AOD-CALIOP des poussières désertiques (C6), AOD-CALIOP des poussières désertiques de la couche la plus basse (C4), altitude du sommet (C2) et de la base (C3) de la couche de poussières. Figure extraite de [Léon et al. \(2020\)](#), Partie B/§5.1 P35
- Figure II.22. Moyennes mensuelles des concentrations massiques en PM10 dérivées de CALIOP et observées sur le site de Banizoumbou au Niger (mesures en coïncidence). Courtesy J-F. Léon. Figure extraite de [Martiny \(2016b\)](#), Partie B/§5.8 P35
- Figure II.23. Nuages de points représentant les PM10 modélisés (Y) versus les PM10 mesurés (X) sur la base d'un modèle basé sur les AOD seulement (« AERONET only », colonne de gauche) et sur les AOD + les produits CALIOP (« AERONET+CALIOP », colonne de droite) aux pas de temps quotidien (ligne 1, 1335 points co-localisés) et mensuel (ligne 2, 6509 points co-localisés). Tableau extrait de [Léon et al. \(2020\)](#), Partie B/§5.1 P37

- Figure II.24. Définition des saisons au Sahel. Chaque colonne représente un mois. La saison des méningites est découpée en 3 fois 2 mois : la phase de démarrage et de développement (Dém.) en janvier-février, la phase d'intensité maximale (Pic) en mars-avril et la phase de décroissante (Fin) en mai-juin (§III/Préambule) P38
- Figure III.I. La ceinture des méningites en Afrique. Carte issue du CDC (Centers for Disease Control and Prevention). Source des données : OMS (2012) P41
- Figure III.2. Les méningites au Niger, Burkina Faso et Mali : A/ variabilité interannuelle - le trait pointillé rouge indique le seuil épidémique à l'échelle d'un pays, fixé à 10 cas pour 100.000 habitants selon OMS (2014); B/ cycle saisonnier moyen sur les périodes 1986-2007 au Niger, 1997-2007 au Burkina Faso, 1994-2007 au Mali – les mois de janvier-février (JF) marque le démarrage et le développement épidémique, les mois de mars-avril (MA) le pic épidémique, et les mois de mai-juin (MJ) la phase de décroissance épidémique. Figure adaptée de Agier et al. (2013) P41
- Figure III.3. Nombre de cas cumulés de méningites et nombre de décès dans 14 pays de la ceinture sur la période 2004-2009 (avant Menafrivac, §III/Préambule). Le jeu de données utilisé pour réaliser cette figure est EPI-I (§III.3/Figure III.20). Figure extraite de [Martiny & Chiapello \(2013\)](#), Partie B/§5.1 P42
- Figure III.4. Les différentes échelles spatiales des facteurs de risque des méningites bactériennes au Sahel. Adapté de [Martiny et al. \(2009\)](#), Partie B/§5.5 sur la base de [Agier et al. \(2017\)](#), Partie B/§5.1 P43
- Figure III.5. Frise chronologique retraçant les grandes étapes des recherches portant sur lien entre climat-environnement et méningites bactériennes en Afrique nord-équatoriale. La couleur verte indique les programmes au sein desquels et les périodes pendant lesquelles mon implication a été majeure sur le thème climat-poussières et méningites : PI du WP3.2 AMMA Santé de 2007 à 2012, membre cofondatrice de MAMEMA (2010-2014), activités de recherches, d'encadrement doctoral et scientifique, et publications. Figure adaptée de [Martiny on behalf the AMMA consortium \(2013\)](#), Partie B/§5.5 P48
- Figure III.6. Distribution spatiale des épidémies de méningites : a) sur la période 1841-1999 à l'aide de données publiées (PubMed) et non publiées (rapports institutionnels) ; b) probabilité d'occurrence des méningites sur la base d'un modèle statistique. Figure extraite de [Molesworth et al. \(2003\)](#) P48
- Figure III.7. Anomalies de vent à 10 m (en m/s) (A) et d'humidité relative (en %) (B) entre les années épidémiques détectées au Burkina Faso (1984 ;1996 ;1997 ;2001 ;2002 ;2006 ; 2007) moins l'ensemble des années (1974-2014) pour le mois de novembre. Données issues de ERA-Interim. Aplats gris: Valeurs significatives à $p=0.1$ selon le test de Student. Figure extraite de [Tomkins et al. \(2019\)](#), Partie B/§5.4 P50
- Figure III.8. Anomalies de circulation atmosphérique entre les années épidémiques (1996 ;1997 ;2001 ;2002 ;2006 ; 2007) et non épidémiques (1991 ;1992 ;1993 ;1994 ;1995 ;2005) au Burkina Faso en considérant la période 1989 à 2010 au pas de temps mensuel. Transect : [-10°W et 30°E]. En vert : Valeurs significatives à $p=0.1$ selon le test de Student. Isolignes rouges : ascendance de vent. Isolignes bleues : subsidence de vent. Figure extraite du stage de M2 d'[Elodie Fluck \(2012\)](#), dont j'ai assuré la co-direction, Partie B/§4.7 P50
- Figure III.9. Importance des cas précoces au Burkina Faso : (A) Relation entre le nombre de cas de méningites pendant le pic épidémique (de janvier à avril) et le nombre de cas précoces (d'octobre à décembre) ; (C) Relation entre le nombre de cas précoces (d'octobre à décembre) et le moment du pic épidémique (en février, mars ou avril). Figures extraites de [Yaka et al. \(2008\)](#) P51
- Figure III.10. Les étapes d'acquisition de la bactérie à *Neisseria meningitidis* selon [Virji \(2009\)](#) P51
- Figure III.11. Carte des districts sanitaires au (A) Mali (52), (B) Burkina Faso (55), (C) Niger (38). Des clusters ont été créés par ordre décroissant d'incidences moyennes (1 : incidences hebdomadaires les plus élevées en gris foncé ; 3 : incidences hebdomadaires les plus faibles en gris clair). Figure extraite de [Agier et al. \(2013\)](#) P54

Figure III.12. Ratios « sol/intégré » : a) PM/AOD, b) PM/AI. La couleur violette correspond au site de Banizoumbou au Niger, la couleur verte au site de Cinzana au Mali. Les moyennes sont indiquées en traits pleins. La moyenne des 2 stations est représentée par la ligne noire. La ligne de tendance du ratio PM/AI sahélien est représentée par un trait noir épais. Les gros points de couleur indiquent les valeurs hebdomadaires des ratios associés à des concentrations en $PM_{10} > 300 \mu g/m^3$. Figure extraite de la [thèse d'Adrien Deroubaix \(2013\)](#), Partie B/§4.3.

P55

Figure III.13. Obtention d'une série temporelle des AI continue et représentative des conditions de poussières en surface. En vert, les AI bruts issus de TOMS/Earth Probe (1997-2005). En noir, les AI bruts recalés sur la période OMI (> 2005). En bleu, les mesures sol de PM_{10} . En rose, les AI corrigés à l'aide du ratio PM/AI sahélien sur l'ensemble de la période 1997-2009. Figure extraite de [Agier et al. \(2013\)](#), Partie B/§5.1

P56

Figure III.14. Séries temporelles des (a) méningites, (b) AI bruts (DUST), (c) AI corrigés (DUST_C), (d) Direction du vent (Wd), (e) Humidité relative (RH), (f) température à 10m (TEMP), (g) force du vent (Wf) de 1986 à 2010. Les incidences des méningites ont subi une transformation logarithmique. La ligne noire représente la médiane des districts. La couleur gris foncé indique la superficie entre les 10^{ème} et 90^{ème} percentiles. La couleur gris clair indique la superficie entre les valeurs minimales et maximales des districts. Figure extraite de [Agier et al. \(2013\)](#), Partie B/§5.1

P59

Figure III.15. Analyses en ondelettes bivariées sur le district de Magaria : cohérence (colonne de gauche), et différence de phase (colonne de droite) entre méningites et a) AI bruts b) AI corrigés c) direction du vent d) humidité relative e) température atmosphérique f) force du vent. L'axe des abscisses représente les années. Colonne de gauche : l'axe des ordonnées représente la périodicité du signal (en années), le cône d'influence est représenté en noir, les surfaces significatives à un seuil de 5% sont indiquées par des autres traits noirs, l'intensité du signal est indiquées en couleurs. Colonne de droite : la phase pour les méningites est représentée par un trait plein, la phase pour les variables climatiques et aérosols par un trait en pointillés, la différence de phase (exprimée en radians) est indiquée par un trait en pointillés épais. Figure extraite de [Agier et al. \(2013\)](#), Partie B/§5.1

P60

Figure III.16. Cycles annuels moyens des poussières et de différentes variables climatiques au Niger. L'encart gris indique la période du pic saisonnier des méningites. En haut, les AI-OMI bruts (notés DUST, en bleu) et les AI-OMI corrigés (notés DUSTc, en rouge). Au milieu, l'humidité relative (notée RH, en bleu) et la température (notée TEMP, en rouge). En bas, la force du vent (en bleu) et la direction du vent (en rouge). Figure extraite de [Agier et al. \(2013\)](#), Partie B/§5.1

P61

Figure III.17. Courbes de différence de phase pour les 33 districts inclus dans l'étude. A gauche, entre méningites et AI corrigés. A droite, entre méningites et force du vent. Figure extraite de [Agier et al. \(2013\)](#), Partie B/§5.1

P61

Figure III.18. Analyse en Composantes Principales : projection des observations dans le plan principal, i.e. les semaines 1 à 18 sur la période 1997-2007 dans les 141 districts du domaine. Les points gris sont sans critère de sélection. Les points colorés correspondent aux semaines des années épidémiques (sur une échelle allant du bleu pour la 1ère semaine de l'année au rouge pour la 18ème semaine). La courbe noire est la moyenne hebdomadaire de la CP1 et de la CP2. Figure extraite de la [thèse d'Adrien Deroubaix \(2013\)](#), Partie B/§4.3.

P62

Figure III.19. Extrait d'un bulletin hebdomadaire de rétro-information sur la méningite cérébrospinale pour 13 pays de la Ceinture. Bulletin disponible en ligne et indiquant le nombre de cas, de décès et le sérogroupe

P64

Figure III.20. Comparaison entre les jeux de données épidémiologiques à l'échelle du district sanitaire (noté ici EPI-I, en abscisses) et à l'échelle nationale (noté ici EPI-II, en ordonnées) pour les années communes aux 2 jeux de données, de 2004 à 2007, au Burkina Faso. Figure extraite du stage de [Elodie Fluck \(2012\)](#), Partie B/§4.7

P64

Figure III.21. Comparaison entre les cycles saisonniers moyens standardisés des méningites (en gris), des aérosols (en noir) et de l'humidité spécifique (en bleu) au Niger (a) et au Mali (b). L'axe des abscisses représentent les semaines. Figure extraite de [Martiny & Chiapello \(2013\)](#), Partie B/§5.1

P66

- Figure III.22. Etude du décalage temporel existant entre les cas de méningites à l'échelle du district sanitaire au Niger et les poussières. Figure extraite de Jeanne et al. (2009) P66
- Figure III.23. Les aires de santé étudiées au Burkina Faso. A gauche, carte des districts sanitaires au sein desquels 456 centres de santé sont représentés par des points noirs. A droite, carte des incidences de méningites (0-200 cas pour 100.000 habitants) pour la semaine du 02 avril 2006. Figure adaptée de Woringer et al. (2018), Partie B/§5.1 P67
- Figure III.24. Partition de Voronoï considérant chaque centre de santé comme un centroïde à Dédougou, Ouahigouya et Bobo-dioulasso. Figure extraite de Woringer et al. (2018), Partie B/§5.1 P69
- Figure III.25. Les incidences des méningites à l'échelle de l'aire de santé. A gauche, incidences hebdomadaires moyennées sur les 14 aires de santé étudiées au Burkina Faso sur la période 2004-2014 (en gris) et nombre de données recueillies par an (en noir). A droite, courbe de sensibilité versus spécificité (ROC) pour 3 méthodes de classification des aires de santé en tant que zones épidémiques localisées. Les chiffres sur les courbes indiquent les seuils hebdomadaires (cas pour 100.000 habitants). Figure adaptée de Woringer et al. (2018), Partie B/§5.1 P69
- Figure III.26. Variations temporelles des AOD et des méningites à l'échelle de l'aire de santé sur la période 2004-2014 : (A) distribution des AOD moyennes (en noir) et des incidences de méningites (en rouge). Les bornes des boîtes à moustache représentent les 75^{ème} et 25^{ème} percentiles respectivement, et la ligne noire la médiane. Les moustaches supérieures (inférieures) indiquent le premier (troisième) quartile moins (plus) 1.5 fois la variation interquartile. Les points marginaux sont indiqués par des cercles vides. (B) variabilité interannuelle des AOD (en noir) et des méningites (en rouge) au pas de temps hebdomadaire. Figure extraite de Woringer et al. (2018), Partie B/§5.1 P70
- Figure III.27. AOD avant et après le démarrage des épisodes de méningites dans 14 districts sanitaires au Burkina Faso, 2004-2014. La courbe noire représente la moyenne des AOD sur les 292 aires de santé-semaines. La courbe noire en pointillés (et les zones grises associées) représente la moyenne (l'intervalle de confiance 95% CI) des AOD sur les aires de santé-semaines non épidémiques. Les traits verticaux représentent le jour 0 des incidences de méningites (en noir) et le jour pour lequel on observe un maximum d'AOD (en rouge). Figure adaptée de Woringer et al. (2018), Partie B/§5.1 P70
- Figure III.28. Cumul annuel moyen de précipitations (exprimé en mm) en Afrique nord équatoriale. Carte réalisée à partir des produits GPCP v6 à une résolution spatiale de 0.5° sur la période 1901-2010. La ceinture des méningites est représentée en rouge. La partie étudiée dans représentée en orange. Figure extraite de Martiny et al. (2015), Partie B/§5.6 P73
- Figure III.29. Carte de la densité de population en Afrique nord-équatoriale en 2000. Sources : Sedac, NASA et Columbia University, Gridded Population of the World and the Global Rural-Urban Mapping Project P73
- Figure III.30. Les AOD550 DB de MODIS (résolution spatiale 10km) moyennées sur la phase ascendante et jusqu'au pic saisonnier des méningites (de janvier à avril) sur la période 2004-2014. Un filtre sur les coefficients d'Angstroem < 1.2 a été appliqué (pixels blancs). La ligne noire indique la Ceinture des méningites. La ligne rouge indique de manière schématique le cône d'influence de la source de Bodélé réalisé à partir des données de vents ERA-Interim sur la période janvier-avril. DZ1 correspond à Dust Zone 1, DZ2 à Dust Zone 2 et DZ3 à Dust Zone 3. Figure extraite de Martiny et al. (2018), Partie B/§5.3 P74
- Figure III.31. Les AE DB de MODIS moyennés sur la phase ascendante et jusqu'au pic saisonnier des méningites (de janvier à avril) sur la période 2004-2014. La ligne noire indique la Ceinture des méningites. Figure extraite de Martiny et al. (2018), Partie B/§5.3 P74
- Figure IV.1. Infrastructures de transport dans 6 villes à travers le monde. Base de données OpenStreetMap. Figure adaptée de Boeing (2019) P79
- Figure IV.2. Des albédos différenciés en ville. Figure NASA réalisée à partir de de Akbari et al. (2008) et Thayer (2008) P80

<i>Figure IV.3. Infrastructures de transport, empreintes au sol des bâtiments et végétation représentée à partir des bases de données OpenStreetMap (en vert clair) et BD TOPO® (vert foncé) à Dijon. Figure extraite de Emery et al. (2018), Partie B/§5.4</i>	P81
<i>Figure IV.4. Indice d'anthropisation de la ville de Dijon à une résolution spatiale de 30 m. L'indice correspond au rapport entre la surface occupée par du tissu urbain discontinu (évalué en fonction de l'empreinte des bâtiments, des infrastructures routières et des parcs urbains) et la surface totale d'un pixel. Cette carte intègre des produits satellitaires NDVI issus de LANDSAT. Figure extraite de Emery et al. (2018), Partie B/§5.4</i>	P81
<i>Figure IV.5. Evolution des émissions de polluants gazeux entre 1990 et 2017 (base 100 en 1990). Figure extraite du CITEPA (2019)</i>	P83
<i>Figure IV.6. Evolution des émissions de polluants particuliers entre 1990 et 2017 (base 100 en 1990). Figure extraite du CITEPA (2019)</i>	P83
<i>Figure IV.7. Concentrations moyennes annuelles des PM₁₀ mesurées en Île de France en 2018. Source : Airparif (2020)</i>	P84
<i>Figure IV.8. Concentrations moyennes annuelles des PM_{2.5} mesurées en Île de France en 2018. Source : Airparif (2020)</i>	P84
<i>Figure IV.9. L'intégration des échelles dans l'étude de la pollution atmosphérique. Figure extraite de la thèse de Justin Emery (2017), Partie B/§4.3.</i>	P85
<i>Figure IV.10. Schéma de principe de la méthode ombre/soleil par différence appliqué sur une image Pléiades acquise à Dijon en 2019. Courtesy : X. Briottet. Figure adaptée de ONERA-DOTA</i>	P91
<i>Figure IV.11. Méthodologie d'inversion des AOD à partir de Pléiades à Dijon en utilisant une méthode ombre/soleil par différence</i>	P92
<i>Figure IV.12. Types de surface des sites ombre/soleil sélectionnés à Dijon et réflectances associées, extraites de l'image Pléiades du 04/08/2019 après corrections atmosphériques. Figure extraite de stage de M2 de Maha Hidane (2019), Partie B/§4.3</i>	P92
<i>Figure IV.13. Sites sélectionnés pour l'application de la méthode ombre/soleil par différence à Dijon à partir de l'image du 15/02/2019 (Place Darcy : Dalles de comblanchien ; Les Grésilles : Gravieres agglomérés ; Bd Gallien : Goudron). Figure extraite du stage de M2 de Maha Hidane (2019), Partie B/§4.3</i>	P93
<i>Figure IV.14 Décomposition de la luminance spectrale L_{TOA} reçue par le capteur satellitaire au sommet de l'atmosphère. Figure extraite du stage de M2 de Maha Hidane (2019), Partie B/§4.3</i>	P93
<i>Figure IV.15. Conceptualisation du trafic routier tel qu'envisagée dans la thèse de Justin Emery (2016), Partie B/§4.3</i>	P96
<i>Figure IV.16. Méthodologie d'évaluation de la pollution atmosphérique en ville telle que développée dans la thèse de Justin Emery (2016), Partie B/§4.3</i>	P96
<i>Figure IV.17. Les paramètres du modèle SCAUP. Figure adaptée de Emery et al. (2020), Partie B/§5.1</i>	P98
<i>Figure IV.18. Calibrage des axes possédant des stations de mesure (moyenne des 15 axes équipés de capteurs). En noir, la simulation est réalisée sans disparition et sans temps de déplacement (témoin). En vert, la disparition des véhicules est introduite. En rouge, un temps de déplacement limité à 30mn est introduit. Figure extraite de Emery et al. (2020), Partie B/§5.1</i>	P98
<i>Figure IV.19. Interopérabilité entre le modèle SCAUP et le logiciel CIRCUL'AIR (à gauche) et exemple des émissions d'oxydes d'azote pour les véhicules légers en fonction de la vitesse de circulation (à droite). Figures adaptées de la thèse de Justin Emery (2016), Partie B/§4.3</i>	P99

<i>Figure IV.20. Processus de ventilation du parc automobile sur les données de trafic routier simulé dans CIRCUL’AIR. Figure extraite de la thèse de Justin Emery (2016), Partie B/§4.3</i>	P99
<i>Figure IV.21. Profils types de la fréquentation des axes routiers en journalier, hebdomadaire et selon la hiérarchie des voies issues de la BD TOPO pour l’année 2008. Figure extraite de la thèse de Justin Emery (2016), Partie B/§4.3</i>	P100
<i>Figure IV.22. Trafic routier simulé par tronçon à Dijon après l’implantation du Tramway. Figure extraite de la thèse de Justin Emery (2016), Partie B/§4.3</i>	P100
<i>Figure IV.23. Comparaison des émissions estimées par l’AASQA locale ATMO BFC (à gauche) et des émissions simulées avec SCAUP (à droite) par type de polluants. Figure extraite de la thèse de Justin Emery (2016), Partie B/§4.3</i>	P102
<i>Figure IV.24. Projet Marrak’air : vue d’ensemble du dispositif (à gauche) avec présentation de l’application sur tablette et projection des niveaux de polluants particuliers sur le quartier du Guéliz (Marrakech) en 3D. Figures extraites de Emery et al. (2017), Partie B/5.6</i>	P102
<i>Figure IV.25. Schéma de mesure de concentrations en PM du Plantower PMS-7003, basé sur un système optique de comptage de particules. Figure extraite du stage de M2 de Lola Canovas (2019), Partie B/§4.7</i>	P103
<i>Figure IV.26. L’un des premiers micro-capteurs UB/IRD installé sur la station de mesures de Péjoces d’ATMO-BFC en 2018. Le micro-capteur est indiqué par la lettre a. La tête PM de l’analyseur de référence est indiquée par la lettre b. Figure extraite du stage de M2 de Lola Canovas (2019), Partie B/§4.7</i>	P105
<i>Figure IV.27. Carte des premiers micro-capteurs UB/IRD installés à Dijon en juillet 2018 (étoiles) sur les stations de mesures de pollution particulaire d’ATMO-BFC (cercles rouges). Figure extraite du stage de M2 de Lola Canovas (2019), Partie B/§4.7</i>	P105
<i>Figure IV.28. Frise chronologique indiquant les phases de développement du concept QameleO. Figure extraite du Cahier POPSU (2022), Partie B/§2.8</i>	P105
<i>Figure IV.29. Concentrations en a) PM₁, b) PM_{2.5}, et c) PM₁₀ mesurées par les trois micro-capteurs pendant la campagne de mesures intensives de juillet 2018 à Péjoces avec d) un tableau des biais moyens et e) un tableau des corrélations entre chaque micro-capteur. Figures extraites du stage de M2 de Louis Jouandanne (2018), Partie B/§4.7</i>	P106
<i>Figure IV.30 Statistiques des mesures de pollution particulaire (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) lors de la campagne de mesures intensives de juillet 2018 à Dijon : a) moyenne sur la période ; b) écart-type sur la période ; c) étendue des valeurs pour chaque micro-capteur et chaque polluant. Figure extraite du stage de M2 de Louis Jouandanne (2018), Partie B/§4.7</i>	P107
<i>Figure IV.31 Inauguration du premier QameleO le 5 juillet 2019 sur le site du Port du Canal à Dijon : dévoilement par Hélène Peskine (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire) et Pierre Pribetich (Dijon Métropole), présentation du capteur par N. Martiny (Université de Bourgogne) et N. Marilleau (Institut de Recherches pour le Développement)</i>	P108
<i>Figure IV.32 Première micro-station environnementale QameleO : le boîtier PVC est ici entouré d’ailettes blanches. Photo © N. Martiny au Centre de Recherches de Climatologie à Biogéosciences</i>	P109
<i>Figure IV.33 Logos de la micro-station de mesures environnementales QameleO, dépôt et obtention de la marque et du visuel UB/IRD en 2021</i>	P109
<i>Figure IV.34. Extrait du premier flyer descriptif du concept de QameleO réalisé en juillet 2019 à l’occasion de l’inauguration du premier capteur implanté à Dijon dans le cadre de l’événement « Regards croisés » du programme POPSU PURE</i>	P109

- Figure IV.35. Régression linéaire entre les micro-capteurs et les BAM pendant la phase de calibration de juillet 2018 à février 2019 au pas de temps de 15 minutes pour les PM_{2.5} (ligne du haut) et les PM₁₀ (ligne du bas). Les sites étudiés sont Péjoces (PEJ), Trémouille (TREM), Transvaal (TRANS), dont la localisation est présentée en Figure IV.27 (§IV.3). Figure extraite du stage de M2 de [Lola Canovas \(2019\)](#), Partie B/§4.7 P114
- Figure IV.36. Les 2 approches correctives des mesures de PM des micro-capteurs testées à Dijon en 2018-2019. Figure adaptée du stage de M2 de [Lola Canovas \(2019\)](#), Partie B/§4.7 P116
- Figure IV.37. Comparaison des 2 méthodes correctives pour les PM₁₀. Figures extraites du stage de M2 de [Lola Canovas \(2019\)](#), Partie B/§4.7 P117
- Figure IV.38. Performance des micro-capteurs UB/IRD dans la mesure des PM_{2.5} après application de la méthode de correction la plus favorable : a) sur un site de pollution de fond ; b) sur un site de proximité trafic. Figure extraite du stage de M2 de [Lola Canovas \(2019\)](#), Partie B/§4.7 P117
- Figure V.1. Chronologie des recherches menées depuis 2007 dans les 3 axes principaux, Axe 1 « Télédéttection des aérosols en surface », Axe 1b « Mesures », Axe 2 « Poussières désertiques et méningites bactériennes », Axe 3 « Pollution particulaire ». Les nuances de bleu indiquent les priorités des recherches engagées, le bleu plus soutenu indiquant une priorité 1 P122
- Figure VI.1. Evolution des concentrations moyennes annuelles des polluants gazeux O₃, NO₂ et SO₂ et particulaires PM₁₀ et PM_{2.5} en fond urbain entre 2000 et 2019 en France métropolitaine hors Corse (base 100 en 2000, en 2009 pour les PM_{2.5}). Les concentrations moyennes d'ozone ont été calculées du 1^{er} avril au 30 septembre. Source : Géod'Air, juin 2020. Traitements : SDES, 2020 P127
- Figure VI.2 : Cartes de la sensibilité environnementale déclarée par la population dijonnaise lors de la Nuit des Chercheurs 2019 organisée sur le campus de l'Université de Bourgogne. Source : [Cahier POPSU \(2022\)](#), Partie B/§2.8 P131
- Figure VI.3. Séries temporelles de l'incidence des méningites observée (en vert) et modélisée (en bleu) à l'échelle nationale pour le Niger et le Burkina Faso. La ligne horizontale (en rouge) est le seuil épidémique sur la période 1997-2007. Figure extraite de la [thèse de Adrien Deroubaix \(2013\)](#), Partie B/§4.3 P132
- Figure VI.4. Schéma conceptuel d'un modèle prenant en compte les résultats des recherches sur le lien entre méningites, poussières et climat. MM_1 représente la modélisation des incidences saisonnières des méningites à l'échelle d'un pays, Inc_S/P, à partir d'un premier indicateur climat-poussières, Ind_1, représentatifs des premiers événements de poussières d'Harmattan, et des cas précoces de méningites. MM_1 permet de détecter si l'année sera épidémique ou pas. MM_2 représente la modélisation des incidences hebdomadaires des méningites à l'échelle du district sanitaire, Inc_H/d, à partir d'un second indicateur climat-poussières, Ind_2, représentatifs de la persistance sur plusieurs semaines des températures élevées et des événements de poussières intenses. MM_2 permet de détecter le démarrage et le pic épidémique. MM_3 représente la modélisation de l'arrêt de la saison ou de l'épidémie des méningites à partir d'un troisième indicateur, Ind_3, basé sur l'humidité relative P133
- Figure VI.5. De la collecte d'un filtre de collection des poussières sur l'instrument TEOM au Burkina Faso (à gauche) aux premières analyses en laboratoire à Dijon (à droite). Illustrations extraites de [Martiny et al. \(2014\)](#), Partie B/§5.7 P133
- Figure VI.6. Analyse de la granulométrie des poussières recueillies sur les filtres de collection du TEOM de Dédougou en novembre 2014. Figures fournies par l'équipe SEDS de Biogéosciences P134

Liste des Tableaux

<i>Tableau II.1. Les principaux sites de mesures in-situ localisés au Sahel et leurs caractéristiques. Les instruments CIMEL appartiennent au réseau AERONET/PHOTONS. Les instruments TEOM appartiennent soit au réseau SDT (TEOM_SDT) soit à l'équipe CRC (TEOM_CRC)</i>	P16
<i>Tableau II.2. Bilan des missions satellitaires et produits aérosols emblématiques présentant un potentiel pour l'analyse des impacts sanitaires</i>	P19-20
<i>Tableau II.3. Qualification des AOD au Sahel sur la base de mesures in-situ issues du réseau AERONET à Banizoumbou (Niger) sur 2004-2009 et Cinzana (Mali) sur 2005-2009. Chaque semestre a été scindé en 2 sous-périodes, S1-4 correspondant par exemple aux semaines 1 à 4. Tableau adapté de Martiny & Chiapello (2013), Partie B/§5.1</i>	P30
<i>Tableau II.4. Idem Tableau II.3 pour les AE</i>	P30
<i>Tableau II.5. Situations aérosols moyennes rencontrées au Sahel d'après les mesures in-situ issues du réseau AERONET à Banizoumbou (Niger) et Cinzana (Mali) et les produits MODIS-DB. D'après Martiny & Chiapello (2013) et Niane et al. (in prep.)</i>	P30
<i>Tableau II.6. Résolutions horizontales et verticales de CALIOP. Tableau extrait de Winker et al. (2007)</i>	P33
<i>Tableau II.7. Premiers produits CALIOP et incertitudes associées. Tableau extrait de Winker et al. (2009)</i>	P33
<i>Tableau II.8. Coefficients des régressions linéaires multiples réalisées : « AOD only », construit seulement à partir des AOD mesurées au sol ; « AOD+CALIOP » construit à partir des AOD mesurées au sol et des produits CALIOP. Tableau extrait de Léon et al. (2020), Partie B/§5.1</i>	P37
<i>Tableau III.1. Caractéristiques des publications reliant méningites et facteurs de risques climatiques et environnementaux des années 80 à la fin des années 2010. Tableau extrait de Agier et al. (2017), Partie B/§5.1</i>	P45-46
<i>Tableau III.2. Statistiques des AI issus de TOMS et OMI de 1997 à 2008 à Banizoumbou au Niger et Cinzana au Mali. Tableau extrait de la thèse d'Adrien Deroubaix (2013), Partie B/§4.3.</i>	P56
<i>Tableau III.3. Coefficient de corrélation entre AI et PM₁₀ sur les 3 ans de mesures disponibles puis pour chaque année. Tableau extrait de la thèse d'Adrien Deroubaix (2013), Partie B/§4.3</i>	P57
<i>Tableau III.4. Validation croisée des AI corrigés (notés ici AI.tr) à Cinzana au Mali et Banizoumbou au Niger. Les colonnes « 2006 », « 2007 » et « 2008 » indiquent les coefficients de corrélations entre les AI corrigés et les PM₁₀, à partir du ratio PM₁₀/AI lissé écartant respectivement les années 2006, 2007 et 2008. Tableau extrait de la thèse d'Adrien Deroubaix (2013), Partie B/§4.3.</i>	P57
<i>Tableau III.5. Coordonnées et contributions des variables sur les 3 premiers axes factoriels de l'Analyse en Composantes Principales sans critères de sélection puis avec critères de sélection des années épidémiques. Les incidences de méningites ont subi une transformation logarithmique. Les AI corrigés (notés ici AI.tr) ont été considérés avec un décalage temporel d'une semaine comparativement aux incidences des méningites. Tableaux extraits de la thèse d'Adrien Deroubaix (2013), Partie B/§4.3</i>	P62
<i>Tableau III.6 Analyse des corrélations entre les AOD et les cas de méningites à l'échelle nationale au Niger et Mali en considérant des décalages temporels de 0 à 2 semaines. La colonne C1 représente la période janvier-mars (période ascendante du nombre de cas de méningites, avant le pic saisonnier). La colonne C2 représente la période janvier-avril (démarrage et pic saisonnier des méningites). La colonne C3 représente la période janvier-juin (l'ensemble de la saison des méningites). Tableau extrait de Martiny & Chiapello (2013), Partie B/§5.1</i>	P67

<i>Tableau III.7. Analyse des corrélations entre les AI-OMI et les cas de méningites à l'échelle nationale au Burkina Faso, Niger et Mali en considérant des décalages temporels de 0 à 4 semaines. La colonne C1 représente la période janvier-mars. La colonne C2 représente la période janvier-juin. Tableau extrait de Deroubaix et al. (2013), Partie B/§5.1</i>	P67
<i>Tableau III.8. Evaluation du risque sanitaire en fonction des situations aérosols dans dans14 pays de la Ceinture des méningites sur la période 2004-2014. Tableau extrait de Martiny et al. (2015), Partie B/§5.6</i>	P76
<i>Tableau IV.1. Missions satellitaires emblématiques pour l'estimation des polluants atmosphériques</i>	P86
<i>Tableau IV.2. Caractéristiques des capteurs Pléiades du programme de coopération franco-italien ORFEO (Optical and Radar Federated Earth Observation)</i>	P90
<i>Tableau IV.3. Pentes des droites de régression entre concentrations des PM mesurées par des instruments de référence (TEOM ou GRIMM) et micro-capteurs de types OPC aux Royaume- Uni. Le coefficient de corrélation est donné entre parenthèses. Tableau extrait de Crilley et al. (2018)</i>	P111

Références citées

- Adetunji, J., J. McGregor, and C. K. Ong (1979). Harmattan Haze. *Weather*, 34, Issue 11, 430-436. <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1979.tb03389.x>
- Agier, A., H. Broutin, E. Bertherat, M. H. Djingarey, C. Lingani, W. Perea, and S. Hugonnet (2013). Timely detection of bacterial meningitis epidemics at district level : a study in three countries of the African Meningitis Belt. *Trans. of the Royal Society of Trop. Med. and Hygiene*, 107, Issue 1, 30–36. <https://doi.org/10.1093/trstmh/trs010>
- Airparif (2020). Bilan 2019 de la qualité de l'air en Ile de France, 98p. https://www.airparif.asso.fr/sites/default/files/documents/2020-06/bilan-2019_o.pdf
- Akbari, H., S. Menon, and A. H. Rosenfeld (2008). Global Cooling : Increasing World-wide Urban Albedos to Offset CO₂. *Climate Change*, 94, Issue 3, 275-286. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9515-9>
- Ala'Aldeen, D. A. A & D. P. J. Turner (2006). *Neisseria meningitidis*. In : S.H. Gillespie & P.M. Hawkeys (Eds.), *Principles and practice of clinical bacteriology* (2nd ed., pp. 205-220). England: John Wiley & Sons Ltd.
- Albrecht, B.A. (1989). Aerosols, cloud microphysics and fractional cloudiness. *Science*, 245, Issue 4923. <https://science.sciencemag.org/content/245/4923/1227>
- Alfaro, S. C., A. Gaudichet, L. Gomes, and M. Maillé (1997). Modeling the size distribution of a soil aerosol produced by sandblasting. *J. of Geophys. Res.*, 102, Issue D10, 11239-11249. <https://doi.org/10.1029/97JD00403>
- Almar, R., E. W. J. Bergsma, P. Maisongrande, and L. P. M. de Almeida (2019). Wave-derived coastal bathymetry from satellite video imagery : a showcase with Pleiades persistent mode. *Rem. Sens. of Env.*, 231, 111263.
- Alvarez-Mendoza, C. I., A. Teodoro, and L. Ramirez-Cando (2019). Spatial estimation of surface ozone concentrations in Quito Ecuador with remote sensing data, air pollution measurements and meteorological variables. *Env. Monit. Assess.*, 11, 191(3):155. Doi: 10.1007/s10661-019-7286-6.
- Andreae, M. O. (1991). Biomass burning - Its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate. *United States: MIT Press*. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:24010477
- Anuforum, A. (2007). Spatial distribution and temporal variability of Harmattan dust haze in sub-Saharan West Africa. *Atmos. Env.*, 41, Issue 39, 9079-9090. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.08.003>
- Archibald, F. S & I. W. DeVoe (1979). Removal of iron from human transferrin by *Neisseria meningitidis*. *FEMS Microb. Letters*, 6, Issue 3, 159–162. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1979.tb04300.x>
- Badura, M., P. Batog, A. Drzeniecka-Osiadacz, and P. Modzel (2018). Evaluation of low-cost sensors for ambient PM_{2.5} monitoring. *J. of Sensors*. <https://doi.org/10.1155/2018/5096540>
- Bagnold, A. (1973). The nature of saltation and of "bed-load" transport in water. *Royal Society of London Proc. Series A*, 332, 473–504. <https://doi.org/10.1098/rspa.1973.0038>
- Baik, J.-J., K.-H. Kwak, S.-B. Park, and Y.-H. Ryu (2012). Effects of building roof greening on air quality in street canyons. *Atmos. Env.*, 61, 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.076>
- Bali, K., A. K. Mishra, S. Singh, S. Chandra, and Y. Lehahn (2019). Impact of dust storm on phytoplankton bloom over the Arabian Sea : a case study during March 2012. *Env. Science and Pollution Res.*, 26, 11940-11950. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-019-04602-7>
- Banos, A. (2013). Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en géographie et SHS. *Thèse de doctorat*, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, 108p.
- Batty, M. (2013). Big data, smart cities and city planning. *Dialogues in Human Geography*. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4605-2018>
- Benenson, I. & P. Torrens (2004). Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena. *John Wiley & Sons*. ISBN 978-0-470-84349-9, 312p.
- Besancenot, J. P., M. Boko, and P. C. Oke (1997). Weather conditions and cerebrospinal meningitis in Benin (Gulf of Guinea, West Africa). *Eur. J. of Epidemiology*, 13, Issue 7, 807–15. Doi: 10.1023/a:1007365919013.
- Beucher, F. (2010). Météorologie tropicale : des alizés au cyclone. *Meteo-France*. http://files.meteofrance.com/files/dm/webedito/livre_meteo_tropicale/cours_web_20100730_3_couverture_tome1et2_piedpagecopyright_taille_reduite.pdf
- Blanchard, C. M., K. S. Courneya, and K. Stein (2008). Cancer survivor's adherence to lifestyle recommendations and associations with Health-related quality of life : Results from the American Cancer Society's SCS-II. *J. of Clinical Oncology*, 26, 13, 2198-2204.
- Boeing, G. (2019). Spatial Information and the Legibility of Urban Form: Big Data in Urban Morphology. *Int. J. of Information Management*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.09.009>
- Bohren, C. F. & D. R. Huffman (1998). Absorption and Scattering of light by small particules. In : *Wiley-ach Verlag GmbH & Co. KGaA*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527618156>

