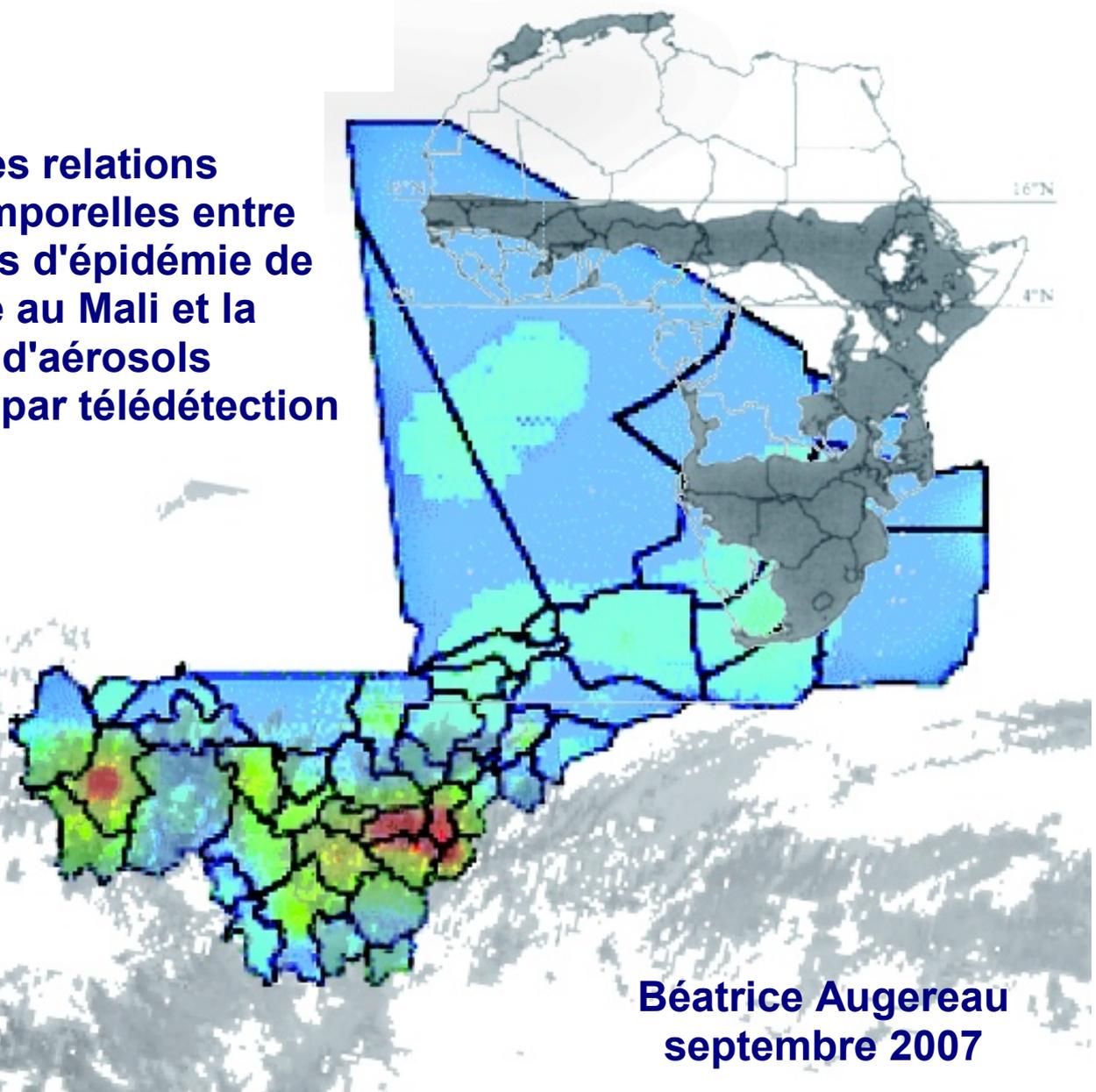


**Études des relations
spatio-temporelles entre
les phases d'épidémie de
méningite au Mali et la
présence d'aérosols
observés par télédétection**



**Béatrice Augereau
septembre 2007**

Rapport de stage de Master deuxième année de
Télédétection et Géomatique Appliquées à l'Environnement

Sous la direction de M. Hans Wackernagel

Remerciements

Ce rapport de stage résulte d'une proposition de M^{me} Catherine MERING et de M. Hans WACKERNAGEL qui a encadré ce stage à l'École des Mines de Paris. Il fait suite au mémoire de maîtrise sur le même sujet. La rédaction n'aurait pas été possible sans le concours de plusieurs personnes l'an passé et pendant le déroulement de ce stage.

Tout d'abord M. Wackernagel et M Mering qui y ont apportés chacun leur point de vue. Je remercie les membres du jury et à M. LANTUÉJOUL d'avoir accepté de représenter l'École des Mines lors de la soutenance.

Ce rapport doit également beaucoup à M. WILSON pour ses remarques constructives, M. LEFRÈRE pour son aide sur les scripts shell et M. BERGÈS pour son apport non négligeable l'an passé sur le traitement des données.

Cette étude n'aurait été possible sans les données épidémiologiques et satellites fournies respectivement par M^{lle} PHILIPPON et M. LEGRAND.

Ayant pu bénéficier de deux structures d'accueil au cours du stage, je tiens à remercier également les membres du Pôle Image : Florence, Isabelle, Pauline, Claudia, Julien, Benoît, François, Olivier, Lise, Émilien, Juliette, Aurélie, Johanna et Monick SIMON ; ceux du centre de géostatistique : Huey Chyi, Claire, Jérémy et l'ensemble de l'équipe.

Merci également aux étudiants du master TGAE. À mes amis : Béatrice, Alexandra, Axel et aux membres du GRESPA.

Enfin toutes mes pensées vont à ma famille.

1 Introduction

Cette étude essaie de caractériser le lien entre les poussières désertiques et les épidémies de méningite au Mali, pays présentant de grandes disparités spatiales et démographiques (cf. fig. 1 et 2). Elle fait appel à de nombreux champs et pratiques : télédétection, épidémiologie, géographie, statistique et géostatistique, et traitement des informations par lot. De plus, il est nécessaire pour la compréhension du sujet de faire une présentation de certains éléments avant d'exposer les phases du traitement et les résultats obtenus.

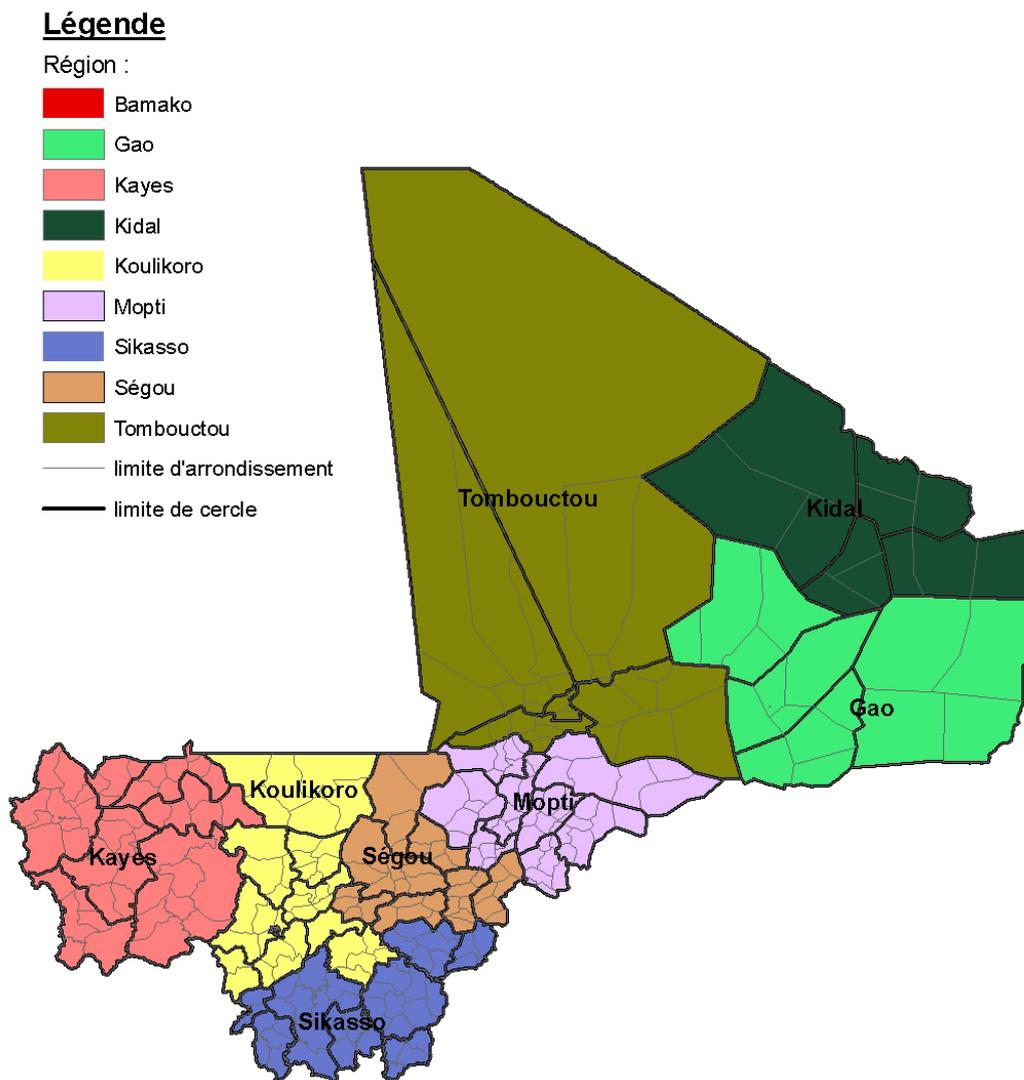


FIG. 1 – Carte administrative du Mali. Le Mali est subdivisé en 8 régions (plus le district de Bamako) et 49 cercles puis en arrondissement.

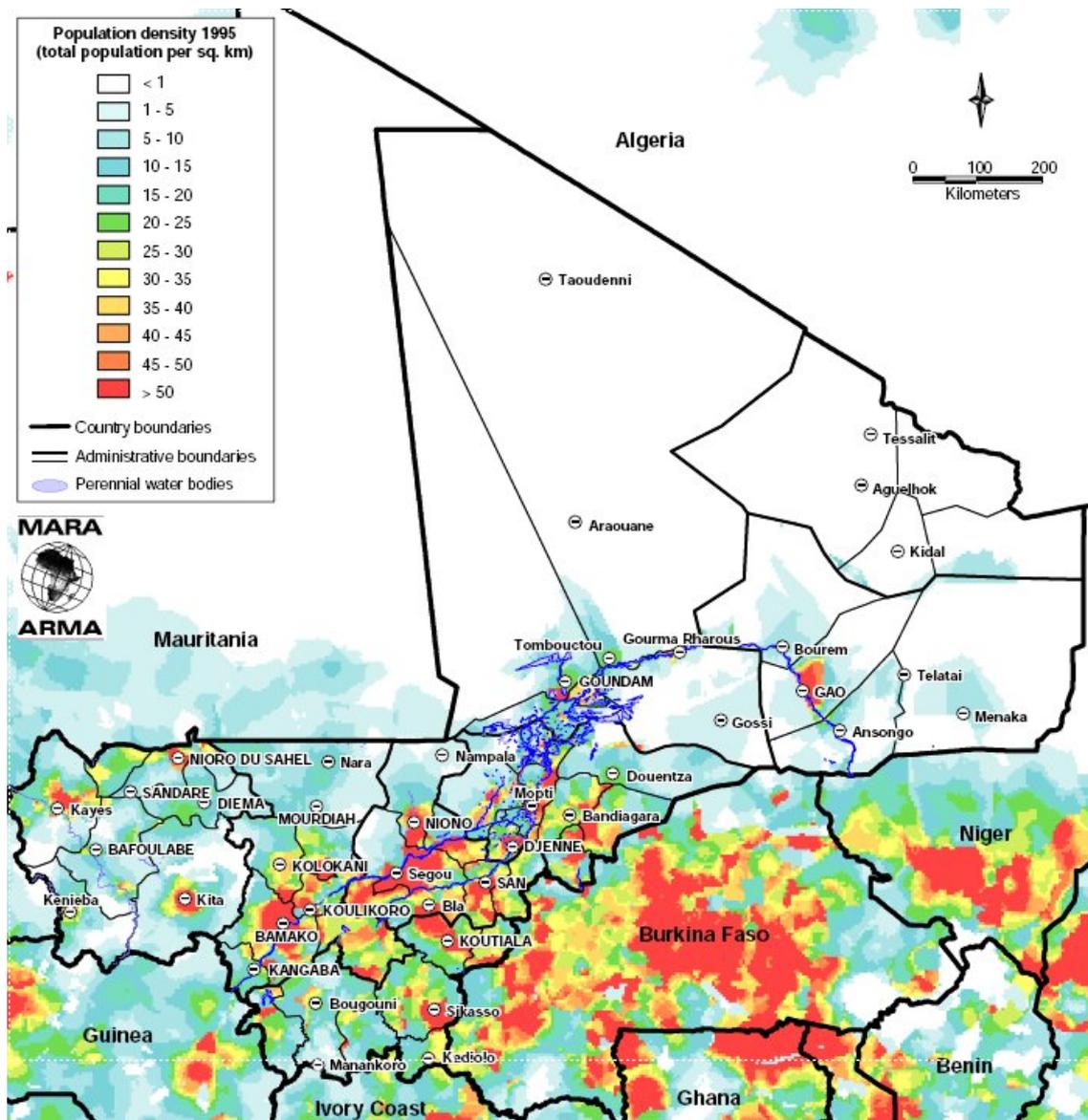


FIG. 2 – Carte de densité de population au Mali en 1995, source : <http://www.mara.org.za/> d'après les données de population du World Resources Institute (<http://www.grid2.cr.usgs/>).

2 Situation du sujet

On détaille ici certains aspects de la méningite et des aérosols et des études existantes sur leurs liens.

2.1 La méningite

Les méningites d'origine bactérienne¹ sont dues à plusieurs espèces qui varient selon l'âge : chez le nouveau-né et jusqu'à six mois les bactéries redoutées sont les streptocoques du groupe B, *Escherichia coli* et *Listeria monocytogenes* ; chez les enfant de moins de 5 ans les trois principales espèces en cause sont *Haemophilus influenzae*, *Neisseria meningitidis* (méningocoque) et *Streptococcus pneumoniae* (pneumocoque) ; après 5 ans les deux espèces bactériennes les plus fréquemment rencontrées sont *N. meningitidis* et *S. pneumoniae* ; enfin des infections méningées et septicémiques à *H. influenzae* et *S. pneumoniae* surviennent aussi chez les personnes âgées (<http://www.pasteur.fr/>).

Cette maladie en Afrique est due principalement à *N. meningitidis* ; c'est un pathogène strictement humain. La transmission est aérienne (expectorations) et est facilitée par les conditions de promiscuité. « La colonisation des épithéliums respiratoires est suivie d'une translocation vers les vaisseaux sanguins créant la bactériémie², puis éventuellement l'invasion des espaces méningés sous-arachnoïdiens » [Alonso et Taha, 2004].

