

UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale



Caractérisation de la variabilité spatio-temporelle de la pluie au Fakara, Niger

Promoteurs :

Pr. C. Bielders
Dr. B. Gérard

*Travail de fin d'études présenté en
vue de l'obtention du grade de
bio-ingénieur par :*

Lecteurs :

Pr. P. Bogaert
Pr. M. Vanclooster

Nathalie Van Vyve

Louvain-la-Neuve
Année académique 2005-2006

Remerciements

Je voudrais remercier les personnes qui m'ont permis de chercher, découvrir, manipuler, me remettre en question, me dépasser, me poser les bonnes questions afin que ce travail soit ce qu'il est.

Un tout grand merci à

Charles Bielders, et Bruno Gérard, mes promoteurs, qui m'ont permis de me lancer dans ce projet et qui m'ont soutenue et aiguillée tout au long de l'année.

Patrick Bogaert qui a partagé avec moi son savoir de la géostatistique et pour ses conseils éclairés sans lesquels je me serais perdue.

Luc Descroix de l'IRD qui m'a ouvert sa porte et sa bibliothèque ainsi qu'Abdou Ali du centre Agrhymet qui m'a initiée au monde de la variabilité spatiale de la pluie.

Boubaka, Tahirou, Laouali, Pierre et Mehdi pour leur accueil, leur aide et les moments passés ensemble sur le terrain.

Caro d'avoir partagé avec moi cette aventure nigérienne pleine de rebondissements.

Steph pour son soutien, son assiduité à la relecture et ses conseils avisés.

Enfin, à tous les autres pour toutes les petites choses qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail : Fred, mes parents, Caroline, Stéphanie, Franck, mes amis nigériens, ...

Résumé

Au Sud-Ouest du Niger, dans la partie du pays qui n'est pas aride, les agriculteurs sont entièrement tributaires de l'eau de pluie pour leurs cultures. En plus des besoins en eau des cultures, la réponse à l'engrais dépend également des précipitations. Une meilleure compréhension de la variabilité pluviométrique de la région permettrait une amélioration de la gestion des risques induits par cette variabilité.

L'objectif de ce travail est de caractériser la variabilité spatiale de la pluie dans une zone du Fakara de 500 km² à l'Ouest du Niger. Un réseau d'une cinquantaine de pluviomètres implanté en 2000 a permis de récolter les données pluviométriques jusqu'en 2005.

L'analyse exploratoire des données a démontré que sur cette zone et sur la période 2000 à 2005, il n'y a pas de corrélation entre le nombre d'événements pluvieux total sur la saison et le cumul pluviométrique annuel. L'analyse de la corrélation entre ce dernier et le nombre d'événements pluvieux du cœur de la saison n'a pas donné de meilleurs résultats.

Les analyses de la structure spatiale des hauteurs de pluie et des champs de pluie ont été effectuées grâce à des variogrammes dont les classes de distances, d'intervalles de 1,5 km, vont de 1 à 22 km. Ces analyses ont été réalisées sur les données pluviométriques brutes et transformées en prenant la racine carrée des données brutes. Ces deux jeux de données ont été analysés sous forme normalisée ou non. Différentes échelles d'agrégation temporelle, de l'événement pluvieux à la saison, ont été analysées à travers ces variogrammes.

Aucune structure spatiale n'a pu être mise en évidence par les variogrammes représentant la structure spatiale des hauteurs de pluie à l'échelle événementielle si ce n'est une légère tendance linéaire croissante. Les hauteurs de pluie peuvent donc être considérées comme des variables indépendantes à cette échelle. La structure spatiale devient cependant plus significative quand le temps d'agrégation temporelle augmente. Pour les variogrammes des champs de pluie, la tendance linéaire croissante est plus marquée. Néanmoins, l'effet pépète est, dans tous les cas, très important et largement prépondérant sur toute structure spatiale proprement dite. La pluviométrie est, de ce fait, un phénomène essentiellement aléatoire au Fakara, puisqu'un effet de pépète pur représente une absence de corrélation entre les données.