- Bojinski S., D. Schlöpfer, M. Schaepman, J. Keller, and K. Itten (2004). Aerosol mapping over land with imaging spectroscopy using spectral autocorrelation. *Int. J. of Rem. Sens.*, 25, 22, 5025-5047.
<https://doi.org/10.1080/01431160410001719830>
- Boman, M. & E. Holm (2004). Multi-agent systems, time geography, and microsimulations. In : *Systems approaches and their application*, 95-118, Springer, Dordrecht.
- Bonnel, P. (2002). Prévission de la demande de transport. *Habilitation à Diriger les Recherches*. Université Lumière - Lyon II, 410p.
- Borrego, C., A. M. Costa, J. Ginja, M. Amorim, M. Coutinh, K. Karatzas, Th. Sioumis, N. Katsifarakis, K. Konstantinidis, S. De Vito, E. Esposito, P. Smith, N. André, P. Gérard, L. A. Francis, N. Castell, P. Schneider, M. Viana, M. C. Minguillón, W. Reimringer, R. P. Otjes, O. von Sicard, R. Pohle, B. Elen, D. Suriano, V. Pfister, M. Prato, S. Dipinto, and M. Penza (2016). Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. *Atmos. Env.*, 147, 246-263.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.050>
- Boucher, O., D. Randall, P. Artaxo, C. Bretherton, C. Feingold, G. Forste, et al. (2013). Clouds and aerosols. In T.F. Stocker, & more (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessments Report of the IPCC*, 571-657. Cambridge University Press.
<http://hdl.handle.net/11858/00-001M-0000-0018-F5F9-F>
- Bratcher, H. B., J. S. Bennett, and M. C. J. Maiden (2012). Evolutionary and genomic insights into meningococcal biology. *Future Microbiology*, 7, Issue 7, 873-885. Doi: 10.2217/fmb.12.62.
- Bréon, F.-M., A. Vermeulen, and J. Desclotres (2011). An evaluation of satellite aerosol products against sunphotometer measurements. *Rem. Sens. of Env.*, 115, Issue 12. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.017>
- Brigham, K. & T. J. Sandora (2009). *Neisseria meningitidis* : epidemiology , treatment, and prevention in adolescents. *Current Opinion in Pediatrics*, 21, Issue 4, 437-443. Doi: 10.1097/MOP.obo13e32832c9668.
- Brignon, J.-M. (2003). Environmental effects of particulate matter. *Pollution atmosphérique*, 177. 91-102.
<http://odel.irevues.inist.fr/pollution-atmosphérique/index.php?id=1905>
- Buseck, P. R. and K. Adachi (2008). Nanoparticles in the Atmosphere. *Elements*, 4 (6): 389–394.
<https://doi.org/10.2113/gselements.4.6.389>
- Cantat, O. & E. Savouret (2014). A catalog of ‘weather types’ in metropolitan France. *Climatologie*, 11, 65-71.
- Carrer, D, J.-L. Roujean, O. Hautecoeur, T. Elias (2010). Daily estimates of aerosol optical thickness over land surface based on a directional and temporal analysis of SEVIRI MSG visible observations. *J. of Geophys. Res.*, 115. <https://doi.org/10.1029/2009JD012272>
- Carruthers, D., A. Stidworthy, D. Clarke, J. Dicks, R. Jones, I. Leslie, O. A. M Popoola, and M. Seaton (2019). Urban emission inventory optimisation using sensor data, an urban air quality model and inversion techniques. *Int. J. of Env. and Pollution*, 66, 4, 252-266. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2019.104878>
- Castell, N., F. R. Dauge, P. Schneider, M. Vogt, U. Lerner, B. Fishbain, D. Broday, and A. Bartonova (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Env. Int.*, 99, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>
- Castro, T., S. Madronich, S. Rivale, A. Muhlia, and B. Mar (2001). The influence of aerosols on photochemical smog in Mexico City. *Atmos. Env.*, 35, 1765-1772. Doi:10.1016/S1352-2310(00)00449-0.
- Cavaliere, A., F. Carotenuto, F. Di Gennaro, B. Gioli, G. Gualtieri, F. Martelli, A. Matese, P. Toscano, C. Vagnoli, and A. Zaldei (2018). Development of low-cost air quality stations for next generation monitoring networks: Calibration and validation of PM_{2.5} and PM₁₀ sensors. *Sensors*, 18, 9, 2843.
<https://doi.org/10.3390/s18092843>
- Cazelles, B., M. Chavez, G. Constantin de Magny, J.-F. Guégan, and S. Hales (2007). Time-dependant spectral analysis of epidemiological time-series with wavelets. *J. of the Royal Society Interface*, 4, 625-636.
<https://doi.org/10.1098/rsif.2007.0212>
- Chalmers, A. J. & W. R. O’Farrell (1916). Preliminary remarks upon epidemic cerebrospinal meningitis as seen in the Anglo- Egyptian Sudan. *J. of Trop. Med. and Hygiene*, 29(101-116) :117–129.
- Chanut, S. & E. Chevallier (2012). Estimating the atmospheric impacts of traffic management projects : application of theoretical models to concrete cases. *Rech. Transp. Sécurité*, 28, 1–14.
<https://doi.org/10.1007/s13547-011-0018-4>
- Cheesbrough, J. S., A. P. Morse, and S. D. Green (1995). Meningococcal meningitis and carriage in western Zaire : a hypoendemic zone related to climate? *Epidemiology and Infection*, 114, 1, 75–92.
 Doi: 10/1017/S0950268800051931.
- Chen, L.-W. A., M. Zhang, T. Liu, K. Fortier, J. C. Chow, F. Alonzo, R. Kolberg, J. Cao, G. Lin, T. Y. Patel, P. Cruz, M. P. Buttner, and J. G. Watson (2019). Evaluation of epifluorescence methods for quantifying bioaerosols in fine and coarse particulate air pollution. *Atmos. Env.*, 213, 620-628.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.051>

- Chiapello, I., C. Moulin, and J. M. Prospero (2005). Understanding the long-term variability of African dust transport across the Atlantic as recorded in both Barbados surface concentrations and large-scale Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) optical thickness. *J. of Geophys. Res.*, 110, D18S10.
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2004JD005132>
- CITEPA (2019). Gaz à effets de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2017. *Rapport national d'inventaire SECTEN*. https://www.citepa.org/fr/2019_09_ag/
- CNES-TOSCA (2019). Séminaire de prospective scientifique, 8-10 octobre 2019, Le Havre.
<https://sciences-techniques.cnes.fr/fr/sciences-et-techniques/politique-scientifique-du-cnes/seminaires-de-prospective/le-havre-2019>
- Cooper L. V., A. Robson, C. L. Trotter, A. Aseffa, J.-M. Collard, D. M. Daugla, A. Diallo, A. Hodgson, J.-F. Jusot, B. Omotara, S. Sow, M. Hassan-King, O. Manigart, M. Nascimento, A. Woukeu, D. Chandramohan, R. Borrow, M. C. J. Maiden, B. Greenwood on behalf of J.M. Stuart, the MenAfriCar Consortium (2019). Risk factors for acquisition of meningococcal carriage in the African meningitis belt. *Trop. Med. and Int. Health*, 24, Issue 4, 392-400. <https://doi.org/10.1111/tmi.13203>
- Crilley, L. R., M. Shaw, R. Pound, L. J. Kramer, R. Price, S. Young, A. C. Lewis, and F. D. Pope (2018). Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring. *Atmos. Meas. Tech.*, 709–720. <https://doi.org/10.5194/amt-11-709-2018>
- Crunaire, S., N. Redon, and L. Spinelle (2018). 1er Essai national d'Aptitude des micro-Capteurs (EAμC) pour la surveillance de la qualité de l'air : synthèse des résultats, *Rapport LCSQA DRC_18_174307_09689A*.
- de Almeida Castanho D. A., R. Prinn, V. Martins, M. Herold, C. Ichoku, and L. Molina (2007). Analysis of Visible/SWIR surface reflectance ratios for aerosol retrievals from satellite in Mexico City urban area. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 20, 5467-5477.
- Dee, D. P., S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Hólm, L. Isaksen, P. Kållberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J.-N. Thépaut, and F. Vitart (2011). The ERA-Interim reanalysis : configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly J. of the Royal Meteorological Society*, 137, Issue 656, 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- de Leeuw, G., L. Sogacheva, E. Rodriguez, K. Kourtidis, A. K. Georgoulias, G. Alexandri, V. Amiridis, E. Proestakis, E. Marinou, Y. Xue, and R. van der A (2018). Two decades of satellite observations of AOD over mainland China using ATSR-2, AATSR and MODIS/Terra : data set evaluation and large-scale patterns. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 1573-1592. <https://doi.org/10.5194/acp-18-1573-2018>
- den Bossche, J. V., J. Petersa , J. Verwaerenb , D. Botteldoorenc , J. Theunisa , and B. De Baetsb (2015). Mobile monitoring for mapping spatial variation in urban air quality: development and validation of a methodology based on an extensive dataset. *Atmos. Env.*, 105, 148-161.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.017>
- Denman, K. L., G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, P. M. Cox, R. E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S Ramachandran, P. L. da Silva Dias, S. C. Wofsy, and X. Zhang (2007). Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In : *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter7-1.pdf>
- Di Antonio, A., O. A. M. Popoola, B. Ouyang, J. Saffell, and R. L. Jones (2018). Developing a Relative Humidity Correction for Low-Cost Sensors Measuring Ambient Particulate Matter. *Sensors*, 18, 2790.
<https://doi.org/10.3390/s18092790>
- Di Biagio, C., P. Formenti, Y. Balkanski, L. Caponi, M. Cazaunau, E. Pangui, E. Journet, S. Nowak, M. O. Andreae, K. Kandler, T. Saeed, S. Piketh, D. Seibert, E. Williams, and J.-F. Doussin (2019). Complex refractive indices and single-scattering albedo of global dust aerosols in the shortwave spectrum and relationship to size and iron content. *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 15503–15531. <https://doi.org/10.5194/acp-19-15503-2019>
- Dukic, V., M. Hayden, and A. Forgor (2012). The Role of Weather in Meningitis Outbreaks in Navrongo, Ghana : A Generalized Additive Modeling Approach. *J. of Agricultural, Biological, and Env. Statistics*, 17, 442–460.
<https://doi.org/10.1007/s13253-012-0095-9>
- Dupuy, S., R. Gaetano, and L. Le Mézo (2020). Mapping land cover on Reunion island in 2017 using satellite imagery and geospatial ground data. *Data in Brief*, 28, 104934. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104934>
- Dutkiewicz, S. & J. F. Parekh (2005). Interactions of the iron and phosphorus cycles : a three-dimensional model study. *Global Biogeochemical Cycles*, 19, 1. <https://doi.org/10.1029/2004GB002342>

- Edussuriya, P. S., A. Chan, and A. Ye (2011). Urban morphology and air quality in dense residential environments in Hong Kong. Part I: district-level analysis. *Atmos. Env.*, 45, Issue 27, 4789-4803.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.061>
- Edussuriya, P. S. & A. Chan (2015). Analysis of urban morphological attributes and street level air pollution in high-density residential environments in Hong Kong. In : R.H. Crawford and A. Stephan (eds.), *Living and Learning: Research for a Better Built Environment: 49th International Conference of the Architectural Science Association*, 467-476.
- Elichegaray, C. (2008). La pollution de l'air: Sources, effets, prevention. *Edition Dunod. Collection Universciences*.
- Engelstaedter, S. & R. Washington (2007). Atmospheric controls on the annual cycle of North African dust. *Geophys. Res. Letters*, 34, Issue 15. <https://doi.org/10.1029/2007GLO29971>
- Escourrou, G. (1991). Le climat et la ville. *Nathan Université*, Paris, 192p.
- Feinberg, S., R. Williams, G. S. W. Hagler, J. Rickard, R. Brown, D. Garver, G. Harshfield, P. Stauffer, E. Mattson, R. Judge, and S. Garvey (2018). Long-term evaluation of air sensir technology under ambient conditions in Denver, Colorado. *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 8, 4605-4615. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4605-2018>
- Fishman, J., F. M. Vukovich, D. R. Cahoon, and M. C. Shipman (1987). The characterization of an air pollution episode using satellite total ozone measurements. *J. of Applied Meteorology and Climatology*, 26, Issue 12, 1638-1654. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1987\)026<1638:TCOAAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1987)026<1638:TCOAAP>2.0.CO;2)
- Fishman, J., K. W. Bowman, J. P. Burrows, A. Richter, K. V. Chance, D. P. Edwards, R. V. Martin, G. A. Morris, R. B. Pierce, J. R. Ziemke, J. A. Al-Saadi, J. K. Creilson, T. K. Schaack, and A. M. Thomson (2008). *Rem. Sens. of Trop. Pollution from Space*. Bulletin of the American Meteorological Society, 89, Issue 6, 805-822. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2526.1>
- Fraser, R. S., Y. J. Kaufman (1984). Satellite measurements of aerosol mass and transport. *Atmos. Env.*, 18, Issue 12, 2577-2584. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(84\)90322-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(84)90322-6)
- Ganor, E., A. Stupp, and P. Alpert (2009). A method to determine the effect of mineral dust aerosols on air quality. *Atmos. Env.*, 43, Issue 34, 5463-5468. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.028>
- Gasse, F. (2002). Diatom-inferred salinity and carbonate oxygen isotopes in Holocene waterbodies of the western Sahara and Sahel (Africa). *Quaternary Science Reviews*, 21(7) :737-767.
 Doi : 10.1016/S0277-3791(01)00125-1.
- Giffinger, R., C. Fertner, H. Kramar, and E. Meijers (2007). City-ranking of European medium-sized cities. *Cent. Reg. Sci. Vienna UT*, 1-12.
- Giglio, L., I. Csiszar, and C. O. Justice (2006). Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensors. *J. of Geophys. Res.*, 111, G02016. <https://doi.org/10.1029/2005JG000142>
- González-Toril, E., S Osuna, D. Viúdez-Moreiras, et al. (2020). Impacts of Saharan Dust Intrusions on Bacterial Communities of the Low Troposphere. *Scientific Reports*, 10, 6837.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-63797-9>
- Goudie, S. and N. Middleton (2006). *Desert Dust in the Global System*. Springer, Heidelberg. ISBN3540323554.
<http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=4m6xempfY1gC&pgis=1>
- Greenwood, B. M., A. K. Bradley, I. S. Blakebrough, S. Wali, and H. C. Whittle (1984). Meningococcal disease and season in sub-Saharan Africa. *The Lancet*, 323, 8390, 1339-1342. Doi: 10.1016/s0140-6736(84)91830-0.
- Greenwood, B. M. (2006). Editorial : 100 years of epidemic meningitis in West Africa – has anything changes? *Trop. Med. and Int. Health*, 11, Issue 6, 773-780. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3156.2006.01639.x>
- Grignard, A., P. Taillandier, B. Gaudou, D. A. Vo, N. Q. Huynh, and A. Drogoul (2013). GAMA 1.6: Advancing the art of complex agent-based modeling and simulation. In : *International conference on principles and practice of multi-agent systems*, 117-131. Springer, Berlin, Heidelberg.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-44927-7_9
- Gross, B., O. Pgunwuyi, F. Moshary, S. Ahmed, and B. Cairns (2004). Aerosol retrieval over urban areas using spatial regression between V/NIR and MIR Hyperion channels. In : *Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization: Numerical Atmospheric Prediction and Environmental Monitoring*, 31 Jul. 2005, San Diego, Cal., *Proc. of SPIE*, 5547. <https://doi.org/10.1117/12.560097>
- Grote, R., R. Samson, R. Alonso, J. H. Amorim, P. Cariñanos, G. Churkina, S. Fares, D. Le Thiec, Ü. Niinemets, T. N. Mikkelsen, E. Paoletti, A. Tiwary and C. Calfapietra (2016). Functional traits of urban trees: air pollution mitigation potential. *Frontiers in Ecology and the Env.*, 14, Issue 10, 543-550.
<https://doi.org/10.1002/fee.1426>
- Gupta, P., S. A. Christopher, J. Wang, R. Gehrig, Y. Lee, N. Kumar (2006). Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmos. Env.*, 40, Issue 30, 5880-5892.
 Doi :10.1016/j.atmosenv.2006.03.016.

- Hamm, N. A. S., M. van Lochen, G. Hoek, R. Otjes, S. van der Sterren, and H. Verhoeven (2016). The invisible made visible: sciences and technology. *AiREAS : Sustainability for a Health City*, 51-77.
Doi: [10.1007/978-3-319-26940-5_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26940-5_3).
- Hansen, J., M. Sato, and R. Ruedy (1997). Radiative forcing and climate response. *J. of Geophys. Res.*, 102, 6831-6864. Doi:[10.1029/96JD03436](https://doi.org/10.1029/96JD03436). <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/96JD03436>
- Hashim, H., Z. Abd Latif, N. Aizam Adnan (2019). Urban vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) Pléiades imagery. *Int. Archives of the Photogrammetry, Rem. Sens. and Spatial Information Science, XLII-4/W16*, 237-240.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-237-2019>
- Haywood, J. M. & P. N. Francis, I. Geogdzhayev, M. Mishchenko, and R. Frey (2001). Comparison of Saharan dust aerosol optical depth retrieved using aircraft mounted pyranometers and 2-channel AVHRR algorithms. *Geophys. Res. Letters*, 28, 2393-2396. <https://doi.org/10.1029/2000GL012625>.
- Heimann, I., V. B. Bright, M. W. McLeod, M. I. Mead, O. A. M. Popoola, G. B. Stewart, R. L. Jones (2015). Source attribution of air pollution by spatial scale separation using high density networks of low cost air quality sensors. *Atmos. Env.*, 113, 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.057>
- Hernandez, E. H., M. Min Oo, L. Charles, B. Gross, F. Moshary, and S. Ahmed (2007). Improvement of MODIS retrieval of aerosols over urban areas using a regionally tuned ground albedo model. *IEEE Int. Geosciences and Rem. Sens. Symposium*, 4307-4310. Doi: [10.1109/IGARSS.2007.4423804](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2007.4423804).
- Hervo, M. (2013). Etude des propriétés optiques et radiatives des aérosols en atmosphère réelle : Impact de l'hygroscopicité. *Thèse de doctorat*. Université Blaise Pascal, Clermon-Ferrand II.
- Hodgson, A., T. Smith, S. Gagneux, M. Adjuik, G. Pluschke, N. K. Mensah, F. Binka, et B. Genton (2001). Risk factors for meningococcal meningitis in northern Ghana. *Trans. of the Royal Society of Trop. Med. and Hygiene*, 95, Issue 5, 477-80. Doi: [10.1016/S0035-9203\(01\)90007-0](https://doi.org/10.1016/S0035-9203(01)90007-0).
- Holben B. N., E. Vermote, Y. J. Kaufman, D. Tanré, and V. Kalb (1992). Aerosol retrieval over land from AVHRR data - Application for atmospheric correction. *IEEE Trans. on Geoscience and Rem. Sens.*, 30, 212-222.
- Holben, B. N., D. Tanré, A. Smirnov, T. F. Eck, I. Slutsker, N. Abuhassan, W. W. Newcomb, J. S. Schafer, B. Chatenet, F. Lavenue, Y. J. Kaufman, J. V. Castle, A. Setzer, B. Markham, D. Clark, R. Frouin, R. Halthore, A. Karneli, N. T. O'Neill, C. Pietras, R. T. Pinker, K. Voss, and G. Zibordi (2001). An emerging ground-based aerosol climatology : Aerosol optical depth from AERONET. *J. of Geophys. Res. : Atmospheres*, 106, Issue D11, 12067-12097. <https://doi.org/10.1029/2001JD900014>
- Horn, A. E. (1908). Report on an investigation of cerebro-spinal fever in the northern territories of the Gold Coast in 1908. *J. of Trop. Med. and Hygiene*, 11, 358-365.
- Hsu, N. C., M.-J. Jeong, C. Bettenhausen, A. M. Sayer, R. Hansell, C. S. Seftor, J. Huang, S. C. Tsay (2013). Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: the second generation. *J. of Geophys. Res. : Atmospheres*, 118, Issue 16, 9296-9315. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50712>
- Jankowiak, I. & D. Tanré (1992). Satellite Climatology of Saharan Dust Outbreaks : Method and Preliminary Results. *J. of Climate*, 5(6) :646-656.
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1992\)005<0646:SCOSDO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1992)005<0646:SCOSDO>2.0.CO;2)
- Jeanne, I. (2009), Meningitis and climate studies in Niger (2009). *AMMA France Workshop*, Paris, France, 25 juin 2009, Oral.
- Jovasevic-Stojanovic, M., A. Bartonova, and D. Topalovic (2018). On the use of small and cheaper sensors and devices for indicative citizen-based monitoring of respirable particulate matter. *Env. Pollution*, 206, 696-704. Doi :[10.1016/j.envpol.2015.08.035](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.08.035).
- Junge, C. (1979). The importance of Mineral Dust as an Atmospheric Constituent. In : *Saharan Dust*, C. Morales (Ed.), J. Wiley & Sons, Chichester, 49-60. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10006661616/>
- Kacenenbogen, M., J.-F. Léon, I. Chiapello, and D. Tanré (2006). Characterization of aerosol pollution events in France using ground-based and POLDER-2 satellite data. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 4843-4849.
<https://doi.org/10.5194/acp-6-4843-2006>
- Karachaliou A., A. J. K. Conlan, M.-P. Preziosi, C. L. Trotter (2015). Modeling Long-term Vaccination Strategies With MenAfriVac in the African Meningitis Belt. *Clinical Infectious Diseases*, 61, Issue suppl_5, S594S600. <https://doi.org/10.1093/cid/civ508>
- Karagukian, F., M. Barbieri, A. Kotsev, L. Spinelle, M. Gerboles, F. Lagler, N. Redon, S. Crunaire, and A. Borowiak (2019). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*, 10, 9, 506.
<https://doi.org/10.3390/atmos10090506>
- Kaufman, Y. J. & C. Sendra (1988). Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery. *Int. J. of Rem. Sens.*, 9, Issue 8, 1357-1381.<https://doi.org/10.1080/01431168808954942>

- Kaufman, Y. J., D. Tanré, L. A. Remer, E. Vermote, A. Chu, and B. N. Holben (1997a). Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. *J. of Geophys. Res.*, 102, 17 051–17 067. <https://doi.org/10.1029/96JD03988>
- Kaufman, Y. J., A. E. Wald, L. A. Remer, B.-C. Gao, R.-R. Li, and L. Flynn (1997b). The MODIS 2.1 µm Channel—Correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Trans. on Geoscience and Rem. Sens.*, 35, 1286–1298.
- Kelly, J. T., C. J. Jang, B. Timin, B. Gantt, A. Reff, Y. Zhu, S. Long, and A. Hanna (2019). A system for developing and projecting PM_{2.5} spatial fields to correspond to just meeting National Ambient Air Quality Standards. *Atmos. Env.*, 2, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.aea0a.2019.100019>
- Keuken, M., P. Zandveld, S. van den Elshout, N. Janssen, and G. Hoek (2011). Air quality and health impact of PM₁₀ and EC in the city of Rotterdam, the Netherlands in 1985–2008. *Atmos. Env.*, 45, 30, 5294–5301. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.058>
- Kim, M.-H., S.-W. Kim, S.-C. Yoon, A. H. Omar (2013). Comparison of aerosol optical depth between CALIOP and MODIS-Aqua for CALIOP aerosol subtypes over the ocean. *J. of Geophys. Res. : Atmospheres*, 118, Issue 23, 13241–13252. <https://doi.org/10.1002/2013JD019527>
- King, M. D., Y. J. Kaufman, D. Tanré, and T. Nakajima (1999). Remote sensing of tropospheric aerosols from space : past, present and future. *Bull. of the American Meteorological Society*, 80, Issue 11, 2229–2260. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<2229:RSOTAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<2229:RSOTAF>2.0.CO;2)
- Kittaka, C., D. M. Winker, M. A. Vaughan, A. Omar, and L. A. Remer (2011). Intercomparison of column aerosol optical depth and MODIS-Aqua. *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 131–141. <https://doi.org/10.5194/amt-4-131-2011>
- Knippertz, P. & A. H. Fink (2006). Synoptic and dynamic aspects of an extreme springtime Saharan dust outbreak. *Quarterly J. of the Royal Meteorological Society*, 132(617), 1153–1177. <https://doi.org/10.1256/qj.05.109>
- Konare, A., A. S. Zakey, F. Solmon, F. Giorgi, S. Rauscher, S. Ibrah, and X. Bi (2008). A regional climate modeling study of the effect of desert dust on the West African monsoon. *J. of Geophys. Res. : Atmosphere*, 113, Issue D12. <https://doi.org/10.1029/2007JD009322>
- Koren, I., L. A. Remer, O. Altaratz, J. V. Martins, and A. Davidi (2010). Aerosol-induced changes of convective cloud anvils produce strong climate warming. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 5001–5010. <https://doi.org/10.5194/acp-10-5001-2010>
- Krzyzanowski, M., J. S. Apte, S. P. Bonjour, et al. (2014). Air Pollution in the Mega-Cities. *Current Env. Health Reports*, 1, 185–191. <https://doi.org/10.1007/s40572-014-0019-7>
- Kumar P, M. Morawska, C. Martani, G. Biskos, M. Neophytou, S. Di Sabatino, M. Bell, L. Norford, R. Britter (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Env. Int.*, 75, 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019>
- Kwarteng, A., J. Amuasi, A. Annan, S. Ahuno, D. Opere, M. Nagel, et al. (2017). Current meningitis outbreak in Ghana: Historical perspectives and the importance of diagnostics. *Acta Tropica*, 169, 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2017.01.014>
- LaForce, M. F., & J. M. Okwo-Bele (2011). Eliminating epidemic group A meningococcal meningitis in Africa through a new vaccine. *Health Affairs*, 6, 1049–1057. Doi: 10.1377/hlthaff.2011.0328.
- Lapeyssonnie, L. & World Health Organization (1963). La méningite cérébrospinale en Afrique. *Bull. of the World Health Organization/L. Lapeyssonnie*, 28. Supplément OMS. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/72037>
- Lavaysse, C., C. Flamant, S. Janicot, D. Parker, J. P. Lafore, B. Sultan, and J. Pelon (2009). Seasonal evolution of the West African heat low : a climatological perspective. *Climate Dynamics*, 33(2) :313–330. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0553-4>
- Le Bras, J. & V. Masson (2015). A fast and spatialized urban weather generator for long-term urban studies at the city-scale. *Frontiers in Earth. Science*, 3, Issue 27. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00027>
- Lee, W-S., R. L. Bhawar, M-K. Kim, and J. Sang (2013). Study of aerosol effect on accelerated snow melting over the Tibetan Plateau during the Boreal spring. *Atmos. Env.*, 75, 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.004>
- Lelieveld, J., H. Berresheim, S. Borrmann, P. J. Crutzen, F. J. Dentener, H. Fischer, J. Feichter, P. J. Flatau, J. Heland, R. Holzinger, R. Korrman, M. G. Lawrence, Z. Levin, K. M. Markowicz, N. Mihalopoulos, A. Minikin, V. Ramanathan, M. de Reus, G. J. Roelofs, H. A. Scheeren, J. Sciare, H. Schlager, M. Schultz, P. Siegmund, B. Steil, E. G. Stephanou, P. Stier, M. Traub, C. Warneke, J. Williams, and H. Ziereis (2002). Global Air Pollution Crossroads over the Mediterranean. *Science*, 298, Issue 5594, 794–799. Doi: 10.1126/science.1075457.
- Lelieveld, J., K. Klingmüller, A. Pozzer, U. Pöschl, M. Fnais, A. Daiber, and T. Münzel (2019). Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. *Eur. Heart J.*, 40, Issue 20, 1590–1596. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz135>

- Léon J.-F., P. Chazette, and F. Dulac (1999). Retrieval and monitoring of aerosol optical thickness over an urban area by spaceborne and groundbased remote sensing. *Applied Optics*, 38, 33, 6918-6926. <https://doi.org/10.1364/AO.38.006918>
- Léon, J.-F., Y. Derimian, I. Chiapello, D. Tanré, T. Podvin, B. Chatenet, A. Diallo, et C. Deroo (2009). Aerosol vertical distribution and optical properties over M'Bour (16.96 deg W; 14.39 deg N), Senegal from 2006 to 2008. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, Issue 23, 9249–9261. <https://www.atmos-chem-phys.net/9/9249/2009/>
- Leroy M., J.-L. Deuzé, F.-M. Bréon, O. Hautecoeur, M. Herman, J. C. Buriez, D. Tanré, S. Bouffies, P. Chazette, and J.-L. Roujean (1997). Retrieval of atmospheric properties and surface bidirectional reflectances from POLDER/ADEOS. *J. of Geophys. Res.*, 102, 17023-17037. <https://doi.org/10.1029/96JD02662>
- Levy, R. C., L. A. Remer, D. Tanré, S. Mattoo, and Y. J. Kaufman (2009). Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol over dark targets from MODIS. Collections 005 and 051: Revision 2. *MODIS ATBD*. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.386.980&rep=rep1&type=pdf>
- Li, J., B. E. Carlson, and A. A. Lacis (2015). How well do satellite AOD observations represent the spatial and temporal variability of PM_{2.5} concentration for the United States? *Atmos. Env.*, 102, 260-273. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.12.010>
- Linke, C., O. Möhler, A. Veres, A. Mohacsi, Z. Bozoki, G. Szabo, and M. Schnaiter (2006). Optical properties and mineralogical composition of different Saharan mineral dust samples: a laboratory study. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3315-3323. <https://doi.org/10.5194/acp-6-3315-2006>
- Liu, Z., M. Vaughan, D. Winker, C. Kittaka, B. Getzewich, R. Kuehn, A. Omar, K. Powell, C. Trepte, and C. Hostetler (2009). The CALIPSO lidar cloud and aerosol discrimination: version 2 algorithm and initial assessment of performance. *J. of Atmos. and Ocean Tech.*, 26, Issue 7. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1229.1>
- Llewellyn-Jones D., M. C. Edwards, C. T. Mutlow, A. R. Birks, I. J. Barton, and H. Tait (2005). AATSR: global-change and surface-temperature measurements from Envisat. *ESA Bull.*, 105, 11-21, 12p. https://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet105/bul105_1.pdf
- Lovett, R. (2010). African dust keeps Amazon blooming. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/news.2010.396>
- Lyons, W. A. & R. B. Husar (1976). SMS/GOES visible images detect as Synoptic-scale air pollution episode. *Monthly Weather Review*, 104, Issue 12, 1623-1626. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1976\)104<1623:SVIDAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1976)104<1623:SVIDAS>2.0.CO;2)
- Ma, X., K. Bartlett, K. Harmon, and F. Yu (2013). Comparison of AOD between CALIPSO and MODIS : significant differences over major dust and biomass burning regions. *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 2391-2401. <https://www.atmos-meas-tech.net/6/2391/2013/>
- Maignant, G. (2007). Dispersion de polluants et morphologie urbaine. *L'Espace géographique*, 36, 141-154. <https://doi.org/10.3917/eg.362.0141>.
- Mainassara, H. B., N. Molinari, C. Demattéi, P. Fabbro-Peray (2010). The relative risk of spatial cluster occurrence and spatio-temporal evolution of meningococcal disease in Niger, 2002-2008. *Geospatial Health*, 5, Issue 1, 93-101.
- Mainassara, H. B., J. Paireau, I. Idi, J.-F. Jusot, J.-P. Moulia Pelat, O. O. Missi Oukem-Boyer, A. Fontanet, J. Muller (2016). Serogroup-specific characteristics of localized meningococcal meningitis epidemics in Niger 2002 and 2015 : analysis of health center level surveillance. *Plos One*, 11, 9 e0163110. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163110>
- Martcorena, B. & G. Bergametti (1995). Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *J. of Geophys. Res. : Atmospheres*, 100, Issue D8, 16415-16430. <https://doi.org/10.1029/95JD00690>
- Martcorena, B., B. Chatenet, J.-L. Rajot, S. Traore, M. Coulibaly, A. Diallo, I. Kone, A. Maman, T. N. Diaye and A. Zakou (2010). Temporal variability of mineral dust concentrations over West Africa : analyses of a pluriannual monitoring from the AMMA Sahelian Dust Transect. *Atmos. Chem. Phys.*, 10(18) :8899–8915. <https://doi.org/10.5194/acp-10-8899-2010>
- Martonchik J. V., D. J. Diner, R. Kahn, T. P. Ackerman, M. M. Verstraete, B. Pinty, and H. R. Gordon (1998). Techniques for the retrieval of aerosol properties over land and ocean using multiangle imaging. *IEEE Trans. on Geoscience and Rem. Sens.*, 36, 4, 1212-1227.
- Martonchik J. V., D. J. Diner, R. Kahn, and B. Gaitley (2004). Comparison of MISR and AERONET aerosol optical depths over desert sites. *J. of Geophys. Res.*, 31, L16102, 1-4. <https://doi.org/10.1029/2004GL019807>
- McGavey, K. (1905). Epidemic cerebro-spinal meningitis in northern Nigeria. *The British Medical J.*, 2, 2340, 1173-1174. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2322717/>
- Mead, M. I., O. A. M. Popoola, G. B. Stewart, P. Landshoff, M. Calleja, M. Hayes, J. J. Baldovi, M. W. McLeod, T. F. Hodgson, J. Dicks, A. Lewis, J. Cohen, R. Baron, J. R. Saffell, and R. L. Jones (2013). The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks. *Atmos. Env.*, 70, 186-203. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.060>