L'aire d'épidémie de la méningite dite *ceinture de la méningite* a été définie par LAPEYSSONIE en 1963 [Lapeyssonnie, 1963]. Elle est définie par le 4^e et 16^e degré nord et des moyennes annuelles de précipitation comprises ente 300 et 1 100 mm (cf. fig.3) ; la définition de l'organisation mondiale de la santé, porte sur les limites frontalière issue de la carte de LAPEYSSONIE. Cette définition met en cause l'aspect environnemental de la maladie. Aujourd'hui, avec les « changements climatiques » la définition de l'aire de répartition des épidémies est reconsidérée par certains [Molesworth *et al.*, 2002, Greenwood, 2006].

¹Nous n'aborderons pas les méningites d'origines virales qui sont généralement sporadiques.

²L'infection est facilité par certaines structures de la surface bactérienne [Tzeng et Stephens, 2000].

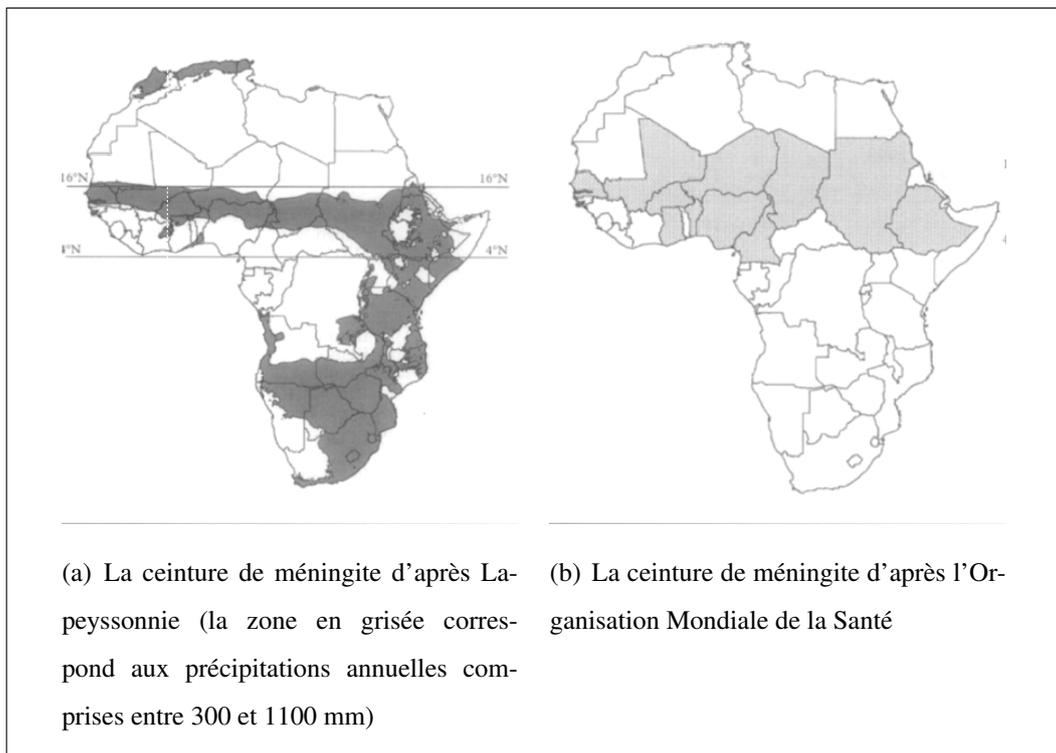


FIG. 3 – La ceinture de méningite [Molesworth *et al.*, 2002]

La méningite méningococcique a un taux de mortalité élevé : 5 à 10 % et peut être ravageuse (200 000 cas et 20 000 décès en 1996 au Nord Nigeria, au Niger, au Burkina Faso et au Mali [Greenwood, 1999] et encore dernièrement plus de 20 000 cas dénombrés au Burkina Faso en 2007). De plus, on estime qu'entre 10 et 25 % des gens sont porteurs de *N. meningitidis* en temps normal, ce taux pouvant être beaucoup plus grand en période d'épidémie. La période d'incubation de la bactérie est de 2 à 10 jours (<http://www.who.int/>).

Face à des épidémies de telles ampleurs la solution actuelle est celle d'une vaccination réactive. Dès le début des années 1970, une stratégie de lutte reposait sur le trépied surveillance épidémiologique, prophylaxie de la létalité en traitant précocement les cas, et les vaccinations réactives —la vaccination reposait sur le vaccin polysidique combiné AC. Cette stratégie n'a pas permis de contrôler la méningite cérébro-spinale en Afrique, par suite de difficultés à définir un seuil épidémiologique [Lewis *et al.*, 2001], des doses de vaccins³ non disponibles, des campagnes

³De plus, le sérotype émergent W135 responsable de l'épidémie en 2002 au Burkina Faso (cf. [Parent du Châtelet *et al.*, 2002, Caugant, 2002]) nécessite un vaccin conjugué tétravalent ACYW135; pour de plus amples informations sur les types de vaccins on se reportera à [Girard *et al.*, 2006].

de vaccination souvent trop tardives et difficiles à organiser [Saliou et Debois, 2002].

La stratégie de vaccination réactive est basée sur un seuil d'alerte et un seuil épidémique. Au Mali le seuil d'alerte à la méningite est de 5 cas pour 100 000 habitants par semaine dans les districts de plus de 30 000 habitants et de 2 cas en 1 semaine (ou simplement une augmentation du nombre de cas par rapport aux mêmes périodes des années précédentes) dans les districts de moins de 30 000 habitants. Le seuil épidémique (ou seuil d'action) est de 15 cas pour 100 000 habitants par semaine dans les districts de plus de 30 000 habitants, et de 5 cas par semaine (ou doublement de cas par rapport aux années précédentes) dans les districts de moins de 30 000 habitants [MSF, 2004].

En plus d'un problème de définition de seuil épidémique, la stratégie de vaccination réactive se heurte au problème de définition de cas suspect comme le montre les deux définitions suivantes :

- définition d'un cas suspect de méningite par l'OMS en 1999 [WHO, 1998] :
 - chez les patients de moins de un an : une fièvre associée à un bombement de la fontanelle avec ou sans raideur de la nuque,
 - chez les patients de plus de un an : apparition brutale d'une fièvre supérieure à 38° C avec raideur de la nuque et-ou éruption pétéchiale ou purpurique ;
- définition d'un cas suspect de méningite par MSF [MSF, 2004] (le patient doit présenter au moins trois des signes suivants) :
 - chez l'adulte et l'enfant : céphalées intenses, vomissements, raideur de la nuque, fièvre à plus de 39° C,
 - chez l'enfant de moins de un an : diarrhée, vomissements, hypotonie axiale, bombement de la fontanelle, fièvre à 39° C, excitabilité.

Ces définitions ne permettent pas un diagnostic différentiel vis-à-vis des méningites virales ou d'autres maladies.

2.2 Les aérosols et leur détection

Les aérosols forment un ensemble très hétérogène ; il existe ainsi plusieurs types de classification qui reflètent leur grande hétérogénéité et variabilité. Ce sont toutes les particules en suspension dans l'atmosphère à l'exception des gouttelettes d'eau

et des cristaux qui forment les nuages. Les aérosols peuvent être classés selon leurs tailles, leurs lieux de résidence dans l'atmosphère, leurs modes de productions et leurs origines. Ils se divisent en trois classes de taille :

- les particules d'Aitken (0,001–0,1 μm),
- les particules fines (0,1–1 μm),
- les grosses particules (1–100 μm).

Les lieux de résidence dans l'atmosphère sont les suivants :

- la stratosphère où les aérosols sont situés entre 12 et 30 km, ils y sont de petites dimensions, produits par le processus gaz-particule et les injections issues des grandes éruptions volcaniques ;
- la troposphère où ils sont surtout concentrés dans la partie basse, ils y sont hétérogènes avec une distribution spatiale et temporelle très variable. Parmi eux les aérosols minéraux soulevés par les vents jouent un rôle très important à l'échelle régionale.

De plus, on distingue les aérosols *primaires* et *secondaires*. Les aérosols primaires sont injectés dans l'atmosphère sous leur forme définitive (poussières désertiques, sels marins, cendres volcaniques). Ils sont de taille supérieure au micromètre lorsque leur production est mécanique, et sub-micronique s'ils sont dus à des phénomènes de combustion. Les aérosols secondaires subissent des transformations chimiques ; ils passent de la phase gazeuse à la phase particulaire par condensation. Ce sont des aérosols de tailles fines.

On peut donc distinguer deux types d'aérosols⁴ : ceux dominés par les petites particules et ceux dominés par les grosses particules. Les aérosols dominés par les petites particules (<1 μm) sont principalement dus à la combustion de la biomasse et à la pollution urbaine et industrielle. Les aérosols dominés par les grosses particules sont d'origine naturelle (poussières minérales, aérosols marins).

À la grande variabilité et hétérogénéité des aérosols s'ajoute les phases de transport. Des modèles de transport ont été établis afin de les modéliser. Les phases de transport sont au nombre de trois : le soulèvement en zones sources, le transport des

⁴Il existe aussi les aérosols volcaniques qui sont injectés directement dans la stratosphère, leur impact climatique est alors important et leur durée de vie est très longue par rapport aux aérosols des basses couches de la troposphère.

particules et le dépôt.

Le soulèvement a lieu quand il n'y a pas d'obstacle (faible couvert végétal par exemple) en surface pour interdire la mobilisation des particules, si les particules susceptibles d'être mobilisées par le vent sont présentes en quantité importante, et lorsque le vent est suffisant. Ce processus ne se produit que pour des vitesses de vents de surface supérieures à une vitesse d'érosion [Marticorena, 1995]. Les particules retombent ensuite sous l'effet de leur poids entraînant une fragmentation des particules et des agrégats en éléments plus fins mobilisables.

Pour le transport des particules les processus en jeu peuvent être d'origine thermique (mouvements convectifs) ou dynamique (liés aux conditions météorologiques ou aux influences orographiques).

La dernière phase, celle du dépôt des particules, se produit en conditions d'atmosphère sèche ou humide. Le dépôt sec est dû à l'action de la gravitation ou par contact avec le relief. Quant au dépôt humide, il apparaît quand les masses d'air poussiéreuses, se mélangent par convection avec les masses d'air humide ou nuageuses. « Les particules minérales peuvent alors être directement capturées par les précipitations (*rainout*) ou par les gouttelettes à l'intérieur du nuage (*washout*), ou peuvent encore devenir des noyaux de condensation » [Pancrati, 2003].

L'effet des aérosols sur le climat est de deux ordres : effet radiatif direct et indirect.

La présence des aérosols peut être considérée comme une perturbation du système terre/océan/atmosphère, système qui retourne à l'équilibre en modifiant son état. L'effet direct correspond à des processus de diffusion et d'absorption des rayonnements solaires et telluriques ; la présence des aérosols modifie l'albédo terrestre. Sauf si les aérosols sont absorbants et la surface brillante, cet effet tend vers une augmentation de l'albédo global, donc un refroidissement du système.

L'effet indirect est subdivisé en deux « comme les aérosols jouent un rôle de noyaux de condensation aux gouttes d'eau et aux cristaux qui forment les nuages, l'augmentation de leur concentration, si elle n'est pas accompagnée d'une augmentation du contenu en eau liquide de l'atmosphère, a pour conséquence la formation de gouttes d'eau plus nombreuses et plus petites. Le fait qu'elles soient plus nom-

breuses augmente l'albédo du nuage, c'est le premier effet direct. Le fait qu'elles soient plus petites augmente la durée de vie du nuage (les gouttes d'eau ont moins tendance à précipiter rapidement), c'est le second effet indirect. »[Bellouin, 2003]

En conclusion, parmi les aérosols, ceux d'origine naturelle sont en grand nombre et ont une influence importante sur le système terre-atmosphère-océan. Les aérosols désertiques auxquels on s'intéresse sont des aérosols grossiers, ont une durée de vie limitée (environ une semaine) et sont caractérisés par des phases de soulèvement depuis les zones sources, de transport dans les basses couches de l'atmosphère et de dépôt.

2.3 Études existantes

On sait depuis longtemps que le démarrage des épidémies coïncide avec le début de la saison sèche et plus particulièrement avec une baisse du taux d'humidité ; elles disparaissent avec la saison des pluies. Le lien entre divers paramètres environnementaux et la méningite a fait l'objet d'un travail à l'échelle de l'Afrique [Molesworth *et al.*, 2003, Thomson *et al.*, 2006, Savory *et al.*, 2006], mais avec des données agrégées spatialement (province) et temporellement (mois). D'après des données de météorologie (humidité, poussières, pluies), de types de sol (land-cover, NDVI) et de population, un modèle a été établi (fig. 4). Pour cette modélisation, les variables ayant le plus fort pouvoir explicatif sont les profils d'humidités et les types de couvertures des sols. Cependant la cartographie est faite à l'échelle continentale, et de façon choroplèthe.

À l'échelle nationale, on peut se reporter à [Kotecká, 2005] au Niger, et surtout à [Sultan *et al.*, 2004, Sultan *et al.*, 2005] au Mali. L'étude sur le Niger recherche aussi des liens entre paramètres environnementaux (épaisseur optique — données issues de l'instrument Total Ozone Mapping Spectrometer—, visibilité, humidité et température) et les épidémies. Mais ce travail ne prend pas en compte l'aspect spatial et ne repose que sur quelques semaines de deux années épidémiques au Niger.

Sur le Mali, SULTAN *et al.* montrent un lien spatial plus précis entre les deux

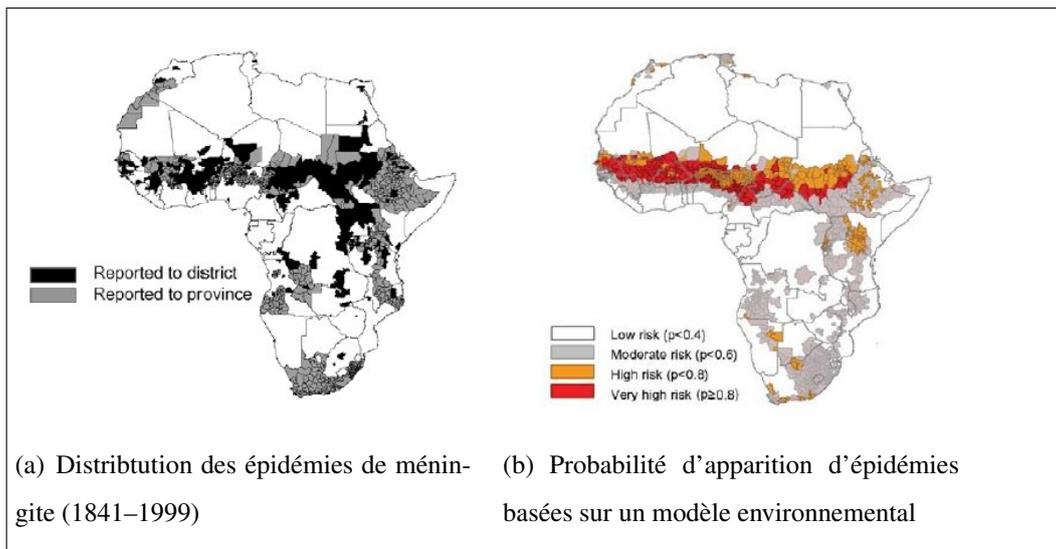


FIG. 4 – Modèle d'occurrence de la méningite [Molesworth *et al.*, 2003]

phénomènes :

- une corrélation entre les paramètres atmosphériques (modules du vent et humidité spécifique de basses couches) et les données épidémiologiques,
- un lien entre le maximum de l'hiver et le démarrage des épidémies.

Avec également une approche climatologique mais sur plusieurs pays de l'Afrique de l'Ouest, on peut se reporter à [Yaka et Sultan, 2007].