Certes, dans ces limites d'échelle spatiale (2 à 22 km), aucune structure n'apparaît, mais la tendance linéaire croissante peut être le reflet d'une corrélation spatiale qui serait mise en évidence grâce à des pluviomètres distants de plus de 20 km.

Cette étude prouve encore une fois combien les champs de pluie au Fakara sont extrêmement variables et difficiles à prédire. Pour les producteurs sahéliens, la meilleure méthode de gestion des risques, qui découlent de la variabilité pluviométrique, pour les cultures est d'éparpiller les champs aux alentours du village.

Table des matières

1. INTRODUCTION :	1
2. LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE AU SAHEL	2
2.1. PRÉCISIONS SUR LE RÉGIME PLUVIOMÉTRIQUE SAHÉLIEN	2
2.1.1. <i>Le climat</i>	2
2.1.2. <i>La pluviométrie</i>	3
2.1.3. <i>La mise en place de la mousson africaine</i>	4
2.1.4. <i>Avancées récentes de l'analyse du système pluviométrique sahélien</i>	7
2.2. DESCRIPTION DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE AU SAHEL.....	9
2.3. ECHELLES PERTINENTES POUR L'ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE.....	12
2.4. MÉTHODE D'ANALYSE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DE LA PLUIE	14
2.4.1. <i>Le variogramme (Bogaert, 2005)</i>	14
2.4.2. <i>Les analyses préalables de la variabilité pluviométrique au Sahel</i>	16
2.5. MODÈLES EXISTANTS.....	20
3. MATÉRIELS ET MÉTHODES	21
3.1. SITE DE L'ÉTUDE.....	21
3.1.1. <i>Contexte global : Le Niger</i>	21
3.1.2. <i>Contexte local : Le Fakara</i>	21
3.2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.....	23
3.2.1. <i>Les pluviomètres</i>	23
3.2.2. <i>Réseau de pluviomètres</i>	23
3.2.3. <i>Méthode de collecte</i>	25
3.2.4. <i>Méthode d'enregistrement</i>	27
3.3. ANALYSE DES DONNÉES.....	27
3.3.1. <i>Procédure de contrôle et « nettoyage » des données</i>	27
3.3.2. <i>Analyse de la variabilité spatiale des pluies</i>	27
3.3.3. <i>Analyse de la composante temporelle de la structure spatiale de la pluie</i>	30
3.3.4. <i>Moyenne des variogrammes</i>	31
4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	33
4.1. ANALYSE EXPLORATOIRE DES DONNÉES.....	33
4.1.1. <i>Début et fin de la saison des pluies et cumuls pluviométriques</i>	33
4.1.2. <i>Variabilité interannuelle du nombre d'événements pluvieux et hauteur moyenne des pluies</i>	36
4.1.3. <i>Variabilité intra-annuelle du nombre d'événements pluvieux et hauteur moyenne des pluies</i>	39
4.1.4. <i>Distribution des pluies</i>	41
4.1.5. <i>Evolution de l'intermittence spatiale sur le réseau pluviométrique</i>	43
4.2. ANALYSE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DE LA PLUIE	45
4.2.1. <i>Variabilité spatiale des cumuls pluviométriques saisonniers</i>	45
4.2.2. <i>Analyse de la structure spatiale des hauteurs de pluie</i>	46
4.2.3. <i>Analyse de la structure spatiale des champs de pluies</i>	55
4.3. ANALYSE DE LA COMPOSANTE TEMPORELLE DE LA STRUCTURE SPATIALE DE LA PLUIE	59
4.4. DISCUSSIONS	62
5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	63
5.1. CONCLUSIONS.....	63
5.2. PERSPECTIVES.....	64
6. BIBLIOGRAPHIE	66
7. ANNEXES	- 0 -