- Medina, S., M. Pascal, and C. Tillier C (2016). Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique. Saint-Maurice : *Santé publique France*. 12p. <http://www.santepubliquefrance.fr>
- Miller, R. L. & I. Tegen (1998). Climate response to soil dust aerosols. *J. of Climate*, 11, 3247-3267. <https://pubs.giss.nasa.gov/abs/mio5100g.html>
- Miller, H. J. & M. F. Goodchild (2014). Data-driven geography. *GeoJournal*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10708-014-9602-6>
- Miller, H. J. (2015). Spatio-temporal knowledge discovery. *Geocomputation: A Practical Primer*. SAGE Publications Ltd, Thousand Oaks, CA, 97-109.
- Mitchell, M., & M. Newman (2002). Complex systems theory and evolution. *Encyclopedia of evolution*, 1, 1-5.
- Molesworth, A. M., M. C. Thomson, S. J. Connor, M. P. Cresswell, A. P. Morse, P. Shears, C. A. Hart, and L. E. Cuevas (2002). Where is the meningitis belt? Defining an area at risk of epidemic meningitis in Africa. *Trans. of the Royal Society of Trop. Med. and Hygiene*, 96, Issue 3, 242-249. [https://doi.org/10.1016/S0035-9203\(02\)90089-1](https://doi.org/10.1016/S0035-9203(02)90089-1)
- Molesworth, A. M., L. E. Cuevas, S. J. Connor, A. P. Morse, and M. C. Thomson (2003). Environmental risk and meningitis epidemics in Africa. *Emerging Infectious Diseases*, 9, Issue 10, 1287-1293. Doi: 10.3201/eid0910.030182.
- Molineaux, L. (1969). Climate and meningococcal disease. *PdD thesis*, Université of Berkeley, USA.
- Moore, P.S. (1992). Meningococcal meningitis in sub-Saharan Africa : a model for the epidemic process. *Clinical Infectious Diseases*, 14, Issue 2, 515-25. ISSN 1058-4838. Doi: 10.1093/clinids/14.2.515.
- Mueller, J. E. & B. D. Gessner (2010). A hypothetical explanatory model for meningococcal meningitis in the African meningitis belt. *Int. J. of Infectious Diseases*, 14, Issue 7, E553-E559. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2009.08.013> .
- Munir, S., M. Mayfield, D. Coca, S. A. Jubb, and O. Osammor (2019). Analysing the performance of low-cost air quality sensors, their drivers, relative benefits and calibration in cities—A case study in Sheffield. *Env. Monit. and Assess.*, 191(2), 94. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7321-8>.
- Münzel T., M.Sørensen, T. Gori, F. P. Schmidt, X. Rao, J. Brook, L. C. Chen, R. D. Brook, and S. Rajagopalan (2017). Environmental stressors and cardio-metabolic disease: part I-epidemiologic evidence supporting a role for noise and air pollution and effects of mitigation strategies. *Eur. Heart J.*, 38, Issue 8, 550-556. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehw269>
- Nadal, F. & F.-M. Bréon (1999). Parameterization of surface polarized reflectance derived from POLDER spaceborne measurements. *IEEE Trans. on Geoscience and Rem. Sens.*, 37, 1709-1718. Doi: 10.1109/36.763292.
- Ntziachristos, L. & S. Zissis (2009). Exhaust emissions from road transport. EMEP/EEA emission inventory guidebook – COPERT. In : *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2013 : Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories*. AEE : European Environment Agency, Copenhagen, p. 1.A.3.b.i-iv (Chapitre technique).
- Oh, H.-J., Y. Ma, and J. Kim (2020). Human inhalation exposure to aerosol and health effect: aerosol monitoring and modelling regional deposited doses. *Int. J. of Env. Res. and Public Health*, 17, 1923. <https://doi.org/10.3390/ijerph17061923>
- Oke T.R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmos. Env.*, 7, Issue 8, 769-779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- OMS (2011). End of a century-long scourge ? *Bulletin de l'Organisation mondiale de la Santé*, 89, 550-551. Doi:10.2471/BLT.11.020811.
- OMS (2013). La pollution de l'air, une importante cause environnementale de la mortalité par le cancer. <https://www.euro.who.int/fr/health-topics/environment-and-health/air-quality/news/news/2013/10/outdoor-air-pollution-a-leading-environmental-cause-of-cancer-deaths>
- OMS (2018). Pollution de l'air et santé de l'enfant : Prescrire un air sain., 32p. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/275547/WHO-CED-PHE-18.01-fre.pdf>
- OMS (2020). Vaincre la méningite à l'horizon 2030 : une feuille de route mondiale, 44p. <https://www.who.int/immunization/research/development/DefeatingMeningitisRoadmap-FR.pdf>
- Openshaw, S. & R. J. Abraham (2000). *Geocomputation 1st Edition*. Taylor & Francis Gpe. ed. CRC Press, Londres, 436p. <https://doi.org/10.4324/9780203305805>
- Paireau, J., F. Girond, J.-M. Collard, H. B. Mainassara, and J.-F. Jusot (2012). Analysingspatio-temporalclustering of meningococcal meningitis outbreaks in Niger reveals opportunities for improved disease control. *PLoS Neglected Trop. Diseases*, 6, Issue 3, e1577. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0001577>
- Pan, X., B. Ge, Z. Wang, Y. Tian, H. Liu, L. Wei, S. Yue, I. Uno, H. Kobayashi, T. Nishizawa, A. Shimizu, P. Fu, and Z. Wang, (2019). Synergistic effect of water-soluble species and relative humidity on morphological

- changes in aerosol particles in the Beijing megacity during severe pollution episodes. *Atmos. Chem. Phys.*, 19(1), 219-232.
- Perez, C., M. Stanton, P. J. Diggle, S. Trzaska, R. L. Miller, J. P. Perliwitz, J. M. Baldasano, E. Cuevas, P. Ceccato, P. Yaka, and M. C. Thomson (2014). Soil dust aerosols and wind as predictors of seasonal meningitis incidence in Niger. *Env. Health Perspectives*, 122, Issue 7. <https://doi.org/10.1289/ehp.1306640>
- Peugeot, C., F. Guichard, O. Bock, D. Bouniol, M. Chong, A. Boone, B. Cappelaere, M. Gosset, L. Besson, Y. Lemaître, L. Séguis, A. Zannou, S. Galle, and J-L. Redelsperger (2011). Mesoscale water cycle within the West African Monsoon. *Atmos. Science Letters*, 12, pp45-50. <https://doi.org/10.1002/asl.309>
- Popoola, O., I. Mead, V. Bright, R. Baron, J. Saffell, C. Stewart, P. Kaye, and R.L. Jones (2013). A portable low-cost high density sensor network for air quality at London Heathrow airport. *EGU General Assembly*. [https://www.ch.cam.ac.uk/files/posters/Jones\(Rod\)1.pdf](https://www.ch.cam.ac.uk/files/posters/Jones(Rod)1.pdf)
- Popoola, O. A., D. Carruthers, C. Lad, V.B. Bright, M. I. Mead, M. E. Stettler, J. R. Saffell, and R. L. Jones (2018). Use of networks of low cost air quality sensors to quantify air quality in urban settings. *Atmos. Env.*, 194, 58-70. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.030>
- Prospero, J. M., P. Ginoux, O. Torres, S. E. Nicholson, et T. E. Gill (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics*, 40(1) :31. Doi : 100210.1029/2000rg000095.
- Pu, R. & S. Landry (2020). Mapping urban tree species by integrating multi-seasonal high resolution pléiades satellite imagery with airborne LiDAR data. *Greening*, 53, 126675. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126675>
- Pye, K. (1987). *Aeolian Dust and Dust Deposits*. Academic Press, ISBN:978-0-12-568690-7. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-05007-4>.
- Randles, C. A., V. Ramaswamy (2008). Absorbing aerosols over Asia: A Geophysical Fluid Dynamics Laboratory general circulation model sensitivity study of model response to aerosol optical depth and aerosol absorption. *J. of Geophys. Res.*, 113. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008JD010140>
- Redon, N. & L. Spinelle (2019). Résultats du premier essai national des micro-capteurs EAμC) pour la surveillance de la qualité de l'air. *IMT LD – INERIS*, 38p. https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/LCSQA2017-CILmicrocapteurs-synthese_resultats.pdf
- Remer, L. A., Y. J. Kaufman, D. Tanré, S. Mattoo, D. A. Chu, J. V. Martins, R.-R. Li, C. Ichoku, R. C. Levy, R. G. Kleidman, T. F. Eck, E. Vermote, B. N. Holben (2005). The MODIS aerosol algorithm, products and validation. *J. of the Atmos. Sciences*, 62, 947-973.
- Retalis, A. & N. Sifakis (2010). Urban aerosol mapping over the Athens using the differential textural analysis (DTA) algorithm on MERIS-ENVISAT data. *ISPRS J. of Photogrammetry and Rem. Sens.*, 65, Issue 1, 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.08.001>
- Richard, Y., J. Emery, J. Dudek, J. Pergaud, C. Chateau-Smith, S. Zito, et al. (2018). How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. *Urban Climate*, 26, 258-274. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.10.002>
- Roberts, G., M. J. Wooster, and E. Lagoudakis (2009). Annual and diurnal African biomass burning temporal dynamics. *Biogeosciences*, 6, 849-866. <https://doi.org/10.5194/bg-6-849-2009>
- Rosenfeld, D. (2000). Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 287, Issue 5459, 1793-1796. <https://science.sciencemag.org/content/287/5459/1793.abstract>
- Sanders, L. (2007). Objets géographiques et simulation agent, entre thématique et méthodologie. *J. of Geomatics and Spatial Analyses*, 17, p135-160.
- Santé Publique France (2016). Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique. <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/pollution-et-sante/air/documents/rapport-synthese/impacts-de-l-exposition-chronique-aux-particules-fines-sur-la-mortalite-en-france-continentale-et-analyse-des-gains-en-sante-de-plusieurs-scenarios>.
- Sayer, A. M., Hsu, N. C., Bettenhausen, C., and Jeong, M.-J. (2013). Validation and uncertainty estimates for MODIS Collection 6 “Deep Blue” aerosol data. *J. of Geophys. Res. : Atmospheres*. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50600>.
- Sayer, A. M., N. C. Hsu, C. Bettenhausen, M.-J. Jeong, and G. Melsner (2015). Effect of MODIS Terra radiometric calibration improvements on Collection 6 Deep Blue aerosol products: validation and Terra/Aqua consistency. *J. of Geophys. Res. : Atmospheres*, 120, 12157-12174. <https://doi.org/10.1002/2015JD023878>.

- Sayer, A.M., Y. Govaerts, P. Kolmonen, A. Lipponen, M. Luffarelli, T. Mielonen, F. Patadia, T. Popp, A. C. Povey, K. Stebel, and M. L. Witek (2020). A review and framework for the evaluation of pixel-level uncertainty estimates in satellite aerosol remote sensing. *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 373-404.
<https://doi.org/10.5194/amt-13-373-2020>
- Schepanski, K., I. Tegen, and B. Laurent (2007). A new Saharan dust source activation frequency map derived from MSG-SEVIRI IR-channels. *Geophys. Res. Letters*, 34, L18803.
<https://doi.org/10.1029/2007GL030168>
- Schneider, T., T. Bischoff, and G. H. Haug (2014). Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature*, 513, 45-53. <https://doi.org/10.1038/nature13636>
- Schneider, P., N. Castell, M. Vogt, F. R. Dauge, W. A. Lahoz, and A. Bartonova (2017). Mapping urban air quality in near real-time using observations from low-cost sensors and model information. *Env. Int.*, 106, 234-247. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.05.005>
- Schuster, M., F. Sylvestre, C. Raimond, A. Moussa, Y. Abakar, and T. Yalikul (2019). Chapitre 1. Changements environnementaux et climatiques à la période humide africaine Holocène dans le bassin du lac Fitri (Tchad). In : *Le Tchad des lacs : les zones humides sahéliennes au défi du changement global (online)*. Marseille, IRD éditions. ISBN : 9782709927161.
<https://books.openedition.org/irdeditions/30516?lang=fr>.
- Seefeldt, M., T. M. Hopson, and T. T. Warner (2012). A characterization of the variation in relative humidity across West Africa during the dry season. *J. of Applied Meteorology and Climatology*, 51, Issue 12, 2077-2089. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0196.1>
- Shinn, E. A., G. W. Smith, J. M. Prospero, P. Bretzer, M. L. Reefs (2000). African dust and the demise of Caribbean Coral Reefs. *Geophys. Res. Letters*, 27, Issue 19, 3029-3032.
<https://doi.org/10.1029/2000GL011599>.
- Sicé, A., E. Robin et L. Brochil (1940). Considération épidémiologiques sur la méningite cérébro-spinale au soudan français. *Bulletin de la Société de pathologie exotique*, 35 à 59, 1940.
- Sifakis, N. and P.-Y. Deschamps (1992). Mapping of air pollution using SPOT satellite data. *Photogrammetry Eng. and Rem. Sens.*, LVIII: 1433-1437.
- Sifakis N., N. Soulakelis, and D. Paronis (1998). Quantitative mapping of air pollution density using Earth observations: a new processing method and application to an urban area. *Int. J. of Rem. Sens.*, 19, 3289-3300.
- Sifakis, N., N. Soulakelis, D. Sarigiannis, M. Tombrou, and K. Schäfer (2003). High spatial resolution satellites as a complement to atmospheric modelling and to ground measurements for air-quality monitoring. *Proc. of SPIE*, 4882.
- Sinclair, D, M. P. Preziosi, T. Jacob John, and B. Greenwood (2010). The epidemiology of meningococcal disease in India. *Trop. Med. and Int. Health*. 12, 1421-35. Doi: 10.1111/j.1365-3156.2010.02660.x.
- Smirnov, A., B. N. Holben, T. F. Eck, O. Dubovik, and I. Slutsker (2000). Cloud-Screening and Quality control algorithms for the AERONET database. *Rem. Sens. of Env.*, 73, 337-349.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00109-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00109-7).
- Snyder, E.G., T. H. Watkins, P. A. Solomon, E. D. Thoma, R. W. Williams, G. S. Hagler, D. Shelow, D. A. Hindin, V. J. Kilaru, and P. W. Preuss (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. *Env. Science and Tech.*, 47, 20, 11369-11377. <https://doi.org/10.1021/es4022602>.
- Stansfeld, S., M. Haines, and B. Brown (2000). Noise and Health in the urban environment. *Review on Env. Health*, 15, Issue 1-2, 43-82. <https://doi.org/10.1515/REVEH.2000.15.1-2.43>.
- Stephens, G. L., D. G. Vane, R. J. Boain, G. G. Mace, K. Sassen, Z. Wang, A. J. Illingworth, E. J. O'Connor, W. B. Rossow, S. L. Durden, S. D. Miller, R. T. Austin, A. Benedetti, C. Mitrescu, and CloudSat Science Team (2002). The CloudSat mission and the A-Train : A new dimension of space-based observations of clouds and precipitation *Bull. of the American Meteorological Society*, 83, 1771-1790.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-83-12-1771>.
- Streibl, N. (2017). Influence of Humidity on the Accuracy of Low-Cost Particulate Matter Sensors. *Technical Report*. Doi: 10.13140/RG.2.2.21095.75683.
- Stumpf, A., J.-P. Malet, P. Allemand, and P. Ulrich (2015). Surface reconstruction and landslide displacement measurements with Pléiades satellite images. *ISPRS J. of Photogrammetry and Rem. Sens.*, 95, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.05.008>.
- Sultan, B., C. Baron, M. Dingkuhn, B. Sarr, and S. Janicot (2005). Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128(1-2), 93-110.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.08.005>.
- Swain, C.L. & D. M. Martin (2007). Survival of meningococci outside of the host: implications for acquisition. *Epidemiology and Infection*, 135, 2, 315-320. <https://doi.org/10.1017/S0950268806006789>.

- Tagle, M., F. Rojas, F. Reyes, Y. Vasquez, F. Hallgren, J. Linden, D. Kolev, A.K. Watne, and P. Oyola (2020). Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter in Santiago, Chile. *Env. Monit. Assess.*, 192, 171. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8118-4>.
- Talbot, R. W., R. C. Harriss, E. V. Browell, G. L. Gregory, D. I. Sebach, and S. M. Beck (1986). Distribution and geochemistry of aerosols in the tropical north Atlantic troposphere: relationship to Saharan dust. *J. of Geophys. Res. : Atmospheres*, 91, Issue D4, 5173-5182. <https://doi.org/10.1029/JD091iD04p05173>.
- Tall, H., S. Hugonnet, P. Donnen, M. Dramaix-Wilmet, L. Kambou, F. Drabo, and J. E. Mueller (2012). Definition and characterization of localised meningitis epidemics in Burkina Faso : a longitudinal retrospective study. *BMC Infectious Diseases*, 12, 2. <https://doi.org/10.1186/1471-2334-12-2>.
- Tall, H., B. M. Njanpop-Lafourcade, D. Mounkoro, L. Tidjani, K. Agbenoko, I. Alassani et al. (2016). Identification of *Streptococcus suis* meningitis through population-based surveillance, Togo, 2010–2014. *Emerging Infectious Diseases*, 22(7), 1262. <https://doi.org/10.3201/eid2207.151511>.
- Tanré, D., J.-F. Geleyn, and J. M. Slingo (1984). First results of the introduction of an advanced aerosol-radiation interaction in the ECMWF low resolution global model. In : *Aerosols and Their Climate Effects*, edited by: Gerber, H. E. and Deepak, A., A. Deepak, 133–147.
- Tanre, D., B. N. Holben, and Y. J. Kaufman (1992). Atmospheric correction algorithm for NOAA-AVHRR products: theory and application. *IEEE Trans. on Geoscience and Rem. Sens.*, 30, 2, 231-248. Doi: 10.1109/36.134074.
- Tegen, I., P. Hollrig, M. Chin, I. Fung, D. Jacob, and J. Penner (1997). Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model results. *J. of Geophys. Res.*, 102, 23895-23915. <https://doi.org/10.1029/97JD01864>.
- Thayer, S. (2008). Taking the “LEED” with reflective concrete. *The Pocket Consultant*, Vol. 11, Issue 3, Braun Intertec.
- Thieuleux, F., C. Moulin, F. M. Bréon, F. Maignan, J. Poitou, and D. Tanré (2005). Remote sensing of aerosols over the oceans using MSG/SEVIRI imagery. *Annales Geophysicae*, 23, 3561-3568. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-3561-2005>.
- Thomson, M., A. M. Molesworth, M. Djingarey, K. R. Yameogo, F. Belanger, and L. E. Cuevas (2006). Potential of environmental models to predict meningitis epidemics in Africa. *Trop. Med. and Int. Health*, 11, Issue 6, 781–8. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3156.2006.01630.x>.
- Thomson, M. C., I. Jeanne, and M. Djingarey (2009). Dust and epidemic meningitis in the Sahel: a public health and operational research perspective. *IOP Conf. Ser.: Earth Env. Science*, 7, Issue 1, 012017. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1307/7/1/012017>.
- Thomson, M. C., E. Firth, M. Jancoes, A. Mihretie, M. Onoda, S. Nickovic, H. Broutin, S. Sow, W. Perea, E. Bertherat, and S. Hugonnet (2013). A climate and Health Partnership to inform the prevention and control of meningococcal meningitis in sub-saharan Africa : the MERIT initiative. In : G.R. Asrar and J.W. Hurrell (eds.), *Climate Science for Serving Society, Research, Modeling and Prediction Priorities*, Doi:10.1007/978-94-007-6692-1_17.
- Todd, W., A. George Jr., and N. Bryant (1979). Satellite-aided evaluation of population exposure to air pollution. *Env. Science and Tech.*, 13, Issue 8, 970-974. <https://doi.org/10.1021/es60156a014>.
- Todd, M. C., R. Washington, J. V. Martins, O. Dubovik, G. Lizcano, S. M'Bainayel, and S. Engelstaedter (2007). Mineral dust emission from the Bodele Depression, northern Chad, during BoDEx 2005. *J. of Geophys. Res.*, 112, D06207. <https://doi.org/10.1029/2006JD007170>.
- Tompkins, A. M., C. Cardinali, J.-J. Morcrette, M. Rodwell (2005). Influence of aerosol climatology on forecasts of the African Easterly Jet. *Geophys. Res. Letters*, 32, Issue 10. <https://doi.org/10.1029/2004GL022189>.
- Torres, O., P. K. Bhartia, J. R. Herman, Z. Ahmad, and J. Gleason (1998). Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation : Theoretical basis. *J. of Geophys. Res.*, 103(D14), pp. 17099–17110. <https://doi.org/10.1029/98JD00900>.
- Torres, O., A. Tanskanen, B. Veihelmann, C. Ahn, R. Braak, P. K. Bhartia, P. Veefkind, and P. Levelt (2007). Aerosols and surface UV products from Ozone Monitoring Instrument observations : An overview. *J. of Geophys. Res. :Atmospheres*, 112(D24), 14. <https://doi.org/10.1029/2007JD008809>.
- Trotter, C. L. and B. M. Greenwood (2007). Meningococcal carriage in the African meningitis belt. *The Lancet Infectious Diseases*, 7, Issue 12, 797–803. [http://dx.doi.org/10.1016/S1473-3099\(07\)70288-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1473-3099(07)70288-8).
- Twomey, S. (1977) The Influence of Pollution on the Shortwave Albedo of Clouds. *J. of the Atmos. Sciences*, 34, 1149-1152. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1977\)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1977)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2).
- van der Werf, G.R., J. T. Randerson, G. J. Collatz, L. Giglio (2003). Carbon emissions from fires in tropical and subtropical ecosystems. *Global Change Biology*. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00604.x>.
- van der Werf, G.R., J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, P. S. Kasibhatla (2006). Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3423-3441. <https://doi.org/10.5194/acp-6-3423-2006>.

- Vaughan, M. A., K. A. Powell, D. M. Winker, C. A. Hostetler, R. E. Kuehn, W. H. Hunt, B. J. Getzewich, S. A. Young, A. Liu, and M. J. McGill (2009). Fully automated detection of cloud and aerosol layers in the CALIPSO Lidar measurements. *J. of Atmos. and Ocean Tech.*, 26, Issue 10, 2034-2050. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1228.1>.
- Veeffkind, J. P., G. de Leeuw, and P. A. Durkee (1998). Retrieval of aerosol optical depth over land using two-angle view satellite radiometry during TARFOX. *Geophys. Res. Letters*, 25, Issue 16, 3135-3138. <https://doi.org/10.1029/98GL02264>.
- Vincent D. A., K. E. Nielsen, P. A. Durkee, and J. S. Reid (2005). Aerosol optical depth retrievals from high-resolution commercial satellite imagery over areas of high surface reflectance. *Proc. of the AGU Fall Meeting*, San Francisco, Etats-Unis, 2005AGUFM.A54A..06V.
- Vincent D.A. (2006), Aerosol optical depth retrieval from high-resolution commercial satellite imagery over areas of high surface reflectance. *PhD Naval Postgraduate school*, 197p. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA457702.pdf>.
- Virji, M. (2009). Pathogenic neisseriae : surface modulation, pathogenesis and infection control. *Nature Reviews Microbiology*, 7, 274–286. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2097>.
- Waddy, B. (1957). African epidemic cerebrospinal meningitis. *J. of Trop. Med. and Hygiene*, 60, 218–223.
- Washington, R., M. Todd, N. J. Middleton, et A. S. Goudie (2003). Dust-storm source areas determined by the total ozone monitoring spectrometer and surface observations. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(2) :297–313. <https://doi.org/10.1111/1467-8306.9302003>.
- Washington, R. (2005). Atmospheric controls on mineral dust emission from the Bodélé Depression, Chad :The role of the low level jet. *Geophys. Res. Letters*, 32(17), L17701. <https://doi.org/10.1029/2005GL023597>.
- Winker, D. M., W. H. Hunt, and M. J. McGill (2007). Initial performance assessment of CALIOP. *Geophys. Res. Letters*, 34, Issue 19. <https://doi.org/10.1029/2007GL030135>.
- Winker, D. M., M. A. Vaughan, A. Omar, X. Hu, K. A. Powell, Z. Liu, W. H. Hunt, and S. A. Young (2009). Overview of the CALIPSO Mission and CALIOP Data Processing Algorithms. *J. of Atmos. and Ocean Tech.*, 26, Issue 11. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1281.1>.
- Winker, D. M., J. L. Tackett, B. J. Getzewich, Z. Liu, M. A. Vaughan, and R. R. Rogers (2013). The global 3-D distribution of tropospheric aerosols as characterized by CALIOP. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 3345-3361. <https://doi.org/10.5194/acp-13-3345-2013>.
- Yaka, P., B. Sultan, H. Broutin, S. Janicot, S. Philippon and N. Fourquet (2008). Relationships between climate and year-to-year variability in meningitis outbreaks : a case study in Burkina Faso and Niger. *Int. J. of Health Geographics*, 7, Issue 34. Doi: 10.1186/1476-072X-7-34.
- Young, S. A. and M. A. Vaughan (2009). The retrieval of profiles of particulate extinction from cloud-aerosols lidar infrared pathfinder satellite observations (CALIPSO) data : algorithm description. *J. of Atmos. and Ocean Tech.*, 26, Issue 6. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1221.1>.
- Zhang, W., X. Gu, H. Xu, T. Yu, and F. Zheng (2015). Assessment of OMI near-UV aerosol optical depth over Central and East Asia. *J. of Geophys. Res.*, 123, 382-398. <https://doi.org/10.1002/2015JD024103>.
- Zhao, C., X. Liu, L. Ruby Leung, and S. Hagos (2011). Radiative impact of mineral dust on monsoon precipitation variability over west Africa. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 1879-1893. <https://acp.copernicus.org/articles/11/1879/2011/acp-11-1879-2011.pdf>.
- Zheng, T., M. H. Bergin, K. K. Johnson, S. N. Tripathi, S. Shirodkar, M. S. Landis, R. Sutaria, and D. E. Carlson (2018). Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments. *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 4823–4846. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4823-2018>.
- Zhou, T., J. G. Liu, W.J. Bai, G. Chen, and B. H. Wang (2006). Behaviors of susceptible-infected epidemics on scale-free networks with identical infectivity. *Physical Review E*, 74, Issue 5, 056109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.74.056109>.
- Zhu, X.R., J. M. Prospero, and F. J. Millero (1997). Diel variability of soluble Fe (II) and soluble total Fe in North African dust in the trade winds at Barbados. *J. of Geophys. Res.: Atmospheres*, 102, Issue D17, 21297-21305. <https://doi.org/10.1029/97JD01313>.

**Nouveaux sites de mesures
et création de base de données originales**

Fiche 1. Le TEOM de Dédougou

Objectifs : Créer un nouveau point de mesures de concentrations massiques des particules en surface pour (i) la calval des produits satellitaires ; (ii) répondre à des problématiques santé dans la bande soudano-sahélienne

Localisation : Burkina Faso, sur un site de mesures dites « synoptiques » de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM). Lat. 12°27'N ; Lon. 3°26'W (Figure II.7)

Profondeur temporelle : en fonctionnement opérationnel depuis 2013

PI scientifique: N. Martiny

Montage du projet et déploiement instrumental : Le TEOM de Dédougou mesure les concentrations des PM₁₀ à un pas de temps de 15mn depuis janvier 2013. En 2010 et 2011, le Conseil Régional de Bourgogne puis le CNRS ont co-financé l'achat du TEOM. En 2012, l'instrument a pu être installé au Burkina Faso via des financements du Conseil Régional de Bourgogne et du programme de recherches AMMA, et grâce à l'aide de l'Association Terra Deserta Expéditions (TDE) en lien avec la Société des Explorateurs de France (Régis Belleville). A partir de 2013, le maintien de l'instrument a été assuré grâce à des crédits de l'OSU THETA (Franche-Comté Bourgogne) (Martiny (2013) et (2014), Partie B/§2.1) puis via les projets de recherches CNES TELEDM (Martiny (2014-2016), Partie B/§2.1) et TELEPaF (Martiny (2017-2019), Partie B/§2.1). Au-delà d'un montage financier assez morcelé et complexe (Figure F1.1), le déploiement du TEOM au Burkina Faso (Figure F1.2) a été une aventure scientifique et humaine indéniable, avec, à ce jour, la mesure de **8 saisons sèches complètes**, et ce, malgré la situation géopolitique prévalant depuis la fin 2014. En réalité, il a été possible de maintenir l'instrument grâce aux collègues burkinabés très motivés par le projet, dont Camille Bebane, technicien à la Direction Générale de la Météorologie du Burkina Faso, qui a accepté de venir en France pour suivre des formations techniques poussées et spécifiques, mais aussi grâce à l'implication de CDD ingénieurs au CRC (Basile Pauthier, Sébastien Zito et Mario Rega). Au final, l'implantation du TEOM à Dédougou et son maintien ont représenté un **investissement en temps recherches** important (missions de terrain jusqu'en 2013, maintien du lien à distance avec le Burkina Faso depuis 2014, encadrement d'ITA et d'étudiants en stage, vérification des mesures recueillies, recherches de financement pour le maintien du TEOM).

Portée et valorisation : Les mesures de PM₁₀ à Dédougou ont d'abord permis de donner une définition quantitative d'un événement de poussières d'Harmattan (Martiny *et al.*, 2015). Ces mesures ont été exploitées dans le cadre de la calval des produits aérosols MODIS ou encore des réanalyses CAMS (thèse de Papa Massar Niane, 2019-2022). Une climatologie (~10 ans de données) des aérosols mesurés à Dédougou ainsi qu'un travail d'analyses de la composition minéralogique des échantillons collectés est en cours de réalisation en partenariat avec les collègues de l'équipe SEDS à Biogéosciences. Ces recherches ont pour objectif d'identifier l'origine potentielle des aérosols, leur minéralogie, ainsi que leurs variabilités pendant la saison sèche, dans un pays situé en plein cœur de la ceinture et particulièrement touché par les méningites.

Référence-clé :

Martiny N., P. Roucou, B. Pohl, P. Camberlin, I. Chiapello (2015). Definition of a Sahelian desert dust event based on new PM₁₀ measurements in Burkina Faso, *Proceeding du 28ème colloque de l'Association Internationale de la Climatologie*, Liège, Belgique, 1-4 juillet 2015.

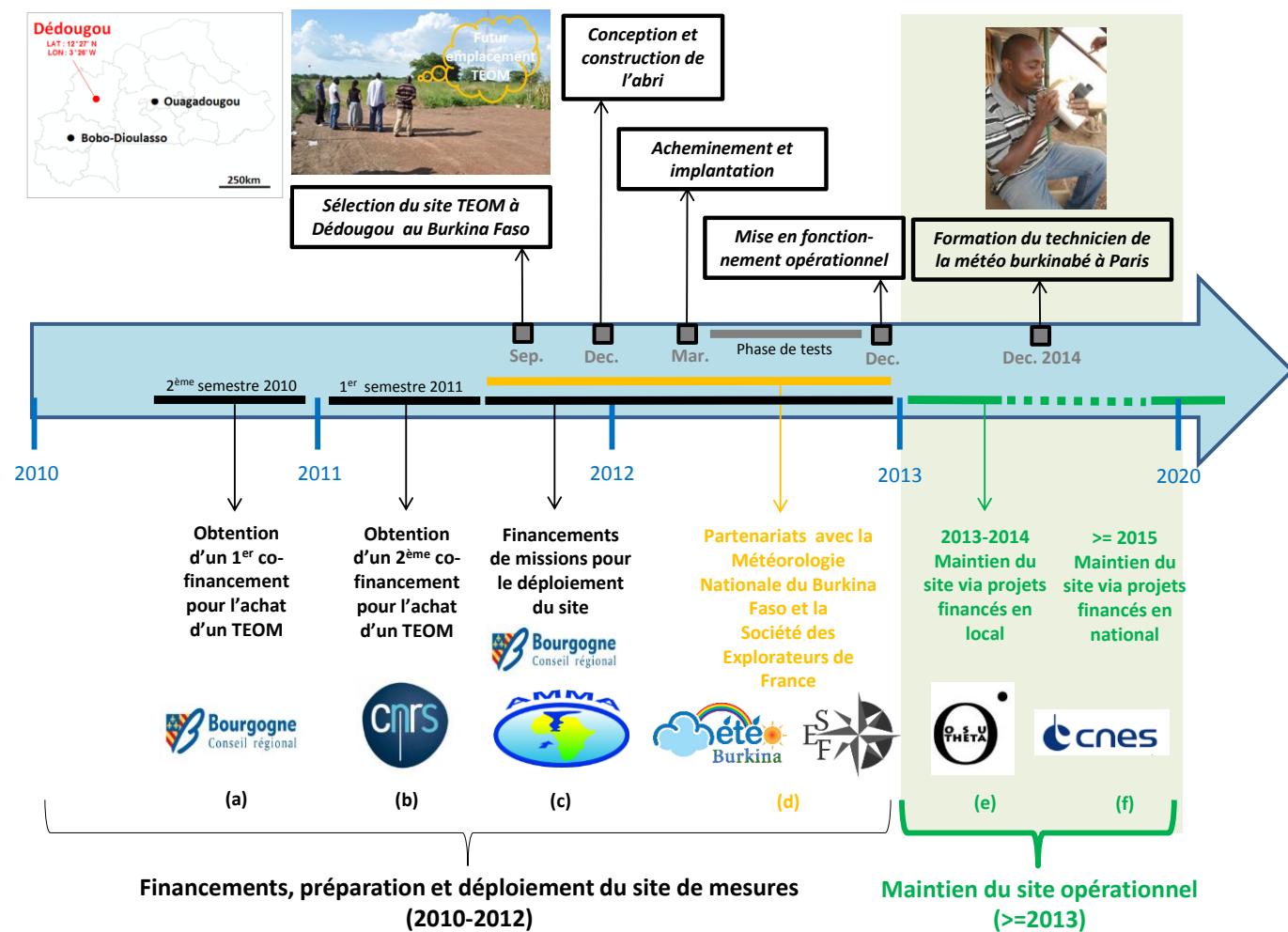


Figure F1.1. Frise chronologique des différentes étapes du projet TEOM à Dédougou au Burkina Faso : des financements et partenariats (a-d) à l'implantation (d) et au maintien du site de mesures depuis 2013 (e-f).

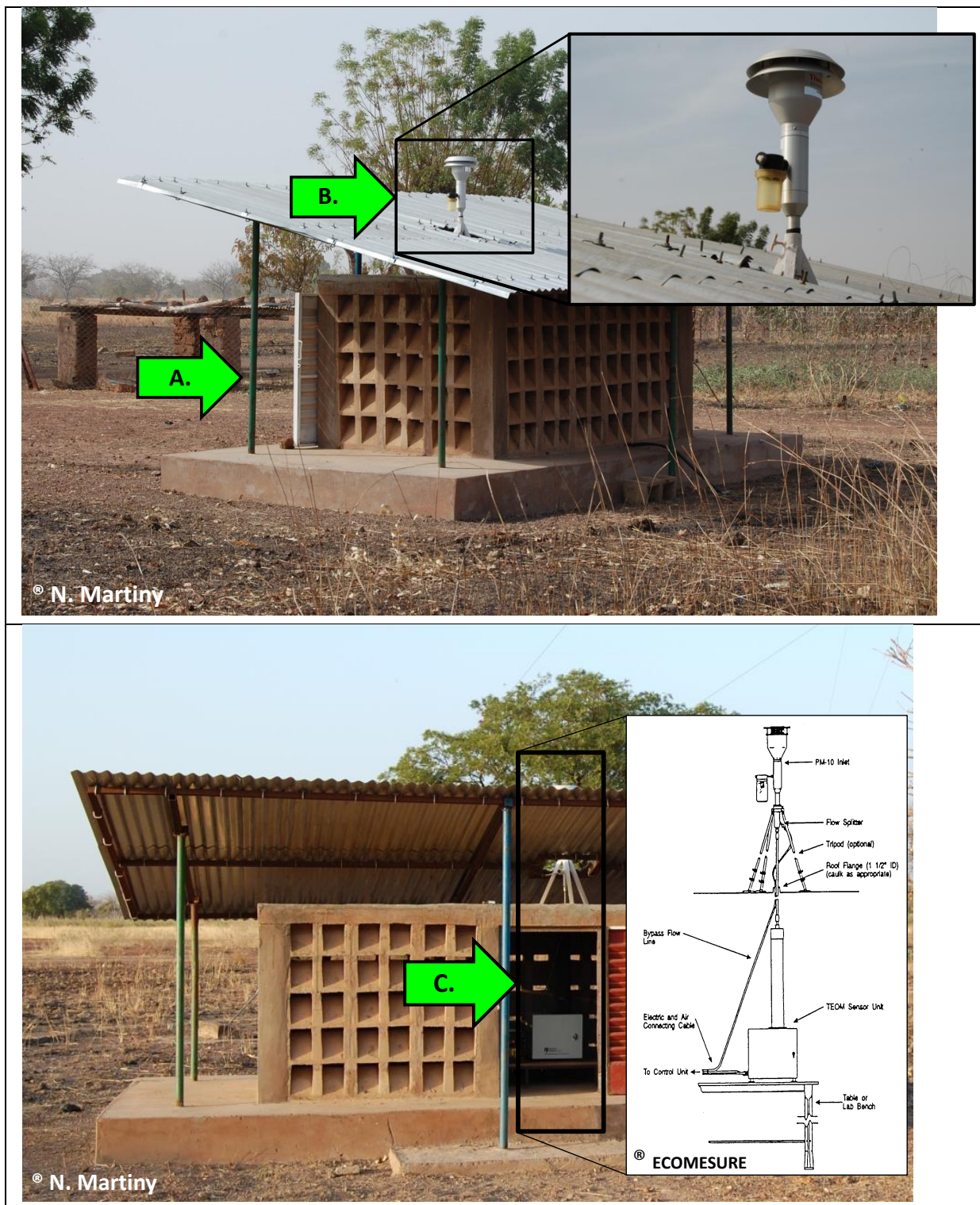


Figure F1.2. Le site du TEOM de Dédougou au Burkina Faso : en haut, l'abri étanche et ventilé spécifiquement construit pour le TEOM (A) et sa tête PM10 (B) ; en bas, l'ensemble des éléments constituant le TEOM, de l'unité centrale à la tête de prélèvement (C).