Une partie des informations qui suivront sur les données épidémiologiques sont extraites de la thèse de S. PHILIPPON. Cette thèse [Philippon, 2006] ne traite pas du lien entre les paramètres environnementaux et le caractère épidémique de la méningite en Afrique. Les aspects abordés sont ceux du système de santé et de la perception de la maladie⁵, néanmoins quelques traitements utilisant les techniques de corrélations croisées (cf. infra) sont présentés mais en les interprétant vis-à-vis de modèles de diffusion ville-campagne.

L'année dernière nous avons réalisé un mémoire de maîtrise portant sur le même sujet à partir des mêmes données épidémiologiques [Augereau, 2006]. En revanche, en ce qui concerne les données de télédétection nous n'avons utilisé qu'une transposition de l'algorithme IDDI sur les données de Météosat Seconde Génération.

⁵En se basant essentiellement sur [Ballo *et al.*, 2002].

Les données ne se recouvraient pas dans le temps puisque les premières réceptions au sein du GDR MSG-ATR⁶ ont eu lieu en 2003 alors que les données épidémiologiques s'arrêtent à 2003. Nous avons donc procédé en comparant les données satellites avec les données sol, puis entre les données de visibilité des stations du réseau synoptique et les données de méningite. Ce travail reposait essentiellement sur les aspects méthodologiques avec notamment la découverte des techniques géostatistiques⁷ permettant de cartographier finement les phénomènes spatiaux et surtout d'en découvrir les différentes structures. Ce mémoire avait abouti à des cartes de krigeages (cf. fig. 5)

⁶Groupe de Recherche Météosat Seconde Génération - Acquisition en Temps Réel.

⁷On se référera à [Matheron, 1963, Matheron, 1978] pour les fondements de la géostatistique, à [Arnaud et Emery, 2000, Emery, 2001] pour une approche détaillée de la géostatistique linéaire et également à [Malherbe et Raouïl, 2002, Malherbe et Raouïl, 2003] pour une approche plus pratique.

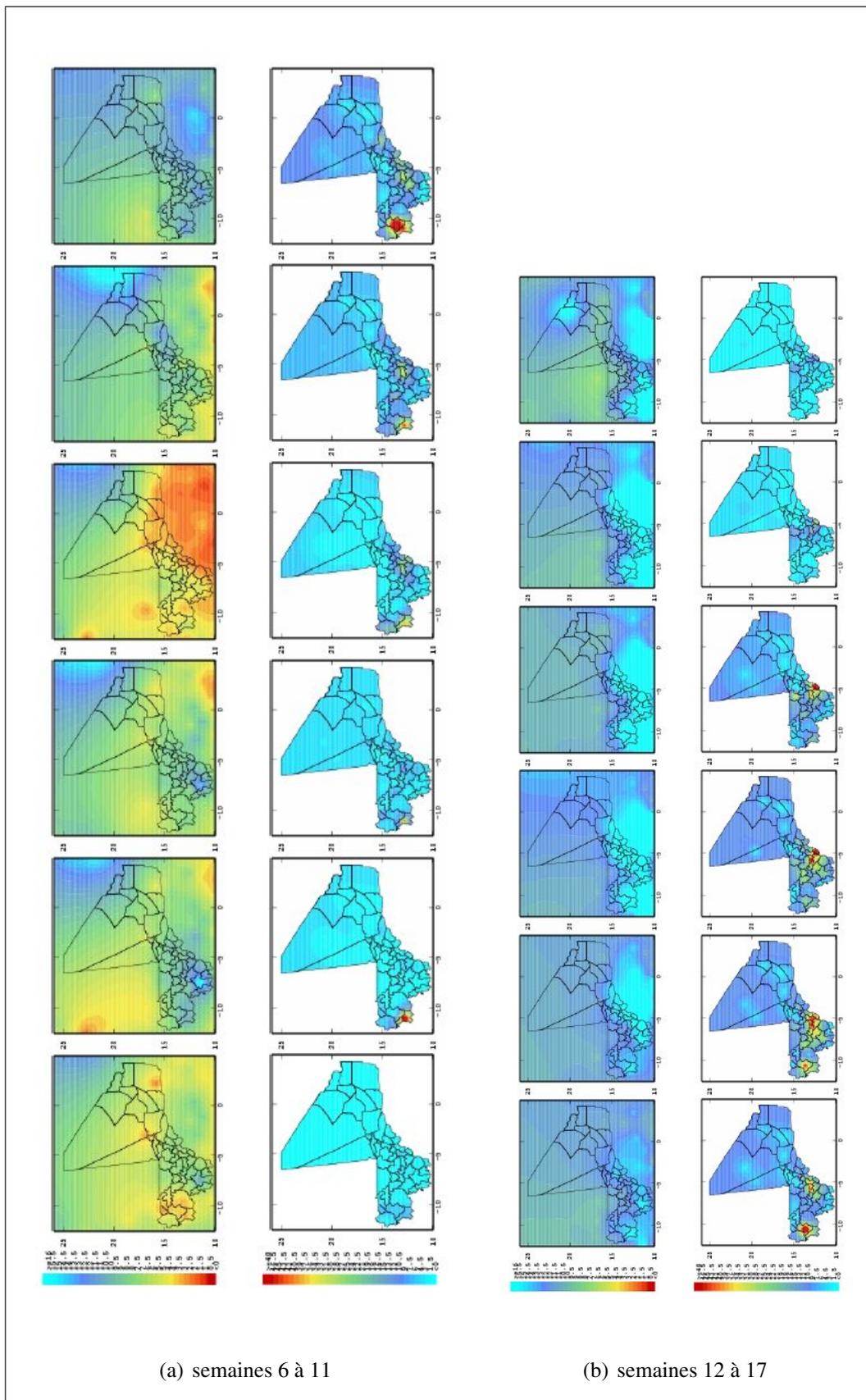


FIG. 5 – Estimation par krigeage de la visibilité issue des données NCDC (en haut) et de l’incidence relative des cas de méningite (en bas) pour les semaines 6 à 17 de l’année 1997

2.4 Objectifs du stage

Par rapport au travail de l'an passé qui ne portait que sur quelques semaines de l'année 1997 (une des années épidémiques sur la période de données dont nous disposons) nous avons traité l'ensemble du corpus de données à notre disposition, à savoir 12 années de données épidémiologiques hebdomadaires, 9 de données satellites journalières et 12 années d'enregistrement de données météorologiques journalières.

De plus, par rapport aux études citées ci-avant nous avons voulu réaliser ce traitement sans idée préalable d'utilisation de modèles et sans s'attacher aux méthodes épidémiologiques, climatiques ou à chercher un modèle environnemental qui décrirait aux mieux les épidémies. Nous sommes restés volontairement au stade de traitements descriptifs et avons essayé d'appréhender le lien connu empiriquement de longue date entre les poussières et la méningite.

3 Les données et leurs traitements

Une grande partie du temps lors de stage a été utilisée par l'apprentissage de ⁸, un environnement de programmation dédié aux traitements statistiques et graphiques (<http://www.r-project.org/>). La partie ci-dessous de description des traitements a presque été entièrement réalisée sous l'environnement . En plus, de l'apprentissage de ce langage de programmation une grande partie du temps a été consacrée à la mise en concordance des données entre-elles afin de pouvoir les confronter et à la gestion de données hétérogènes par lot vu leur grand nombre.

3.1 Les données épidémiologiques

Ce sont des données relatif au nombre de cas déclarés par cercle et par semaine du 1^{er} janvier 1992 au 31 décembre 2003, ce qui représente plus de dix ans de données consécutives⁹. Ces données nous ont été données gracieusement par Solenne PHILIPPON qui les a recueillies au Mali. Ce sont une compilation des rapports hebdomadaires de chaque agent de santé des centres de santé de district. Les données ne sont donc pas représentatives de l'ensemble de la population dans la mesure où le taux d'utilisation des soins de santé publics et communautaires ne dépassent pas 0.3 contact par an et par habitant dans la capitale où l'implémentation des centres de santé est plus dense que pour le reste du Mali [Philippon, 2006], les disparités étant encore plus criantes dans le reste du pays et surtout dans le Nord.

De plus, les diagnostics permettant cette déclaration de cas suspects sont basés sur des signes cliniques, sans savoir précisément lesquels¹⁰. Ils sont du ressort des infirmiers des centres de santé. Or, une étude rétrospective sur des centres de santé

⁸Pour un tutorial d'initiation en langue française voir [Paradis, 2005].

⁹Les données utilisées dans les études citées précédemment sont beaucoup plus brève et sont le plus souvent des données agrégées spatialement et temporellement. Il est aisé d'obtenir des données par an et par pays [WHO, 2000] mais les données exhaustives et à forte répétitivité temporelle et à une échelle spatiale fine sont difficiles d'accès

¹⁰« Concrètement, les infirmiers ont entre leurs mains des « ordinogrammes diagnostiques » récapitulant les démarches à suivre pour mener à bien des diagnostics différentiels en fonction des signes observés sur le malade et de la plainte qu'il (ou son entourage) formule. Trois principes sont préconisés par le *Guide thérapeutique à l'intention des chefs de poste SSSA et CSCOM* pour l'établissement d'un diagnostic : l'unicité du diagnostic qui privilégiera une maladie capable d'expliquer la plus grande partie des symptômes ; l'urgence qui poussera à traiter en priorité la maladie la plus grave ; et l'attention portée à la fréquence des pathologies, qui orientera le soignant vers la maladie la plus probable en fonction du contexte sanitaire d'où provient le patient. »[Philippon, 2006] — SSSA : Service Socio-Sanitaire d'Arrondissement, CSCOM : Centre de Santé Communautaire.

du district de Bamako montre que 30 % des infirmiers se déclaraient incapables de suspecter cliniquement une méningite chez un patient [Philippon, 2006].

Ces enregistrements de cas suspects présentent donc deux biais, l'un provient du problème de compilation des enregistrements, et l'autre du diagnostic de la méningite. En effet, les enregistrements sont effectués par chaque centre de santé (centre de santé communautaire, d'arrondissement, associatif, confessionnel, médecin privé et hôpitaux) et compilés au niveau du centre de santé de référence de chaque cercle. Solenne PHILIPPON souligne dans sa thèse des incohérences de notation entre les semaines où le nombre de cas est 0 et celles où il n'y a aucun enregistrement ; incohérences probablement dues à l'agrégation des enregistrements des centres de santé, à ceux des arrondissements et des cercles. On peut se rendre compte aisément de ce problème de fiabilité en observant les premières semaines de pics épidémiques pour divers cercles. Par exemple (cf. fig. 6) pour l'année 1996 pour le cercle de Dioila le nombre de cas déclarés passe de 3 à 84 cas de la 213^e à la 214^e semaine, alors que le cercle de Yelimane enregistre respectivement 6, 5 et 29 cas pour les semaines 224, 225 et 226. Mais dans le cas de Dioila les semaines précédentes sont enregistrées avec 0 cas, alors que pour Yelimane il n'y a pas d'enregistrement. Ceci est d'autant plus important dans un contexte de vaccination réactive.

Pour tout les traitements qui suivent, nous avons, de plus, retirés les enregistrements de l'année 1994, puisque ceux-ci ne contenaient pas de nombres cas déclarés entiers.

3.2 Les données météorologiques

Elles sont issues du jeu de données Surface Data - Global Summary of Day du National Climatic Data Center (<http://www.ncdc.noaa.gov/>). Ces sont des données de station contenant les principaux indices météorologiques (température, pression, visibilité, vent, etc.). Sur les 13 indices seuls quelques uns sont bien renseignés sur l'ensemble des stations du Mali ; il s'agit de la température, du point de rosée, de la pression, de la visibilité, de la vitesse du vent et des précipitations. Pour notre étude nous ne retiendrons que la température, la vitesse du vent, les précipitations et la visibilité ; parmi ceux-ci c'est la visibilité qui semble le plus en accord avec l'évolution des nombres de cas de méningite. On peut le voir sur les figures 7

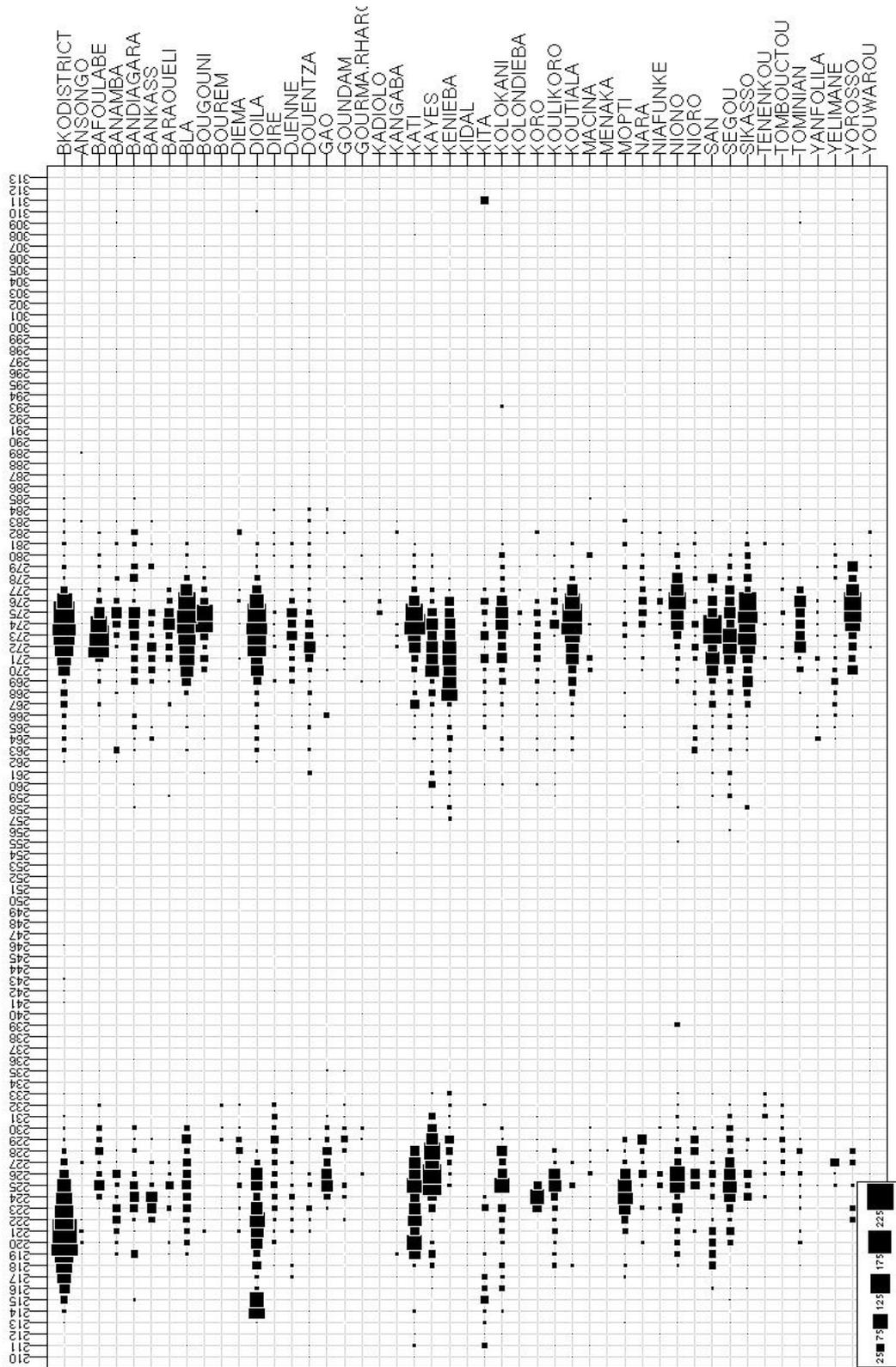


FIG. 6 – Nombre de cas déclarés par cercles et le district de Bamako pour les semaines des années 1996 et 1997

et 8.