Table des figures

FIGURE 1 : TEMPERATURE, ETP ET PLUVIOMETRIE MOYENNES MENSUELLES ENREGISTREES A NIAMEY- 13°30'N 2°08'E (1931-1990) (SIVAKUMAR ET AL., 1993).	3
FIGURE 2 : PRINCIPALES ZONES AGRO-CLIMATIQUES (MÉTÉOROLOGIE NATIONALE DU NIGER).	4
FIGURE 3 : REPRÉSENTATION DE LA ZCIT AU NIVEAU DE L'AFRIQUE DE L'OUEST EN ÉTÉ ET GÉNÉRATION DE NUAGES DE LA MOUSSON. (SCHAYES, 2000).	5
FIGURE 4 : PRÉCIPITATIONS ANNUELLES ET MOYENNE DES SOUS-SÉRIES PLUVIOMÉTRIQUES AU COURS DES TROIS PÉRIODES « HUMIDE », DE « SÉCHERESSE » ET « ACTUELLE » À GOURÉ, NIGER. (OZER ET AL, 2005).	6
FIGURE 5 : EVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS À GOURÉ DE 1936 À 2003 EXPRIMÉE EN FONCTION DE L'INDICE D'ANOMALIE PLUVIOMÉTRIQUE SELON LA MÉTHODE DE LAMB (D'APRÈS OZER ET AL, 2005).	7
FIGURE 6 : INFLUENCE DE LA POSITION DU FIT SUR LE CLIMAT SAHÉLIEN.	7
FIGURE 7 : MOYENNE DES PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES (MM/JOUR) ENTRE 10° OUEST ET 10° EST À LA LATITUDE 15° NORD SUR LA PÉRIODE 1968-1990 (SULTAN ET JANICOT, 2004).	8
FIGURE 8 : ILLUSTRATION DES PHÉNOMÈNES D'INTERMITTENCE SPATIALE DE L'ÉVÉNEMENT DU PREMIER JUIN 2000, POUR LE RÉSEAU DE PLUVIOMÈTRES DU FAKARA.	9
FIGURE 9 : VARIABILITÉ INTERANNUELLE DU NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX ET CUMULS PLUVIOMÉTRIQUES ANNUELS ASSOCIÉS (ALI, 2003).	11
FIGURE 10 : ILLUSTRATION DES PROBLÈMES RENCONTRÉS SI LA DISTANCE CONSIDÉRÉE ENTRE LES POINTS EST TROP IMPORTANTE. REPRÉSENTATION DES COUPLES DE POINTS ÉTANT SÉPARÉS PAR UNE DISTANCE SUPÉRIEURE À 1 (BOGAERT, 2006).	15
FIGURE 11 : ÉLÉMENTS D'UN MODÈLE DE VARIOGRAMME (DRAPEAU).	16
FIGURE 12 : VARIOGRAMMES CLIMATOLOGIQUES DU RÉSEAU EPSAT-NIGER (LEBEL ET LE BARBÉ, 1997).	18
FIGURE 13 : DIFFÉRENTS TYPES DE FONCTION DE STRUCTURE CARACTÉRISANT LES ÉVÉNEMENTS SUR UN RÉSEAU DENSE DANS LA RÉGION DE NIAMEY. A) ET B) VARIOGRAMMES PRÉSENTANT UN EFFET DE PÉPITE PUR ; C) VARIOGRAMME DE TYPE PUISSANCE ; D) VARIOGRAMME DE TYPE GAUSSIEN. (TAUPIN, 1997).	19
FIGURE 14 : CARTE DÉTAILLÉE DU NIGER (ONU)	21
FIGURE 15 : SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE : LE FAKARA (HIERNAUX ET AYANTUNDE, 2004).	22
FIGURE 17 : CARTE DU RÉSEAU DE PLUVIOMÈTRES DU FAKARA EN 2005.	24
FIGURE 19 : MÉTHODE DE COLLECTE DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES.	26
FIGURE 20 : CARTE DE LA RÉPARTITION DES PLUVIOMÈTRES DONT LES ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX SONT DATÉS ET CEUX DONT LES ÉVÉNEMENTS NE SONT PAS DATÉS, RÉSEAU DE PLUVIOMÈTRES DE L'ANNÉE 2005.	26
FIGURE 21 : ILLUSTRATION D'UN PHÉNOMÈNE DE TYPE « BRUIT BLANC » (BOGAERT, 2005)	30