Fiche 2. Le réseau QameleON à Dijon Métropole

Objectifs : Déployer un réseau d'une vingtaine de micro-stations environnementales QameleO à Dijon Métropole dans le but de (i) compléter et densifier le réseau de surveillance de qualité de l'air existant mis en place par l'AASQA ATMO-BFC ; (ii) caractériser la variabilité spatio-temporelle de la pollution atmosphérique à l'échelle micro-locale

Localisation : Dijon Métropole (Figure F2.1)

Profondeur temporelle : En fonctionnement opérationnel en 2021-2022

PI scientifiques: N. Martiny (Biogéosciences/UB) et N. Marilleau (UMMISCO/IRD)

Montage du projet et déploiement instrumental : La micro-station QameleO, développée par Biogéosciences en collaboration avec l'Institut de Recherches pour le Développement (concept décrit en §IV.3), permet de mesurer de manière simultanée les concentrations des PM₁₀, PM_{2.5} et PM₁ au pas de temps de la minute, agrégé au pas de temps quart-horaire. La première station QameleO a été construite, testée puis implantée à Dijon en juillet 2019, dans le cadre du programme POPSU PURE, financé par le Ministère de Transition Ecologique et Dijon Métropole. Le déploiement du réseau de mesures était ensuite prévu en 3 phases : la phase I de septembre à décembre 2019, la phase II de février à mai 2020 et la phase III de septembre à décembre 2020. Les phases II et III ont été perturbées par les confinements successifs liés à l'épidémie de COVID-19 en France. Ainsi, la situation en juillet 2020 était la suivante : 7 stations installées (phase I réalisée), 7 stations prêtes à l'implantation (phase II réalisée à moitié) et 7 en cours de préparation (Figure F2.1). De juillet 2020 à juillet 2021, la métrologie de QameleO ainsi que le logiciel ont été améliorés, et sur les 7 stations prêtes à l'installation, 4 ont été implantées dans leur nouvelle version. Ainsi, dans ce projet, ce n'est pas l'aspect financier qui a été limitant (les QameleO étant justement *low-cost*), mais l'aspect production et implantation des micro-stations elles-mêmes. Ainsi, dès septembre 2021, la construction de l'ensemble des QameleO nécessaires au déploiement complet du réseau dijonnais se fera dans le cadre d'un FABLAB à l'IRD à Bondy. Le déploiement d'un tel réseau de mesures n'aurait pas pu voir le jour sans un cadre programmatique solide comme celui du programme POPSU PURE ([Cahier POPSU 2022](#)) et des financements régionaux (plateforme GeoBFC) ainsi que des collaborations solides établies. D'abord, Dijon Métropole a fourni les autorisations nécessaires à l'implantation des QameleO sur certains candélabres (alimentés sur secteur pendant la nuit et offrant la possibilité d'une recharge des batteries de QameleO le jour) identifiés sur la base de critères scientifiques et techniques (§IV.3) puis a fourni également des cartes GSM permettant la transmission des données en temps réel. ATMO-BFC a fourni un accès aux sites ainsi qu'aux mesures de référence à Dijon, élément-clé dans la phase de tests des micro-stations avant implantation sur site. Enfin, UMMISCO à l'IRD de Bondy a joué un rôle majeur dans la création du FABLAB (production), dans la programmation puis dans l'implantation des QameleO sur site. Au final, le déploiement du réseau QameleO a représenté un **investissement en temps de recherches important** : identification des sites de mesures, tests des instruments en laboratoire, missions de terrain à coordonner avec Dijon Métropole, encadrement d'ITA et d'étudiants en stage, vérification de la bonne transmission des données ainsi que de la qualité des mesures notamment.

Portée et valorisation : Avec le réseau QameleON (QameleO Network), Dijon est l'une des premières villes françaises en passe d'être dotée de 20 sentinelles connectées dans le domaine de la qualité de l'air, ancrée dans une logique de réseau d'observation pérenne avec un accès grand public et en temps réel à l'information (actualisée toutes les 3h), s'inscrivant ainsi pleinement dans la mouvance *Smart City*. Le projet de mise en place d'un QR code visible au pied de chaque candélabre sera finalisé une fois l'ensemble des QameleO implanté à horizon 2022. Le réseau QameleON constitue ainsi un

réseau-pilote en local et vise à un déploiement plus large, notamment à l'international. Plusieurs projets de recherches, de valorisation et de communication sont à venir (§VI/Perspectives de recherches). Ils ont une portée scientifique nationale, européenne et internationale (2 projets CNES, 1 projet ANR, 1 projet H2020 ayant démarré en 2021), mais pas uniquement. Du lien est d'ores et déjà établi entre monde universitaire et sphère politique (programme POPSU PURE 2019-2021), entre partenaires publics (universités, collectivités, associations agréées de surveillance de la qualité de l'air) et privés (petites entreprises telle que URBASENSE dans le cadre d'une ANR LabCom 2022-2026 ou grand groupe tel que ORANGE avec un projet de PSPC prévu en 2022). La portée du projet QameleO est donc scientifique, mais aussi opérationnelle et industrielle. Elle est également pédagogique avec le montage de projets communs entre Universités et Lycées/Collèges, ou entre Universités au Nord et au Sud dans le cadre de projets pilotés par l'RD (actions de formations). Enfin, le projet a des visées de communication et de sensibilisation du Grand Public à la qualité de l'air par le biais de participations à des événements tels que la Nuit des Chercheurs, la Fête de la Science et des Expositions en France et à l'international.

Référence-clé:

[Cahier POPSU \(2022\)](#). La construction d'un observatoire intelligent à Dijon-Métropole. Par* A. Jegou, N. Martiny, Y. Richard et T. Thevenin. Edition *Autrement*, Flammarion Paris 2022.

* contributions équivalentes, auteurs par ordre alphabétique

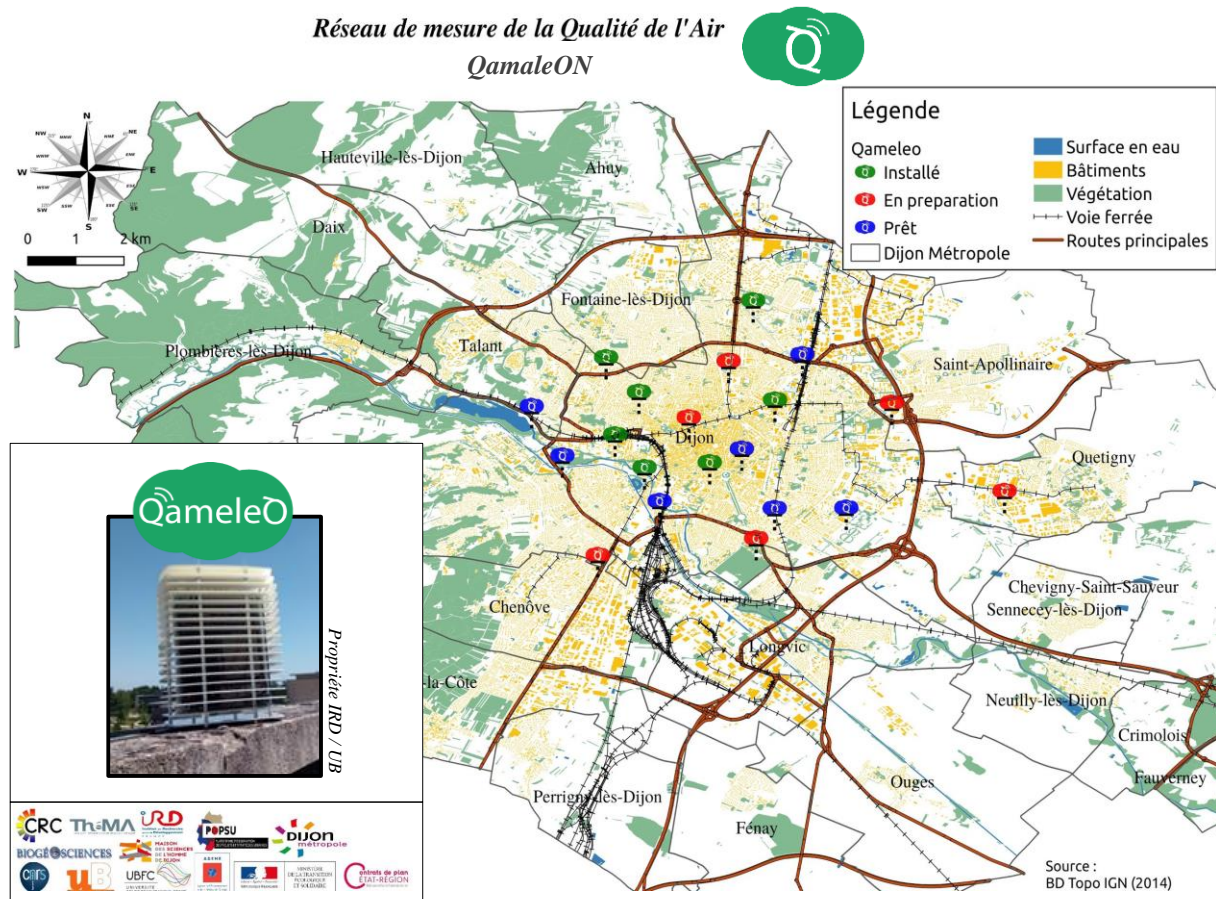


Figure F2.1. Carte du réseau QameleON à Dijon en juillet 2020. L'encart présente une micro-station QameleO faisant partie du réseau. Figure adaptée du [cahier POPSU \(2022\)](#), Partie B/§2.8. Carte réalisée par J. Diallo-Dudeck.

Fiche 3. Le CIMEL d'Arcachon

Objectifs : Créer un nouveau point de mesures des épaisseurs optiques des aérosols pour (i) la validation des corrections atmosphériques des images THRS en zones littorales turbides ; (ii) créer une climatologie des aérosols pour le site-atelier KALIDEOS-Littoral du CNES centré sur le Bassin d'Arcachon.

Localisation : Arcachon, sur le toit de la Station Marine (Figure F3.1), nouveau site du réseau AERONET de la NASA (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>). Lat. 44°40'N ; Lon. 1°10'W.

Profondeur temporelle : en fonctionnement opérationnel depuis décembre 2008

PI scientifique: N. Martiny (2008-2010) puis B. Lubac (>2010)

Montage du projet et déploiement instrumental : Le CIMEL CE 318 d'Arcachon permet de caractériser les propriétés optiques des aérosols dans le Bassin d'Arcachon. Ce type de photomètre *in-situ* est entièrement autonome (il est équipé de panneaux solaires) et réalise de façon automatique des mesures d'éclairements solaires (protocole SUN) et de luminances du ciel (protocoles ALMUCANTAR et PLAN_PRINCIPAL) dans les domaines du visible et du proche infrarouge, dans 4 canaux multispectraux centrés sur les longueurs d'onde 440nm, 675nm, 870nm et 1020nm respectivement. Les mesures d'éclairements solaires (W/m^2) permettent d'inverser des épaisseurs optiques des aérosols au pas de temps quart-horaire. Les luminances du ciel ($W/m^2/sr$) sont, elles, disponibles au pas de temps horaire. En 2008, le Conseil Régional d'Aquitaine a financé le projet d'implantation du CIMEL sur le site d'Arcachon dans le cadre d'un projet BQR « jeune chercheur ». L'idée était initialement de réaliser, à l'aide de mesures *in-situ* des aérosols, une étude de faisabilité, avant une mise en place opérationnelle, d'une méthodologie de corrections atmosphériques pour les zones littorales à partir de l'imagerie satellitaire haute résolution. Ainsi, le CIMEL implanté à Arcachon était un prêt du Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) sur une durée de deux ans. Finalement, en 2009, il rejoint le réseau AERONET de la NASA (projet co-financé par l'Université de Bordeaux et le CNRS) devenant ainsi un site d'observation pérenne ; à noter que ceci a été rendu possible grâce au support technique d'ITA à la Station Marine d'Arcachon, Michel Leconte notamment. En 2010, je transmets la responsabilité du site à B. Lubac, maître de conférences à l'UMR EPOC. En 2019, l'instrument de mesures est remplacé par un CIMEL plus récent, équipé de 8 canaux centrés sur les longueurs d'onde 340nm, 380nm, 440nm, 500nm, 675nm, 870nm, 1020nm, 1640nm, illustrant ainsi la volonté de l'UMR EPOC à faire perdurer ce site de mesures.

Portée et valorisation (pendant ma période MCF à Bordeaux 1 - 2007-2009) : Les mesures du CIMEL d'Arcachon ont permis de définir la zone du Bassin d'Arcachon comme un site-atelier pour le projet KALIDEOS-Littoral du CNES, apportant ainsi une lisibilité nationale supplémentaire aux recherches menées en couleur de l'eau, morphologie sous-marine et cartographie bio-sédimentaire de l'équipe METHYS (axe télédétection piloté par Jean-Marie Froidefond) de l'UMR EPOC à l'Université de Bordeaux 1. Après mon départ, les mesures du CIMEL d'Arcachon ont été valorisées dans le cadre de la thèse de Driss Bru (2012-2015) encadrée par B. Lubac et P. Bonneton à l'UMR EPOC. J'étais alors membre du comité de pilotage de la thèse visant à développer une méthode de corrections atmosphériques pour les capteurs à très haute résolution spatiale en zone littorale. Ces travaux ont débouché sur l'écriture d'une publication (Bru *et al.*, 2017).

Référence-clé :

Bru L., B. Lubac, C. Normandin, A. Robinet, M. Leconte, O. Hagolle, N. Martiny, C. Jamet (2017). Atmospheric correction of multi-spectral littoral images using a PHOTONS/AERONET-based regional aerosol model. *Remote Sensing*, 9, 814. <https://doi.org/10.3390/rs9080814>

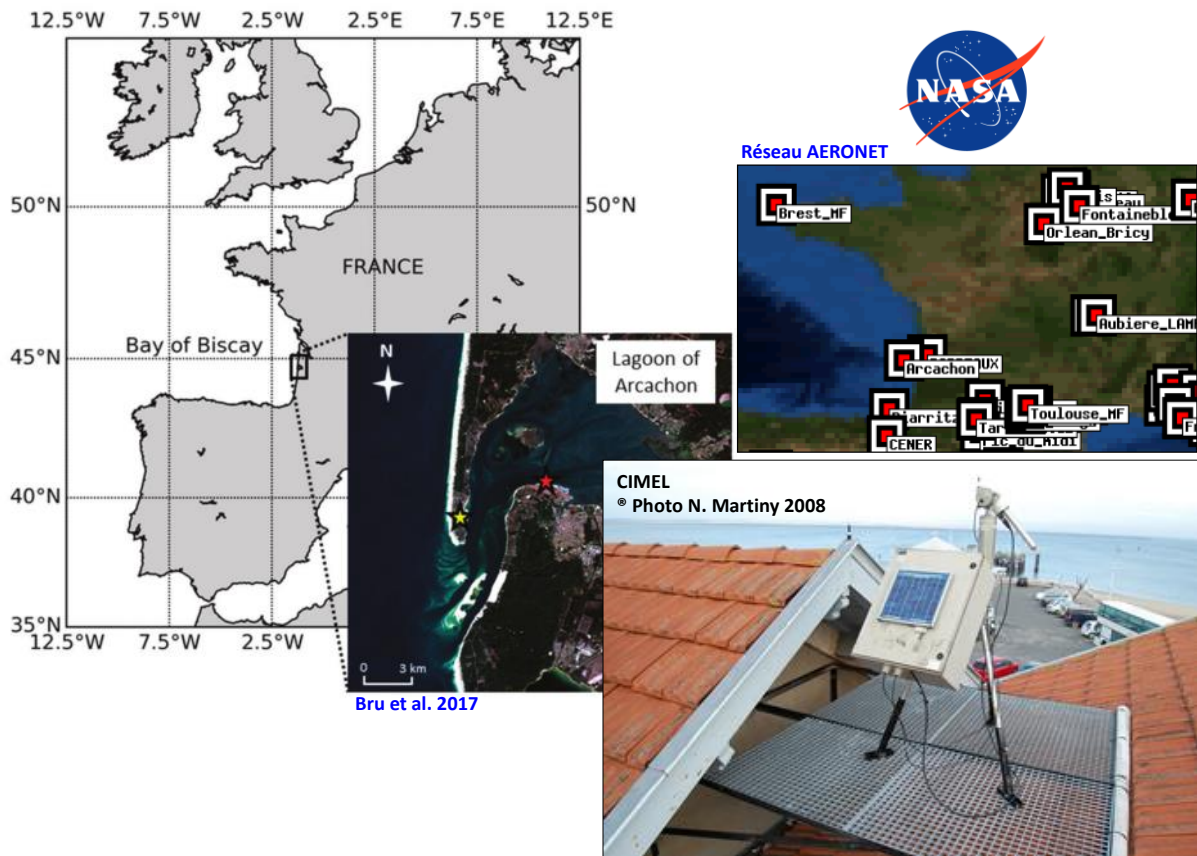


Figure F3.1. Localisation et photographie du CIMEL CE318 implanté à Arcachon en 2008.
Ce site fait partie du réseau AERONET de la NASA depuis 2009.

Partie B
Résumé de carrière

Etat civil

Nadège Martiny
La Chaume
21700 Marey-lès-Fussey

Née le 7 novembre 1975
Situation familiale : mariée, 1 enfant
Nationalité française

Statut actuel

Maîtresse de conférences Centre de Recherche de Climatologie depuis le 1^{er} septembre 2009
Unité Mixte de Recherches CNRS 6282 Biogéosciences

Université de Bourgogne
6 Boulevard Gabriel
21000 Dijon

Section CNU 37 - *Météorologie, Océanographie physique et physique de l'environnement*

Tél. : +33 (0)3 80 39 38 21
Fax. : +33 (0)3 80 39 57 41
Email : nadege.martiny@u-bourgogne.fr

Formation

01/10/1998-07/01/2002	Doctorat de physique. Spécialité : Modélisation du transfert radiatif, Optique marine et Télédétection. Université du Littoral Côte d'Opale
1998	Diplôme d'Etudes Approfondies en Méthodes Physiques en Télédétection. Université de Paris VII
1996-1997	Licence et Maîtrise de Physique et Applications Mention Océan/Atmosphère. Université de Toulon et du Var
1994-1995	Diplôme d'Etudes Universitaires Générales en Sciences de la Matière, Option Mathématiques/Physique. Université de Bourgogne
1993	Baccalauréat général, Série C. Lycée Carnot à Dijon

Expériences professionnelles

2014-2015	Délégation CNRS INSU Section 19 à l'Université de Bourgogne (1 an ½). Unité Mixte de Recherches CNRS 6282 BIOGEOSCIENCES Equipe Centre de Recherches en Climatologie
>01/09/2009	Maîtresse de Conférences à l'Université de Bourgogne. Unité Mixte de Recherches CNRS 6282 BIOGEOSCIENCES, équipe Centre de Recherches en Climatologie. Enseignements à l'Unité de Formation et de Recherches en Sciences Humaines, Département de Géographie.
2007-2009	Maîtresse de Conférences à l'Université de Bordeaux 1 (2 ans). Unité Mixte de Recherches CNRS 5805 Environnements et Paléo-environnements Océanographiques (EPOC). Enseignements à l'Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et de la Mer
2004-2007	Post-doctorat CNRS (2 ans et ½) Unité Mixte de Recherches CNRS 5210 Centre de Recherches de Climatologie, Université de Bourgogne. Thème : Variabilité climatique et état de surface dynamique (végétation) en Afrique semi-aride
2003-2004	Contrat de Recherches ESA (Agence Spatiale Européenne) (1 an et ½) Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences de l'Environnement (LISE) CNRS ELICO/UPRESA 8013, Université du Littoral Côte d'Opale. Thème : Etalonnage en vol des capteurs satellitaires moyenne à basse résolutions MERIS et SeaWiFS
2002-2003	Bourse post-doctorale européenne (1 an) Joint Research Center of the European Commission à Ispra en Italie. Thème : Télédétection et caractérisation des poussières désertiques en Mer Méditerranée
01/10/1998-07/01/2002	Doctorante au Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences de l'Environnement (LISE), CNRS ELICO/UPRESA 8013, Université du Littoral Côte d'Opale. Bourse co-financée Région/Département. Thème : Interprétation géophysique des aérosols et corrections atmosphériques pour la couleur de l'eau en milieu côtier
01/10/1998-30/09/2001	Monitrice Initiée à l'Enseignement Supérieur (MIES) à l'Université du Littoral Côte d'Opale. Enseignements à l'Unité de Formation et de Recherche de Physique à Calais (60h eTD/an)
1998	Stage de DEA (6 mois) au Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences de l'Environnement (LISE), CNRS ELICO/UPRESA 8013, Université du Littoral Côte d'Opale. Thème : Interprétation géophysique des aérosols
1997	Stage de Maîtrise (2 mois) à l'Institut des Sciences de la Mer à Rimouski Québec. Mission Océanographique sur le St Laurent. Thème : Couleur de l'eau

2. Activités en recherches et valorisation

2.1 Principaux projets de recherches avec responsabilités scientifiques x15 depuis 2007

Au niveau régional, en qualité de l'air

2021-2022	<p>Coordinatrice du volet « Mesures mobiles du BC à Dijon » au sein du projet Plateformes du Conseil Régional de Bourgogne Franche-Comté GEOBFC OBS_AQ (Observatoire environnemental : Qualité de l'air) piloté par la Maison des Sciences de l'Homme et l'Unité Mixte de Recherches 6049 CNRS Théoriser et Modéliser pour Aménager (ThéMA). <u>Consortium</u>¹ : ThéMa (Dijon), Biogéosciences (Dijon), UMMISCO (Bondy), LOA (Lille) et ATMO-BFC</p> <p>Responsable scientifique de volet de programme</p> <p>Budget² total demandé : 32 kE (investissement et CDD)</p>
2020-2021	<p>Coordinatrice du volet « Pollution aux PM₁ à Dijon » au sein du projet Plateformes du Conseil Régional de Bourgogne Franche-Comté GEOBFC MUSTARDijon & Air quality piloté par la Maison des Sciences de l'Homme, l'Unité Mixte de Recherches 6049 CNRS Théoriser et Modéliser pour Aménager (ThéMA). <u>Consortium</u>¹ : ThéMa (Dijon), Biogéosciences (Dijon) et ATMO-BFC</p> <p>Responsable scientifique de volet de programme</p> <p>Budget² total alloué : 37 kE (investissement)</p>
2019-2021	<p>Coordinatrice du volet « Qualité de l'air et mobilité quotidienne » au sein du projet POPSU (Plateforme d'Observation des projets et stratégies urbaines) PURE (Plateforme Urbaine d'Expérimentation de Dijon) piloté par l'Unité Mixte de Recherches 6049 CNRS Théoriser et Modéliser pour Aménager (ThéMA) et Dijon Métropole, financé par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, le Ministère de la Cohésion des Territoires et Dijon Métropole. <u>Consortium</u>¹ : ThéMa (Dijon), Biogéosciences (Dijon), UMMISCO (Bondy) et Dijon Métropole</p> <p>Responsable scientifique de volet de programme</p> <p>Budget² total alloué : 6 kE (fonctionnement)</p>

Au niveau national, en télédétection

2020-2022	<p>Co-proposante (avec le LOA) du projet CNES-TOSCA Groupe Atmosphère VenuS/S2/Pléiades « Restitution des caractéristiques des aérosols et de la surface terrestre à partir des observations très haute résolution spatiale : validation de produits aérosols ». <u>Consortium</u> : LOA (Lille), Biogéosciences (Dijon), UMMISCO (Bondy), ONERA-DOTA (Toulouse), CESBIO (Toulouse)</p> <p>Co-responsable scientifique de programme</p> <p>Budget² total demandé : 23kE (fonctionnement et CDD)</p>
2019-2021	<p>Coordinatrice du projet CNES TOSCA Groupe Atmosphère Quali_ThR « Apport de la télédétection THRS Pléiades pour la qualité de l'air en ville » <u>Consortium</u> : Biogéosciences (Dijon), UMMISCO (Bondy), ONERA-DOTA (Toulouse), LA (Toulouse)</p> <p>Responsable scientifique de programme</p> <p>Budget total alloué : 7kE (fonctionnement)</p>
2008-2009	<p>Coordinatrice de l'année 1 du projet CNES-TOSCA Groupe Surfaces Continentales SPADYN «SPAtial et DYNamique : Télédétection spatiale optique dans l'étude de la dynamique des fronts turbides en zones côtières» <u>Consortium</u> : EPOC (Bordeaux) + Géotransfert (Bordeaux) , Intitut des Sciences de la Mer de Rimouski (Québec)</p> <p>Responsable scientifique de programme</p> <p>Budget total alloué : 57kE (fonctionnement, PR invité en France)</p>
2008-2009	<p>Coordinatrice du projet BQR Jeune Chercheure CIMEL-Arcachon « Un nouveau site du réseau AERONET de la NASA pour les corrections atmosphériques sur imagerie haute résolution en zones littorales » <u>Consortium</u> : EPOC (Bordeaux) et LOA (Lille)</p> <p>Responsable scientifique de programme</p> <p>Budget total alloué : 13kE (fonctionnement)</p>

Au niveau international, en aérosols désertiques et impacts

2020-2022	Co-proposante (avec l'IGE) du projet CNES-TOSCA Groupe Atmosphère IHACA « Intrusion of HArmannan in Northern Central Africa ». <u>Consortium</u> ¹ : IGE (Grenoble), Biogéosciences (Dijon), UMMISCO (Bondy) Responsable scientifique de volet programme Budget² total alloué : 8 k€ (fonctionnement)
2017-2019	Coordinatrice du projet CNES-TOSCA Groupe Surfaces Continentales TELEPaF « Télédétection des Particules Fines pour les risques sanitaires en milieu rural africain ». <u>Consortium</u> : Biogéosciences (Dijon), LA (Toulouse), MIVEGEC (Montpellier), Institut Pasteur/EHESP (Paris), LOA (Lille), ANM (Burkina Faso) et CGQA (Sénégal) Responsable scientifique de programme Budg et total alloué : 82k€ (fonctionnement et CDD)
2014-2016	Coordinatrice du projet CNES-TOSCA Groupe Surfaces Continentales TELEDM « Télédétection des Dust pour les impacts Méningites en Afrique de l'Ouest ». <u>Consortium</u> : Biogéosciences (Dijon), LA (Toulouse), LOA (Lille), MIVEGEC (Montpellier) et ANM (Burkina Faso) Responsable scientifique de programme Budget total alloué : 72k€ (fonctionnement et CDD)
2013-2014	Coordinatrice du projet OSU-THETA de BFC SOURCE « Variabilité saisonnière des Dust au Burkina Faso et hypothèses sur les sources » de Bourgogne Franche-Comté. <u>Consortium</u> : Biogéosciences (Dijon) et ANM (Burkina Faso) Responsable scientifique de programme Budget total alloué : 8k€ (fonctionnement)
2010-2014	Membre co-fondatrice (avec MIVEGEC et l'institut Pasteur/EHESP) du consortium MAMEMA « Multidisciplinary Approach for Meningitis Epidemiology and Modeling in Africa », mini-groupe international de recherches pluridisciplinaires du programme MERIT « Meningitis Risk Environmental Information Technologies » lancé par l'OMS afin de lutter contre les épidémies de méningites en Afrique. <u>Groupe international</u> impliquant le NIH et l'Université de Princeton aux Etats-Unis, ainsi que l'Université de Lancaster au RoyaumeUni Membre co-fondatrice d'un consortium scientifique international Budget: sur projets déjà financés (fonctionnement)
2011-2012	Coordinatrice du projet TEOM-Dédougou «Un nouveau site de mesures des PM en Afrique pour l'analyse des impacts des poussières sur les épidémies de méningites bactériennes», co-financé par le FABER (porté par le CRC/A. Ullmann) et le CNRS . <u>Consortium</u> : CRC (futur Biogéosciences à Dijon), ANM (Burkina Faso) et Tera Deserta Expéditions Responsable scientifique de programme Budget total alloué : 32 k€ (investissement et fonctionnement)
2009-2012	Coordinatrice du volet « climat-aérosols-méningites » au sein du programme ADCEM (Impact des Aérosols désertiques et du Climat sur les épidémies de méningites au Sahel) porté par le LISA (Paris) et financé par le GIS (Groupement d'Intérêt Scientifique) Climat-Environnement-Sociétés de l'IPSL. <u>Consortium</u> : LISA (Paris), CRC (future Biogéosciences à Dijon), CERMES (Niger), LOCEAN (Paris), LMD (Paris), LOA (Lille), UCAD (Sénégal), ANM (Burkina Faso) Responsable scientifique de volet de programme Budget total alloué : 319 k€ (fonctionnement, 1 thèse et 1 pdoc environnés)
2007-2012	Coordinatrice du Work Package 3.2 « climat-aérosols-méningites » au sein de la composante française du programme international AMMA « Analyse Multidisciplinaire de Mousson Africaine » piloté par le LOCEAN (Paris). <u>Consortium</u> ¹ : CRC (futur Biogéosciences à Dijon), LOCEAN (Paris), LOA (Lille), LISA (Paris), LMD (Paris), PRODIG (Paris), Chrono-Environnement (Besançon), MIVEGEC (Montpellier), CERMES (Niger), ANM (Burkina Faso) Responsable scientifique de volet de programme Budget² total alloué : estimé à 15 k€/an (fonctionnement)

¹ Indique les laboratoires impliqués dans le volet coordonné (et non pour l'ensemble du projet)

² Indique le budget total alloué pour le volet coordonné sur la durée du projet

2.2 Principaux projets de recherches en tant que participante x12 depuis 2007

2020-2025	<p>Projet H2020 Villes et communautés intelligentes RESPONSE piloté par Dijon Métropole et les équipes locales d'EDF. 53 partenaires européens issus de 13 pays et partenaires locaux tels que l'Université de Bourgogne.</p> <p><u>Contribution</u> : aux groupes de travail Qualité de l'air (avec ATMO-BFC) et Plateforme (alimentation du réacteur de données)</p> <p>Participation à un projet européen Financement d'un an de CDD IE (2022)</p>
2021-2024	<p>Projet ANR AIRQUALI-4-ASMAFRI piloté par le LPED à l'Université d'Aix Marseille. 6 partenaires en France et au Bénin.</p> <p><u>Contribution</u> : en partenariat avec UMMISCO, exploitation des mesures issues d'un réseau de 60 QameleO prévus à l'implantation en 2022 à Cotonou</p> <p>Participation à un projet ANR Financement d'un pdoc partagé d'un an avec UMMISCO (2022)</p>
2019-2021	<p>Projet SAVE-IFU « Santé Aménagement Végétation Environnement : Îlot de Fraîcheur Urbain » piloté par le CRC/Y. Richard à Biogéosciences, et financé par le Pôle Fédératif de Recherche et de Formation en Santé Publique de BFC.</p> <p><u>Contribution</u> : recherches en télédétection Très Haute Résolution Spatiale en ville : travail sur la végétation et la définition des types d'occupation des sols sur 5 agglomérations en BFC à partir de l'imagerie Pléiades</p> <p>Participation à un projet d'échelle régionale en BFC Encadrement d'un CDD IE 3 mois (2021)</p>
2019-2020	<p>Projet UTIQUE SMA-Santé « SMA pour les impacts santé au Sénégal » financé par l'IRD et pilotée par UMMISCO à Bondy.</p> <p><u>Contribution</u> : en tant que co-encadrante de la thèse dans le cadre de laquelle 1 visite par an est organisée en France (soit à Biogéosciences, soit à l'IRD).</p> <p>Participation à un projet environnant une thèse en co-tutelle Projet environnant la thèse de Papa Massa Niane (2019-2021)</p>
2017-2018	<p>Projet CNES-TOSCA Groupe Surfaces Continentales WaTFor « Water availability for Forest Greenness » porté par l'IGE à Grenoble.</p> <p><u>Contribution</u> : recherches en télédétection des aérosols en Afrique à partir de l'imagerie MODIS, produits Deep Blue.</p> <p>Participation à un projet CNES Recherches préparatoires au projet CNES-TOSCA IHACA (2020-2021)</p>
2014-2017	<p>Projet ANR ACASIS « Alerte aux Canicules Au Sahel et à leurs Impacts sur la Santé » pilotée par le LOCEAN à Paris. 12 partenaires en France (dont CRC/Biogéosciences), au Sénégal et au Burkina Faso.</p> <p><u>Contribution</u> : recherches sur le lien entre poussières désertiques et vagues de chaleur au Sahel.</p> <p>Participation à un projet ANR Recherches préparatoires au stage de M2 de Papa Massar Niane (2018)</p>
2013-2014	<p>Lancement du Pôle Thématique Surface Continental THEIA financé par le CNES et membre du CES « Centre d'Expertise Scientifique » Risque et maladies infectieuses : https://www.theia-land.fr/ceslist/ces-risques-maladies-infectieuses/</p> <p><u>Contribution</u> : élaboration de documents visant à communiquer sur les produits satellitaires à valeur ajoutée pour les impacts sanitaires</p> <p>Participation à un pôle de données et de services satellitaires En tant que membre du TOSCA Surfaces Continentales (2010-2018)</p>
2010-2011	<p>Projet FABER VARMED « Variabilité climatique du domaine méditerranéen et impacts régionaux au Nord (Europe de l'Ouest) et au Sud (Afrique de l'Ouest) » financé par le Conseil Régional de Bourgogne et piloté par le CRC/A. Ullmann.</p> <p><u>Contribution</u> : recherches sur les poussières désertiques dites d'Harmattan</p> <p>Participation à un projet « jeunes chercheurs » Recherches préparatoires au projet TEOM-Dédougou (2011-2012)</p>

2009	<p>Projet BATEL-2 « Mesures optiques, hydrologiques et courantologiques du panache turbide de l'Adour (pays basque) » financé par le CNRS-INSU et piloté par EPOC. <u>Contribution</u> : mesures optiques dans l'eau</p> <p>Participation à une campagne de mesures en couleur de l'eau Recherches dans le cadre de mon poste MCF à Bordeaux (2007-2009)</p>
2008	<p>Projet ECORS-TrucVert (en Aquitaine, Lège-Cap Ferret) piloté par EPOC (Bordeaux). 16 partenaires dont 1 au Royaume-Uni, 3 aux Etats-Unis, 1 en Australie, 1 en Nouvelle-Zélande, 1 au Pays Bas.</p> <p><u>Contribution</u> : campagnes de mesures optiques atmosphériques et développement d'un dispositif expérimental de mesures à jetski</p> <p>Participation à une campagne de mesures internationales Recherches dans le cadre de mon poste MCF à Bordeaux (2007-2009)</p>
2007-2009	<p>Projet KALIDEOS-Littoral financé par le CNES et piloté par EPOC à Bordeaux: http://kalideos.cnes.fr</p> <p>Contribution : recherches en télédétection à Très Haute Résolution spatiale pour la couleur de l'eau en milieu lagunaire (bassin d'Arcachon)</p> <p>Participation à une campagne de mesures internationales Recherches dans le cadre de mon poste MCF à Bordeaux (2007-2009)</p>
2004-2008	<p>GDR METEOSAT Seconde Génération piloté par le PRODIG (Paris) et le LMD (Paris).</p> <p><u>Contribution</u> : recherches sur la végétation à partir de produits issus des satellites géostationnaires et lien avec les précipitations en Afrique semi-aride</p> <p>Participation à un GDR sur les satellites géostationnaires Recherches en lien avec mon pdoc CNRS au CRC (2004-2006)</p>