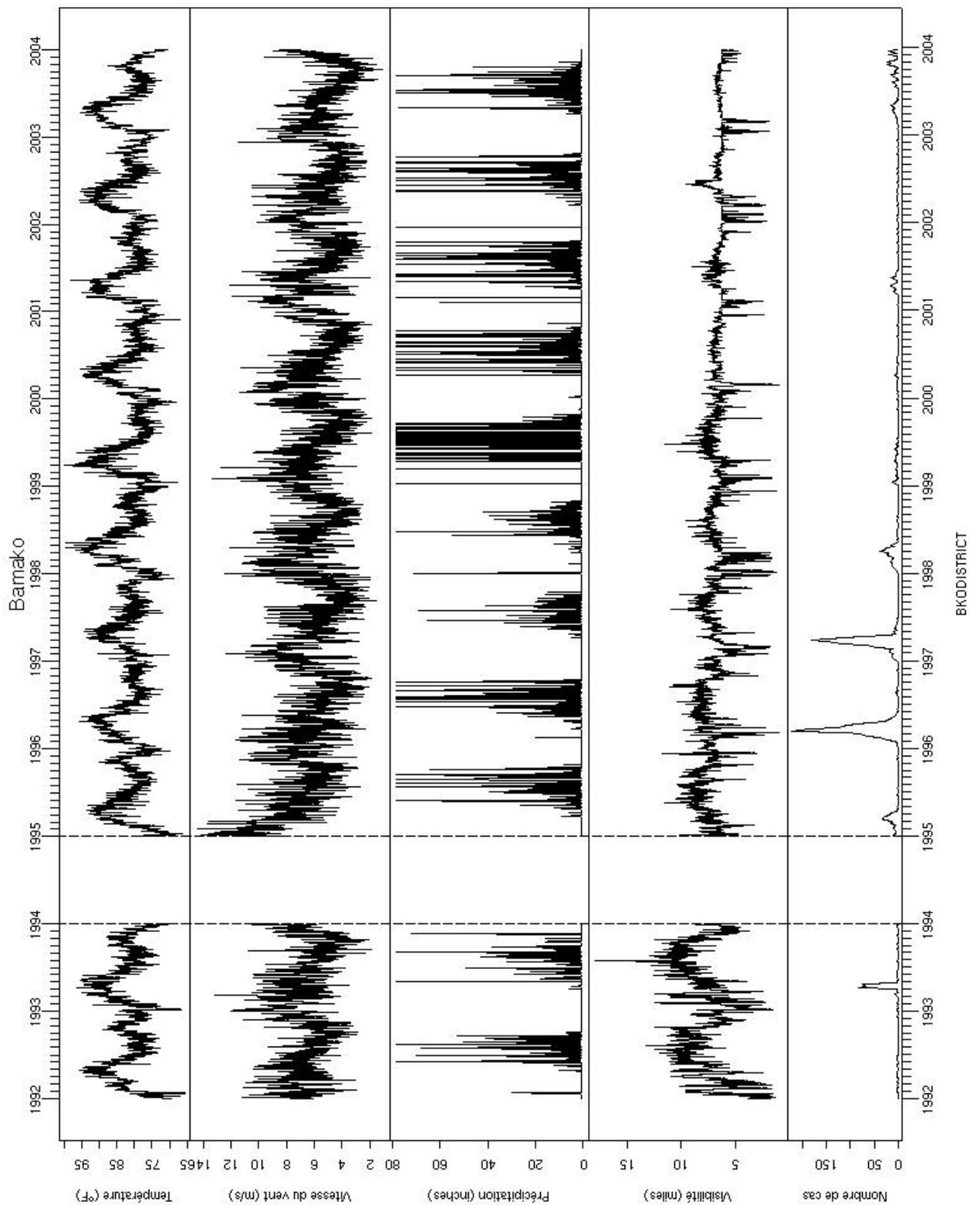


FIG. 7 – Les paramètres météorologiques (NCDC) de la station de Bamako et les nombres de cas du district de Bamako (on a ôté l'année 1994 volontairement)

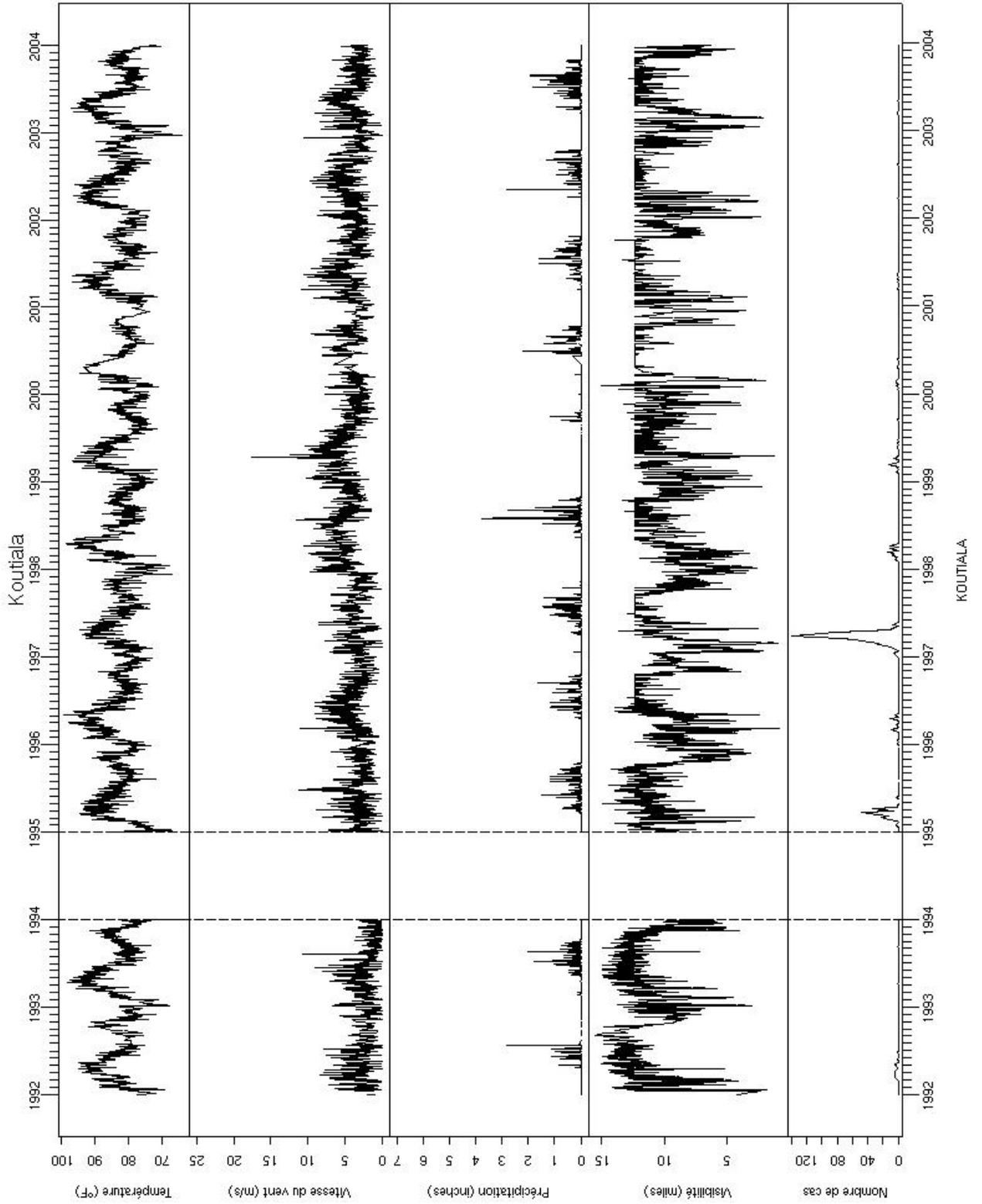


FIG. 8 – Les paramètres météorologiques (NCDC) de la station de Koutiala et les nombres de cas du cercle de Koutiala (on a ôté l'année 1994 volontairement)

Les précipitations quant à elles surviennent en fin de pic épidémique. Il y a 19 stations météorologiques au Mali, nous n'en utiliserons que 9 (cf. fig. 9), car les autres ne comportent que des enregistrements sporadiques (cf. fig. 10).

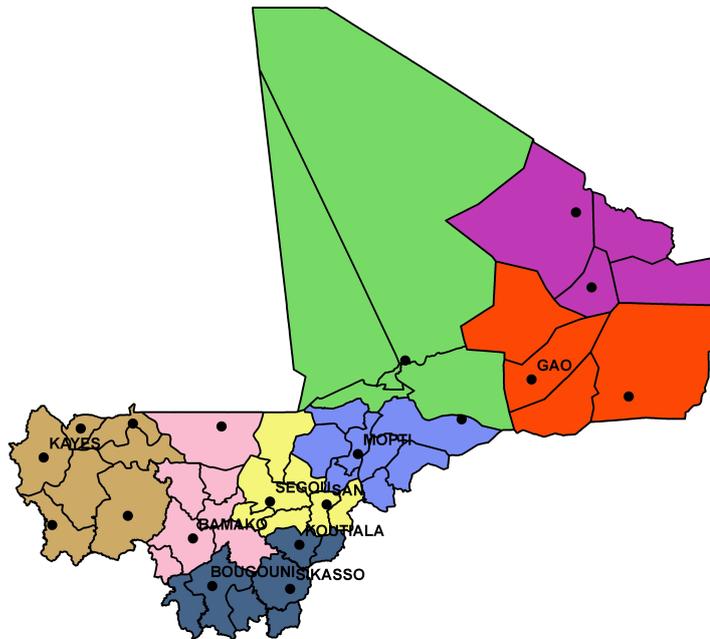


FIG. 9 – Les stations du réseau météorologique mondial au Mali (les noms sont ceux des stations utilisées dans notre étude)

Ce sont des données dans un format condensé, chaque champ a donc un descriptif propre et en particulier pour les valeurs manquantes. Pour faciliter la lecture de ces champs dans \mathbb{R} , on a donc préalablement changé des descripteurs de valeurs manquantes propres à chaque champ par la valeur NA qui est le descripteur des valeurs manquantes sous \mathbb{R} . De plus, pour le champ précipitation le format condensé est composé d'une lettre accolée à la mesure, lettre qui renseigne sur le nombre de report par jour. Nous avons donc dû requérir à un script shell se basant sur la recherche de sous-motif afin de modifier le champ correspondant aux mesures de précipitation ¹¹.

¹¹En effet en modifiant dans un premier temps les descripteurs de valeurs manquantes de tous les champs des fichiers nous n'étions plus en présence de fichiers avec des champs de largeurs fixes d'où la nécessité d'utiliser une commande de type `awk` ou `sed`. Nous tenons à remercier l'aide de

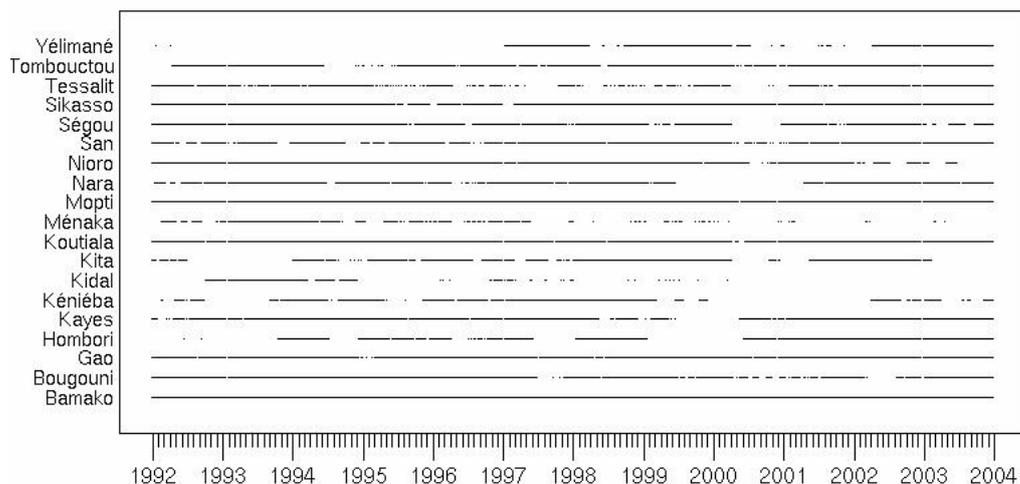


FIG. 10 – Continuité d’enregistrement de données des stations météorologiques

Ces données sont journalières, pour pouvoir les confronter aux données épidémiologiques il faut les transformer en données hebdomadaires. Or les données des stations du réseau synoptique, ont autant de lignes que d’enregistrements, soit ici 47 898 enregistrements pour l’ensemble des stations et 29 567 pour les 9 stations retenues. Il faut donc utiliser le descripteur de date de chaque ligne pour pouvoir reconstituer des données à la semaine. Il nous faut donc utiliser la même numérotation de semaine que pour les données épidémiologiques. Or, la numérotation des semaines n’est pas normalisée. En effet, premièrement le premier jour de la semaine peut être soit le lundi soit le dimanche (usage anglo-saxon). Ce décalage de jour peut entraîner différents nombres de semaines dans une année¹². Secondement, entre la notation des semaines sur un calendrier et la représentation informatique des numéros de semaine il y a également une différence. La notation des systèmes de type Unix repose sur la norme POSIX, les semaines d’une année y sont numérotées de 00 à 52 ou 53. Les jours de la semaine 00 complètent les jours de la dernière semaine (incomplète) de l’année précédente alors que pour la plupart des calendriers les premiers jours de l’année qui complètent le reste de la semaine de l’année pré-

Jacques LEFRÈRE pour son élaboration.

¹²Si on considère que la semaine commence le dimanche l’année 2000 a alors 52 semaines et l’année suivante 53 et inversement si on considère le lundi comme premier jour de la semaine.

cédente sont aussi numérotés 52 ou 53¹³. Pour cette norme le premier jour de la semaine par défaut est le dimanche. Les données hebdomadaires épidémiologiques ne possèdent pas de descripteur précis pour être sûr du type de numérotation choisie. Cependant la numérotation des semaines correspond à un début de semaine le dimanche. Nous avons donc opté pour cette numérotation des semaines pour la mise en concordance des données épidémiologiques, météorologiques et satellites. Afin de ramener les données météorologiques journalières à hebdomadaires nous avons dû élaborer un script sous  tenant compte des journées non enregistrées, des jointures des dernières semaines avec les premières des années suivantes, ainsi que des années bissextiles. Cette procédure a été rendue possible grâce au descripteur de date de chaque enregistrement. Dans un premier temps nous avons envisagé d'utiliser les objets `time-series` pour stocker les valeurs, mais ce type d'objet n'est pas assez souple pour l'utilisation voulue. Nous avons donc décidé de stocker les données sous une forme très proche des tableaux originels. Chaque calcul peut alors être contraint par le descripteur de temps¹⁴. Les indices hebdomadaires calculés sont alors la moyenne, le minimum, le maximum et le cumul. Les résultats varient peu pour ces divers indices nous ne retiendrons par la suite que la valeur moyenne hebdomadaire.