2.3 Responsabilités d'évaluation ou d'administration scientifique

Membre de commissions

> 2019	<p>Membre élue suppléante du BCP « Bureau des Commissions de Proposition » pour les sections 35-36-37. Université de Bourgogne.</p> <p>Responsabilité collective au niveau local</p>
> 2014	<p>Membre du CNU « Conseil National des Universités ». Section 37. 2 mandats dont l'un en cours.</p> <p>1^{er} mandat en tant que membre nommé suppléant (2014-2019). 2^{ème} mandat en tant que membre élu titulaire et membre élu du bureau en tant qu'assesseure (2020-2025).</p> <p>Responsabilités collectives au niveau national</p>
2010-2019	<p>Membre du Comité CNES-TOSCA groupe d'évaluation « Surfaces continentales » (comprenant la télé-épidémiologie). 3 mandats en effectués.</p> <p>En moyenne 5 projets de recherches à évaluer par an. A ceci s'adjoint un exercice de prospectives scientifiques quadriennal est réalisé par les membres du comité, donnant lieu à un séminaire (participation sur invitation) : 1/ La Rochelle en 2015 2/ Paris en 2017 3/ Le Havre en 2019.</p> <p>Responsabilités d'expertise scientifique au niveau national</p>

Membre de commissions de recrutement

Mai 2021	Membre d'un comité de recrutement (COS) de maître de conférences (section CNU 23) à l'Université de Paris, laboratoire LADYSS, LIED ou PRODIG. Commission de recrutement au niveau national
Mai 2017	Membre d'un comité de recrutement (CS) de maître de conférences (section CNU 37) au LAMP, Observatoire de Physique du Globe de Clermont Ferrand (OPGC), Clermont-Ferrand. Commission de recrutement au niveau national
Mai 2017	Membre de la commission de recrutement d'un Ingénieur et Personnel Technique de Recherche et de Formation (ITRF) à Biogéosciences, Université de Bourgogne. Commission de recrutement au niveau local
Avril 2015	Membre de la commission de recrutement d'un chercheur en télédétection : fusion de données multi-sources et multi-capteurs pour le développement du territoire, au CIRAD à Montpellier. Commission de recrutement au niveau national

Evaluations de projets de recherches hors-comités

2017	1 projet C2D Côte d'Ivoire « Constat de Désendettement et de Développement »
2015	2 projets OSU THETA « Observatoire des sciences de l'Univers en BFC »
2014	1 projet PARRAF « Programme d'Appui à la Recherche en Réseau en Afrique »
2013	1 projet Européen QWECY « Quantifying Weather and Climat Impacts on Health » https://livunigeog.wordpress.com/2013/05/24/qweci-final-project-meeting-barcelona/
2012	1 projet PNTS « Programme National de la Télédétection Spatiale »
2011	1 projet OASU « Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers »
2008	1 projet COFECUB « Comité Français d'Evaluation de la Coopération Universitaire et Scientifique avec le Brésil »
2008	1 projet PNTS « Programme National de la Télédétection Spatiale »

Revue d'articles scientifiques (1/an en moyenne)

Atmosphere (2), Aeolian Research (1), Remote Sensing of Environment (2), Journal of Climate (1), Meteorology and Atmospheric Physics (1), International Journal of Remote Sensing (1), Journal of Geophysical Research (1), Water Air Soil Pollution (1), Theoretical Environmental Society (2), Climatologie (1), Journal of Applied Meteorology and Climatology (1), International Journal of Oceanography (1)

2.4 Collaborations principales

	Poussières et Méningites en Afrique
	Qualité de l'air en milieu urbain
	Téledétection et Mesures <i>in-situ</i>
	Végétation et Climat

Au niveau international

Années	Organisme	Chercheurs	Pays	Domaines	Thème
>2020	MERIT <i>Mère et Enfant en Milieu Tropical</i> Université de Paris, Institut de Recherches pour le Développement	R. Lalou	Liens vers le Bénin	Socio-démographie, maladies infectieuses tropicales	
>2019	LGPE <i>Laboratoire Génie des Procédés et Environnement, Faculté des sciences et techniques de Mohammedia</i>	L. Mouhir	Maroc	Sciences de l'environnement	
>2019	LPAO <i>Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan, ESP, Université Cheikh Anta Diop de Dakar</i>	A. Tierno Gaye	Sénégal	Physique de l'atmosphère	
>2014	LAMSIN <i>Laboratoire de Mathématiques et de Simulations Numériques, Université de Tunis El-Manar</i>	S. Ben Miled	Tunisie	Modélisation mathématique de phénomènes épidémiologiques	
>2010	EHESP <i>Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique, Institut Pasteur</i> Unité de l'épidémiologie des maladies infectieuses	J. Mueller	Liens vers le Burkina Faso	Epidémiologie des maladies infectieuses	
>2007	MIVEGEC <i>Maladies Infectieuses et Vecteurs : Ecologie, Génétique, Evolution et Contrôle, Institut de Recherches pour le Développement</i>	H. Broutin	Liens vers le Sénégal	Epidémiologie des maladies infectieuses	
>2007	Agence National de Météorologie du Burkina Faso	P.Yaka, C. Bebane	Burkina Faso	Climatologie Météorologie	

Au niveau national

Années	Organisme	Chercheurs	Ville	Domaines	Thèmes	
					1	2
>2017	ONERA-DOTA <i>Département d'Optique et Techniques associées</i>	X. Briottet	Toulouse	Méthodes physiques en télédétection THR en ville		
>2014	UMMISCO <i>Unité de Modélisation Mathématique et Informatique des Systèmes Complexes, Institut de Recherches pour le Développement</i>	N. Marilleau	Bondy	Modélisation informatique multi-agents		
>2014	LA <i>Laboratoire d'Aérodynamique, Observatoire Midi Pyrénées</i>	J-F. Léon	Toulouse	Poussières désertiques, télédétection lidar et qualité de l'air		
>2004	IGE <i>Institut des Géosciences de l'Environnement, Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble</i>	N. Philippon	Grenoble	Climatologie Afrique		
>2002	LOA <i>Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Université de Lille</i>	I. Chiapello Y. Derimian S. Crumeyrolle	Lille	Télédétection des aérosols, transfert radiatif, qualité de l'air		

Au niveau local

Années	Organisme	Chercheurs	Ville	Domaines	Thème
>2018	Dijon-Métropole	A. Volatier F. Bouvier O. Codet-Hache	Dijon	Agents métropolitains en urbanisme, transport et environnement	
>2009	ATMO-BFC <i>Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air</i>	F. Schweitzer A. Detournay M. Boilleaut	Dijon et Besançon	Qualité de l'air	
>2009	ThéMa <i>Théoriser et Modéliser pour Aménager, Université de Bourgogne France Comté</i>	T. Thevenin A. Jegou	Dijon	Modélisation du trafic routier et mobilités, sciences participatives	

2.5 Brevet, création de données et de base de données originale, responsabilités de stations et de réseaux de mesures

Brevet/Licence

2021	Dépôt de la marque QameleO avec visuel (logo). Deux logos ont été créés, dont l'un dans une forme simplifiée. Réalisé dans le cadre d'une action d'amorçage financée par l'IRD en 2020 et coordonnée par la cellule de valorisation de l'IRD.
2020	Dépôt de Licence Open Source pour QameleO : CERN OHL W pour la partie logiciel et Creative Commons BY NC ND pour la partie tutoriels. Réalisé dans le cadre d'une action d'amorçage financée par l'IRD en 2020 et coordonnée par la cellule de valorisation de l'IRD.
2019	Déclaration d'invention de la micro-station de mesures environnementales QameleO « Quality of Air Module for Environmental Learning Engineering and Observation ». Co-propriété UB/IRD, à 50%-50%. Co-inventeurs à Biogéosciences : N. Martiny/M. Rega Co-inventeurs à UMMISCO : N. Marilleau/A. Bisquerra

Création de données originales

>2022	Réseau de 60 QameleO au Bénin (Cotonou) afin d'analyser la relation entre la pollution atmosphérique en zones urbaines d'Afrique de l'Ouest, où pollutions anthropiques et naturelles sont combinées, et asthme chez les adolescents. <u>Cadre</u> : ANR AIRQALI-4-SMAFRI (MERIT, Université de Paris) Co-PI scientifique (PI IRD) d'un réseau en qualité de l'air
>2019	Réseau de 10 QameleO à Dakar (Sénégal) afin de modéliser la qualité de l'air à l'échelle de la ville via une approche SMA. <u>Cadre</u> : DAK'AIR (IRD à Bondy) Co-PI scientifique (PI IRD) d'un réseau en qualité de l'air
>2019	Réseau de 20 QameleO à Dijon-métropole (France) afin de caractériser la pollution particulaire à très haute résolution spatiale (mesures directes, assimilation des mesures dans des modèles de SMA et de chimie transport et télédétection). Lien avec le climat urbain et compréhension des phénomènes micro-échelles. Lien avec la santé. <u>Cadre</u> : POPSU PURE (Dijon Métropole et MSH/ThéMa à Dijon) PI scientifique (co-PI IRD) d'un réseau en qualité de l'air
>2019	2 QameleO à Pokola et Mokabi , stations météorologiques implantées par l'IGE, dans le but de détecter puis de caractériser les intrusions d'Harmattan aux marges des forêts d'Afrique Centrale <u>Cadre</u> : CNES-TOSCA IHACA (IGE à Grenoble) PI scientifique (co-PI IRD) de stations de mesures de poussières
>2013	TEOM à Dédougou (Burkina Faso) dans le but mesurer les concentrations massiques des PM10 sur une station de l'OMM, calval de données spatialisées issues des modèles ou de la télédétection spatiale, et lien avec la santé. <u>Cadre</u> : projet TEOM-Dedougou (CRC/Biogéosciences à Dijon) PI scientifique d'une station de mesures de référence des poussières
2007-2012	Station automatique CIMEL E318 à Arcachon (France), reliée au réseau AERONET de la NASA (http://aeronet.gsfc.nasa.gov) afin de caractériser les propriétés optiques des aérosols en milieu lagunaire, corrections atmosphériques des images satellitaires à très haute résolution. <u>Cadre</u> : projet CIMEL-Arcachon (EPOC à Bordeaux) PI scientifique d'une station AERONET de la NASA

Création d'une base de données originale

2016-2017	Développement de la base de données multi-échelles et multi-variables poussières, climat et méningites TELEDM avec interface visuelle <u>Cadre</u> : projets TELEDM et TELEPaF Encadrement d'un CDD IE pendant 1 an au CRC/Biogéosciences
-----------	--

2.6 Séjours ou participation à des événements en tant que chercheuse invitée

2017	<p>ICTP International Center for Theoretical Physics, Advanced School on Tropical-Extratropical interactions on Intraseasonal timescales <u>Lieu</u> : Trieste, Italie (8 jours). <u>Contact</u>: A. Tompkins. Participation invitée à une Ecole d'Été en Italie</p>
2015	<p>SCOLab Statistical and Computational Physics Laboratory <u>Lieu</u> : Elche, Espagne (5 jours). <u>Contact</u> : J-A. Garcia Orza. Séjour en tant que chercheuse invitée</p>
2013	<p>QWeCI "Quantifying Weather and Quantifying Weather and Climate Impacts on Health in Developing Countries" – réunion de clôture et d'évaluation d'un projet européen. <u>Lieu</u> : Barcelone, Espagne (5 jours). <u>Contacts</u>: A. Morse (PI du projet) et C. Caminade à Université de Liverpool https://livunigeog.wordpress.com/2013/05/24/qweci-final-project-meeting-barcelona/ Séjour en tant que chercheuse invitée, rapportrice de projet européen</p>
2006	<p>Département d'Océanographie de l'University de Cape Town <u>Lieu</u> : Cape Town, South Africa (14 jours). <u>Contact</u> : Mathieu Rouault Séjour en tant que chercheuse invitée</p>

2.7 Participations à l'organisation d'école d'été, de colloque ou à l'animation scientifique du laboratoire

2021 <i>Juillet-Août</i>	<p>Conférence invitée Exposition Observenville, clôture de POPSU PURE : « La pollution atmosphérique à Lille : déploiement d'un nouveau réseau de mesures fixes basés sur la technologie des micro-capteurs » <u>Intervenante</u>: S. Crumeyrolle (LOA à Lille) https://popsu-dijon.u-bourgogne.fr/wp-content/uploads/2021/06/flyer-colloque.pdf Participation à l'animation scientifique de l'inauguration d'une exposition sur le thème de l'observation environnementale en ville</p>
2017	<p>Conférence invitée au CRC/Biogéosciences « Predicting climate impacts on health at Sub-seasonal to Seasonal timescales » <u>Intervenant</u>: A. Tompkins (ICTP à Trieste, Italie) Participation à l'animation scientifique du laboratoire</p>
2016	<p>Mini-workshop du CRC/Biogéosciences (1/2 journée) – organisation. « Apport de la télédétection hyperspectrale en milieu urbain » <u>Intervenants</u>: X. Briottet (ONERA-DOTA à Toulouse), et Y. Richard, J. Emery, J. Diallo-Dudeck, B. Pohl (CRC/Biogéosciences à Dijon) Participation à l'animation scientifique du laboratoire</p>
2014 (<i>sep.</i>)	<p>27e Colloque de l'AIC Association Internationale de Climatologie à Dijon, France sur le thème « Climat : Système et interactions » (3 jours, 50 participants). <u>Organisateur</u> : CRC/Biogéosciences, Dijon, France Participation à l'organisation d'un colloque international francophone, reviews de proceedings scientifiques</p>
2014 (<i>fév.</i>)	<p>Mini-workshop du CRC/Biogéosciences (1 journée) – organisation. « Télédétection des Dust pour les impacts méningites en Afrique de l'Ouest » <u>Intervenants</u> : N. Martiny, H. Broutin, I. Chiapello, J-F. Léon, P. Roucou Participation à l'animation scientifique du laboratoire</p>
2013	<p>CRC Summer School « Joint analyses of climate and environmental variables for impact studies in sub-saharan Africa : Health » (4 jours, 20 participants) <u>Organisateurs</u> : N. Philippon, N. Martiny et P. Camberlin à CRC/Biogéosciences Participation à l'organisation d'une école d'été internationale</p>
2010	<p>Conférence invitée au CRC/Biogéosciences « La télédétection environnementale » <u>Intervenant</u>: A. Irissa Bokoye (ECCC au Ministère de l'Environnement et Changement Climatique du gouvernement du Canada). Participation à l'animation scientifique du laboratoire</p>

2.8 Actions de vulgarisation scientifique et communications destinées aux gestionnaires et décideurs politiques

Vulgarisation scientifique

2021-2022 Octobre-Fév.	Interview pour l' Exposition RESOMES à l'occasion des 300 ans de l'UB. « La qualité de l'air : enjeux et présentation de la micro-station de mesures QameleO déployée en réseau à Dijon Métropole » Vulgarisation scientifique sur la qualité de l'air, vidéo de quelques mn
2021 Juillet-Août	Interview pour l' Exposition Observenville , clôture de POPSU PURE : « La qualité de l'air à Dijon Métropole : enjeux et présentation de la micro-station de mesures QameleO déployée en réseau dans le cadre de POPSU PURE » https://popsu-dijon.u-bourgogne.fr/wp-content/uploads/2021/06/flyer-colloque.pdf Vulgarisation scientifique sur la qualité de l'air, vidéo de quelques mn
2019	Nuit Européenne des Chercheurs à la MSH de Dijon Stand « Qualité de l'air à Dijon Métropole : enjeux, présentation de la 1 ^{ère} micro-station de mesures QameleO implantée au Port du Canal, sciences participatives » https://blog.u-bourgogne.fr/nuit-des-chercheurs/ Participation (avec l'IRD) à un événement scientifique Grand Public avec les étudiants de L3 et de M1 du Département de Géographie
2019	Interview pour un article sur le Site du CNES : « Mieux prévenir la méningite avec la télé-épidémiologie » https://calipso.cnes.fr/fr/mieux-prevenir-la-meningite-avec-la-tele-epidemiologie Vulgarisation scientifique sur la télé-épidémiologie
2018	Journée Nationale de l'Innovation en Santé à la Cité des Sciences et de l'Industrie à Paris. Conférence-Flash de type Interview « Dépoussiérons nos méninges ! » et tenue d'un stand sur la télé-épidémiologie avec le CNES. https://www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/lieux-ressources/cite-de-la-sante/nos-evenements/journees-nationales-de-linnovation-en-sante-2018/ Participation à un événement scientifique Grand Public national
2017	Nuit Européenne des Chercheurs à la MSH de Dijon. Stand « Qualité de l'air Marrakech : présentation d'une maquette en 3D avec scénarisation de la PAA dans le quartier du Guéliz, sciences participatives » https://blog.u-bourgogne.fr/nuit-des-chercheurs/category/les-nuits-precedentes/nuit-2017/ Participation à un événement scientifique Grand Public Application interactive sur tablette
2015	Interview pour un article Futura Sciences : « Dossier Les méningites, leurs dangers et leurs traitements » https://www.futura-sciences.com/sante/actualites/medecine-dossier-meningites-leurs-dangers-leurs-traitements-61172/ Vulgarisation scientifique sur le lien poussières-méningites
2015	COP21 , conférence dans le Train du Climat , un arrêt en Côte d'Or. « Le climat de la saison sèche au Sahel et les risques sanitaires associés » par B. Oueslati et N. Martiny https://france3-regions.francetvinfo.fr/bourgogne-franche-comte/cote-d-or/dijon/dijon-train-du-climat-fait-halte-cote-805243.html Participation à un événement scientifique Grand Public en national
2011	Interview pour un article dans Sciences et Vie Découvertes N°146 « Il y a du monde dans l'air » Vulgarisation scientifique, presse écrite, pour Jeune public
2009	Carboshools Aquitaine/GLOBE France (actions INRA/CNES/EPOC) Rencontres entre collégiens/lycéens et scientifiques, sur le thème « Atmosphère et Changement global ». Conférence sur les aérosols et leurs impacts sur la santé. Participation à un événement scientifique Jeune public
2008	Sciences en fête à l'Université de Bordeaux 1 Présentation d'un poster « Télédétection Spatiale » et lien avec les formations existantes à Bordeaux 1 (Master ENVOLH notamment). Participation à un événement scientifique Jeune public et étudiants
2008	Association OCEAN à Bordeaux, interface entre le monde scientifique et le grand public. Conférence sur les impacts du climat sur la santé. Participation à un événement scientifique Grand Public

Communications destinées aux gestionnaires et décideurs politiques

2022	Cahier POPSU. La construction d'un observatoire intelligent à Dijon-Métropole. Par* A. Jegou, <u>N. Martiny</u> , Y. Richard et T. Thevenin. Edition <i>Autrement</i> , Flammarion Paris 2022. * contributions équivalentes, auteurs par ordre alphabétique
2021 <i>Juillet-Août</i>	Inauguration de l' Exposition Observenville , clôture de POPSU PURE : Stand « Qualité de l'air Dijon Métropole : présentation d'une maquette en 3D avec scénarisation de la PAA dans la ville, sciences participatives, aide à la décision » avec UMMISCO à Bondy, ThéMa à Dijon et l'Université de Compiègne. https://www.metropole-dijon.fr/Actualites/Exposition-ObservEnvVille Rencontre avec les élus et agents de la Métropole
2021 <i>Juin</i>	Bilan du programme POPSU PURE à Dijon Métropole : Présentation « Echanges élus/chercheurs, la construction d'un observatoire environnemental participatif » Rencontre avec les élus et agents de la Métropole
2020 <i>Mai</i>	METROSCOPE Les 22 Métropoles françaises, analyses chiffrée et focus sur la qualité de vie : « Dijon, qualité de l'air et températures urbaines : des mesures pour une meilleure qualité de vie en ville », p51. www.fnau.forg Communication auprès des agences d'urbanismes et des collectivités
2019 <i>Juillet</i>	Inauguration de la première micro-station QameleO impantée sur le site du Port du Canal à Dijon, dans le cadre du lancement de POPSU PURE, événement Regards Croisés. Avec UMMISCO à Bondy et ThéMa à Dijon. http://climatologie.u-bourgogne.fr/personnel/equipe-actuelle/96-breaking-news/518-inauguration-du-capteur-qameleo.html https://www.bienpublic.com/edition-dijon-ville/2019/07/08/un-capteur-de-qualite-de-l-air-installe-au-port-du-canal Rencontre avec les élus et agents de la Métropole

2.9 Partenariats avec des associations, la sphère éducative, les collectivités et le privé

>2020	ORANGE et DIGINOVE Partenariats établis dans le cadre du montage du PSPC visant à modéliser la pollution particulaire dans des villes européennes et africaines, à partir de mesures fixes au sol QameleO, de produits satellitaires issus du programme COPERNICUS de l'Union Européenne et des données de santé Partenariat avec un grand groupe pour projet international
>2020	URBASENSE Partenariat établi dans le cadre du montage du projet de Laboratoire Commun WAQATALI piloté par UMMISCO à Bondy et la société URBASENSE (prévu en 2022). Ce projet, centré sur la végétation en ville, a un axe végétation et qualité de l'air à Dijon en menant des expériences ciblées avec les QameleO. Partenariat avec une entreprise privée
>2020	Dijon Métropole et équipes d'EDF en local Partenariat établi dans le cadre du projet européen H2020 RESPONSE (2020-2025) dans la suite de POPSU PURE et dans un but de valorisation du réseau QameleON mis en place à Dijon Métropole Partenariat avec une collectivité dans un cadre de projet européen
>2019	Lycées Antoine Antoine de Chenôve (21) et St Joseph à Dijon Partenariats établis dans un but de mise en place de projets pédagogiques autour de la micro-station de mesures QameleO. Dans le cadre du Campus des Métiers et des qualifications Territoire Intelligent , un partenariat avec des collègues dijonnais est également envisagé. Partenariat avec les lycées dans un but de formation/sensibilisation
>2018	Dijon Métropole Partenariat établi dans le cadre du programme POPSU PURE (2019-2021) et ayant permis le déploiement du réseau de micro-stations environnementales QameleON. Partenariat avec une collectivité dans un but de recherche-action
2012-2013	TERA Deserta Expédition Partenariat entre chercheurs et association d'explorations pour la mise en place du TEOM de Dédougou au Burkina Faso/R. Belleville Partenariat avec des explorateurs dans un but scientifique

3. Activités en enseignements

3.1 Responsabilités pédagogiques et administratives

> 2018	<p>UE « Environnement : environnement atmosphérique et changement climatique » du Master TMEC 1^{ère} année Unité de Formation et de Recherche Sciences Humaines, Département de Géographie. Master Mention Géographie Aménagement Environnement et Développement, Spécialité « Transport, Mobilité, Environnement, Climat ». <u>Volume horaire</u> UE: 48h. <u>Intervenants</u> : Y. Richard (24h) / N. Martiny (24h). <u>Effectif</u> : 15 à 20 étudiants. Co-responsable d'UE en Master 1^{ère} année</p>
> 2018	<p>Mini-workshop (Figure B.1), Mini-conférences scientifiques données à par les étudiants, activité mise en place dans le cadre de l'UE « Outils et Applications/Préparation au Projet Professionnel (PPP) » de la Licence de la 3^{ème} année de Géographie et Aménagement, Parcours Aménagement et Environnement. Unité de Formation et de Recherche Sciences Humaines, Département de Géographie. <u>Période de préparation</u> : du S5 au S6. <u>Durée de l'événement</u> : 1/2 journée. <u>Public</u> : promo de L3 et 4 enseignants-chercheurs accompagnant les étudiants. <u>Encadrement pédagogique</u> : N. Martiny/P. Roucou. Accompagnement d'étudiants dans la réalisation et la restitution d'un poster scientifique en géographie</p>
> 2017	<p>UE « Outils et Applications/Préparation au Projet Professionnel (PPP) » de la Licence 3^{ème} année de Géographie et Aménagement, Parcours Aménagement et Environnement. Unité de Formation et de Recherche Sciences Humaines, Département de Géographie. <u>Volume horaire</u> : 44h. <u>Intervenants</u> : P. Roucou (16h) / N. Martiny (16h). <u>Effectif</u> : 30 à 60 étudiants. Accompagnement d'étudiants dans leur projet post-Licence</p>
> 2017	<p>Responsable de la Licence de Géographie et Aménagement, Parcours Aménagement et Environnement. Unité de Formation et de Recherche Sciences Humaines, Département de Géographie. <u>Volume horaire</u> : ~500h / an. <u>Intervenants</u> : 12 permanents du Département de géographie dans 2 laboratoires, ThéMa et CRC/Biogéosciences, 6 extérieurs en moyenne, 4 ATER ou vacataires en moyenne. <u>Effectif</u> : 120 à 200 étudiants. Le Département de Géographie fonctionnant avec des responsables d'année, les temps forts du travail ont lieu à chaque renouvellement des maquettes de formation (tous les 5 ans). Responsable de diplôme</p>
> 2011 ¹	<p>GEOFORUM (Figure B.1), Forum des métiers de la géographie, mis en place dans le cadre du Plan Réussir en Licence de la 3^{ème} année de Géographie et Aménagement, Parcours Aménagement et Environnement. Unité de Formation et de Recherche Sciences Humaines, Département de Géographie. <u>Période de préparation</u> : du S5 au S6. <u>Durée de l'événement</u> : 1 journée. <u>Public</u> : ~100 étudiants de la Licence au Master ; 10 à 15 professionnels, 12 enseignants-chercheurs. <u>Encadrement pédagogique</u> : N. Martiny/P. Roucou. Accompagnement d'étudiants dans l'organisation d'un forum des métiers en géographie, devenu annuel</p>
2011-2016 ²	<p>Projet de Plan Réussir en Licence de la 3^{ème} année de Licence de Géographie et Aménagement, Parcours Aménagement et Environnement. Unité de Formation et de Recherche Sciences Humaines, Département de Géographie. <u>Titre</u> : Conception d'un projet professionnel personnalisé. <u>Attribution</u> : 5k€ annuel et 72h d'enseignements. Ce projet a permis de donner naissance au GEOFORUM. Responsable d'un projet pédagogique en Licence Générale</p>
> 2010 ¹	<p>UE « Environnement : pollutions urbaines, mesures et analyses de la qualité de l'air » du Master TMEC 2^{ème} année. Unité de Formation et de Recherche Sciences Humaines, Département de Géographie. Master Mention Géographie Aménagement Environnement et Développement, Spécialité « Transport, Mobilité, Environnement, Climat ». <u>Volume horaire</u> UE: 95h. <u>Intervenants</u> : Y. Richard (40h)/N. Martiny (40h) en partenariat avec ATMO-BFC et intervenants extérieurs (15h). <u>Effectif</u> : 15 à 20 étudiants. Co-responsable d'UE en Master 2^{ème} année</p>

<p>> 2009¹</p>	<p>Responsable de Licence 3^{ème} année de Géographie et Aménagement, Parcours Aménagement et Environnement. Unité de Formation et de Recherche Sciences Humaines, Département de Géographie. <u>Volume horaire</u> : ~500 h/an. <u>Intervenants</u> : 8 permanents du Département de géographie dans 2 laboratoires, ThêMa et CRC/Biogéosciences, 4 extérieurs en moyenne, 4 ATER ou vacataires en moyenne. <u>Effectif</u> : 30 à 70 étudiants. Lien avec les enseignants de chaque semestre. Lien étudiants/équipe pédagogique (1 réunion / semaine avec les délégués étudiants). Lien avec le secrétariat de géographie (au minimum une réunion par semaine avec la secrétaire du Département). Examen des candidatures d'entrée en L3 (internationales 120 dossiers en 2021, transfert-arrivée, VA) Responsable d'année de Licence Générale</p>
<p>> 2009¹</p>	<p>UE «Géomatique : SIG, cartographie manuelle et CAO/DAO» de la Licence Professionnelle Sciences Technologie et Santé, Mention Aménagement Paysager : conception, gestion, entretien, Parcours : Gestion des Espaces Végétaux Urbains (GEVU). Unité de Formation et de Recherche Sciences Humaines, Département de Géographie. <u>Volume horaire</u> : 110h/an dont 70h en Systèmes d'Information Géographique. <u>Intervenants en SIG</u>: N. Martiny (49h), G. Chevillard (12h), P. Mille (9h). <u>Effectif</u>: 15 à 20 étudiants. Responsable d'UE en Licence Professionnelle</p>
<p>2007-2009¹</p>	<p>UE « Bases méthodologiques pour les Sciences de l'Environnement » du Master ENVOLH 1^{ère} année « ENVironnement, OCéanographie Littorale et Hauturière ». Master Sciences et Technologies, Mention Sciences de la Terre et de l'Environnement, Ecologie. Université de Bordeaux 1. <u>Intervenante</u> : N. Martiny. <u>Volume horaire</u> : 34h. <u>Effectif</u>: 20 étudiants. Responsable d'UE en Master 1^{ère} année</p>

¹ Sauf années universitaires 2014-2015 et 2015-2016 pour motif de délégations CNRS

² Le Plan Réussir en Licence a été une mesure ponctuelle d'accompagnement de la réussite des étudiants en licence ; il a été mis en place à l'échelle nationale par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche pour une durée limitée (ici pendant l'offre de formation 2011-2016)



Figure B.1. Productions des étudiants de Licence 3^{ème} année : poster scientifique réalisé en 2020-2021 (à gauche), affiche du Géoforum réalisé en 2018-2019 (à droite).

3.2 Prix et distinction

<p>2015</p>	<p>Prix d'Excellence en Enseignements Rempporté par le Département de Géographie, Unité de Formation et de Recherche Sciences Humaines, pour le suivi des étudiants, et la mise en place d'activités pédagogiques originales, telles que les projets enquête-territoire et le GEOFORUM, permettant aux étudiants de révéler d'autres compétences que celles du cadre académique classique. <u>Attribution</u> : 3000 euros.</p>
-------------	---

3.3 Enseignements réguliers avec descriptif et analyse

A l'Université de Bourgogne (>2009)

<i>Discipline enseignée</i>	<i>Niveau</i>	<i>Nature</i>	<i>éTD</i>	<i>Examen</i>
Statistiques	M1 TMEC	TD	6h	-
Statistiques	L3 Géographie	TD	22h ¹	CC
Statistiques	L2 Géographie	TD	24h ¹	CC
Télédétection	L3 Géographie	Cours + TD	9h + 16h ¹	CC
Télédétection	L2 Géographie	Cours + TD	9h + 16h ¹	CC
Télédétection	L3 pro ADNT ²	Cours + TD	3h + 4h	-
SIG	L3 pro GEVU	Cours + TD + Projets ³	33h + 8h + 8h	CC
SIG	L2 Géographie	TD	12h ¹	CC
Qualité de l'air	M2 TMEC	Cours + Projets ³	15h + 25h	CC
Qualité de l'air	M1 TMEC	Cours + Projets ³	18h + 12h	CC
Climatologie	M1 SEME ²	Cours + TD	6h + 4h	ET
Climatologie	M2 Géobiosphère	TD	4h	-
Météorologie	L2 Géographie	Cours + TD	6h + 5h	ET
Anglais	L3 Géographie	TD	5h	CC
Préprofessionnalisation	L3 Géographie	Projets ³	12h à 22h	CC

¹ Par groupe de TD à partir de 2012 (avant 1 groupe = 24h)

² A l'UFR Sciences Vie Terre Environnement

³ Les projets sont comptabilisés en heures équivalent TD

Tous les enseignements surlignés en gris ci-dessus constituent le **socle de mon service d'enseignements actuel** (offre de formation 2017-2021).

Un **descriptif** de chacun de ces enseignements est donné ci-après.

Qualité de l'air (en M1 et M2) 70h éTD

Il s'agit aujourd'hui de la discipline représentant la plus grande partie de mon service. Elle est enseignée à 2 niveaux, en M2 et en M1.

L'UE « Environnement : pollutions urbaines, mesures et analyses de la qualité de l'air » était nouvelle dans l'offre de formation du **M2 TMEC** lors de ma prise de fonctions en 2009. J'ai participé à sa mise en place avec Y. Richard, professeur au CRC/Biogéosciences. Cette UE (qui représente environ 40h éTD par intervenant) prend la forme d'un projet tutoré visant à étudier l'impact du trafic en ville sur la pollution de proximité. Cette UE est organisée sur une période de 4 semaines (non consécutives): semaine 1, les interventions extérieures des professionnels dans le but de contextualiser le projet des étudiants ; semaine 2, l'acquisition des données de qualité de l'air sur le terrain (notamment les oxydes d'azote et les particules); semaines 3 et 4, le traitement de la base de données, les analyses/interprétations et les restitutions des résultats (intermédiaires puis finales). Cette UE est mise en place en partenariat avec **Dijon Métropole** qui fournit les données de trafic, **ATMO-BFC** qui fournit les données issues de analyseurs de référence pendant la période d'échantillonnage des étudiants, voire fournit un local (par exemple une remorque) pour y installer les stations d'ATMO et celles du CRC/Biogéosciences (QameleO depuis 2018) et **Météofrance** qui fournit des données météorologiques à confronter avec celles du trafic et de la qualité de l'air. L'UE a considérablement évolué depuis sa mise en place, et à partir de 2013-2014, une véritable station de mesures fixe a été installée (NO_x, CO, O₃, PM, vent, température, humidité) à Dijon (site défini avec ATMO-BFC dans un cadre d'étude réelle de l'AASQA) pendant une semaine entière, puis sur un mois complet, donnant lieu à des résultats de plus en plus riches lors des restitutions finales des étudiants. En outre, cette UE a vocation à être **mutualisée** avec d'autres UFR ou formations, comme l'ESTP par exemple, dont les activités de recherches sont liées au domaine *Smart City* du Campus de Dijon et qui a pour souhait de lancer une future chaire dans les domaines de la décarbonation et des cycles de vie urbains.

J'interviens en qualité de l'air en **M1 TMEC** dans le l'UE « Environnement : environnement atmosphérique et changement climatique » depuis 2018. Cette UE existante a été remaniée de manière à y introduire un volet en qualité de l'air (à hauteur de 30h éTD). Y. Richard et moi-même avons alors mis en place un projet préparatoire à l'UE « Environnement » en M2. Ils prennent la forme de 2 projets, l'un dédié au climat urbain (Y. Richard) et l'autre dédié à la qualité de l'air (N. Martiny). Ils ont pour objectif de donner les bases théoriques aux étudiants sous la forme de cours magistraux, de préparation d'une mini-campagne de **mesures mobiles** à Dijon, à l'aide des stations de mesures du CRC/Biogéosciences (sondes de températures et mini-aethalomètre pour le carbone particulaire), de les faire travailler les données (constitution de base de données et analyses statistiques), puis de les interpréter. Ma participation à cette UE a été l'occasion de renforcer le lien entre enseignements et recherches sur le thème de la qualité de l'air et devrait perdurer dans l'offre de formation 2024-2028.

Téledétection (en L2 et L3) 58h éTD

Il s'agit de la 2^{ème} discipline représentant la plus grande partie de mon service en enseignements (58h éTD avec une hypothèse moyenne de 2 groupes de TD en L2 et en L3). Les enseignements en télédétection en L2 sont généralement assurés avec un doctorant ou une doctorante du CRC.

A mon arrivée à l'Université de Bourgogne en 2009, les cours et TD de télédétection étaient nouveaux. J'ai donc intégralement monté cet enseignement, cours magistraux et TD, en salle informatique. L'objectif fixé est de faire découvrir aux étudiants géographes les applications de la télédétection dans les domaines de l'environnement, du climat et leurs impacts sur les sociétés, puis de les familiariser aux méthodes de la télédétection spatiale afin qu'ils puissent avoir un regard critique sur les images satellitaires qu'ils analysent. L'objectif est ensuite de leur apprendre à télécharger des images, les traiter puis créer des indices de télédétection utiles à leurs problématiques en géographie, comme par exemple l'indice de végétation NDVI. Le cours et les TD sont centrés sur les capteurs passifs dans la

gamme de longueurs d'onde du visible au proche infrarouge. La maquette 2012-2016 de la filière géographie prévoyant plus d'UE en méthodologie et donc en télédétection, j'interviens depuis lors également en L3 dans cette discipline. J'ai alors organisé les enseignements en L2 et L3 de manière à introduire une continuité et une progression dans la formation en télédétection. Ainsi, le programme en L3 a été imaginé de manière à compléter la formation en L2 avec 3 cas d'études précis : l'influence de l'atmosphère sur la surface, la télédétection des aérosols, la télédétection en milieu urbain. Les étudiants doivent, pour finaliser leur formation en L2-L3, mener un projet visant à traiter l'image de leur choix sur un thème qu'ils ont choisi : détection de changements, pollution atmosphérique, canicules, etc. En télédétection les logiciels utilisés sont libres : il s'agit d'**ImageJ** et de **Quantum GIS**, qui font le lien avec les enseignements en SIG.

Système d'Information Géographique (en Licence Professionnelle) 49h éTD

Il s'agit de la 3^{ème} discipline représentant la deuxième plus grande partie de mon service en enseignements (49h éTD, bloc incompressible).

J'interviens en L3 PRO GEVU depuis 2009 dans un enseignement très étroitement lié au projet tutoré des étudiants en aménagement paysager, qui constitue le cœur de leur formation en Licence Professionnelle. Le but du projet SIG est de constituer une base de données (grâce à l'inventaire du patrimoine végétal réalisé dans le cadre de leur projet tutoré), de l'exploiter (répondre à des problématiques précises en aménagement qu'ils définissent par groupe de 3 à 4 étudiants) et d'en faire un rendu (exposer des cartes aux élus de la commune concernée, qui change chaque année). L'exercice proposé en SIG entraîne donc les étudiants au-delà de la « simple » maîtrise d'un logiciel. Il leur permet d'engager une réflexion sur les bases de données en SIG et comment les interroger pour créer de la valeur ajoutée à une problématique posée par leur soin, en accord avec la zone d'étude. Ainsi, les sujets traités par les étudiants, via une approche géomatique, peuvent relever de la classique gestion du patrimoine arboré en ville ou encore de la gestion différenciée des espaces végétalisés mais aussi de thèmes plus originaux comme celui des plantes invasives ou encore la gestion hydrologique des abords d'une portion du canal de Bourgogne. Au fil des années, les liens entre le projet tutoré et le projet SIG sont devenus très étroits et les cartes thématiques créées en SIG bien souvent mobilisées pour le projet tuoré en aménagement paysager. Les étudiants en L3 PRO GEVU viennent pour la plupart de BTS en Aménagement Paysager, peuvent être en alternance ou en reconversion professionnelle. Cela en fait un public curieux, participatif et pragmatique ; la dynamique de promotion est par suite généralement très appréciable. En SIG les logiciels utilisés sont libres (**Quantum GIS**) ou sous licence (**ArcGIS**).

Statistiques multivariées (en L3 et M1) 28h éTD

J'enseigne les statistiques multivariées en L3 géographie depuis 2009 (44h éTD, 2 groupes de TD en moyenne) et en M1 TMEC (6h éTD de remise à niveau). Ces enseignements sont généralement assurés avec un doctorant ou une doctorante du CRC.

En L3, le programme traite des **statistiques descriptives** : Analyse en Composantes Principales, Analyse Factorielle des Correspondances, Classification Hiérarchique Ascendante. L'approche adoptée est une approche « pas à pas » pour les ACP notamment. L'étudiant est alors amené à réaliser et à comprendre chaque étape d'une ACP, méthode complexe, avant d'en réaliser une complète et d'interpréter les résultats dans les domaines de l'environnement (par exemple la déforestation, en lien avec une autre UE de leur semestre) ou de la socio-démographie (les pays d'Amérique latine depuis les années 60). Ceci permet d'introduire une continuité avec le programme de L2 en statistiques bivariées, que j'ai assuré en en 2009-2010 et 2010-2011, composé de l'analyse de tableaux de contingence avec test du χ^2 , l'analyse de variances, les modèles de régressions linéaires simples et multiples. Lorsque j'ai repris les cours et TD de statistiques en 2009 (que ce soit en L2 ou L3), j'ai mis en place la réalisation des exercices sur machine : travail sur tableur **Excel** et logiciel **PhilCarto**.

Changement Climatique et Pollutions atmosphériques (en M1) 10h éTD

J'interviens en **Master SEME 1^{ère} année de l'UFR SVTE** depuis 2017.

Cette formule cours/TD au faible volume horaire constitue une introduction aux thématiques environnementales atmosphériques. Cet enseignement porte aujourd'hui sur le changement climatique global (système climatique, signes et causes du changement, climat futur) et sur la qualité de l'air (pollutions gazeuses et particulaires). Je l'ai envisagé comme une occasion de créer des interactions avec les étudiants, sous la forme de débats/discussions, sur des thématiques d'actualité, et notamment en fin de séances.

Anglais disciplinaire (en L3) 5h éTD

J'interviens en anglais disciplinaire en L3 Géographie depuis 2017.

J'ai construit ces 5 séances dans l'objectif de réalisation d'un **résumé scientifique en anglais**, sur un thème choisi par les étudiants, qui travaillent en groupe de 3 à 4, en environnement. Ce cours a pour objectif de réaliser un travail bibliographique et de le synthétiser en 1 page. Les étudiants doivent également associer à leur texte une iconographie de leur choix, illustrant l'idée principale du résumé scientifique. Le commentaire de cette illustration est travaillé avec une enseignante linguiste, V. Gacon, avec qui j'ai monté cet enseignement. Je le présente aux étudiants comme un travail préparatoire au mémoire de stage de Master 1^{ère} année qu'ils devront rédiger et dans lequel devra figurer une étude bibliographique.

Préprofessionnalisation (en L3) 16h éTD

J'interviens dans l'UE « Outils et Applications/Préparation au Projet Professionnel (PPP) » en L3 Géographie depuis 2017.

Cet enseignement, construit en binôme avec P. Roucou, maître de conférences au CRC/Biogéosciences, a pour objectif d'aider à la professionnalisation des étudiants après leur Licence Générale en Géographie. Il est décliné selon 2 actions-phares : (i) « le **devenir professionnel** », qui consiste pour les étudiants géographes à réaliser des enquêtes auprès de professionnels travaillant dans des domaines en lien avec la géographie et leurs enseignements afin d'avoir une idée plus précise des débouchés-métiers ; (ii) « le forum des métiers », **GEOFORUM**, qui consiste à réunir le temps d'une journée étudiants et professionnels de la géographie afin de favoriser les échanges au moment des questionnements des étudiants sur leur avenir (<http://orientation.u-bourgogne.fr/toute-lactualite/35-actualites/219-geo-forum.html>). Ces actions semblent en faveur de recrutements en stage dès la licence (aujourd'hui non obligatoires dans l'offre de formation). Chaque année, cet enseignement demande un gros investissement personnel (temps passé supérieur au nombre d'heures rémunérées), mais il me permet de participer concrètement à la vie du département de géographie, et de mieux connaître les étudiants, ce qui rejoint totalement mes activités en tant que responsable de la Licence 3^{ème} année.

Mon **service annuel** a été **complet** dès mon recrutement en 2009 (et également à l'Université de Bordeaux avec un service annuel de 197h en 2007-2008 et 196h en 2008-2009). Il est aujourd'hui en **sur-service à hauteur de 46%** (281h eTD en 2020-2021, soit 89h eTD complémentaires par rapport au service statutaire) (Tableau B.1). Cette situation est essentiellement liée aux effectifs étudiants en augmentation ces dernières années, à mon implication dans le L3 PRO GEVU et à la nature de mes enseignements, à dominance méthodologique, donc organisés en salle informatique. En effet, comme décrit précédemment, la télédétection et les statistiques ont été mis en place en salle informatique l'année de mon arrivée, dans la perspective de proposer, adossés aux enseignements de SIG en cycle L, une offre de formation d'actualité, numérique et en accord avec le marché de l'emploi. Les salles informatiques étant d'ordinaire limitées à 24 places, ceci multiplie nécessairement le nombre de groupes de TD. Les doctorants du CRC/Biogéosciences et des enseignants vacataires ont ainsi été (et sont encore aujourd'hui) une aide précieuse dans mes activités d'enseignements. Les enseignements méthodologiques (télédétection, SIG et statistiques) ont représenté 70% de mon service sur les offres de formation 2007-2011 (Figure B.2) et 2012-2016 (Figure B.3) et 60% à l'heure actuelle (Figure B.4). A l'Université de Bordeaux, c'était déjà le cas avec 71% d'enseignements en statistiques, SIG-cartographie et télédétection (Figure B.5).

Années Universitaires	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020	2020-2021
Statistiques M1 TMEC												
Statistiques L3 GEO												
Statistiques L2 GEO												
Télédétection L3 GEO												
Télédétection L2 GEO												
Télédétection LP ADNT												
SIG L2 GEO												
SIG LP GEVU												
Qualité de l'air M2 TMEC												
Qualité de l'air M1 TMEC												
Climatologie M2 Géobiosphère												
Climatologie M1 SEME												
Météorologie L2 GEO												
Anglais L3 GEO												
Préprofessionnalisation L3 GEO												
Responsabilité L3 GEO												
Total Service (eTD)	196	213,5	249,5	233	205,5			211	272	264	266,5	281

Tableau B.1. Bilan interannuel des enseignements à l'Université de Bourgogne (> 2009)

Au sein des enseignements méthodologiques, la **télédétection**, mon domaine disciplinaire, a toujours été bien représentée. La part enseignée en télédétection est passée de 15% à Bordeaux à 21% en début de carrière à Dijon et ~30% depuis 2012. Cette évolution est liée, en plus de son existence en L2 géographique, à l'introduction de cette discipline au niveau L3 dès 2012. Le **SIG** a toujours été très présent également, fort besoin en géographie, et faisant l'objet de débouchés professionnels importants. La formation dans laquelle j'interviens le plus dans cette discipline est la Licence Professionnelle, qui a construit sa marque de fabrique avec un projet tutoré d'aménagement en ville. **Actuellement mes enseignements en qualité de l'air et climatologie représentent un tiers de mon service.**

Mes enseignements en Licence Générale diminuent au fil des années, avec 66% en début de carrière à Dijon versus 47% actuellement. Les **enseignements au niveau Master ont, eux, augmenté de 21% à 33%** actuellement. Les enseignements en Licence Professionnelle (inexistants à Bordeaux) ont toujours occupé une place équivalente dans mon

service d'enseignements, représentant environ 20% des enseignements tous niveaux confondus.

La part dédiée aux cours magistraux a un peu plus que triplé par rapport au début de carrière, 11% des enseignements étaient des CM à Bordeaux versus 37% aujourd'hui. Cette part a logiquement augmenté au fil des années avec des interventions plus nombreuses au niveau Master. La part dédiée aux TD est toujours très importantes, 85% à Bordeaux (en regroupant TD et TP, inexistant à Dijon) en début de carrière versus 38% à l'heure actuelle. Cette part, qui a diminué au fil des années, s'explique par le type d'enseignements, orientés vers les matières méthodologiques. Aujourd'hui la part accordée aux CM et aux TD est beaucoup plus équilibrée, les enseignements dans les matières méthodologiques ayant quelque peu diminué au profit des matières disciplinaires en M1 et en M2. Ainsi, depuis 2018 mes enseignements en qualité de l'air et climatologie se sont renforcés au niveau Master (Tableau B.1). Ceci coïncide à l'inflexion de mes recherches vers la qualité de l'air. Cette évolution m'a permis **d'adosser de manière plus directe mes activités d'enseignements à mes activités de recherches.**

Un autre point notable dans mes activités d'enseignements relève de la **part dédiée aux projets**. J'ai souhaité séparer les TD des projets bien que les projets soient rémunérés comme des TD ; cependant, sur le plan pédagogique, ce format d'enseignements me semble pertinent car plus efficace en termes d'apprentissage. Loin de la pédagogie inversée, c'est une manière d'apprendre par la pratique, la mise en situation et l'autonomisation progressive des étudiants. Cette méthode d'enseignements me semble également plus en phase avec les attentes des étudiants, de plus en plus préoccupés des débouchés professionnels au sortir de l'Université, et ce, dès la L3. Par ailleurs, ces enseignements semblent permettre aux étudiants de gagner en confiance en eux, d'apprendre à travailler en équipe (en groupe de travail) et de préparer une synthèse de leurs résultats. Pour les étudiants en fin de 3^{ème} année de Licence et les étudiants en Master, ils sont mis en situation réelle de réponse à une commande. Les projets les amènent ainsi, pour les étudiants en L3, à se préparer à leurs futurs Master, et pour les étudiants en Master, à se préparer au stage professionnel puis au monde professionnel. La part dédiée aux projets dans mes enseignements a augmenté au fil des années avec l'évolution de l'offre de formation, très orientée « projets » au Département de Géographie. Ces enseignements ont réellement démarré lors de la mise en place du Plan Réussir en Licence en 2011 (<https://www.bienpublic.com/cote-d-or/2011/03/31/geoforum-sur-le-campus>); ils ont ensuite été intégrés dans les maquettes avec un volant d'heures associé après la disparition de ce dernier. L'ensemble du Département de Géographie a d'ailleurs été récompensé en 2015 avec la remise d'un prix d'Excellence en Enseignements.

Aujourd'hui, mes enseignements sont équilibrés entre cours magistraux, TD et projets. A l'avenir, je souhaiterais conserver cet équilibre. Je souhaiterais également continuer de **tester de nouvelles méthodes pédagogiques**. Le déroulement des années universitaires 2010-2020 et 2020-2021 a été fortement perturbé par l'épidémie de COVID-19 en France. En 2019-2020 les enseignements en présentiel se sont arrêtés au milieu du 2^{ème} semestre, à la mi-mars. Il a alors fallu s'adapter très vite à une nouvelle façon d'enseigner en 100% distanciel, et à de nouveaux outils numériques (Teams) pour des questions de continuité pédagogique et afin de permettre aux étudiants de terminer leur année dans les meilleures conditions possibles. J'ai pu alors mettre en place quelques cours en **pédagogie inversée**. La rentrée 2020-2021 s'est déroulée normalement, mais à la mi-octobre, l'Université a de nouveau fermé ses portes.

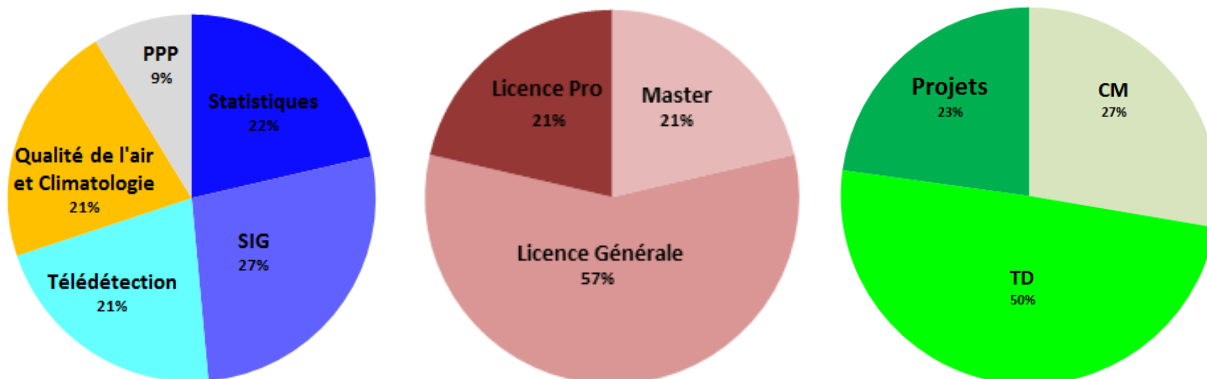


Figure B.2. Répartition par matière, par formation et par type d'enseignements de mon service annuel pour l'offre de formation 2007-2011

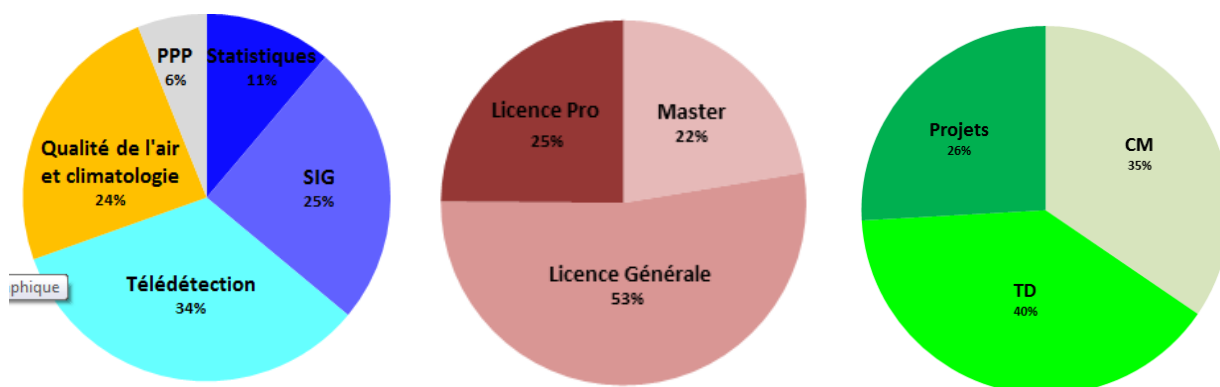


Figure B.3. Répartition par matière, par formation et par type d'enseignements de mon service annuel pour l'offre de formation 2012-2016

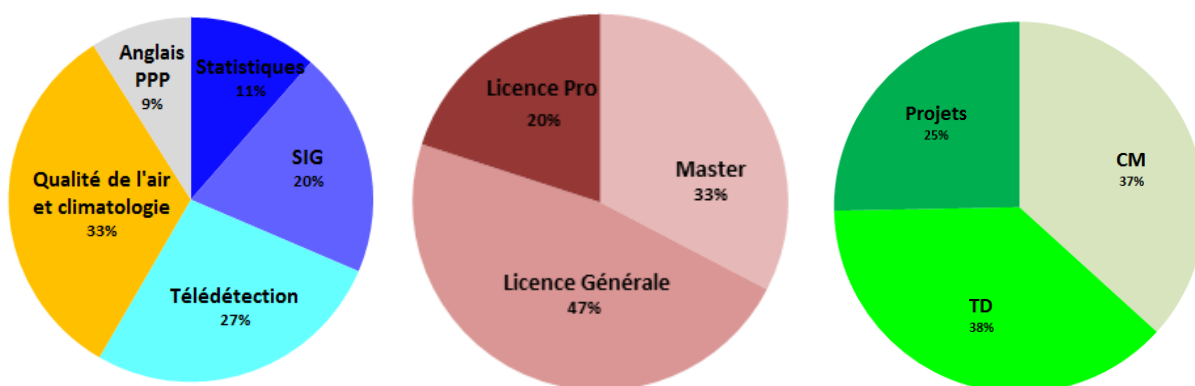


Figure B.4. Répartition par matière, par formation et par type d'enseignements de mon service annuel pour l'offre de formation 2017-2021

L'ensemble des enseignements s'est alors déroulé en **100% distanciel**, excepté en Licence Professionnelle où j'ai réussi à maintenir l'ensemble des cours/TD de SIG en présentiel. Cette situation a duré jusqu'en mars 2021, certains enseignements méthodologiques en Licence Générale (comme la télédétection) ou certaines UE en Master (comme la qualité de l'air) ayant nécessité des séances en présentiel à l'approche de l'étape de restitution finale des étudiants (en mars-avril). Lors de cette reprise très partielle en présentiel, les **enseignements hybrides** ont pu être testés. D'après mon expérience en la matière, ces derniers sont réellement à éviter, car ils impliquent une hétérogénéité de formation au sein de la promotion, l'enseignant étant nécessairement plus disponible et à l'écoute des étudiants présent en cours, sans évoquer les problématiques d'ordre technique (accès au wi-fi très hétérogène d'une salle à une autre).

Si les enseignements en 2019-2020 puis 2020-2021 ont provoqué une réelle surcharge de travail, d'autant plus difficile à gérer lorsqu'une partie des enseignements est en 100% distanciel et une autre partie en 100% présentiel (en Licence Professionnelle), ils ont également permis de tester de nouvelles formules pédagogiques qu'il serait intéressant de transposer dans la future offre de formation en Licence Générale et en Master, comme la pédagogie inversée, l'autoformation individuelle et en groupe ou encore l'organisation de blocs d'enseignements par projet dès la Licence 3^{ème} année. Par ailleurs, **placer l'étudiant au cœur des dispositifs** d'enseignements me semble être un moyen intéressant de le rendre acteur, force de proposition et ainsi de le faire progresser plus efficacement dans les apprentissages et leur formation universitaire. Il s'agit en effet de sortir du système classique d'enseignements, où l'étudiant est en position « passive », à un système plus dynamique où l'étudiant est en interaction, à la fois avec l'enseignant et avec les autres étudiants.

L'offre de formation du Département de Géographie va prochainement évoluer avec d'une part **la disparition de la L3 PRO GEVU dès la rentrée 2021-2022** et d'autre part **la mise en place d'un nouveau parcours de Master en 2024-2028** (avec un parcours transitoire dès 2021-2022) ; ce parcours sera parallèle au TMEC existant, et intégrera des modules d'enseignements financés sur un projet SFRI (Structuration de la formation par la Recherche d'Initiative d'Excellence) porté par P. Camberlin et A. Ullmann, enseignants-chercheurs au CRC/Biogéosciences.

Cette évolution devrait impacter mon service d'enseignements comme suit :

- (i) **Une baisse significative voire un arrêt des enseignements en SIG** avec la disparition de la Licence Professionnelle, et le degré selon lequel ces enseignements (géomatique avec cas d'application dans le domaine du végétal) sont maintenus dans le nouveau parcours de Master ;
- (ii) **Un relatif statu quo voire un léger renforcement des enseignements en qualité de l'air et climatologie** dans le cadre du nouveau parcours de Master.

J'ai aujourd'hui le souhait de **recentrer mon service autour d'enseignements plus disciplinaires**, et en particulier en **qualité de l'air**, thématique faisant l'objet de nouvelles préoccupations en recherches (§VI/Perspectives de recherches). Par ailleurs, le lien entre les enseignements et la recherche, et en particulier au niveau Master, est de mon point de vue, essentiel pour la qualité de la formation universitaire d'une part, et le recrutement des étudiants en stage afin d'optimiser les chances d'obtention de financements de thèse de doctorat par la suite.

A l'Université de Bordeaux 1 (2007-2009) - UFR SVTE

<i>Discipline enseignée</i>	<i>Niveau</i>	<i>Nature</i>	<i>éTD</i>	<i>Examen</i>
Statistiques	Master ENVOLH-1	TD	34h	CC
Statistiques	L3 STE	TD	25h	CC
Téledétection	Master ENVOLH-1	Cours et TD	8h + 9h	CC
Téledétection	Master Géorressources 2	Cours et TD	4h + 5h	-
Téledétection	Prépa AGREG SV-STU	Cours	2h	-
Informatique et SIG	L2 STE	TD	34h	CC
Topographie	L2 STE	Cours, TD et TP	4h + 10h +13h	CC
Géophysique	L2 STE	Cours et TD	5h20 + 8h	ET
TOHC	L2 STE	Projets	7h à 9h30	CC
Stéréoscopie	L3 STE	TD et TP	2h + 4h40	CC
Géosciences	L1 BGSTU	TP	12h	-
Cartographie	L2 BGSTU	TP	10h	-
FPP	L1 BGSTU	TD	12h	-

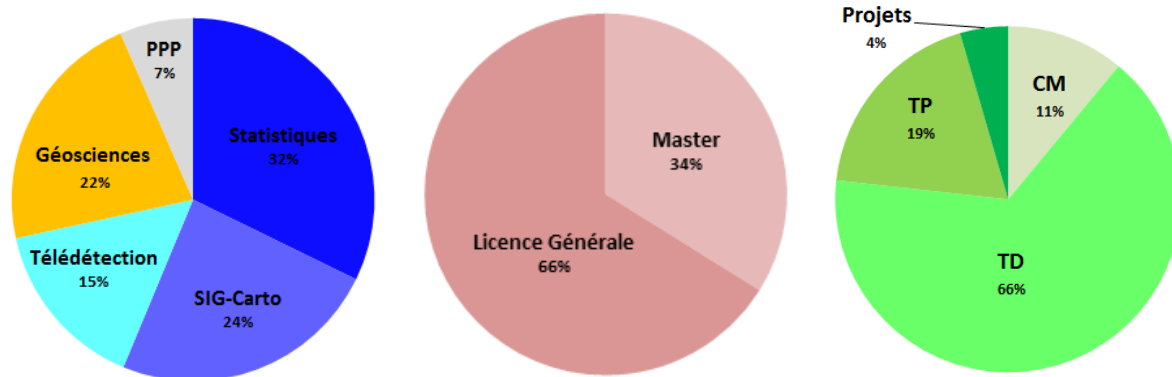


Figure B.5. Répartition par matière, par formation et par type d'enseignements de mon service annuel à l'Université de Bordeaux 1 en 2007-2008 et 2008-2009.

3.4 Autres enseignements

Cette rubrique concerne les années **2008-2014**, couvrant la période Bordeaux et Dijon avant les délégations CNRS. Bien que ces interventions extérieures aient représenté dans chaque cas des expériences enrichissantes du fait des thèmes enseignés (méthodologiques en télédétection ou thématiques en climat et santé), ainsi que des publics ciblés : élèves ingénieurs (Ecole Centrale Paris ou Institut EGID à Bordeaux) et étudiants aux niveaux Masters et Thèses à l'international (EHESP), j'ai fait le choix, à partir de 2016-2017, de ne pas reprendre d'enseignements à l'extérieur de l'Université de Bourgogne.

<i>Formation</i>	<i>Institut et Lieu</i>	<i>Discipline</i>	<i>Heures</i>	<i>Années</i>
Master Spécialité Géoressources et Environnement Parcours Télédétection et imagerie des géoressources	ENSEGID ¹ (ex Institut EGID) Université Michel de Montaigne-Bordeaux ³	Télédétection : Initiation à ENVI ²	10h CM/TD	2008-2009
Master Ingénierie des données de la recherche médicale et biotechnologies	Ecole Centrale Paris Châtenay-Malabry	Télédétection : Traitement d'images	10h CM/TD	2009-2010
Master of Public Health : https://www.ehesp.fr/formation/formations-diplomantes/master-of-public-health/	EHESP ³ Reid Hall, Paris	Climate and Health	4h CM en Anglais	2011-2012 2012-2013 2013-2014

¹ Environnement, Géoressources et Ingénierie du Développement durable

² ENvironment for Visualizing Images

³ Ecole de Hautes Etudes en Santé Publique

3.5 Autres responsabilités

<i>Type</i>	<i>Lieu</i>	<i>Thème</i>	<i>Evénement</i>	<i>Année</i>
Journée de formation des enseignants en Histoire Géographie en Lycée Professionnel Organisation avec le rectorat de l'Académie de Dijon et intervention	Université de Bourgogne- Département de Géographie Salle informatique	Cartographie et SIG : La place du numérique et de la pratique dans l'enseignement universitaire	1 journée : 9h-17h Intervenants du Département : 5 Enseignants en Lycée : 28	2019
Commission de choix de sujets de Baccalauréat Série Sciences et Technologies de la Gestion	Rectorat de l'Académie de Dijon	Epreuve écrite d'Histoire-Géographie	1 journée : 9h-17h	2012
Présidente de jury de Baccalauréat	Rectorat de l'Académie de Bordeaux	Série S	1 journée : 9h-17h	2009

4. Formation par la recherche

4.1 Encadrements de thèse (x3)

2019-2022	<p>Thèse de doctorat en modélisation des Systèmes Complexes à l'Institut de Recherches pour le Développement (co-tutelle Sénégal/France) Par : P.M. Niane Titre : <i>Construction d'un modèle à base d'agent à partir de données environnementales multi-sources : application à la propagation de la méningite bactérienne en Afrique de l'Ouest</i> http://www.ummisco.ird.fr/pdi/spip.php?rubrique106 Direction au Sud : LPAO à Dakar (A. Gaye) Direction au Nord : UMMISCO à Bondy (N. Marilleau) Co-encadrement au Nord : CRC/Biogéosciences à Dijon (N. Martiny/P. Roucou) Co-encadrement de thèse de doctorat 30%</p>
2012-2016	<p>Thèse de doctorat en géographie à l'Université de Bourgogne Par : J. Emery Titre : <i>La ville sous électrodes : de la mesure à l'évaluation de la pollution atmosphérique automobile. : vers une simulation multi-agents du trafic routier en milieu urbain</i>, http://www.theses.fr/2016DIJOL018 Direction : ThéMA/CRC Biogéosciences (T. Thevenin/N. Martiny¹) Soutenance : 17 novembre 2016 Co-direction de thèse de doctorat 50%</p>
2009-2013	<p>Thèse de doctorat en physique de l'atmosphère à l'Université de Paris 6 Par : A. Deroubaix Titre : <i>Impact des aérosols désertiques et du climat sur les épidémies de méningites au Sahel</i>, http://www.theses.fr/17973248X Direction : LOCEAN/CRC Biogéosciences (S. Thiria/N. Martiny¹) Soutenance : 17 septembre 2013 Co-direction de thèse de doctorat 50%</p>

¹ Demande officielle formulée à l'Ecole Doctorale Environnements - Santé de l'Université de Bourgogne Franche Comté

4.2 Membre de comités de pilotage de thèse (x3)

2019-2021	<p>Thèse de doctorat en modélisation mathématiques à l'Université de Tunis El-Manar Par : W. Zaatour Direction : LAMSIN, Tunisie(S. Ben Miled) Co-direction : UMMISCO à Bondy (N. Marilleau) Participation à un comité de pilotage de thèse et accueil ponctuel du doctorant au laboratoire</p>
2016-2019	<p>Thèse de doctorat en écologie de la santé à l'Institut de Recherches pour le Développement (co-tutelle France/République Démocratique du Congo) Par : S. Mazamay Titre : <i>Dynamique spatio-temporelle et écologie des méningites bactériennes en dehors de la ceinture de la méningite en Afrique : le cas de la RDC</i>, http://www.theses.fr/s175208 Direction au Nord : MIVEGEC à Montpellier (J-F. Guegan) Direction au Sud : OMS (J-J. Muyembe) Soutenance : 18 décembre 2019 Participation à un comité de pilotage de thèse et accueil ponctuel du doctorant au laboratoire</p>
2012-2015	<p>Thèse de doctorat en physique de l'environnement à l'Université de Bordeaux 1 Par : D. Bru Titre : <i>Corrections atmosphériques pour capteurs à très haute résolution spatiale en zone littorale</i>, https://www.theses.fr/191773689 Direction : EPOC à Bordeaux (P. Bonneton/B. Lubac) Soutenance : 1er décembre 2015 Participation à un comité de pilotage de thèse</p>

4.3 Références des thèses encadrées ou pilotées

- Zaatour, W. (2021).** Modélisation mathématique de la diffusion de la leishmaniose cutanée chez *Meriones Shawi*. Thèse de doctorat à l'Université de Carthage, Spécialité Physique.
- Mazamay, S. (2019).** Dynamique spatio-temporelle et écologie des méningites bactériennes en dehors de la Ceinture de la méningite en Afrique : cas de la République démocratique du Congo. Thèse de doctorat à l'Université de Montpellier en cotutelle avec l'Université de Kinshasa, Spécialité Ecologie de la santé. <http://www.theses.fr/2019MONTG093>
- Emery, J. (2016).** La ville sous électrodes : de la mesure à l'évaluation de la pollution atmosphérique automobile. Vers une simulation multi-agents du trafic routier en milieu urbain. Thèse de doctorat de l'Université de Bourgogne Franche-Comté, Spécialité Géographie, pp. 412. <http://www.theses.fr/2016DIJOL018>
- Bru, D. (2015).** Corrections atmosphériques pour capteurs à très haute résolution spatiale en zone littorale. Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux 1, Spécialité Physique de l'environnement. <https://www.theses.fr/191773689>
- Deroubaix, A. (2013).** Impact des aérosols désertiques et du climat sur les épidémies de méningites au Sahel. Thèse de doctorat de l'Université de Pierre et Marie Curie, Spécialité Sciences de l'environnement Île de France, Mention Physique de l'Atmosphère, pp.222. <http://www.theses.fr/17973248X>

4.4 Participations à des jurys de thèse (x6)

2021	<p>Thèse de doctorat en géographie du développement à l'Université Paris Par : Jean-Claude Bergès Titre : <i>La ville des précipitations tropicales et subtropicales</i>, https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-03188624 Direction : PRODIG/CRC Biogéosciences (G-A. Fassetta/P. Camberlin) Soutenance : le 16 mars 2021 Membre du jury en tant qu'examinatrice (JT extérieur)</p>
2016	<p>Thèse de doctorat en géographie à l'Université de Bourgogne Par : Justin Emery Titre : <i>La ville sous électrodes : de la mesure à l'évaluation de la pollution atmosphérique automobile. : vers une simulation multi-agents du trafic routier en milieu urbain</i>, http://www.theses.fr/2016DIJOL018 Direction : ThéMA/CRC Biogéosciences (T. Thevenin/N. Martiny¹) Soutenance : 17 novembre 2016 Membre du jury en tant que co-directrice de thèse</p>
2015	<p>Thèse de doctorat en physique de l'environnement à l'Université de Bordeaux 1 Par : Driss Bru Titre : <i>Corrections atmosphériques pour capteurs à très haute résolution spatiale en zone littorale</i>, https://www.theses.fr/191773689 Direction : EPOC à Bordeaux (P. Bonneton/B. Lubac) Soutenance : 1er décembre 2015 Membre du jury en tant qu'examinatrice (JT extérieur)</p>
2013	<p>Thèse de doctorat en physique de l'atmosphère à l'Université de Paris 6 Par : Adrien Deroubaix Titre : <i>Impact des aérosols désertiques et du climat sur les épidémies de méningites au Sahel</i>, http://www.theses.fr/17973248X Direction : LOCEAN/CRC Biogéosciences (S. Thiria/N. Martiny¹) Soutenance : 17 septembre 2013 Membre du jury en tant que co-directrice de thèse</p>
2013	<p>Thèse de doctorat en Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement à l'Université de Rouen (co-tutelle France/Niger) Par : Bouba Hassane Titre : <i>Variabilité de la dynamique éolienne au sol (direction et vitesse du vent) et de ses conséquences (visibilité horizontale) au Sahel central et Sahara méridional entre 1950 et 2009 (exemple de quelques stations synoptiques au Niger)</i>, http://www.theses.fr/2013ROUES012 Direction Nord: Université de Rouen (A. Durand) Direction Sud: Université Abdou Moumouni à Niamey (Z. Garba) Soutenance : le 18 décembre 2013 Membre du jury en tant qu'examinatrice (JT extérieur)</p>
2011	<p>Thèse de doctorat en Géographie à l'Université de Bourgogne (cotutelle France/Cameroun) Par : Viviane Djoufack Titre : <i>Etude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun : analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques et anthropiques de variabilité du NDVI</i>, https://www.theses.fr/161234747 Direction au Nord : CRC (B. Fontaine) Direction au Sud : Université de Yaoundé 1 (M. Tsalefac) Soutenance : le 30 septembre 2011 Membre du jury en tant qu'examinatrice (JT extérieur)</p>

4.5 Encadrements de post-doctorat (x1), d'ingénieurs (x4) et de techniciens (x1)

<p>2022 (1 an)</p>	<p>Ingénieur d'études au CRC/Biogéosciences de l'Université de Bourgogne Julita Diallo-Dudeck Missions : <i>Cartographies de la qualité de l'air à l'échelle décamétrique de j-1 à j+1, interopérabilité modèles et micro-stations de mesures fixes QameleO</i> Encadrement : CRC Biogéosciences / ATMO-BFC (N. Martiny, J. Pergaud/M. Boilleault) Cadre : Projet européen H2020 RESPONSE Encadrement ingénieur à 50%</p>
<p>2021 (6 mois)</p>	<p>Ingénieur d'études au CRC/Biogéosciences de l'Université de Bourgogne Julita Diallo-Dudeck Missions : <i>Classifications d'occupation du sol à partir des images Pléiades Très Haute Résolution Spatiale</i> Encadrement : CRC Biogéosciences / ThéMa / MSH (N. Martiny/D. Roy/L. Granjon) Cadre : Projet SAVE-IFU (Y. Richard) Encadrement ingénieur à 30%</p>
<p>> 2011</p>	<p>Technicien à l'Agence Nationale de Météorologie du Burkina Faso Camille Bebane Missions : <i>Changement des filtres de collection de l'instrument TEOM implanté à Dédougou, relevés des données de concentrations de PM, maintenance régulière. Points réguliers par mail, points plus conséquents trimestriels en visio et formation organisée en France en 2014.</i> Encadrement : CRC Biogéosciences (N. Martiny, M. Rega) Cadre : Projets TEOM-Dedougou, CNES TELEDM et TELEPaF Encadrement ingénieur à 100% puis 50% depuis 2017</p>
<p>2016-2017 (1 an)</p>	<p>Ingénieur d'études au CRC/Biogéosciences de l'Université de Bourgogne Sébastien Merlet Missions : <i>Développement de la base de données multi-échelles et multi-variables poussières/climat/méningites TELEDM avec interface visuelle</i> Encadrement : CRC Biogéosciences (N. Martiny, J. Pergaud) Cadre : Projet CNES TELEDM Encadrement ingénieur à 80%</p>
<p>2012-2013</p>	<p>Ingénieur d'études au CRC/Biogéosciences de l'Université de Bourgogne Basile Pauthier Missions : <i>Contribution à la mise en place du TEOM de Dédougou au Burkina Faso (2 missions en 2012 et 2013)</i> Encadrement : CRC Biogéosciences / TDE (N. Martiny/R. Belleville) Cadre : Projet TEOM-Dedougou Encadrement ingénieur à 80%</p>
<p>2010-2011 (1 an)</p>	<p>Post-doctorante au CRC/Biogéosciences de l'Université de Bourgogne Alice Favre Missions : <i>analyse des téléconnexions entre les conditions climatiques ouest-africaines (mousson et vent d'Harmattan) et la variabilité climatique extra-tropicale : analyses diagnostiques et modélisation</i> Encadrement : CRC Biogéosciences (N. Martiny) Cadre : Projet FABER VARMED (A. Ullmann) Encadrement post-doc à 100%</p>

4.6 Encadrements de stages (x 31 en Master)

J'ai encadré et co-encadré **31 étudiants en stage de Master 1^{ère} et 2^{ème} année** depuis mon recrutement à l'Université de Bordeaux 1 en 2007 (voir liste ci-dessous pour le détail). Parmi ces étudiants, **17 étudiants étaient en Master 2^{ème} année**, dont 7 extérieurs à mon université de rattachement. Ces étudiants peuvent être issus de l'ENS (x1) et d'autres universités en France (x4) et à l'international (x2). Cela représente une moyenne de **2 étudiants/an encadrés au niveau Master**, 1 étudiant au niveau Master 2 (encadrement régulier avec 1 étudiant chaque année universitaire) et 1 étudiant au niveau M1. L'étudiant de l'ENS encadré en 2014-2015 a effectué **un stage « longue durée »**, année de césure entre le M1 et le M2, en partenariat avec 3 laboratoires, l'EHESP à Paris, le CRC/Biogéosciences à Dijon et le LMA à Paris. Il a ainsi effectué plusieurs périodes au CRC/Biogéosciences.