3.3 Les données satellites, le produit IDDI

Ces données, 3 237 images, nous ont été fournies par Michel LEGRAND. Elles sont issues de l'algorithme IDDI (Infra-red Difference Dust Index) élaboré par Michel LEGRAND [Legrand *et al.*, 1992, Legrand *et al.*, 2001, Legrand *et al.*, 2002]. Cet algorithme¹⁵ est basé sur l'enregistrement de la réduction de la température du système terre-atmosphère due à la présence d'aérosols¹⁶. Il est élaboré à partir du canal infra-rouge de Meteosat (10,5–12,5 μm). L'idée principale d'IDDI est de

¹³Il existe aussi des variantes avec des semaines notées 0 en fonction du nombre de jour complétant la dernière semaine de l'année précédente.

¹⁴Cette façon de faire est plus longue syntaxiquement parlant mais permet de ne pas dupliquer les objets par la suite. De plus on peut alors utiliser des objets de classe `Date` et `POSIXct` qui permettent des manipulations similaires à celle de la norme `POSIX` pour avoir la correspondance entre le descripteur d'enregistrement et respectivement le numéro de semaine, de jour, etc. [Chessel, 2006].

¹⁵Pour une revue complète des différentes méthodes de télédétection des aérosols voir [King *et al.*, 1999]

¹⁶L'effet de la vapeur d'eau n'est pas pris en compte.

séparer la contribution stable de la surface, de la contribution négative des variations atmosphériques. La partie stable est approximée par le maximum de radiance (brightness temperature). Les étapes de calculs se décomposent de la façon suivante :

- les images originelles sont prises à midi sur une période de 15 jours (afin d'omettre les effets du cycle diurne — l'IDDI est produit sur toute l'Afrique de l'Ouest),
- construction d'une image de référence (image dite « claire », c'est la synthèse des pixels de plus fortes valeurs sur la quinzaine),
- construction de l'image de différence (soustraction de l'image originelle à l'image de référence),
- classification des pixels nuageux à partir de graphiques en arche et d'un seuil (cf. fig. : 11). Cette étape d'analyse utilise la méthode de cohérence spatiale. Pour chaque pixel est calculé la moyenne et l'écart-type du voisinage 3×3 ; on obtient alors un graphique de l'écart-type en fonction de la moyenne. La forme typique est une arche ; si celle-ci n'est pas apparente, l'ensemble des pixels sont classés comme nuageux. Un seuillage permet de distinguer les pixels contaminés par les nuages des pixels contaminés par les aérosols ; de plus, les valeurs de seuils sont modifiées par un code d'identification des nuages afin de minimiser les erreurs.

Les images produites par l'algorithme IDDI sont au format B2 [EUM, 2004], c'est un format d'archive qui échantillonne la pleine résolution à raison d'un pixel sur 6 en lignes et en colonnes (soit une résolution de 5×5 km contre 30×30 km initialement). Leur stockage est en binaire 16 bits non signés (big endian) d'une taille de $275 \times 256 \times 2 = 140800$ octets. Nous disposons de la quasi totalité des images par jour de 1992 à 2000 inclus.

La signification des pixels est la suivante : les pixels appartenant au masque océan ont une valeur de 20 000, ceux appartenant au masque de nuages sont à 25 500. Les autres valeurs vont de 0 à 9 000 et sont en 100^e de compte par rapport à la publication de référence (soit une quantité de poussière très faible), voir la fig. 12. La présence importante de poussière est attestée par des valeurs au moins de l'ordre de 1 000.

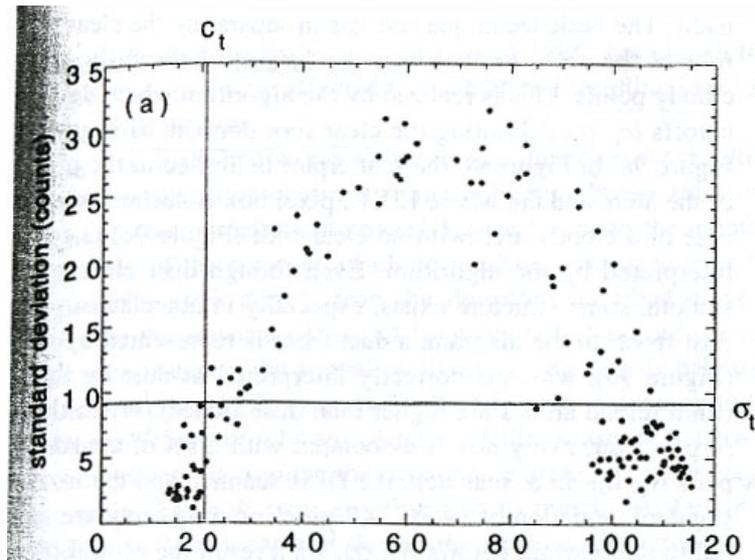


FIG. 11 – Exemple de diagramme en arche avec les valeurs de seuillage pour sélectionner les pixels contaminés par les aérosols [Legrand *et al.*, 2001]

Afin d'obtenir des séries temporelles comparables à celles obtenues à partir des données épidémiologiques et météorologiques, nous avons extrait les valeurs des pixels correspondants aux stations météorologiques. Les images fournies n'étant pas calées, nous avons dû le faire. Malheureusement ne possédant pas l'entête des images nous n'avons pu lire ces images avec le logiciel du laboratoire d'optique atmosphérique de Lille qui permet de lire le format B2 et de reprojeter géographiquement celles-ci. Nous avons alors effectué un calage à partir de points d'amer (points d'appuis) sur une image vectorielle de référence¹⁷. Nous nous sommes basés sur le seul repère possible avec ces images : le trait de côte. À partir de 27 points répartis sur tout le pourtour du continent africain et un modèle polynomial d'ordre 3 on obtient une erreur quadratique moyenne d'environ 12 km dans la direction E.-O. et de 13 km dans la direction N.-S., soit une erreur quadratique moyenne dans l'axe de plus grande déformation de 17,5 km. Cela peut sembler beaucoup pour un pixel d'environ 30 km de côté, mais si on regarde localement (en ne conservant que 14 points dans le calcul polynomial) cette erreur quadratique moyenne n'est plus que d'environ 4.5 km (2.5 en E.-O. et 4 km en N.-S.). On peut ainsi noter les numéros de lignes et colonnes des images correspondants respectivement aux stations météorologiques. D'un point de vue pratique la constitution de séries temporelles à partir de

¹⁷Le calage a été effectué avec le logiciel TNTmips de la société MicroImages.

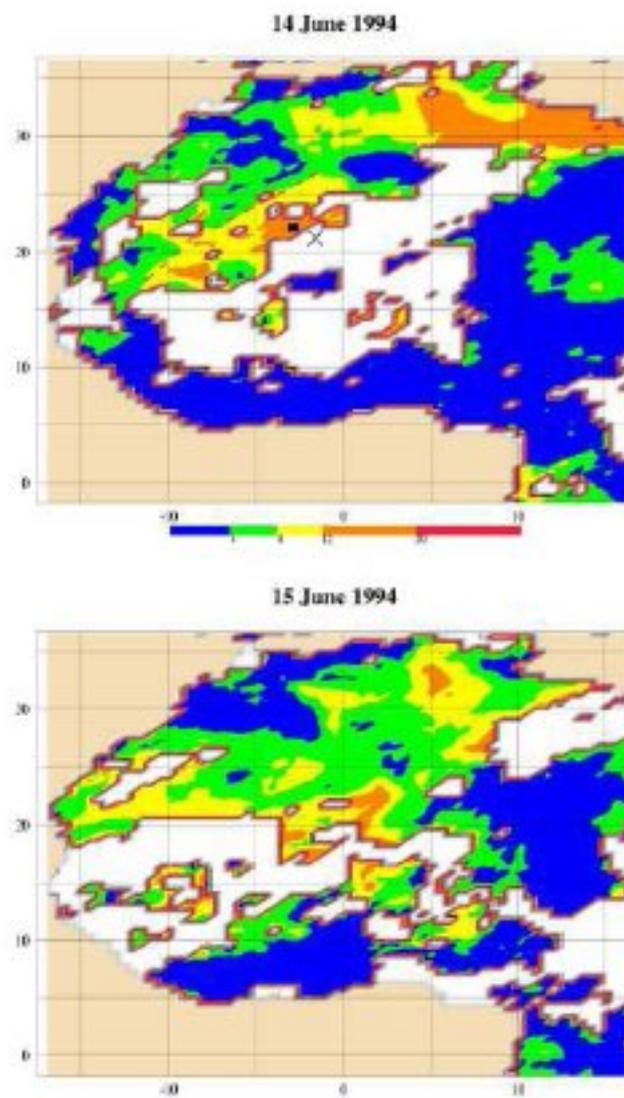


FIG. 12 – Répartition de la poussière au-dessus de l’Afrique de l’Ouest (0° – 35°N, 16°W – 15°E) les 14 et 15 juin 1994 à 12 :00 TU en utilisant des moyennes de l’IDDI obtenu à partir de Météosat-5. L’échelle des couleurs va du bleu au rouge par valeurs croissantes de l’IDDI (exprimé en K). Les nuages sont remplacés par un masque blanc. [Vergé-Depré, 2007]

toutes les images à été faite selon la procédure suivante sous l'environnement  :

- concaténation des images année par année (le découpage en année est nécessaire pour ne pas saturer la mémoire vive) pour pouvoir extraire des séries temporelles des pixels correspondant aux stations du réseau synoptique ainsi que les pixels connexes afin de confirmer le caractère assez lisse de la mesure IDDI (évitant ainsi des écarts de valeurs dans les cas où l'implantation de la station météorologique se trouve en bordure de pixel) ;
- concaténation des séries temporelles obtenues précédemment ;
- transformation des séries journalières en série hebdomadaires à l'aide d'un script¹⁸. L'indice hebdomadaire retenu est, comme pour les données météorologiques, la moyenne.

3.4 Les traitements

Une fois ce travail de mise en concordance des données fait il est enfin possible de commencer le travail de confrontation des données.

Cette partie repose essentiellement sur un travail graphique¹⁹ au travers de divers scripts . Nous avons donc schématiquement :

- pu constater le caractère saisonnier connu empiriquement depuis longtemps, à savoir :
 - on observe une baisse de la visibilité quelques semaines avant le déclenchement des pics épidémiques,
 - les cas cessent avec l'arrivée des pluies (cf. fig. 7 et 8) ;
- nous avons donc sélectionnés le paramètre de visibilité puisqu'il semble le plus probant des paramètres environnementaux ;
- réalisés une cartographie des particularités locales en fonction des profils épidémiologiques²⁰ ;

¹⁸Cette opération est plus aisée que pour les données météorologiques car, hormis quelques journées manquantes — 51 sur 3 288 — substituées par des descripteurs de valeurs manquantes, le caractère quasi exhaustif de la série permet une lecture des données sept par sept afin de calculer les indices suivants : moyenne, minimum, maximum, cumul.

¹⁹Les graphiques qui égrènent ce rapport sont ceux correspondant aux stations de Bamako et Koutiala ainsi qu'aux cercle ou district, et pixels IDDI correspondants. En effet, de part leur caractère quasi exhaustif ces exemples sont les plus probants.

²⁰Pour l'utilisation du package `ade4` et `FactoMineR` pour les analyses multivariées on peut se référer respectivement à [Chessel *et al.*, 2006] et [Lê *et al.*, 2006].

- effectué le calage et l'extraction des séries temporelles à partir des images IDDI ;
- il est ainsi possible de confronter les valeurs de ces séries à celles des stations du réseau synoptique :
 - l'aspect saisonnier du produit IDDI est beaucoup moins frappant que pour les données NCDC (cf. fig. 13 et 14),
 - il y a un petit nombre de valeurs fortes au sein des séries dont on ne peut dire au vu de nos connaissances s'il s'agit de valeurs aberrantes ou si elles sont dues à des situations atmosphériques particulières (visées verticales) ;
- et pour finir nous avons calculé des corrélations croisées différées sous *Isatis*²¹ ainsi que des covariances associées permettant de résumer les décalages temporels mentionnés.

²¹[Bleines *et al.*, 2004, Bleines *et al.*, 2007]