Je suis également très régulièrement tutrice universitaire d'étudiants en **filière professionnelle, en L3 PRO GEVU et en M2 TMEC**. Loin du temps passé lors d'encadrements de stages de recherches en laboratoire, l'effet « volume » - **31 étudiants** suivis dont 8 au niveau Master 2 sur 8 ans- est tout de même à considérer sur la charge totale d'encadrement. Cela représente 2 à 3 étudiants à suivre chaque année en moyenne. Très ponctuellement, j'ai également encadré des stages au niveau Licence Générale, de courte durée (2 semaines en moyenne), 3 au total en 2008, 2014 et 2019. Enfin, j'ai eu l'occasion d'accueillir 3 collégiens en stage d'observation d'une durée d'une semaine au CRC/Biogéosciences en 2012, 2013 et 2017, respectivement. Ces stages sont à mon sens essentiels pour sensibiliser et faire découvrir le monde de la recherche aux plus jeunes.

Niveau	Master 2¹	Master 1²	Licence³	Filières Pro⁴
Durée de l'encadrement	4 à 6 mois	2 mois	2 semaines	Ponctuel
<i>Université de Bourgogne</i>				
2020-2021	1 (1)	3 (0)	-	4 (1)
2019-2020	-	-	-	2 (1)
2018-2019	2 (1)	3 (1)	1 (0)	3 (1)
2017-2018	3 (0)	-	-	4 (1)
2016-2017	1 (0)	1 (0)	-	7 (1)
2015-2016	1 (1)	-	-	-
2014-2015	1 (1)	4 (0)	-	-
2013-2014	1 (1)	-	1 (0)	3 (1)
2012-2013	1 (0)	-	-	4 (1)
2011-2012	2 (0)	-	-	4 (1)
2010-2011	1 (0)	-	-	-
2009-2010	1 (0)	-	-	-
<i>Université de Bordeaux 1</i>				
2008-2009	1 (1)	1 (0)	-	-
2007-2008	1 (1)	1 (0)	1 (0)	-
<i>Avant recrutement MCF</i>				
2005-2006	1 (0)	-	-	-
2004-2005	-	1 (0)	-	-

¹Nb total d'étudiants encadrés en M2 avec indication, entre parenthèses, du nb d'étudiants en Master extérieur à l'Université

²Nb total d'étudiants encadrés en M1 avec indication, entre parenthèses, du nb d'étudiants en Master extérieur à l'Université

³Nb total d'étudiants encadrés en cycle L avec indication, entre parenthèses, du nb d'étudiants extérieur à l'Université

⁴Nb total d'étudiants encadrés en tant que tuteur universitaire (stage professionnel en Licence professionnelle GEVU et en Master TMEC 2^{ème} année), avec indication, entre parenthèses, du nb d'étudiants au niveau Master

4.7 Références des stages de recherches encadrés et co-encadrés (x31)

- Zazza, O. (2021)**, La méthode Ombre-Soleil appliquée aux images Pléiades à Dijon : un pas vers la qualité de l'air à très haute résolution spatiale. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **100%**. Master *Sciences et Gestion de l'Environnement* 2^{ème} année, Faculté des Sciences et Techniques, Université Hassan II de Casablanca.
- Marion, S. (2021)**, Analyse de la pollution particulaire à Dijon métropole durant les confinements d'octobre 2020 à mai 2021 : Apport des mesures du réseau QameleO. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **100%**. Master *Sol Eau Milieux Environnement* 1^{ère} année, UFR Sciences de la Terre et des Planètes Environnement, Université de Bourgogne.
- Bayssari, A. (2021)**, Thermographie et qualité de l'air du quartier du Pont des Tanneries avant le projet « Eco-quartier ». Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : Y. Richard 50%/N. Martiny **50%**. Master *Transport Mobilité Environnement Climat* 1^{ère} année, UFR Sciences Humaines, Université de Bourgogne.
- Koutouan, R. (2021)**, Les méningites bactériennes en Côte d'Ivoire : analyse des cycles saisonniers et hypothèses sur l'influence du climat et des aérosols. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **100%**. Master *Transport Mobilité Environnement Climat* 1^{ère} année, UFR Sciences Humaines, Université de Bourgogne.
- Canovas, L. (2019)**, Les microcapteurs de particules en suspension à Dijon : études de sensibilité aux variables météorologiques. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **100%**. Master *Sol Eau Milieux Environnement* 2^{ème} année, UFR Sciences de la Terre et des Planètes Environnement, Université de Bourgogne.
- Hidane, M. (2019)**, La pollution particulaire Très Haute Résolution à Dijon : évaluation du potentiel de l'imagerie Pléiades. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) et ONERA-DOTA (Toulouse) : N. Martiny **80%** / X. Briottet 20%. Master *Sciences et Gestion de l'Environnement* 2^{ème} année, Faculté des Sciences et Techniques, Université Hassan II de Casablanca.
- Stellian, S. (2019)**, Evaluation des produits atmosphériques issus des réanalyses MACC en Afrique. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **50%**/P. Roucou 50%. Master *Transport Mobilités Environnement Climat* 1^{ère} année, UFR Sciences Humaines, Université de Bourgogne.
- Li, C. (2019)**, Evaluation des produits atmosphériques issus des réanalyses CAMS en Afrique. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **50%**/P. Roucou 50%. Master *Transport Mobilités Environnement Climat* 1^{ère} année, UFR Sciences Humaines, Université de Bourgogne.
- Mangata, L. (2019)**, Sensibilité de WRF_Chem aux modèles d'aérosols : simulation de l'événement de poussières de mars 2006 au Sahel. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : P. Roucou 60%/N. Martiny **20%**/J. Pergaud 20%. Master *Physique et physique numérique* 1^{ère} année, Université de Franche-Comté.
- Brenot, L. (2019)**, Classification des événements de poussières désertiques à Dédougou (Burkina Faso), minéralogie et hypothèses sur les sources. Encadrement : CRC/Biogéosciences et SEDS/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **40%**/P. Roucou 20%/J-F. Deconinck 40%. Licence 3^{ème} année *Science Vie Terre Environnement*, UFR Sciences de la Terre et des Planètes Environnement, Université de Bourgogne.
- Jouandanne, L. (2018)**, La qualité de l'air à Dijon vue par les microcapteurs de particules fines. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny 80%/M. Rega 20%. Master *Transport Mobilités Environnement Climat* 2^{ème} année, UFR Sciences Humaines, Université de Bourgogne.
- Niane, P.M. (2018)**, Les aérosols troposphériques lors des vagues de chaleur 2003-2014 au Sahel : apport des produits aérosols Deep Blue de MODIS? Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **50%**/P. Roucou 50%. Master *Sol Eau Milieux Environnement* 2^{ème} année, UFR Sciences de la Terre et des Planètes Environnement, Université de Bourgogne.

- Barraud, G. (2018)**, Caractérisation des saisons sèches dans les zones forestières d'Afrique Centrale : approche multi-base de données combinant télédétection et observations. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : P. Camberlin **70%**/N. Martiny **30%**. Master *Sol Eau Milieu Environnement* 2^{ème} année, UFR Sciences de la Terre et des Planètes Environnement, Université de Bourgogne.
- Niane, P.M. (2017)**, Les vagues de chaleur au Sahel, quel lien avec les poussières désertiques ? Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **50%**/P. Roucou **50%**. Master *Transport Mobilités Environnement Climat* 2^{ème} année, UFR Sciences Humaines, Université de Bourgogne.
- Niang, A. (2017)**, Les particules de poussières désertiques et la qualité de l'air au Sénégal. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **50%**/P. Roucou **50%**. Master *Transport Mobilités Environnement Climat* 1^{ère} année, UFR Sciences Humaines, Université de Bourgogne.
- Merzoug, F. (2016)**, Cartographie des concentrations de particules aérosols en Afrique de l'Ouest à partir des mesures par satellite. Encadrement Laboratoire d'Aérodologie (Toulouse) et CRC/Biogéosciences : J-F. Léon **80%**/N. Martiny **20%**. Master *Sciences de l'Océan, de l'Atmosphère et du Climat* 2^{ème} année, Observatoire Midi Pyrénées.
- Woringer, M. (2015)**. Influence des paramètres atmosphériques sur les méningites et les infections respiratoires à l'échelle de l'aire de santé. Encadrement EHESP (Paris), CRC/Biogéosciences (Dijon), LMA (Paris) : J. Mueller **40%**/N. Martiny **40%**/A. Bar-Hen **30%**. Ecole Normale Supérieure (Paris), diplômé du Master 1 *Ecologie-Biodiversité-Evolution* de l'UPMC. **Stage ENS longue durée (1 an)** avant l'entrée en Master 2, sur un projet de recherches libre, en partenariat Paris/Dijon avec des périodes d'accueil au CRC/Biogéosciences.
- Farion, M. (2015)**. Définition d'indices atmosphériques pour la prévisibilité des incidences de méningites au Mali. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **50%**/P. Roucou **50%**. Master *Transport Mobilités Environnement Climat* 1^{ère} année, UFR Sciences Humaines, Université de Bourgogne.
- Vairet, T. (2015)**, Définition d'indices atmosphériques pour la prévisibilité des incidences de méningites au Niger. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **50%**/P. Roucou **50%**. Master *Transport Mobilités Environnement Climat* 1^{ère} année, UFR Sciences Humaines, Université de Bourgogne.
- Drogrey, M. (2015)**, SIG et statistiques pour la détection et l'analyse des épidémies de méningites au Mali depuis les années 90. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **50%**/P. Roucou **50%**. Master *Transport Mobilités Environnement Climat* 1^{ère} année, UFR Sciences Humaines, Université de Bourgogne.
- Ndiaye, M. (2015)**, SIG et statistiques pour la détection et l'analyse des épidémies de méningites au Niger depuis les années 90. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **50%**/P. Roucou **50%**. Master *Transport Mobilités Environnement Climat* 1^{ère} année, UFR Sciences Humaines, Université de Bourgogne.
- Arab, N. (2014)**, Application des AOD Deep Blue de MODIS à l'étude des liens aérosols/méningites en Afrique de l'Ouest. Encadrement Laboratoire d'Optique Atmosphérique (Lille) et CRC/Biogéosciences (Dijon) : I. Chiapello **80%**/N. Martiny **20%**. Master 2^{ème} année en Physique, spécialité *Lumière-Matière*, Parcours international *Atmospheric Environment*, Université de Lille 1.
- Hébert, X. (2014)**, Les PM₁₀ à Dédougou : qu'est-ce qu'un événement de poussière ? Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **100%**. Licence 2^{ème} année *Science Vie Terre Environnement*, UFR Sciences de la Terre et des Planètes Environnement, Université de Bourgogne.
- Adde, A. (2013)**, Impact du climat sur les épidémies de méningite en Afrique de l'Ouest : diagnostic et apport du modèle climatique régional WRF. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **50%**/P. Roucou **50%**. Master *Geobiosphère* 2^{ème} année, UFR Sciences Vie Terre Environnement, Université de Bourgogne.

- Fluck, E. (2012)**, Influence du climat sur la variabilité interannuelle des épidémies de méningite au Burkina Faso. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : N. Martiny **50%**/P. Roucou **50%**. Master *Geobiosphère* 2^{ème} année, UFR Sciences Vie Terre Environnement, Université de Bourgogne.
- Emery, J. (2012)**, La qualité de l'air liée au transport routier en milieu urbain : analyse des concentrations en oxydes d'azote sur l'agglomération dijonnaise. Encadrement CRC/Biogéosciences et ThéMa (Dijon): N. Martiny **40%**/Y. Richard **40%**/T. Thevenin **20%**. Master *Transport Mobilités Environnement Climat* 2^{ère} année, UFR Sciences Humaines, Université de Bourgogne.
- Blais, A. (2011)**, Etude de l'impact des grands modes de variabilité climatique en Afrique sur les trente dernières années à travers les données de télédétection de l'activité photosynthétique de la végétation. Encadrement CRC/Biogéosciences(Dijon) : N. Philippon **80%**/N. Martiny **20%**. Master *Geobiosphère* 2^{ème} année, UFR Sciences Vie Terre Environnement, Université de Bourgogne.
- Doll, D. (2010)**, Vulnérabilité des forêts de douglas du Morvan face au changement climatique : l'expérience de 2003. Encadrement CRC/Biogéosciences (Dijon) : Y. Richard **40%**/T. Castel **40%**/N. Martiny **20%**. Master *Geobiosphère* 2^{ème} année, UFR Sciences Vie Terre Environnement, Université de Bourgogne.
- Hu, G. (2009)**, Analyse et quantification des vitesses de déplacement des fronts turbides dans le panache de l'Adour à partir des données du capteur satellite MODIS. Encadrement : EPOC (Bordeaux) : N. Martiny **100%**. Master *Géoréssources, Géorisques et Géotechnique* 2^{ème} année, Université de Bordeaux 3.
- Laugier, S. (2009)**, Analyse de la « couleur de l'eau » à partir de mesures optiques acquises à bord d'un jet-ski en avril 2008 dans le cadre du programme ECORS. Validation des données du capteur satellite haute résolution FORMOSAT-2 dans la zone du bassin d'Arcachon. Encadrement EPOC (Bordeaux) : N. Martiny **100%**. Master *Environnement, Océanographie Littorale et Hauturière* 1^{ère} année, UFR Sciences de la Terre et de la Mer, Université de Bordeaux 1.
- Thomas, N. (2008)**, Apport de la télédétection spatiale dans l'étude du lien entre les aérosols désertiques et les épidémies de méningites en Afrique de l'Ouest dans le cadre du programme AMMA. Encadrement EPOC (Bordeaux)/Laboratoire d'Optique Atmosphérique (Lille) : N. Martiny **80%**/I. Chiapello **20%**. Master *Géoréssources, Géorisques et Géotechnique* 2^{ème} année, Université de Bordeaux 3.
- Raffenne, G. (2008)**, Analyse de la « couleur de l'eau » et sa variabilité spatio-temporelle en Aquitaine à partir de l'imagerie SeaWiFS. Encadrement EPOC (Bordeaux) : N. Martiny **100%**. Master *Environnement, Océanographie Littorale et Hauturière* 1^{ère} année, UFR Sciences de la Terre et de la Mer, Université de Bordeaux 1.
- Jacques, J. (2008)**, Réalisation de mesures optiques aérosols autour du bassin d'Arcachon avec un photomètre portable. Encadrement EPOC (Bordeaux) : N. Martiny **100%**. Licence *Science Terre Environnement* 2^{ème} année, UFR Sciences de la Terre et de la Mer, Université de Bordeaux 1.
- Marteau, R. (2006)**, Sensibilité de la relation Précipitations-NDVI (1981-1999) aux états de surfaces continentaux sur l'ouest du plateau sud-africain. Encadrement CRC (Dijon) : Y. Richard **50%**/N. Martiny **50%**. Master *Geobiosphère* 2^{ème} année, UFR Sciences Vie Terre Environnement, Université de Bourgogne.
- Marteau, R. (2005)**, Dynamique saisonnière moyenne (1981-1999) du NDVI sur l'ouest du plateau sud-africain et relation avec la pluviométrie. Encadrement CRC (Dijon) : Y. Richard **50%**/N. Martiny **50%**. Master *Geobiosphère* 1^{ère} année, UFR Sciences Vie Terre Environnement, Université de Bourgogne.

5. Production scientifique

5.1 Articles parus dans des revues à comité de lecture (x29 dont 4 francophones)

- Zaatour, W., N. Marilleau, P. Giraudoux, N. Martiny, A. Ben Haj Amara, S. Ben Miled (2021).** An agent-based model of a cutaneous leishmaniasis reservoir host, *Meriones shawi*, *Ecological modeling*, 443, pp. 109455, Doi:10.1016/j.ecolmodel.2021.109455.
- Léon, J-F., N. Martiny, S. Merlet (2020).** A multi linear regression model to derive dust PM10 in the Sahel using AERONET Aerosol Optical Depth and CALIOP aerosol layer products, *Remote sensing*, 12, 3099, doi:10.3390/rs12183099.
- Emery, J., N. Marilleau, N. Martiny, T. Thevenin (2020).** The SCAUP model : multi-agent simulation from Urban sensors for traffic air pollution, *Cybergeo : European Journal of Geography, Systèmes Modélisation, Géostatistiques*, 944, <https://journals.openedition.org/cybergeo/34767>.
- Camberlin, P., G. Barraud, S. Bigot, O. Dewitte, F. Makanzu Imwangana, J. C. Maki Mateso, N. Martiny, E. Monsieurs, V. Moron, T. Pellarin, N. Philippon, M. Sahani, G. Samba (2019).** Evaluation of remotely sensed rainfall products over Central Africa, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Doi :10.1002/qj.3547.
- Woringer, M., N. Martiny, S. Porgo, B. W. Bicaba, A. Bar-Hen, J.E. Mueller (2018).** Atmospheric Dust, Early Cases, and Localized Meningitis Epidemics in the African Meningitis Belt: An Analysis Using High Spatial Resolution Data. *Environmental Health Perspectives*, 126, 9, <https://doi.org/10.1289/EHP2752>.
- Bru, L., B. Lubac, C. Normandin, A. Robinet, M. Leconte, O. Hagolle, N. Martiny, C. Jamet (2017).** Atmospheric correction of multi-spectral littoral images using a PHOTONS/AERONET-based regional aerosol model. *Remote Sensing*, 9, 814, <https://doi.org/10.3390/rs9080814>.
- Mueller, J., M. Woringer, S. Porgo, Y. Madec, H. Tall, N. Martiny, B. W. Bicaba (2017).** The association between respiratory tract infection incidence and localised meningitis epidemics: an analysis of high-resolution surveillance data from Burkina Faso. *Scientific Report*, 7, 11570, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11889-4>.
- Agier, L., N. Martiny, O. Thiongane, J. E. Mueller, J. Paireau, E. R. Watkins, T. J. Irving, T. Koutangni, H. Broutin (2017).** Towards understanding the epidemiology of *Neisseria meningitidis* in the African meningitis belt: a multi-disciplinary overview. *International Journal of Infectious Disease*, 54, 103-112.
- Philippon, N., B. de Lapparent, V. Gond, G. Sèze, N. Martiny, P. Camberlin, G. Cornu, B. Morel, V. Moron, S. Bigot, T. Brou, V. Dubreuil (2016).** Analysis of the diurnal cycles for a better understanding of the mean annual cycle of forests greenness in Central Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 223, 81-94, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.04.005>.
- Philippon, N., N. Martiny, P. Camberlin, M. T. Hoffman, V. Gond (2014).** Timing and patterns of ENSO signal in Africa over the last 30 years: insights from Normalized Difference Vegetation Index data. *J. of Climate*. Doi: 10.1175/JCLI-D-13-00365.1.
- Martiny, N., I. Chiapello (2013).** Assessments for the impact of mineral dust on the meningitis incidence in West Africa. *Atmospheric Environment*, 70:245-253.
- Deroubaix, A., N. Martiny, I. Chiapello, B. Marticorena (2013).** Suitability of OMI to reflect mineral dust surface conditions: preliminary application for studying the link with meningitis epidemics in the Sahel. *Remote Sensing of Environment*, 133, 116-127.
- Agier, L., A. Deroubaix, N. Martiny, P. Yaka, A. Djibo, H. Broutin (2013).** Seasonality of meningitis in Africa and climate forcing : aerosols stand out. *Journal of the Royal Society Interface*. Doi:10.1098/rsif.2012.0814.
- Martiny, N., N. Dessay, P. Yaka, O. Toure, B. Sultan, S. Rebaudet, H. Broutin, R. Piarroux, I. Chiapello, I. Sagara, B. Fontaine, M. Sissoko, I. Jeanne, O. Doumbo, J. Gaudart (2012).** Climate as a risk factor for health in West Africa. *La Météorologie, Spécial AMMA*, 73-79.

- Eymard, L., C. Baron, G. Caniaux, C. Flamant, L. Kergoat, F. Karbou, J-A. Ndione, T. Pellarin, N. Martiny, J. Ramarohetra, E. Vintrou, R. Roca (2012).** Use of space observation in the AMMA program. *La Météorologie, Spécial AMMA*, 80-99.
- Richard, Y., N. Martiny, M. Rouault, N. Philippon, Y. Tracol, T. Castel (2012).** Multi-month memory effects on early summer vegetative activity in semi-arid South Africa and their spatial heterogeneity. *International Journal of Remote Sensing*, 33(21), 6763-6782.
- Djoufack, V., B. Fontaine, N. Martiny, M. Tsalefac (2012).** Climatic and demographic determinants of vegetation cover in northern Cameroon. *International Journal of Remote Sensing*, 33(21), 6904-6926.
- Dehouck, A., V. Lafon, N. Sénéchal, J-M. Froidefond, R. Almar, B. Castelle, N. Martiny (2012).** Evolution morphodynamique interannuelle du littoral sud de la Gironde. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 197, 31-42.
- Martiny, N., N. Philippon, Y. Richard, P. Camberlin, C. Reason (2009).** Predictability of NDVI in semi-arid African regions. *Theoretical and Applied Climatology*.
Doi: 10.1007/s00704-009-0223-9.
- Dehouck, A., N. Martiny, J.M. Froidefond, N. Sénéchal, S. Bujan (2009).** New outcomes from spatial remote sensing during the ECORS experiment : towards validation of ocean color products and large-scale bathymetry mapping in a coastal zone. *Journal of Coastal Research*, SI 56, 1756-1760.
- Richard, Y., N. Martiny, N. Fauchereau, C. Reason, M. Rouault, N. Vigaud, Y. Tracol (2008).** Interannual memory effects for spring NDVI in semi-arid South Africa. *Geophysical Research Letters*, **35**, L13704. Doi :10.1029/2008GL034119.
- Philippon, N., N. Martiny, P. Camberlin (2008).** Forecasting the vegetation photosynthetic activity over the Sahel : a Model Output Statistics Approach. *International Journal of Climatology*. Doi. 10.1002/joc.1797.
- Camberlin, P., N. Martiny, N. Philippon, Y. Richard (2007).** Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa. *Remote Sensing of Environment*, 106(2), 199-216.
- Philippon, N., L. Jarlan, N. Martiny, P. Camberlin, E. Mougin (2007).** Characterization of the interannual and intraseasonal variability of West African vegetation between 1982-2002 by means of NOAA-AVHRR NDVI data. *Journal of Climate*, 20(7), 1202-1218.
- Martiny N., P. Camberlin, Y. Richard, N. Philippon (2006).** Compared regimes of NDVI and rainfall in semi-arid regions of Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 27(23), 5201-5223.
- Martiny N., R. Frouin, R. Santer (2005b).** Radiometric calibration of SeaWiFS in the near infrared. *Applied Optics*, 44(36), 7828-7844.
- Martiny N., R. Santer, I. Smolskaia (2005a).** Vicarious calibration of MERIS over dark waters in the near infrared. *Remote Sensing of Environment*, 94(4), 475-490.
- Martiny N., Y. Richard, P. Camberlin (2005c).** Interannual persistence effects in vegetation dynamics of semi-arid Africa. *Geophysical Research Letters*, **32**(24), L24403. Doi:10.1029/2005GL024634.
- Santer R., N. Martiny (2003).** Sky radiance measurements for ocean-color calibration-validation. *Applied Optics*, 42(6), 896-907.

5.2 Article soumis (x1)

- Woringer, M., S. Porgo, C. Fermanian, N. Martiny, J. Mueller (2021),** High Spatial resolution epidemic surveillance of bacterial meningitis in the African meningitis belt in Burkina Faso, *Scientific Report*, **submitted**.

5.3 Articles dans des actes de congrès internationaux avec comité de lecture (x22 dont 5 francophones)

- Martiny, N., J-F. Léon, P. Roucou, J. E. Mueller, H. Broutin (2018).** Tele-epidemiology : general approach and specific case of meningitis in Africa. *World Committee on Space Research. COSPAR 2018 : From the Center of the Earth to the Edge of the Universe*. Chap. Earth System, p. 24-25.
- Martiny, N., P. Roucou, B. Pohl, P. Camberlin, I. Chiapello (2015).** Definition of a Sahelian desert dust event based on new PM₁₀ measurements in Burkina Faso. *28ème colloque de l'Association Internationale de la Climatologie*, Liège, Belgique, 1-4 juillet 2015.
- Martiny, N., P. Roucou (2014).** Climate and health in West Africa : Regional dust modeling for meningitis. *27ème colloque de l'Association Internationale de la Climatologie*, Dijon, France, 2-5 juillet 2014, <http://www.aic2014.com/>.
- Emery, J., N. Marilleau, T. Thevenin, N. Martiny (2014).** Du comptage ponctuel à l'affectation par simulation multi-agents : application à la circulation routière de la ville de Dijon. *Conférence internationale annuelle SAGEO (Spatial Analysis and GEomatics, Grenoble, France, 24-27 novembre 2014.*
- Larouche, P., B. Ricard, N. Martiny, J-M. Froidefond (2010),** The use of spectral derivatives to measure suspended matter concentration in estuarine and coastal waters from multispectral sensors. *The 4th Oceans from Space proceedings*, https://www.researchgate.net/publication/256411240_The_use_of_spectral_derivatives_to_measure_suspended_matter_concentration_in_estuarine_and_coastal_waters_from_multispectral_sensors
- Doll, D., T. Castel, N. Martiny, Y. Richard, D. Thévenin (2010),** Vulnérabilité des forêts de Douglas du Morvan face au changement climatique : l'expérience de 2003. *23ème colloque de l'Association Internationale de la Climatologie*, Rennes, France, 1-4 septembre 2010.
- Schmeltz, M., J.-M. Froidefond, F. Jourdain, N. Martiny (2009).** IOP from reflectance measurements to obtain the K_d coefficient: application to the Gabon and Congo coastal waters. In : *Ocean Remote Sensing: Methods and Applications*, edited by Robert J. Frouin, *Proceedings of SPIE*, 7459 (SPIE, Bellingham, WA 2009), 74590A. Doi:10.1117/12.828851, <http://spie.org/x574.xml>.
- Martiny, N., A. Dehouck, J-M. Froidefond, N. Sénéchal (2008).** Ocean color measurements onboard a jet-ski : consistency for calval exercise of high-resolution satellite imagery? In : *Remote Sensing of Inland, Coastal, and Oceanic Waters*, edited by Robert J. Frouin, Serge Andrefouet, Hiroshi Kawamura; Mervyn J. Lynch; Delu Pan; Trevor Platt, *Proceedings of SPIE*, 7150 (SPIE, Bellingham, WA 2008), 71501Q. Doi:10.1117/12.805382, <http://spie.org/x574.xml>.
- Philippon, N., N. Martiny, P. Camberlin, Y. Richard (2008).** Impact des précipitations sur l'activité photosynthétique de la végétation en Afrique semi-aride sub-saharienne. *Actes des Journées de Climatologie*, Nantes, France, 13-14 mars 2008, p. 77-90.
- Dehouck, A., N. Martiny, J.-M. Froidefond, N. Sénéchal (2008).** In-Water Reflectance Spectra Measured On Board a Jet-Ski Across a Complex Nearshore Zone of Case-2 Waters during the ECORS Experiment. In : *Ocean Optics XIX*, Barga, Italy, 6-10 Oct. 2008, *Proceedings on CD*.
- Martiny, N., I. Chiapello, B. Sultan, B. Fontaine (2007).** Les aérosols désertiques, un facteur potentiel des épidémies des méningites en Afrique de l'Ouest. *Santé-Décision-Management*, Vol. 10/3-4 – 2007, pp. 31-39. Doi:10.3166/sas.10.3-4.31-39.
- Martiny, N., R. Frouin, R. Santer (2004).** In-orbit calibration of SeaWiFS in the near infrared. In : *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VII*, edited by Joan B. Lurie; Roland Meynart; Michelle L. Aten; Steven P. Neeck; Haruhisa Shimoda, *Proceedings of SPIE*, 5234 (SPIE, Bellingham WA 2004), 445-455. Doi: 10.1117/12.511446, <http://spie.org/x574.xml>.
- Santer, R., N. Martiny, F. Cabot (2004).** Two different approaches to achieve vicarious calibration without a priori on the aerosol model : application to SPOT5 over the test site of La Crau. In : *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VII*, edited by Joan B. Lurie; Roland Meynart; Michelle L. Aten; Steven P. Neeck; Haruhisa Shimoda, *Proceedings of SPIE*, 5234 (SPIE, Bellingham, WA 2004), 456-467. Doi: 10.1117/12.512706, <http://spie.org/x574.xml>.

- Bokoye, A. I., R. Santer, N. Martiny, J. Vidot, X. Meriaux (2004).** Evaluation of Junge Power Law as a tool for atmospheric correction validation. In : *Remote Sensing of Clouds and the atmosphere VIII*, edited by Klaus P. Schaefer, Adolfo Comeron, Michel R. Carleer, Richard H. Picard, *Proceedings of SPIE*, 5235 (SPIE, Bellingham, WA 2004), 67-78. Doi:10.1117/12.510828, <http://spie.org/x574.xml>.
- Martiny, N., R. Santer, I. Smolskaia, A. I. Bokoye (2004).** In-orbit calibration of MERIS in the near infrared. In : *Working meeting on MERIS and AATSR Calibration and Geophysical Validation (MAVT)*, ESA, Frascati, Italy, 20-24 October 2003, *Proceedings on CD* (ESA Publications Division, ESTEC, P.O. Box 299, 2200 AG Noordwijk, The Netherlands).
- Santer, R., N. Martiny, F. Cabot (2004).** Vicarious calibration of MERIS over La Crau, France. In : *Working meeting on MERIS and AATSR Calibration and Geophysical Validation (MAVT)*, ESA, Frascati, Italy, 20-24 October 2003, *Proceedings on CD* (ESA Publications Division, ESTEC, P.O. Box 299, 2200 AG Noordwijk, The Netherlands).
- Richard, Y., N. Martiny, R. Marteau, P. Oettli, P. Camberlin, T. Castel (2003),** Utilisation d'ensembles de simulations climatiques sur Modèles de Circulation Générale de l'Atmosphère : concepts, méthodes et applications à la climatologie de l'espace Sud-Africain. *Actes des 8èmes rencontres Théoquant*, pp. 4.
- Martiny, N., R. Santer (2003).** Validation of the standard aerosol models used in the atmospheric correction algorithms over coastal waters. In : *Ocean Remote Sensing and Applications*, edited by Robert J. Frouin, Yeli Yuan, Hiroshi Kawamura, *Proceedings of SPIE*, 4892 (SPIE, Bellingham WA 2003), 557-565. Doi: 10.1117/12.467290, <http://spie.org/x574.xml>.
- Santer, R., N. Martiny (2003).** Validation of the water leaving radiances retrieved by SeaWiFS over coastal waters. In : *Ocean Remote Sensing and Applications*, edited by Robert J. Frouin, Yeli Yuan, Hiroshi Kawamura, *Proceedings of SPIE*, 4892 (SPIE, Bellingham WA 2003), 205-214. Doi: 10.1117/12.467307, <http://spie.org/x574.xml>.
- Martiny, N., R. Santer, J. Vidot (2003).** Validation of the SeaWiFS atmospheric correction over coastal waters. *Ocean Optics XVI*, Santa Fe, Nouveau Mexique, 18-22 novembre 2002, *Proceedings sur CD-rom*.
- Martiny, N., R. Santer (2002).** Atmospheric corrections over coastal waters for SeaWiFS : validation using ground-based measurements. In : *Ocean Optics: Remote Sensing and Underwater Imaging*, edited by Robert J. Frouin, Gary D. Gilbert, *Proceedings of SPIE*, 4488 (SPIE, Bellingham, WA 2002), 184-194. Doi: 10.1117/12.452824, <http://spie.org/x574.xml>.
- Martiny, N., J-C. Roger, R. Santer (2001).** SeaWiFS atmospheric corrections over coastal waters : creation of an aerosol climatology over the Venice site. In : *International Radiation Symposium (IRS)*, St Petersburg, Russia, 24-29 July 2000, *Proceedings of IRS*, 973-976.

5.4 Chapitres d'ouvrage à visée internationale (x2)

- Tompkins, A. M., R. Lowe, H. Nissan, N. Martiny, P. Roucou, M. C. Thomson, T. Nakasawa (2019).** Predicting climate impacts on health at sub-seasonal to seasonal timescales. *Sub-seasonal to Seasonal Prediction: The Gap Between Weather and Climate Forecasting*, Elsevier, Editor(s): A Robertson, F Vitart. Chap. 22, 455-477, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811-714-9.00022-X>.
- Emery, J., J. Dudek, L. Granjon, B. Pohl, Y. Richard, T. Thevenin, N. Martiny (2018).** Characterizing Urban Morphology for Urban Climate Simulation Based on a GIS Approach. *QGIS and applications in Territorial Planning*, Wiley Online Library, Editor(s): N Baghdadi, C Mallet, M Zribi. Chap. 3, 53-91, <https://doi.org/10.1002/9781119457121.ch3>.

5.5 Communications et posters dans des conférences internationales (x47 dont 5 conférences invitées et 1 Key-Note)

Roucou, P., B. Pohl, N. Martiny, A. Ullmann, Durée et sévérité des vagues de chaleurs dans les simulations CMIP5 (RCP4.5 et 8.5) en Afrique de l'Ouest. *Colloque de restitution finale de l'ANR ACASIS, Dakar, Sénégal*, octobre 2018, Poster.

Léon, J-F., N. Martiny, I. Chiapello, B. Marticorena, New insight from the CALIPSO mission on the retrieval of dust surface concentration in Western Africa. *European Aerosol Conference*, Tours, France, 4-9 septembre 2016, Oral.

Philippon, N., B. de Lapparent, V. Gond, S. Bigot, T. Brou, P. Camberlin, G. Cornu, V. Dubreuil, N. Martiny, B. Morel, V. Moron, G. Sèze, Keys to understanding the seasonal signal of rainforest photosynthetic activity in Central Africa. *Our Common future under Climate Change*, Paris, France, 7-10 juillet 2015, Poster.

Martiny, N., Dust versus climate variables as determinants of the onset of the meningitis outbreaks in Niger, Mali and Burkina Faso. *3rd Iberian Meeting on Aerosol Science and Technology (RICTA)*, Elche, Spain, 29 June- 1 July, 2015, Oral. **Conférence invitée.**

Martiny N., P. Roucou, B. Pohl, P. Camberlin, I. Chiapello, Definition of a Sahelian desert dust event based on new PM₁₀ measurements in Burkina Faso. *28ème colloque de l'Association Internationale de la Climatologie*, Liège, Belgique, 1-4 juillet 2015, Poster. **Acte avec revues.**

Martiny, N., Remote sensing and regional climate modeling for the health surveillance in West Africa. *CoMMISCO 2014 : Conférence sur la Modélisation Mathématique et Informatique des Systèmes Complexes*, Campus IRD Nord-France, 13-15 octobre 2014, Oral. **Conférence invitée.**

Emery, J., N. Marilleau, T. Thevenin, N. Martiny, Du comptage ponctuel à l'affectation par simulation multi-agents : application à la circulation routière de la ville de Dijon, *Conférence internationale annuelle SAGEO (Spatial Analysis and GEomatics)*, Grenoble, France, 24-27 novembre 2014, Oral. **Acte avec revues.**

Léon, J-F., N. Martiny, I. Chiapello, H. Broutin, S. Merlet, Impact of mineral dust on the meningitis incidence in West Africa: what can bring the CALIPSO mission? *13th IGAC science conf. on Atmospheric Chemistry*, Natal, Brésil, 22-26 sep. 2014, Poster.

Martiny, N., P. Roucou, Climate and health in West Africa : Regional dust modeling for meningitis. *27ème colloque de l'Association Internationale de la Climatologie*, Dijon, France, 2-5 juillet 2014, Poster. **Acte avec revues.**

Martiny, N., P. Roucou, I. Chiapello, A. Favre, S. Merlet, A. Adde, H. Broutin, Mineral dust as a key determinant in the onset and the development of the bacterial meningitis outbreaks in Africa. *DUST 2014 : Int. Conference on ATMOSPHERIC DUST*, Castellana Marina (TA), Italie, 1-6 Juin 2014, Oral, **Key-note.**

Martiny, N., Assessments for the impact of mineral dust on the meningitis incidence in West Africa, *QWECY final project meeting*, Barcelone, Espagne, 16-18 mai 2013, Oral. **Conférence invitée.**

Martiny, N., H. Broutin, L. Agier, A brief overview on the meningitis belt definitions and its climate determinants as identified in the literature. *Mini-MERIT : Multidisciplinary Approach for Meningitis Epidemiology and Modeling in Africa (MAMEMA-III)*, 18-21 juin 2013, Paris, France, Oral. **Conférence invitée.**

Emery, J., N. Marilleau, J. Boyard-Micheau, T. Thevenin, N. Martiny, Exploitation of traffic counting data for traffic study in urban areas. *European Colloquium of Theoretical and Quantitative Geography 2013*, Dourdan, France, 5-9 septembre 2013, Oral.

Deroubaix, A., N. Martiny, Statistical modeling of the weekly meningitis incidence based on climate and dust. *Mini-MERIT : Multidisciplinary Approach for Meningitis Epidemiology and Modeling in Africa (MAMEMA-III)*, 18-21 juin 2013, Oral.

Agier, L., A. Deroubaix, N. Martiny, P. Yaka, A. Djibo, H. Broutin, Seasonality of meningitis in Africa and climate forcing, *6th international MERIT technical meeting*, Accra, Ghana, 27-28 novembre 2012, Oral.

- Martiny, N., I. Chiapello, H. Broutin, A. Deroubaix, L. Agier, B. Sultan, P. Yaka, I. Jeanne, B. Fontaine, B. Marticorena**, Advances in research on the relationships between climate, dust and meningococcal meningitis epidemics in West Africa in the AMMA frame. *4th AMMA International Conference*, Toulouse, France, 2-6 juillet 2012, Oral.
- Favre, A., N. Martiny, A. Ullmann, A. Deroubaix**, Harmattan dust events over the Western Sahel : synoptic analysis. *4th AMMA International Conference*, Toulouse, France, 2-6 juillet 2012, Oral.
- Yaka, P., B. Sultan, F. Tarbangdo, H. Broutin, S. Janicot, W. Thiaw, N. Martiny**, Predictability and control of Meningococcal Meningitis in African Sahelo-Soudanian countries by using climate. *4th AMMA international Conference*, Toulouse, France, 2-6 juillet 2012, Oral.
- Pohl, B., J. Ramarohetra, B. Sultan, A. Diedhiou, G. de Coetlogon, S. Janicot, N. Martiny, A. Favre, A. Deroubaix, B. Fontaine**, Downscaling West African climate : a perspective for impact studies. *4th AMMA international Conference*, Toulouse, France, 2-6 juillet 2012, Oral.
- Pohl, B., J. Ramarohetra, B. Sultan, A. Diedhiou, G. de Coetlogon, S. Janicot, N. Martiny, A. Favre, B. Fontaine**, Downscaling West African climate : uncertainties, sensitivity to the model physics, and regional variability. *4th AMMA international Conference*, Toulouse, France, 2-6 juillet 2012, Poster.
- Deroubaix, A., N. Martiny, B. Marticorena, I. Chiapello**, The use of the remotely sensed Aerosol Index for mineral dust impact study on the meningitis epidemics over West Africa. *Mini-MERIT : Multidisciplinary Approach for Meningitis Epidemiology and Modeling in Africa (MAMEMA-III)*, 03-04 avril 2012, Oral.
- Deroubaix, A., N. Martiny, I. Chiapello, B. Marticorena**, Remote sensing of desert dust aerosols over the Sahel: potential use for health impact studies. *European Geophysical Union*, Vienne, Autriche, 22-27 avril 2012, Poster.
- Martiny, N.**, The climate/dust/meningitis relationships : a review of the AMMA-France phase-I, and prospective, *Mini-MERIT : Multidisciplinary Approach for Meningitis Epidemiology and Modeling in Africa (MAMEMA-III)*, 03-04 avril 2012, Oral.
- Martiny, N., I. Chiapello, B. Marticorena, H. Broutin, A. Deroubaix, P. Yaka, B. Sultan, B. Fontaine**, A multidisciplinary research group in the AMMA frame : Impacts of climate and mineral dust on meningitis outbreaks in West Africa. *Mini-MERIT : Multidisciplinary Approach for Meningitis Epidemiology and Modeling in Africa (MAMEMA-II)*, 19-21 avril 2011, Oral.
- Deroubaix, A., N. Martiny, I. Chiapello**, The use of aerosol remote sensing data sets for health impacts studies. *Mini-MERIT : Multidisciplinary Approach for Meningitis Epidemiology and Modeling in Africa (MAMEMA-II)*, 19-21 avril 2011, Oral.
- Broutin, H., N. Martiny, J. E. Mueller et al.**, Presentation of the mini-MERIT group. *MERIT Strategic Review meeting*, 10-11 November 2011, Chavannes-de-Bogis, Suisse, Oral.
- Deroubaix, A., N. Martiny, I. Chiapello**, The use of aerosol remote sensing data sets for health impacts studies, *EGU general assembly 2011 (European Geosciences Union)*, Vienna, Austria, avril 2011, Oral.
- Martiny, N., I. Chiapello, B. Marticorena, I. Jeanne, A. Deroubaix, H. Broutin, L. Agier, C. Liousse, E. Garnier, F. Courtin, B. Fontaine**, Advances in the analyses of the dust/climate and meningitis relationships based on a multidisciplinary approach, as part of the French AMMA program. *Mini-MERIT : Multidisciplinary Approach for Meningitis Epidemiology and Modeling in Africa (MAMEMA-I)*, 19-20 octobre 2010, Oral.
- Deroubaix, A., N. Martiny, I. Chiapello**, The use of remote sensing data sets for health impact studies in the frame of the ADCEM project. *4th International MERIT Technical meeting*, Addis Ababa, Ethiopie, 18-20 novembre 2010, Oral.
- Larouche, P., B. Ricard, N. Martiny, J-M. Froidefond**, The use of spectral derivatives to measure suspended matter concentration in estuarine and coastal waters from multispectral sensors. *The 4th Oceans from Space Conference*, 26-30 avril 2010, Oral. **Acte avec revues.**

- Doll, D., T. Castel, N. Martiny, Y. Richard, D. Thévenin**, Vulnérabilité des forêts de Douglas du Morvan face au changement climatique : l'expérience de 2003. *23ème colloque de l'Association Internationale de la Climatologie*, Rennes, France, 1-4 septembre 2010, Oral. **Acte avec Revues.**
- Martiny, N., I. Chiapello, I. Jeanne, B. Fontaine**, Advances in the analyses of dust/climate and meningitis relationships based on a multidisciplinary approach. *Third International AMMA conference*, Ouagadougou, Burkina Faso, 20-24 juillet 2009c, Oral.
- Martiny, N., B. Marticorena, I. Chiapello, B. Sultan, I. Jeanne, B. Fontaine, G. Bergametti, A. Deroubaix, S. Thiria, H. Broutin, P. Yaka, L. Menut, M. Legrand, H. Yahi, B. Chatenet, A. Niang, J-L. Rajot, C. Schmechtig, D. Khvorostiyannov**, The ADCEM project : Impacts of dust/climate on meningitis in the Sahel. *Third International MERIT Technical Meeting*, Niamey, Niger, 9-12 Novembre 2009b, Oral.
- Martiny, N., I. Chiapello, N. Thomas**, Relationships between dust aerosols and meningitis epidemics year-to-year variability in Burkina Faso, Niger and Mali on the recent time period 2004-2009, *Third International MERIT Technical Meeting*, Niamey, Niger, 9-12 Novembre 2009a, Poster.
- Dehouck, A., N. Martiny, J-M. Froidefond, N. Sénéchal, S. Bujan**, New outcomes from spatial remote sensing during the ECORS experiment : achieving validation of ocean color products and large-scale bathymetry mapping in coastal zone. *10th International Coastal Symposium*, Lisbonne, Portugal, 13-18 avril 2009, Poster.
- Martiny, N., I. Chiapello, B. Sultan, B. Fontaine**, Analysis of the relationships between climate/aerosols and meningitis epidemics in Western Africa. *Joint AMMA/ENSEMBLES Workshop*, Niamey, Niger, 26-30 mai 2008, Oral.
- Martiny, N., A. Dehouck, J-M. Froidefond, N. Sénéchal**, Ocean color experiments onboard a jet-ski : consistency for calval exercise of high-resolution satellite imagery. *SPIE Asia-Pacific remote sensing*, Noumea, Nouvelle-Calédonie, 17-21 novembre 2008, Poster.
- Martiny, N., I. Chiapello, B. Fontaine**, About the potential role of desert dust in the West African meningitis epidemics. *Second International AMMA conference*, Karlsruhe, Allemagne, 26-29 novembre 2007, 1 Oral et 1 Poster.
- Martiny, N., B. Fontaine, S. Louvet**, On the link between aerosols and meningitis in Western Africa. *AMMA and ENSEMBLES workshop : Impacts of Climate fluctuations and trends in West Africa*, Bamako, Mali, 26 Février – 02 mars 2007, Oral.
- Philippon, N., N. Martiny, P. Camberlin**, Variabilité et prévisibilité de l'état de la végétation (appréhendé par télédétection) en Afrique de l'Ouest. *Réduction de la vulnérabilité des systèmes naturels, économiques et sociaux en Afrique de l'Ouest face au changement climatique*, Ouagadougou, Burkina Faso, 2007, Oral.
- Martiny, N., P. Camberlin, Y. Richard, N. Philippon**, Interannual memory effects of vegetation in semi-arid Africa. *European Geophysical Union*, Vienne, Autriche, 02-07 avril 2006, Oral.
- Martiny, N., Y. Richard, R. Marteau, P. Oettli, P. Camberlin, T. Castel**, What controls the early summer greenness in semi-arid South Africa? *South African Society for Atm. Sciences Conference*, Bloemfontein, Afrique du Sud, 04-06 octobre 2006, Oral.
- Martiny, N., Y. Richard, N. Fauchereau, M. Rouault, N. Vigaud**, Interannual memory effects in vegetation dynamics of semi-arid South Africa. *South African Society for Atm. Sciences Conference*, Bloemfontein, Afrique du Sud, 04-06 octobre 2006, Poster.
- Martiny, N., R. Santer**, Validation of the standard aerosol models used in the atmospheric correction algorithms for satellite ocean observation. *European Geophysical Society*, Nice, France, 21-26 avril 2002, Poster.
- Martiny, N., J-C. Roger, R. Santer, G. Zibordi**, SeaWiFS atmospheric corrections over typical European coastal waters. *European Geophysical Society*, Nice, France, 25-29 avril 2000, Oral.
- Martiny, N., J-C. Roger, R. Santer, G. Zibordi**, Specificity of the atmospheric corrections over the European coastal waters. *European Geophysical Society*, La Haye, Pays-Bas, 19-23 avril 1999, Poster.

5.6 Communications et posters dans des conférences nationales (x15)

- Martiny, N., N. Dessay, V. Herbreteau, A. L. Tran**, Télé-épidémiologie: quelles approches? Quels résultats? *2ème colloque de restitution TOSCA du CNES*, Paris, France, 21-22 mars 2017, Oral.
- Martiny, N., J. Emery, X. Ceamanos, X. Briottet, N. Marilleau, T. Thevenin, J-F. Léon**, La qualité de l'air en ville à Très Haute Résolution : apport des images Pléiades dans la démarche SCAUP. *Futurmob'17 : Préparer la transition vers la mobilité autonome*, Montbéliard, France, 5-7 septembre 2017, Oral.
- Emery, J., N. Marilleau, N. Martiny, T. Thevenin**, La démarche de modélisation SCAUP: Simulation multi-agents à partir de capteurs urbains pour la Pollution atmosphérique automobile. *Futurmob'17 : Préparer la transition vers la mobilité autonome*, Montbéliard, France, 5-7 septembre 2017b, Oral.
- Diallo-Dudek, J., B. Lacaze, N. Martiny**, Ilôt de chaleur urbain en deux approches. *Futurmob'17 : Préparer la transition vers la mobilité autonome*, Montbéliard, France, 5-7 septembre 2017, Oral.
- Emery, J., N. Marilleau, N. Martiny, T. Thevenin, T. Nguyen-Huu, M. Ait Badram, A. Grignard, H. Hbdid, A. Laatabi, S. Toubhi**, Une simulation participative pour observer les émissions atmosphériques du trafic routier en milieu urbain. *13ème rencontre de TheoQuant*, Besançon, France, 18 mai 2017a, Oral.
- Martiny, N., P. Roucou, I. Chiapello, H. Broutin**, Dust influence on meningitis at the scale of the Belt. *Journées du programme AMMA-2 France*, Paris, France, 24-25 novembre 2015, Oral.
- Deroubaix, A., N. Martiny, B. Marticorena, I. Chiapello, S. Thiria, L. Agier, H. Broutin**, Impact des aérosols désertiques et du climat sur les épidémies de méningites au Sahel. *Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail*, Maison-Alfort, France, 05 novembre 2013, Oral.
- Martiny, N., B. Marticorena, I. Chiapello, A. Deroubaix, I. Jeanne, H. Broutin, L. Agier, C. Liousse, E. Garnier, F. Courtin, B. Fontaine**, Advances in the analyses of the dust/climate and meningitis relationships based on a multidisciplinary approach. *AMMA-France workshop*, Toulouse, France, 3-5 novembre 2010, Oral.
- Deroubaix, A., N. Martiny, I. Chiapello, B. Fontaine**, Validation des indices d'absorption aérosols du capteur satellite OMI pour les études d'impacts santé en Afrique de l'Ouest. *AMMA-France workshop*, Toulouse, France, 3-5 novembre 2010, Poster.
- Martiny, N., I. Chiapello, I. Jeanne, N. Thomas**, Relationships between dust aerosols and meningitis epidemics using satellite data sets. *Colloque du GDR « Météosat Seconde Génération – Acquisition en Temps réel, sur le thème : Les Satellites Grand Champ pour le suivi de l'environnement, des ressources naturelles et des risques*, Clermont-Ferrand, France, 21-22 janvier 2010, Oral.
- Martiny, N., Y. Richard, N. Philippon, P. Camberlin, C. Reason**, Predictability of NDVI in semi-arid African regions. *Colloque du GDR « Météosat Seconde Génération – Acquisition en Temps réel, sur le thème : Les Satellites Grand Champ pour le suivi de l'environnement, des ressources naturelles et des risques*, Clermont-Ferrand, France, 21-22 janvier 2010, Oral.
- Richard, Y., N. Martiny, M. Rouault, T. Castel**, Végétation de début de saison en Afrique du Sud semi-aride : effets mémoire et conditions environnementales. *Colloque du GDR « Météosat Seconde Génération – Acquisition en Temps réel, sur le thème : Les Satellites Grand Champ pour le suivi de l'environnement, des ressources naturelles et des risques*, Clermont-Ferrand, France, 21-22 janvier 2010, Oral.
- Dehouck, A., J-M. Froidefond, N. Martiny, V. Lafon, N. Sénéchal, S. Bujan**, Morphologie littorale et quantification des Matières en Suspension par une approche multi-capteurs. *Journées CNES jeunes chercheurs*, Toulouse, France, octobre 2008, Poster.
- Philippon, N., N. Martiny, P. Camberlin, Y. Richard**, Impact des précipitations sur l'activité photosynthétique de la végétation en Afrique semi-aride sub-saharienne. *Journées de Climatologie, Commission Climat-Sociétés*, Nantes, France, 13-15 mars 2007, Oral.

Martiny, N., I. Chiapello, B. Sultan, B. Fontaine, Les aérosols désertiques, un facteur potentiel des épidémies de méningites en Afrique de l'Ouest. *Colloque interdisciplinaire du programme MOUSSON*, Paris, France, 21-22 juin 2007, Oral.

5.7 Communications et posters dans des ateliers nationaux (x2) et régionaux (x6)

Hameau, D., N. Martiny, Y. Richard, A. Jegou, J. Pergaud, C. Cruz, B. Pohl, T. Thevenin, Comment FAIR.E métropole dans la ville Smart : de MUSTARDijon à QameleON, la construction d'un observatoire environnemental participatif. *Semaine DATA SHS, Maison des Sciences de l'Homme*, Campus de Dijon, Université de Bourgogne, France, 7-11 décembre 2020, Oral-vidéo.

Martiny, N. (au nom du consortium POPSU PURE : T. Thevenin, A. Volatier, Y. Richard, N. Marilleau, M. Rega, J. Pergaud, B. Pohl, J. Emery, T. Vairet, J. Diallo-Dudeck, L. Pillot, L. Granjon), POPSU Dijon, plateforme d'observation de Dijon Métropole : la ville durable à l'épreuve de la ville intelligente. *Journée Ville intelligente*, Lycée Hyppolite Fontaine, Dijon, 12 novembre 2019, Oral.

Martiny, N., J-F. Deconinck, P. Pellenard, L. Bruno, C. Bebane, Variabilité intra-saisonnière des dust pour la saison sèche 2013-2014 : acquisition des mesures de concentrations en PM₁₀ à Dédougou (Burkina Faso) et analyses minéralogiques. *Journées de l'Observatoire des Sciences de l'Univers THETA Franche-Comté/Bourgogne*, Besançon, France, 18 décembre 2014, Oral.

Restitution de projets.

Martiny, N., I. Chiapello, H. Broutin, P. Roucou, J. Mueller, C. Bebane, R. Belleville, B. Pauthier, A-J. Garane, P. Camberlin, B. Fontaine, Dust et méningites : acquisition des premières mesures de concentrations en PM₁₀ à Dédougou, Burkina Faso (saison sèche 2012-2013). *Journées de l'Observatoire des Sciences de l'Univers THETA Franche-Comté/Bourgogne*, Frasnay, France, 18 octobre 2013, Oral. **Restitution de projets.**

Castel, T., N. Martiny, Production et analyses d'images pour le climat. *Journée thématique Analyse d'images et animation (Anima)*, Dijon, France, 8 novembre 2010, Oral.

Martiny, N., I. Chiapello, B. Marticorena, I. Jeanne, B. Sultan, B. Fontaine, Avancées dans les analyses du lien entre aérosols/climat et méningites en Afrique de l'Ouest sur la base d'une approche pluridisciplinaire. *Journée des GT3.x de l'API-AMMA*, Paris, France, 26 juin 2009, Oral.

Martiny, N., N. Sénéchal, A. Sottolichio, Les passes du Bassin d'Arcachon : Hydrodynamique et transport sédimentaire. *Journées du Bassin d'Arcachon*, Arcachon, France, 26 mars 2009, Oral.

Martiny, N., N. Thomas, I. Chiapello, B. Fontaine, Quel rôle les aérosols terrigènes jouent-ils sur les épidémies de méningite en Afrique de l'Ouest ? Etudes de cas au Niger, Mali et Burkina Faso. *Journées bilan-prospectives AMMA-Impacts*, Paris, France, 16-17 septembre 2008, Oral.

Martiny, N., V. Lafon, J-M. Froidefond, N. Sénéchal, Projet d'implantation d'un CIMEL à Arcachon : un plus pour les données « couleur de l'eau ». *Journées du Bassin d'Arcachon*, Arcachon, France, 12 novembre 2007, Oral.

Lafon, V., N. Martiny, J-M. Froidefond, N. Sénéchal, Images satellites : Activités et programmes d'observation. *Journées du Bassin d'Arcachon*, Arcachon, France, 12 novembre 2007, Oral.

5.8 Rapports d'activités (x11)

- Martiny, N. (2021)**, Rapport d'activités du projet CNES Quali_ThR : Apport de la télédétection ThR Pléiades pour la qualité de l'air en ville. *Synthèse du projet.*
- Philippon, N., N. Martiny (2020)**. Rapport d'activités du projet CNES IHACA : Intrusions of Harmattan in northern Central Africa rainforests. *Synthèse de l'année 1.*
- Martiny, N. (2019c)**, Rapport d'activités du projet CNES IHACA : Apport de la télédétection ThR Pléiades pour la qualité de l'air en ville Intrusions of Harmattan in northern Central Africa rainforests. *Activités prévisionnelles.*
- Martiny, N. (2019b)**, Rapport d'activités du projet CNES Quali_ThR : Apport de la télédétection ThR Pléiades pour la qualité de l'air en ville. *Synthèse de l'année 1.*
- Martiny, N. (2019a)**, Rapport d'activités du projet CNES TELEPaF : Télédétection des Particules Fines pour les risques sanitaires en milieu rural africain. *Synthèse du projet.*
- Martiny, N. (2018)**, Rapport d'activités du projet CNES Quali_ThR : Apport de la télédétection ThR Pléiades pour la qualité de l'air en ville. *Activités prévisionnelles.*
- Martiny, N. (2017)**, Rapport d'activités du projet CNES TELEPaF : Télédétection des Particules Fines pour les risques sanitaires en milieu rural africain. *Synthèse année 1.*
- Martiny, N. (2016b)**, Rapport d'activités du projet CNES TELEPaF : Télédétection des Particules Fines pour les risques sanitaires en milieu rural africain. *Activités prévisionnelles.*
- Martiny, N. (2016a)**, Rapport d'activités du projet CNES TELEDM : Télédétection des Dust pour les Impacts Méningites en Afrique de l'Ouest. *Synthèse du projet.*
- Martiny, N. (2015)**, Rapport d'activités du projet CNES TELEDM : Télédétection des Dust pour les Impacts Méningites en Afrique de l'Ouest. *Synthèse de l'année 1.*
- Martiny, N. (2014)**, Rapport d'activités du projet CNES TELEDM : Télédétection des Dust pour les Impacts Méningites en Afrique de l'Ouest. *Activités prévisionnelles.*

5.9 Monographie

- Martiny, N. (2002)**, Validation des corrections atmosphériques : application au capteur SeaWiFS en milieu côtier, *Thèse de doctorat de l'Université du Littoral Côte d'Opale, Spécialité : Modélisation du transfert radiatif, Optique marine et télédétection*, p231.
<https://www.theses.fr/2002DUNK0071>

5.10 Récapitulatif des productions scientifiques

Le tableau ci-dessous résume le **nombre total d'articles parus** depuis la thèse (**ART_***) ainsi que le **nombre total de communications et posters (COM_*)**, par catégorie. Les couleurs représentent les périodes : gris pour la thèse, rose pour les post-doctorats, vert pour les postes de maîtresse de conférences à Bordeaux puis Dijon. Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de publications en 1^{er} et 2^{ème} auteur, respectivement.

Année	ART_ART ¹	ART_CFI ²	ART_CHP ³	COM_CFI ⁴	COM_CFN ⁵	COM_WHP ⁶
2021	1 (0,0)					
2020	2 (0,1)					1 (0,1)
2019	1 (0,0)		1 (0,0)			1 (1,0)
2018	1 (0,1)	1 (1,0)	1 (0,0)	1 (0,0)		
2017	3 (0,1)				5 (2,0)	
2016	1 (0,0)			1 (0,1)		
2015		1 (1,0)		3 (2,0)	1 (1,0)	
2014	1 (0,1)	2 (1,0)		5 (3,1)		1 (1,0)
2013	3 (1,1)			4 (2,1)	1 (0,1)	1 (1,0)
2012	5 (1,1)	3 (1,0)		9 (2,3)		
2011				4 (1,3)		
2010		2 (0,0)		4 (1,1)	5 (3,2)	1 (0,1)
2009	2 (1,1)	1 (0,0)		4 (3,1)		2 (2,0)
2008	2 (0,2)	3 (1,2)		2 (2,0)	1 (0,0)	1 (1,0)
2007	2 (0,1)	1 (1,0)		3 (2,1)	2 (1,1)	2 (1,1)
2006	1 (1,0)			3 (3,0)		
2005	3 (3,0)					
2004		5 (2,2)				
2003	1 (0,1)	4 (2,2)				
2002		1 (1,0)		1 (1,0)		
2001		1 (1,0)				
2000				1 (1,0)		
1999				1 (1,0)		

¹ART_ART : Nombre d'articles parus dans des revues à comité de lecture

²ART_CFI : Nombre d'articles dans des actes de congrès internationaux avec comité de lecture

³ART_CHAP : Nombre de chapitres d'ouvrage à visée internationale

⁴COM_CFI : Nombre de communications et posters dans des conférences internationales

⁵COM_CFN : Nombre de communications et posters dans des conférences nationales

⁶COM_WHP : Nombre de communications et posters dans des ateliers nationaux et régionaux

6. Synthèse quantitative

Production scientifique

Catégories	Total	1 ^{er} auteure	2 ^{ème} auteure	Avec étudiants
ART_ART ¹	29	7	11	7
ART_CFI ²	25	12	6	1
ART_CHP ³	2	0	0	1
COM_CFI ⁴	46	24	12	14
COM_CFN ⁵	15	7	4	7
COM_WHP ⁶	10	7	2	3

¹ART_ART : Nombre d'articles parus dans des revues à comité de lecture

²ART_CFI : Nombre d'articles dans des actes de congrès internationaux avec comité de lecture

³ART_CHAP : Nombre de chapitres d'ouvrage à visée internationale

⁴COM_CFI : Nombre de communications et posters dans des conférences internationales

⁵COM_CFN : Nombre de communications et posters dans des conférences nationales

⁶COM_WHP : Nombre de communications et posters dans des ateliers nationaux et régionaux

Projets de recherches

Catégories	Total	Responsable	Responsable WP	Participante
PROJ_INT ⁷	15	5	3	7
PROJ_NAT ⁸	8	4	0	4
PROJ_REG ⁹	4	0	3	1

⁷PROJ_INT : Les projets d'envergure internationale ou incluant des partenaires internationaux

⁸PROJ_NAT : Les projets d'envergure nationale

⁹PROJ_REG : Les projets d'envergure régionale

PI scientifique de stations et de réseaux de mesures et brevet/licence

Catégories	Total	PI	Co-PI
MES_INT ¹⁰	4	2	2
MES_FRA ¹¹	1	1 (2007-2012)	0
MES_REG ¹²	1	1	0
DI_LIC_MARQ ¹³	3	3	0

¹⁰MES_INT : Les stations ou réseaux de mesures implantées à l'international

¹¹MES_FRA : Les stations ou réseaux de mesures implantées en national

¹²MES_REG : Les stations ou réseaux de mesures implantées en régional

¹³DI_LIC_MARQ : Déclaration d'invention, Licence et Marque de QameleO (co-propriété UB/IRD)

Membre de commissions nationales, recrutements et évaluations

Catégories	Période
CNES TOSCA	2010-2019 : 3 mandats Groupe Surfaces Continentales
CNU Section 37	2014-2025 : 2 mandats dont l'un en tant que membre du bureau
EVAL_PROJ ¹⁴	9 (dont 4 internationaux)
EVAL_ART ¹⁵	15 (dans des revues anglophones)
RECRUTEMENTS	4 (1 ITRF, 2 MCF, 1 CIRAD)
JURYS THESE	6 (dont 4 extérieurs à l'Université de Bourgogne)
COMITE THESE	3 (dont 3 extérieurs à l'Université de Bourgogne)

¹⁴EVAL_PROJ : Evaluation de projets en dehors des commissions précédemment mentionnées

¹⁵EVAL_ART : Principales revues d'articles scientifiques

Animation scientifique en local, national et à l'international

Catégories	Total
SEJ_INVITES ¹⁶	4 (x2 Espagne, x1 Afrique du Sud, x1 Italie)
ANIMATION ¹⁷	7 (dont 1 école d'été, 1 exposition Gd Public et 1 colloque international)
VULGARIS ¹⁸	12 (dont 6 au niveau national)
ELUS ¹⁹	4 (au niveau local et national)
AUTRES ²⁰	8 (dont 4 entreprises, 1 association, 2 lycées, 1 collectivité)

¹⁶ SEJ_INVITES : Séjours en tant que chercheuse invitée et participation invitée lors d'événements

¹⁷ ANIMATION : Participation à l'animation scientifique du laboratoire, d'une école d'été, d'une exposition Grand Public et d'un colloque international francophone

¹⁸ VULGARIS : Actions de vulgarisation scientifique sous forme d'interviews pour presse écrite ou vidéos, participations à la Nuit Européenne des Chercheurs, Sciences en Fête, ou des événements d'ampleur nationale : COP21, Journée Nationale de l'Innovation en Santé par exemple

¹⁹ ELUS : Communications auprès d'élus, d'agents métropolitains et d'agences d'urbanismes

²⁰ AUTRES : Partenariats avec des associations autre que ATMO-BFC, sphère éducative, collectifs et monde privé

Enseignements

Catégories	Total	Master	Licence Générale	Licence Pro
SERVICE ²¹	270 h (240h)	33%	47%	20%
RESP_FORM ²²	2	-	2 (dont L3 > 2009)	-
RESP_UE ²³	7	2	4	1

²¹ SERVICE : Total correspond au service annuel moyen d'enseignements sur l'offre de formation 2017-2021 (entre parenthèse figure la moyenne de mon service depuis 2009), les % ont été calculés pour l'offre de formation 2017-2021

²² RESP_FORM : Responsabilités de formation

²³ RESP_UE : Responsabilités pédagogiques au sein des formations

Encadrements

Catégories	Total ²⁴	Taux d'encadrement ²⁵
Thèse	3 (2)	50% (2), 30% (1)
Master_2	17 (7)	100% (4), 80% (3), 50% (5), 40% (3), 30% (1), 20% (1)
Master_1	14 (1)	100% (4), 50% (9), 20% (1)
Licence	3 (0)	100% (2), 40% (1)
Filière Pro	31 (0)	10% (31)
Pdoc	1 (0)	100% (1)
IE/technicien	5 (1)	100% (1), 80%, (2), 50% (2)

²⁴ Le chiffre entre parenthèse indique le nombre d'étudiants ou de personnels à l'extérieur de l'Université de Bourgogne

²⁵ Le chiffre entre parenthèse indique le nombre d'étudiants ou de personnels encadrés à ce taux

Délégations CNRS, Prime et Prix

Catégories	Période
Délégation CNRS	1 an + 1 semestre en 2014-2015. Section 19.
PES ²⁶	5 ans de 2010 à 2014 (PEDR non demandée depuis)
PEE ²⁷	2015 (prix collectif attribué au Département de Géographie)

²⁶ PES : Prix d'Excellence Scientifique, examiné en national par le CNU Section 37

²⁷ PEE : Prix d'Excellence en Enseignements, attribué par l'Université de Bourgogne

Table des matières

Sommaire	P1
<u>Partie A. Synthèse des travaux de recherches</u>	P3
I. Introduction : enjeux et objectifs scientifiques	P4
I.1 Les aérosols atmosphériques, un objet de recherche central	P4
I.2 Ma démarche scientifique	P7
II. Télédétection des poussières désertiques	P9
Préambule : le climat et les poussières désertiques au Sahel	P9
Questions scientifiques et éléments contextuels	P14
II.1 Bilan des produits aérosols présentant un potentiel pour la santé	P17
II.2 Les AI sont-ils représentatifs des poussières désertiques en surface ?	P21
II.3 Différenciation des types d'aérosols à partir des produits MODIS	P26
II.4 Apport de la télédétection active et de la mission CALIPSO	P33
Synthèse de la partie II	P38
III. Poussières désertiques, climat et santé en Afrique	P40
Préambule : les méningites bactériennes au Sahel	P40
Questions scientifiques et éléments contextuels	P43
III.1 Bref historique du lien entre climat-environnement et méningites	P47
III.2 Les aérosols versus le climat pendant les méningites saisonnières	P53
III.3 Importance des aérosols au démarrage et développement épidémique	P63
III.4 Poussières et méningites à l'échelle de la Ceinture	P72
Synthèse de la partie III	P77
IV. Pollution particulière en milieu urbain	P79
Préambule : la ville, milieu complexe et hétérogène	P79
Contextualisation et questions scientifiques	P82
IV.1 Potentiel de l'imagerie satellitaire Pléiades	P86
IV.2 La SMA pour la pollution atmosphérique automobile	P95
IV.3 Le concept QameleO	P103
IV.4 Des mesures « low-cost » de qualité scientifique	P111
Synthèse de la partie IV	P118
V. Conclusion générale	P121
VI. Perspectives de recherches	P127
Liste des Figures	P136
Liste des Tableaux	P144
Références citées	P146
Nouveaux sites de mesures et création de base de données originales	P158
Fiche 1. Le TEOM de Dédougou	P159
Fiche 2. Le réseau QameleON à Dijon Métropole	P162
Fiche 3. Un photomètre CIMEL à Archachon	P164

Partie B. Résumé de carrière	P166
1. Etat civil, statut actuel, formation et expériences professionnelles	P167
2. Activités en recherches et valorisation	P169
2.1 Principaux projets de recherches avec responsabilités scientifiques	P169
2.2 Principaux projets de recherches en tant que participante	P171
2.3 Responsabilités d'évaluation ou d'administration scientifique	P172
2.4 Collaborations principales	P174
2.5 Brevet, création de données et de base de données originales, responsabilités de stations et de réseaux de mesures	P176
2.6 Séjours ou participations à des événements en tant que chercheuse invitée	P177
2.7 Participations à l'organisation d'école d'été, de colloque ou à l'animation scientifique du laboratoire	P177
2.8 Actions de vulgarisation scientifique et communications destinées aux gestionnaires et décideurs politiques	P178
2.9 Partenariats avec des associations, la sphère éducative, les collectivités, le privé	P179
3. Activités en enseignements	P180
3.1 Responsabilités pédagogiques et administratives	P180
3.2 Prix et distinction	P181
3.3 Enseignements réguliers avec descriptif et analyse	P182
3.4 Autres enseignements	P191
3.5 Autres responsabilités	P191
4. Formation par la recherche	P192
4.1 Encadrements de thèse	P192
4.2 Membre de comités de pilotage de thèse	P192
4.3 Références des thèses encadrées ou pilotées	P193
4.4 Participations à des jurys de thèse	P194
4.5 Encadrements de post-doctorat, d'ingénieurs et de technicien	P195
4.6 Encadrements de stages	P196
4.7 Références des stages de recherches encadrées et co-encadrés	P197
5. Productions scientifiques	P200
5.1 Articles parus dans des revues à comité de lecture	P200
5.2 Article soumis	P201
5.3 Articles dans des actes de congrès internationaux avec comité de lecture	P202
5.4 Chapitres d'ouvrage à visée internationale	P203
5.5 Communications et posters dans des conférences internationales	P204
5.6 Communications et posters dans des conférences nationales	P207
5.7 Communications et posters dans des ateliers nationaux et régionaux	P208
5.8 Rapports d'activités	P209
5.9 Monographie	P209
5.10 Récapitulatif des productions scientifiques	P210
6. Synthèse quantitative	P211