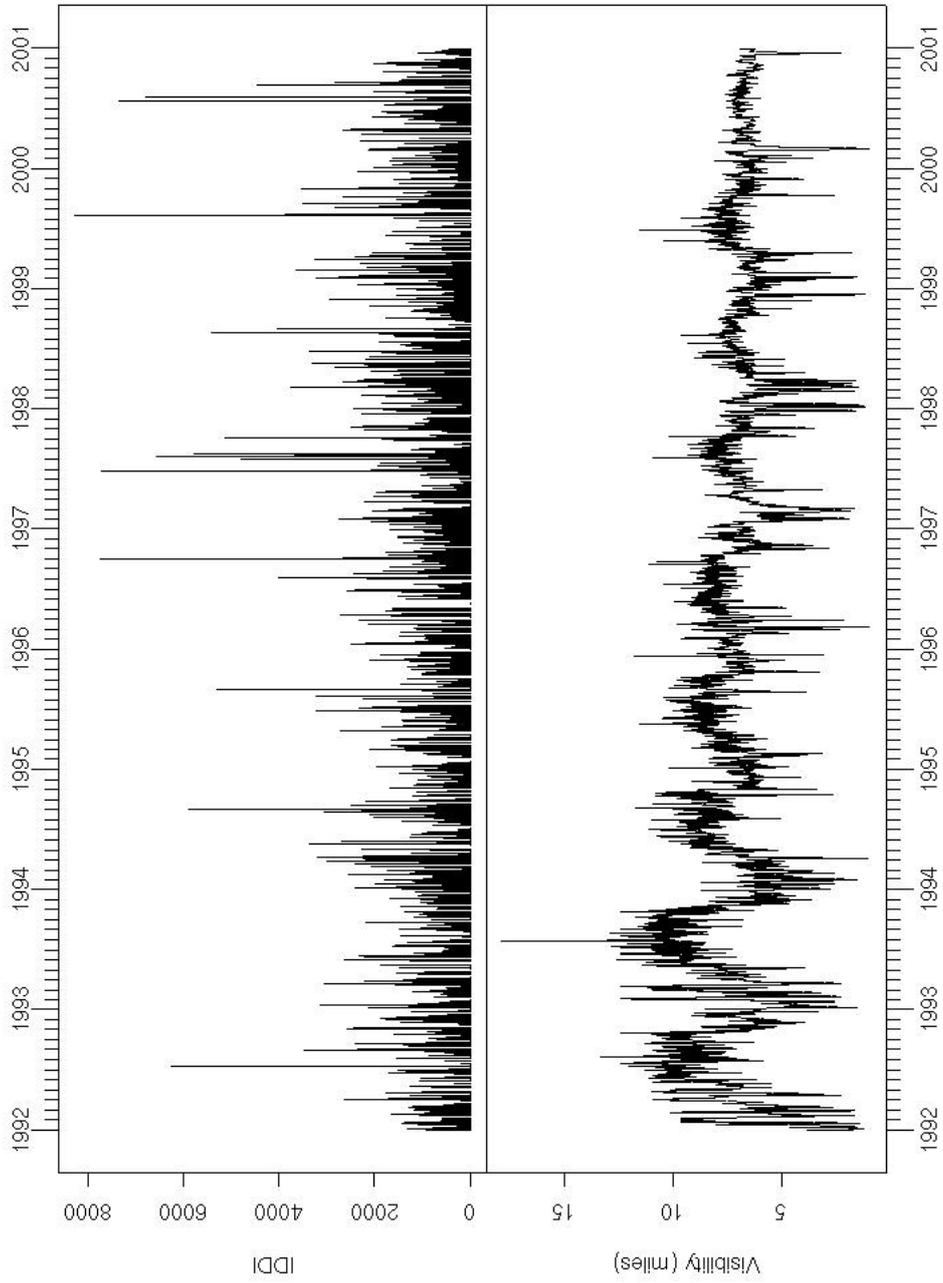


FIG. 13 – Confrontation des données IDDI et NCDC pour Bamako

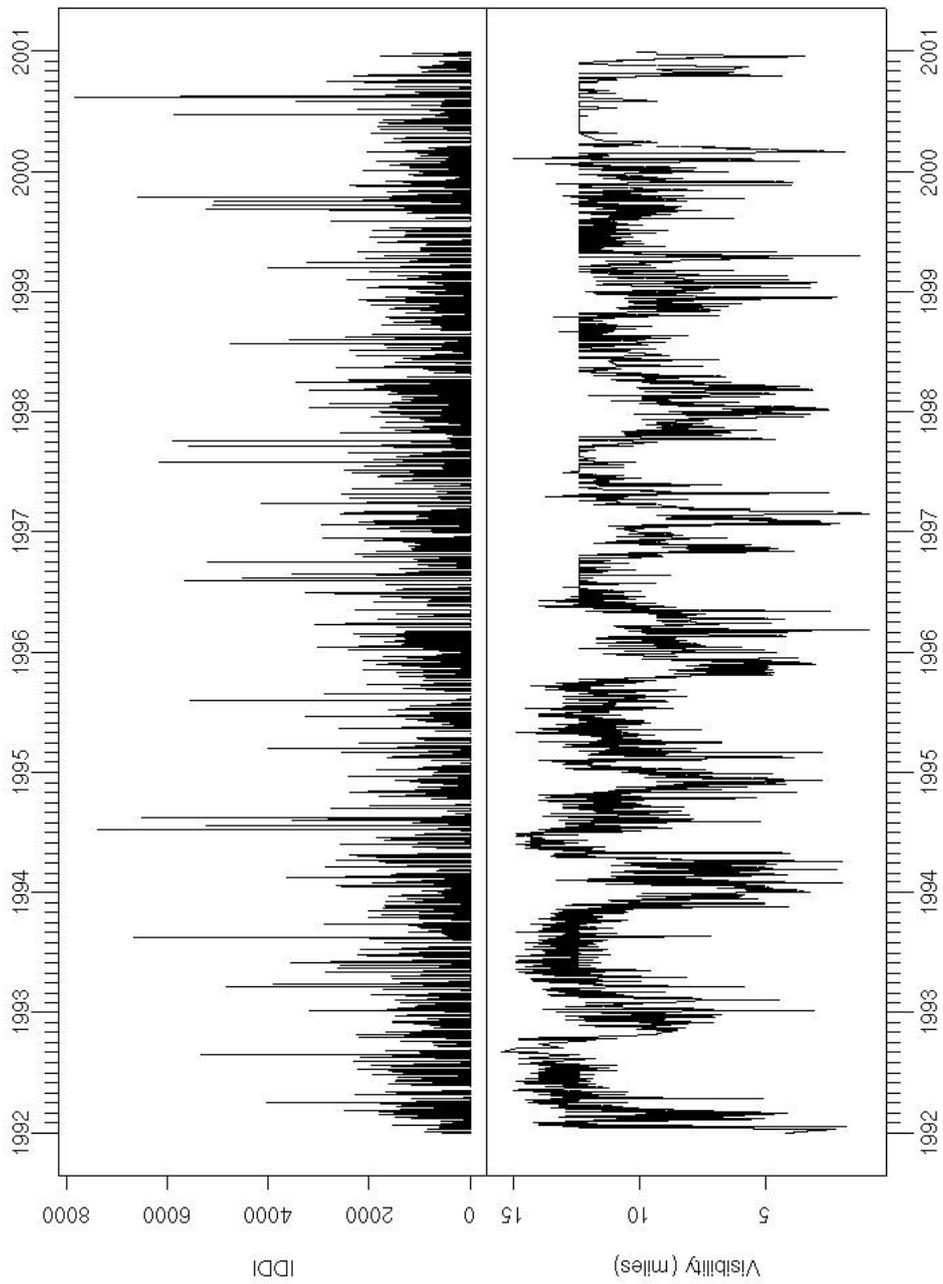


FIG. 14 – Confrontation des données IDDI et NCDC pour Koutiala

4 Analyse des résultats

Nous présentons ici d'une part une carte issue de traitements multivariés sur les données de méningite, d'autre part ceux issus de l'approche géostatistique avec les corrélation croisée différée et les fonctions de covariances associées.

4.1 Approche multivariée classique

Une rapide analyse multivariée sur les données de méningites a permis de repérer les cercles dont les profils sont atypiques. Une analyse en composantes principales sur les 626 semaines (en tant que variables) suivie d'une classification ascendante hiérarchique a permis d'obtenir la carte des cercles atypiques après avoir tronqué l'arbre pour ne conserver que les cercles qui se distinguent nettement des autres (fig. 15). Il en ressort les cercles suivants :

- Dioila qui présente deux pics en 1996,
- Kati qui a des cas plusieurs semaines avant les autres en 1996,
- Sikasso dont les cas déclarés présentent une quasi continuité de 1995 à 2003,
- et le District de Bamako où le nombre de cas enregistrés est plus important qu'ailleurs avec des pics toutes les années épidémiques.

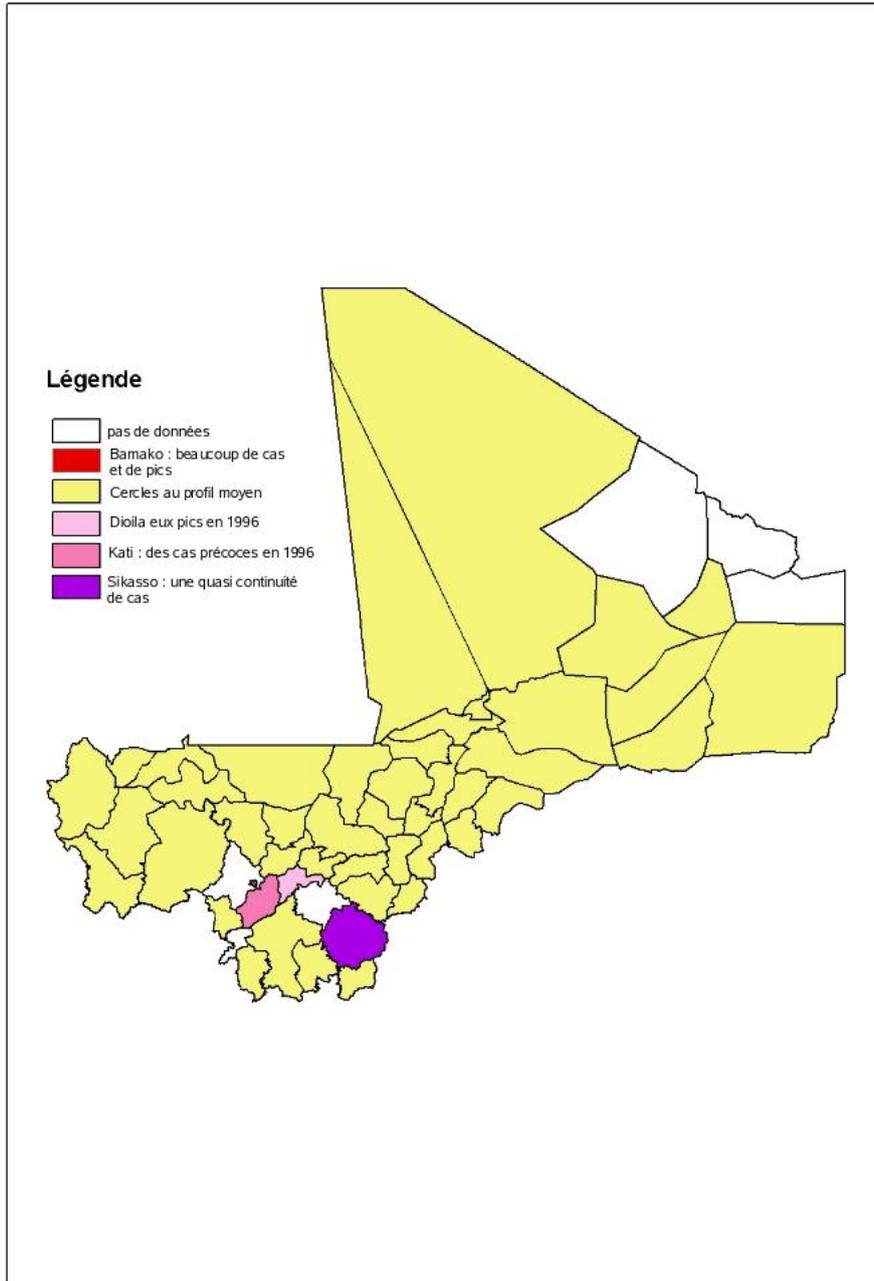


FIG. 15 – Les cercles aux profils atypiques

4.2 Approche géostatistique

Les graphiques 16, 18 sont des corrélations croisées différées entre les données de visibilité horizontale au sol et les cas de méningite déclarés. Chaque point informe sur la valeur prise simultanément (time lag = 0) par les cas de méningite en ordonné et la visibilité moyenne hebdomadaire en abscisse. Puis pour un décalage allant de 1 à 8 semaines on observe le nombre de cas de méningite confronté à la visibilité (time lag). De plus, le calcul a été fait sur les autres indices hebdomadaires (maximum, minimum et cumul) ; ces indices sont très similaires et donnent le même décalage temporel (cf. fig. 17). La corrélation est maximum lorsque le nuage de point s'infléchit vers la gauche ; on peut ainsi noter le décalage recherché pour chaque cercle. Il y a une corrélation maximale pour un décalage de 5 semaines pour tous les cercles, hormis Bamako (4 semaines) et Sikasso (6 semaines). L'information donnée par ces graphiques peut être résumée par les fonctions de covariance différée (fig. 19 et 20). On retrouve alors sur ceux-ci un minimum à 4 et 5 semaines.

Cette information permet de quantifier le laps de temps entre la baisse de visibilité et les pics épidémiques. Malheureusement on ne peut retrouver une information similaire pour le début des épidémies. Cela permet néanmoins de donner un ordre de temps pour la mise en place de campagnes de vaccinations réactives potentielles. De plus, une indétermination reste à lever : la baisse de la visibilité correspond-t-elle à des épisodes de poussières ?

Nous avons aussi fait les calculs de corrélations croisées différées sur les séries temporelles issues des données IDDI. Les résultats sont beaucoup moins probants (fig. 21 et 22) ; la structure des nuages n'est plus aussi nette et leur évolution temporelle ne semble plus continue. Cela est probablement dû aux valeurs fortes et à l'atténuation du phénomène saisonnier.

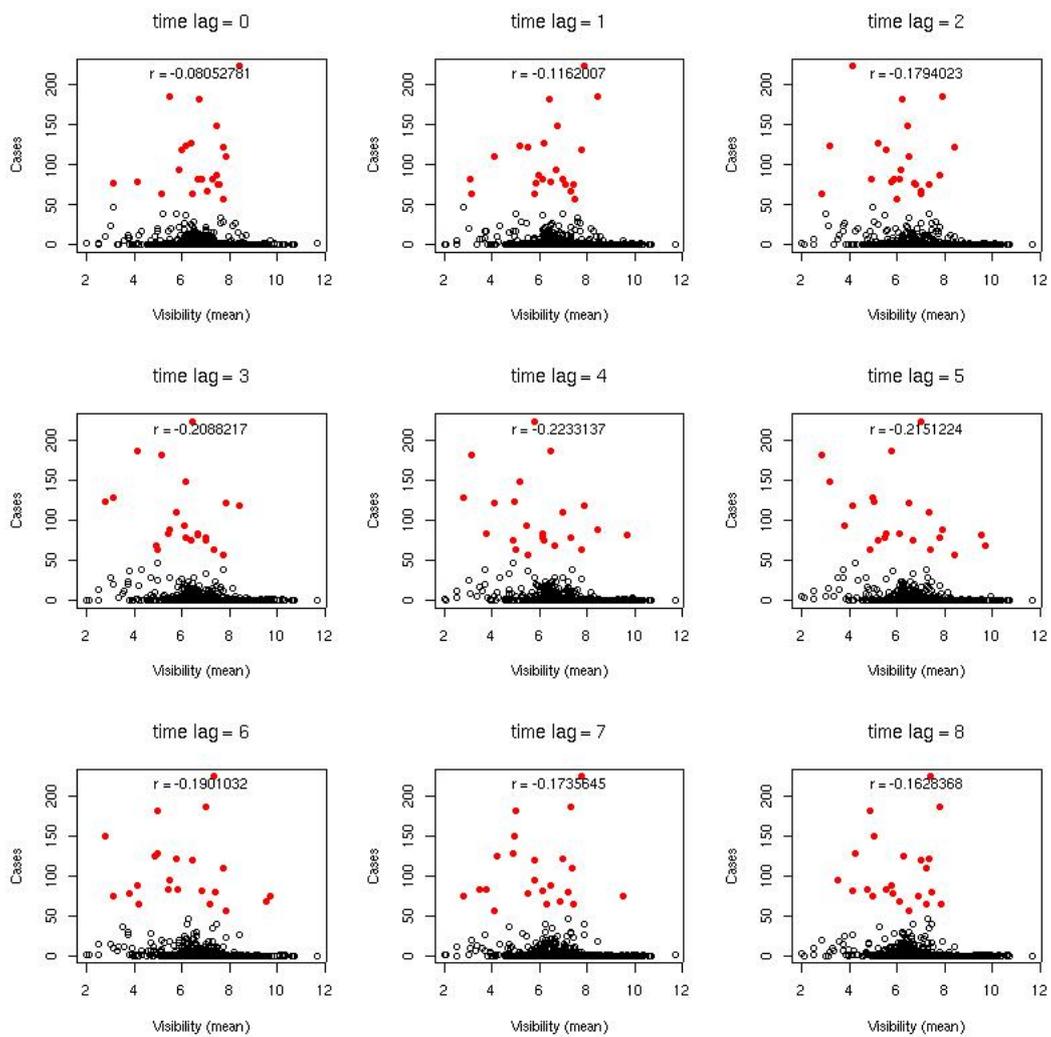


FIG. 16 – Visibilité (NCDC) par nombre des cas (moyenné par semaine) de méningite selon un décalage hebdomadaire pour Bamako

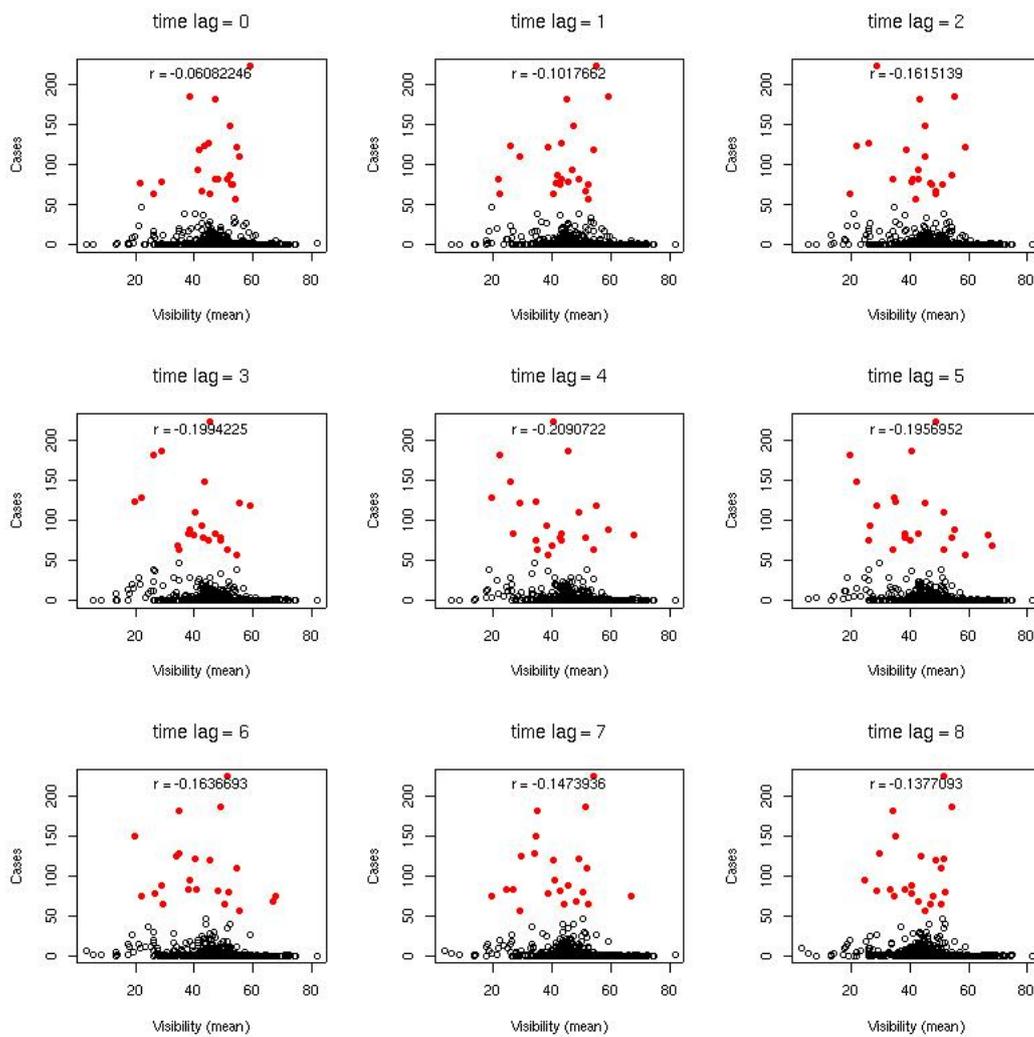


FIG. 17 – Visibilité (NCDC) par nombre des cas (cumul par semaine) de méningite selon un décalage hebdomadaire pour Bamako

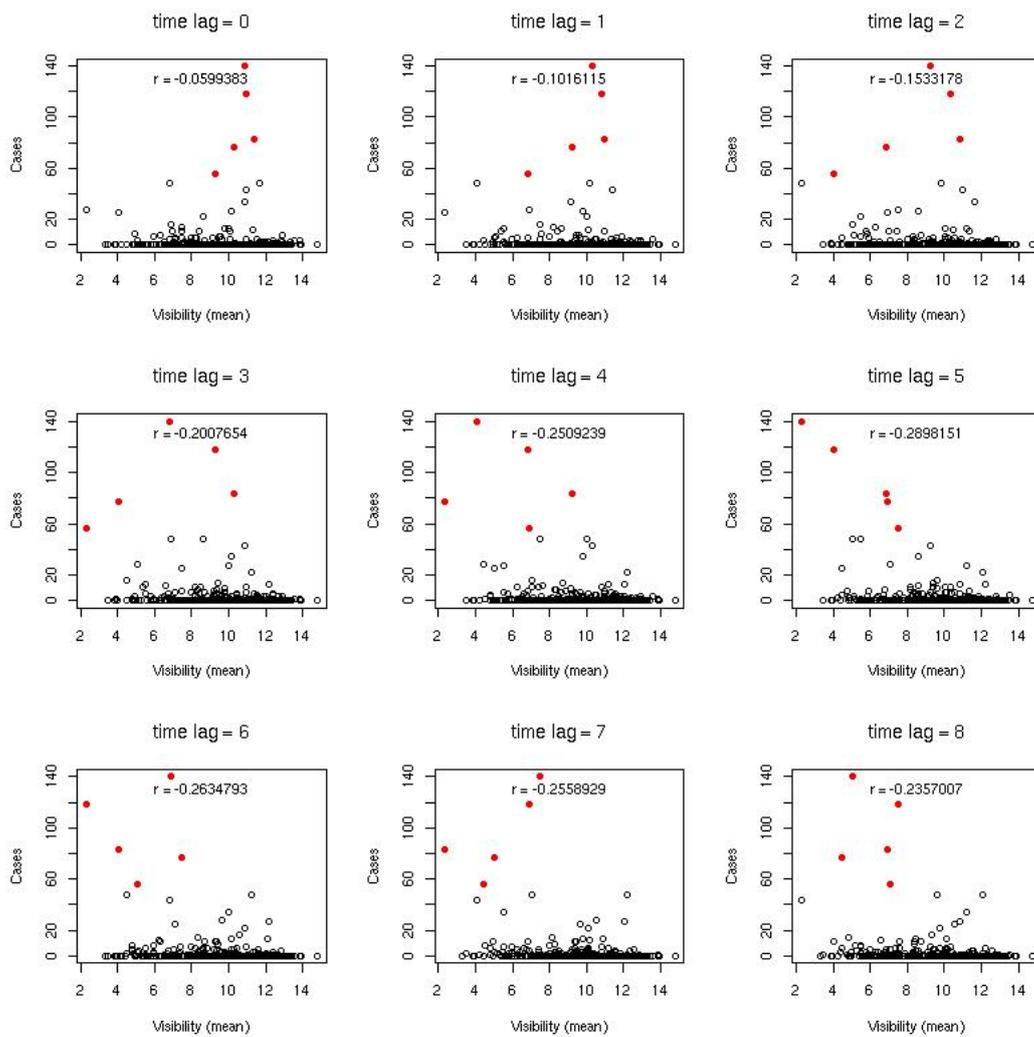


FIG. 18 – Visibilité (NCDC) par nombre des cas de méningite selon un décalage hebdomadaire pour Koutiala

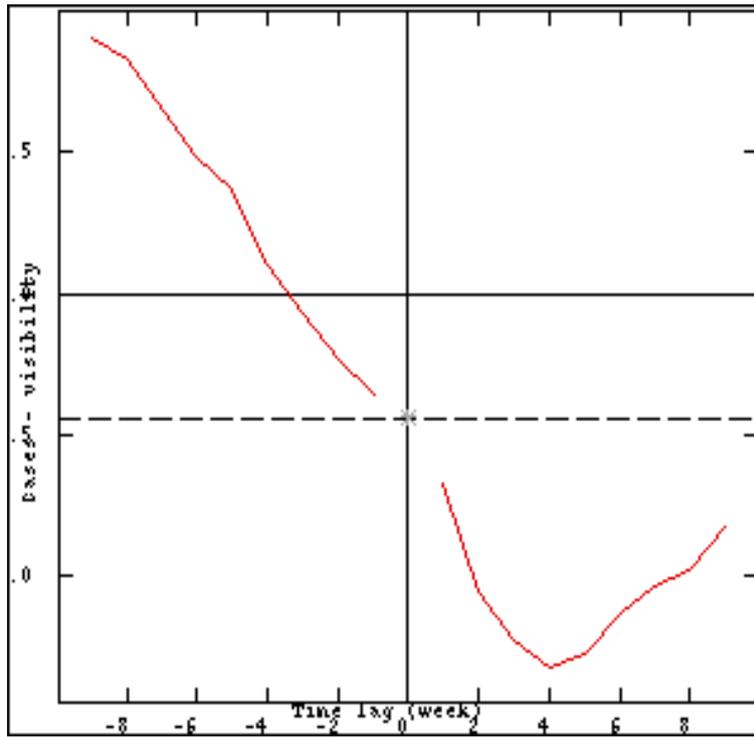


FIG. 19 – Fonction de covariance pour Bamako

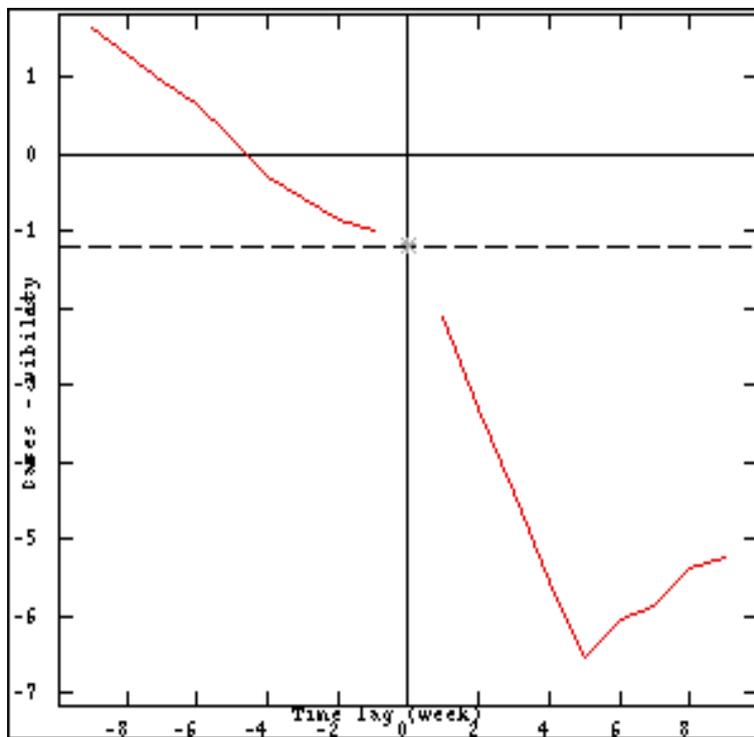


FIG. 20 – Fonction de covariance pour Koutiala

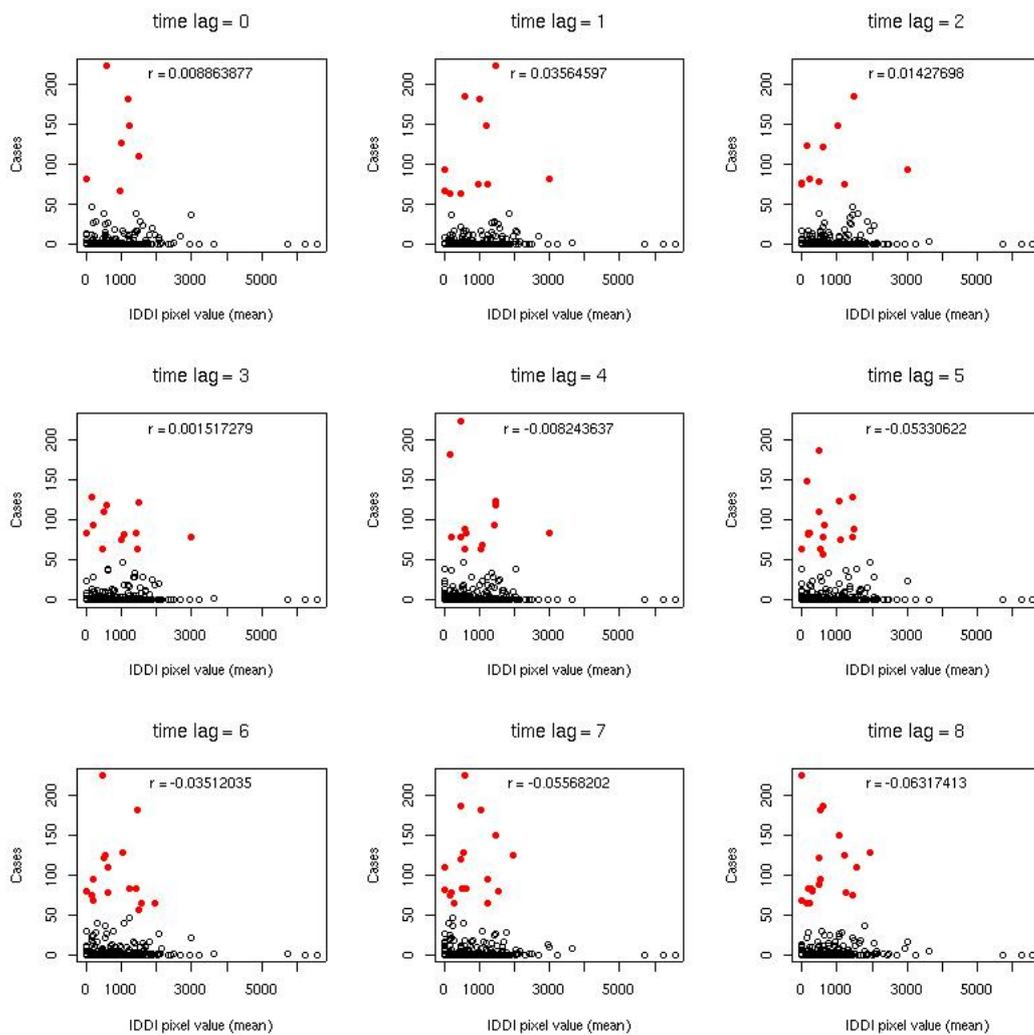


FIG. 21 – Corrélation croisée différée pour les données IDDI (Bamako)

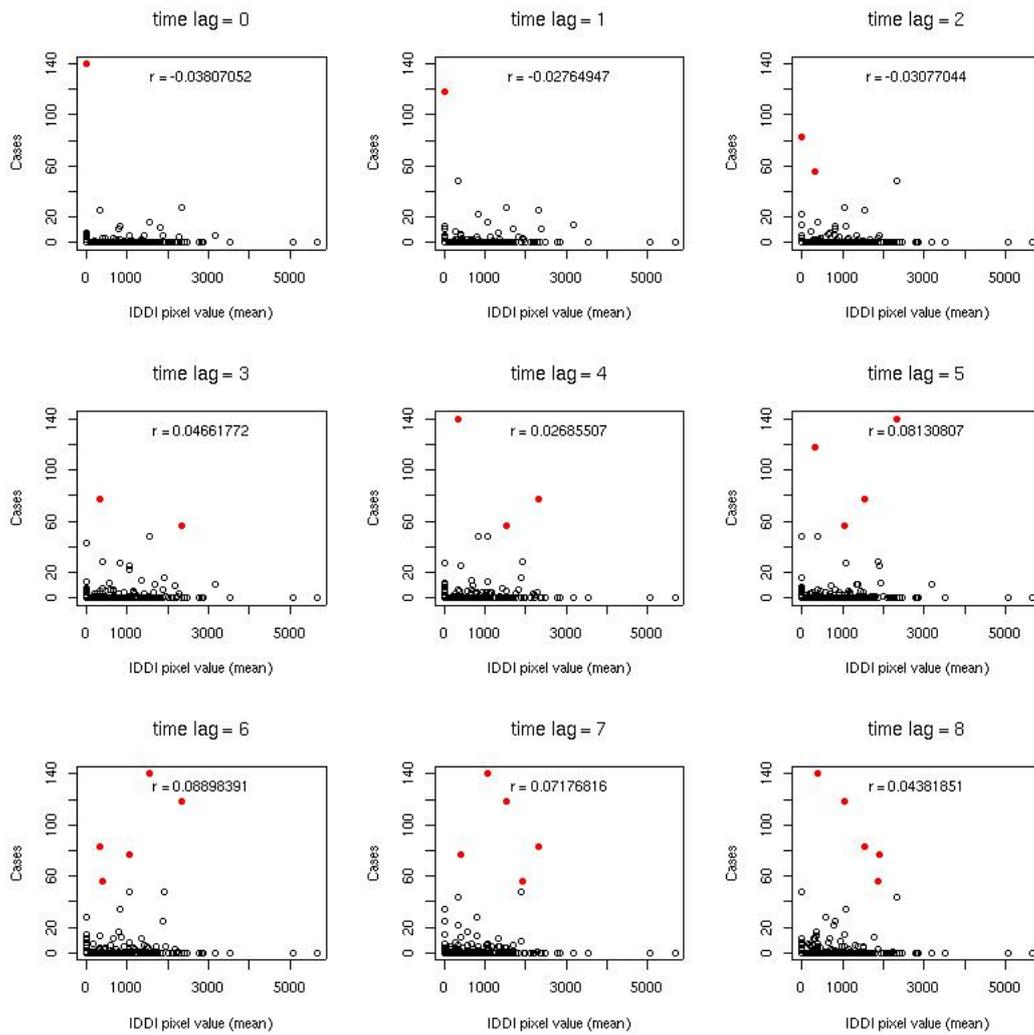


FIG. 22 – Corrélation croisée différée pour les données IDDI (Koutiala)

5 Conclusion

Cette étude aura permis de déboucher sur un résultat inédit²² de quantification de du décalage temporel entre les épisodes de poussières et les épidémies de méningites.

Par rapport aux objectifs initiaux le travail a été écourté en raison du temps non négligeable passé à se familiariser avec  et surtout à réussir la mise en concordance des données²³.

À ce stade ce stage constitue une étude préliminaire des aspects environnementaux de la méningite cérébro-spinale. En effet nous nous sommes limités au paramètre de visibilité mais il serait certainement possible d'affiner les résultats en prenant en compte d'autres résultats tel que la température, l'humidité, etc.

L'exploitation de méthodes géostatistiques permettrait également d'affiner les résultats en prenant en compte les aspects spatiaux négligés ici.

Enfin, avec Météosat Seconde Génération, et un nouvel indice IDDI développé pour ce dernier on peut s'attendre à des données télédéteectées plus riches spatialement, temporellement et surtout spectralement [Legrand *et al.*, 2004].

²²Résultat qui a été exposé récemment [Augereau *et al.*, 2007a, Augereau *et al.*, 2007b].

²³Nous avons passé au cours du rapport les divers reprises du travail en amont due à la découverte notamment du problème de numérotation de semaine et des changements de formats des données.

Références

- [WHO, 1998] (1998). Lutte contre les épidémies de méningite à méningocoque : guide pratique. WHO/EMC/BAC/98.3.
- [WHO, 2000] (2000). Who report on global surveillance of epidemic-prone infectious diseases. WHO/CDS/CSRI/ISR/2000.1.
- [EUM, 2004] (2004). Dust RGB Product.
- [MSF, 2004] (2004). Prise en charge d'une épidémie de méningite à méningocoque. ISBN : 2-906498-55-6.
- [Alonso et Taha, 2004] ALONSO, J.-M. et TAHA, M.-K. (2004). Épidémiologie des pathologies invasives à *Neisseria meningitidis*. *Revue française des laboratoires*, 2004(362):25–28.
- [Arnaud et Emery, 2000] ARNAUD, M. et EMERY, X. (2000). *Estimation et interpolation de données spatiales. Méthodes déterministes et géostatistiques*. Hermès-Science. ISBN : 2-7462-0138-0.
- [Augereau, 2006] AUGEREAU, B. (2006). Détection des aérosols à partir de Meteosat Seconde Génération et leur lien avec la méningite au Mali. Mémoire, Université Paris 7 - Denis Diderot.
- [Augereau *et al.*, 2007a] AUGEREAU, B., WACKERNAGEL, H., PHILIPON, S., BERGÈS, J.-C. et MERING, C. (2007a). étude des relations entre les nuages de poussières et le déclenchement des épidémies de méningite au Sahel : l'exemple du Mali. dans *Mousson - Des Hommes et des saisons en Afrique sub-saharienne*.
- [Augereau *et al.*, 2007b] AUGEREAU, B., WACKERNAGEL, H., PHILIPPON, S., BERGÈS, J.-C., WILSON, M. et MERING, C. (2007b). Interaction between dust clouds and meningitis epidemics in the Sahel. An exploratory study. dans *international Meeting on Statistical Climatology*.
- [Ballo *et al.*, 2002] BALLO, M. B., TRAORÉ, S. M., NIAMB ?L ?, I., BA, S., AYAD, M. et NDIAYE, S. (2002). Enquête démographique et de santé (edsm iii). Rapport technique, Cellule de planification et de la statistique de la santé, Direction nationale de la statistique et de l'informatique.

- [Bellouin, 2003] BELLOUIN, N. (2003). *Estimation de l'effet direct des aérosols à partir de la modélisation et de la télédétection passive*. Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille.
- [Bleines *et al.*, 2004] BLEINES, C., DERAISME, J., GEFFROY, F., N., J., PERSEVAL, S., RAMBERT, F., RENARD, D., TORRES, O. et TOUFFAIT, Y. (2004). *Isatis software Manuel*. Géovariances & École des Mines de Paris, 5th édition.
- [Bleines *et al.*, 2007] BLEINES, C., DERAISME, J., GEFFROY, F., N., J., PERSEVAL, S., RAMBERT, F., RENARD, D., TORRES, O. et TOUFFAIT, Y. (2007). *Isatis Technical References, Structure identification in the intrinsic case*.
- [Caugant, 2002] CAUGANT, D. (2002). L'épidémiologie moléculaire des méningocoques. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 95(5):319–322.
- [Chessel, 2006] CHESSEL, D. (2006). Manipuler des données calendaires.
- [Chessel *et al.*, 2006] CHESSEL, D., DUFOUR, A.-B., DRAY, S., LOBRY, J. R., OLLIER, S., PAVOINE, S. et THIOULOUSE, J. (2006). The ade4 package.
- [Emery, 2001] EMERY, X. (2001). Géostatistique linéaire. ENSMP.
- [Girard *et al.*, 2006] GIRARD, M. P., PREZIOSI, M.-P., AGUADO, M.-T. et KIENY, M. P. (2006). A review of vaccine research and development : Meningococcal disease. *Vaccine*, 24:4692–4700.
- [Greenwood, 1999] GREENWOOD, B. (1999). Meningococcal meningitis in Africa. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 93:341–353.
- [Greenwood, 2006] GREENWOOD, B. (2006). 100 years of epidemic meningitis in West-Africa – has anything changed? *Tropical Medicine and International Health*, 11(6):773–780.
- [King *et al.*, 1999] KING, M. D., KAUFMAN, Y. J., DIDIER, T. et NAKALIMA, T. (1999). Remote sensing of tropospheric aerosols from space : past, present and future. *Bulletin of the American meteorological society*, 80(11):2229 –2258.
- [Kotecká, 2005] KOTECKÁ, M. (2005). Study of potential on meningitis in Niger and influence of dust aerosol. Mémoire, Université de Lille I.
- [Lapeyssonnie, 1963] LAPEYSSONNIE, L. (1963). *La méningite cérébro-spinale en Afrique*. World Health Organization.

- [Lê *et al.*, 2006] LÊ, S., JOSSE, J. et HUSSON, F. (2006). FactoMineR : an R package for multivariate analysis.
- [Legrand *et al.*, 1992] LEGRAND, M., CAUTENET, G. et BURIEZ, J.-C. (1992). Thermal impact of Saharan dust over land. Part ii : application to satellite IR remote sensing. *Journal of Applied Meteorology*, 31:181–192.
- [Legrand *et al.*, 2002] LEGRAND, M., PANCRATI, O., PLANA-FATTORI, A. et BROOKS, N. P. J. (2002). African dust climatology from METEOSAT IR compared to ground-based photometric measurements. dans *The 2002 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*.
- [Legrand *et al.*, 2001] LEGRAND, M., PLANA-FATTORI, A. et C., N. (2001). Satellite detection of dust using th IR imagery of METEOSAT 1. Infrared difference dust index. *Journal of Geophysical Research*, 106(D16):18, 251–18, 274.
- [Legrand *et al.*, 2004] LEGRAND, M., VERGÉ-DEPRÉ, G. et PANCRATI, O. (2004). Remote sensing of dust in Africa using MSG/SEVIRI : towards a multi-channel dust index. dans *Second MSG RAO Workshop*.
- [Lewis *et al.*, 2001] LEWIS, R., NATHAN, N., DIARRA, L., BELANGER, F. et PAQUET, C. (2001). Timely detection of meningococcal meningitis epidemics in Africa. *The Lancet*, 358(9278):287–293.
- [Malherbe et Raouïl, 2002] MALHERBE, L. et RAOUÏL, L. (2002). Méthodes de représentation de la qualité de l’air dans les zones peu/pas couvertes. Part. 1. Stratégies et préconisations. Rapport technique, Institut national de l’environnement industriel – Laboratoire central de surveillance de la qualité de l’air. INERIS DRC-02-39284-LRI-Lma-n7-LCSQA.
- [Malherbe et Raouïl, 2003] MALHERBE, L. et RAOUÏL, L. (2003). Méthodes de représentations de la qualité de l’air. Guide d’utilisation des méthodes de la géostatistique linéaire. Rapport technique, Institut national de l’environnement industriel – Laboratoire central de surveillance de la qualité de l’air. INERIS DRC-03-45597-LRI-Lma-n140_v1.
- [Marticorena, 1995] MARTICORENA, B. (1995). *Modélisation de la productin d’aérosols désertiques en zones arides et semi-arides : développement et va-*

lidation d'un code de calcul adapté au transport à grande échelle. Thèse de doctorat, Université Paris VII -Denis Diderot.

- [Matheron, 1963] MATHERON, G. (1963). Les principes de la géostatistiques. Rapport technique N-88, Centre de géostatistique - Écoles des Mines de Paris.
- [Matheron, 1978] MATHERON, G. (1978). Estimer et choisir. dans *Les cahiers du Centre de Morphologie Mathématiques*, numéro 7. Écoles des Mines de Paris.
- [Molesworth *et al.*, 2003] MOLESWORTH, A. M., CUEVAS, L. E., STEPHEN J. CONNOR, S. J., MORSE, A. P. et C., T. M. (2003). Environmental risk and meningitis epidemics in Africa. *Emergin Infectious Diseases*, 9(10):1287–1293.
- [Molesworth *et al.*, 2002] MOLESWORTH, A. M., THOMSON, M. C., CONNOR, S. J., CREESWELL, M. P., MORSE, Andrew, P., SHEARS, P., HART, A. C. et CUEVAS, L. E. (2002). Where is the Meningitis Belt ? Defining an area at risk of epidemic meningitis in Africa. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 96:242–249.
- [Pancrati, 2003] PANCRATI, O. (2003). *Télé-détection de l'aérosol désertique depuis le sol par radiométrie infrarouge thermique multibande*. Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille.
- [Paradis, 2005] PARADIS, E. (2005). R pour les débutants.
- [Parent du Châtelet *et al.*, 2002] Parent du CHÂTELET, I., ALONSO, J.-M. et TAHA, M.-K. (2002). Expansion clonale de *Neisseria meningitis* W135. Implications épidémiologique pour la ceinture africaine de la méningite. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 95(5):323–325.
- [Philippon, 2006] PHILIPPON, S. (2006). *De la veille sanitaire à l'urgence épidémique. Méningite cérébrospinale et système de santé au Mali : une approche géographique*. Thèse de doctorat, Université Paris I Panthéon-Sorbonne.
- [Saliou et Debois, 2002] SALIOU, P. et DEBOIS, H. (2002). Quelles stratégies vaccinales contre les épidémies africaines de méningite à méningocoque ? *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 95(5):326–330.
- [Savory *et al.*, 2006] SAVORY, E. C., CUEVAS, L. E., YASSIN, M. A., HART, C. A., MOLESWORTH, A. M. et THOMSON, M. C. (2006). Evaluation of the meningitis epidemics risk model in Africa. *Epidemiology Infectiology*, 134:1047–1051.

- [Sultan *et al.*, 2004] SULTAN, B., LABADI, K., BELTRANDO, G. et JANICOT, S. (2004). L'épidémie de méningite au Mali et la circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest. *environnement, Risques et Santé*, 3(1):23–24.
- [Sultan *et al.*, 2005] SULTAN, B., LABADI, K., GUÉGAN, J.-F. et JANICOT, S. (2005). Climate drives the meningitis epidemics onset in West Africa. *Plos Medicine*, 2(1):0043–0049.
- [Thomson *et al.*, 2006] THOMSON, M. C., MOLESWORTH, A. M., DJINGAREY, M. H., R., Y. K., BELANGER, F. et CUEVAS, L. E. (2006). Potential of environmental models to predict meningitis epidemics in Africa. *Tropical Medicine and International Health*, 11(6):781–788.
- [Tzeng et Stephens, 2000] TZENG, Y.-L. et STEPHENS, D. S. (2000). Epidemiology and pathogenesis of *Neisseria meningitidis*. *Microbes and Infection*, 2(6):687–700.
- [Vergé-Depré, 2007] VERGÉ-DEPRÉ, G. (2007). *Téledétection multispectrale des poussières désertiques dans l'infrarouge thermique au-dessus de l'Afrique à partir de MSG/SEVIRI*. Thèse de doctorat, Université des Antilles et de la Guyane.
- [Yaka et Sultan, 2007] YAKA, P. et SULTAN, B. (2007). Analyse spatio-temporelle et dynamique atmosphérique liée à l'émergence saisonnière et à l'ampleur de la MCS en Afrique sahélienne. dans *Mousson - Des Hommes et des saisons en Afrique sub-saharienne*.

Table des figures

1	Carte administrative du Mali	1
2	Carte de densité de population au Mali	2
3	La ceinture de méningite	4
4	Modèle d'occurrence de la méningite	9
5	Cartes krigées de visibilité et d'incidence relative	11
6	Nombre de cas de méningite (1996-1997)	15
7	Paramètres NCDC et cas de méningite à Bamako	16
8	Paramètres NCDC et cas de méningite à Koutiala	17
9	Carte des stations météorologiques	18
10	Continuité des données météorologiques	19
11	Diagramme en arche de l'algorithme IDDI	22
12	Exemple d'image IDDI	23
13	Confrontation des données IDDI et NCDC pour Bamako	26
14	Confrontation des données IDDI et NCDC pour Koutiala	27
15	Les cercles aux profils atypiques	30
16	Visibilité (NCDC) par nombre des cas (moyenné par semaine) de méningite selon un décalage hebdomadaire pour Bamako	32
17	Visibilité (NCDC) par nombre des cas (cumul par semaine) de mé- ningite selon un décalage hebdomadaire pour Bamako	33
18	Visibilité (NCDC) par nombre des cas de méningite selon un déca- lage hebdomadaire pour Koutiala	34
19	Fonction de covariance pour Bamako	35
20	Fonction de covariance pour Koutiala	35
21	Corrélation croisée différée pour les données IDDI (Bamako)	36
22	Corrélation croisée différée pour les données IDDI (Koutiala)	37

Table des matières

1	Introduction	1
2	Situation du sujet	3
2.1	La méningite	3
2.2	Les aérosols et leur détection	5
2.3	Études existantes	8
2.4	Objectifs du stage	12
3	Les données et leurs traitements	13
3.1	Les données épidémiologiques	13
3.2	Les données météorologiques	14
3.3	Les données satellites, le produit IDDI	20
3.4	Les traitements	24
4	Analyse des résultats	29
4.1	Approche multivariée classique	29
4.2	Approche géostatistique	31
5	Conclusion	39