FIGURE 22 : COMPARAISON DES DEUX MÉTHODES DE CALCUL DE MOYENNE DES VARIOGRAMMES POUR DES GROUPES DE 3 (A), 13 (B), 16 (C) ET 5 (D) ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX. LÉGENDE : * MOYENNE PONDÉRÉE, O MOYENNE PAR LA MÉTHODE DES DISTANCES.	32
FIGURE 23 : EVOLUTION DE LA MOYENNE DE LA HAUTEUR DE PLUIE TOMBÉE PAR ÉVÉNEMENT DE 2000 À 2005 AU FAKARA.	36
FIGURE 24 : CORRÉLATION ENTRE LE NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX MOYEN ET LE CUMUL PLUVIOMÉTRIQUE ANNUEL MOYEN POUR LES ANNÉES 2000 À 2005 POUR LE RÉSEAU PLUVIOMÉTRIQUE DU FAKARA.	36
FIGURE 25 : CORRÉLATION ENTRE LE NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX ET LE CUMUL PLUVIOMÉTRIQUE ANNUEL POUR TOUS LES PLUVIOMÈTRES DU RÉSEAU PLUVIOMÉTRIQUE DU FAKARA DE 2000 À 2005.	37
FIGURE 26 : CORRÉLATION ENTRE LE NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX DU CŒUR DE LA SAISON ET LE CUMUL PLUVIOMÉTRIQUE ANNUEL POUR LE RÉSEAU PLUVIOMÉTRIQUE DU FAKARA.	38
FIGURE 27 : EVOLUTION DU NOMBRE MOYEN D'ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX PAR MOIS ET PAR PLUVIOMÈTRE SUR LE RÉSEAU DU FAKARA DE 2000 À 2005.	39
FIGURE 28 : EVOLUTION DÉCADAIRE DU NOMBRE MOYEN D'ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX PAR PLUVIOMÈTRE. MOYENNE POUR LES SIX ANNÉES (2000 À 2005), AU FAKARA.	39
FIGURE 29 : EVOLUTION DÉCADAIRE DE LA MOYENNE DE HAUTEUR DE PLUIE PAR ÉVÉNEMENT. MOYENNE SUR SIX ANS, DE 2000 À 2006, POUR LA ZONE DU FAKARA.	40
FIGURE 30 : EVOLUTION DÉCADAIRE DU CUMUL PLUVIOMÉTRIQUE. MOYENNE SUR LES SIX ANNÉES DE MESURE (2000 À 2006), AU FAKARA.	41
FIGURE 31 : DISTRIBUTION DES PLUIES NORMALISÉES, MOYENNÉE SUR 6 ANNÉES (2000-2005), POUR LA TROISIÈME DÉCADE DE JUIN ET LA PREMIÈRE DÉCADE DE JUILLET, POUR LA ZONE DU FAKARA.	42
FIGURE 32 : DISTRIBUTION DES PLUIES NORMALISÉES APRÈS TRANSFORMATION LOGARITHMIQUE, MOYENNÉE SUR 6 ANNÉES (2000-2005), POUR LA TROISIÈME DÉCADE DE JUIN ET LA PREMIÈRE DÉCADE DE JUILLET, POUR LA ZONE DU FAKARA.	42

FIGURE 33 : DISTRIBUTION DES PLUIES NORMALISÉES APRÈS TRANSFORMATION PAR LA RACINE CARRÉE, MOYENNÉE SUR 6 ANNÉES (2000 À 2005), POUR LA TROISIÈME DÉCADE DE JUIN ET LA PREMIÈRE DÉCADE DE JUILLET, POUR LA ZONE DU FAKARA.	43
FIGURE 34 : ÉVOLUTION DÉCADAIRE DE LA PROBABILITÉ DE RECOUVREMENT DU RÉSEAU DE PLUVIOMÈTRES DU FAKARA, MOYENNÉE SUR 6 ANS (2000 À 2005).....	43
FIGURE 35 : CARTES DE LA RÉPARTITION DES CUMULS PLUVIOMÉTRIQUES SAISONNIERS POUR LES ANNÉES 2000 À 2005 AU FAKARA.	46
FIGURE 36 : VARIOGRAMMES DES ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX MOYENNÉS SUR BASE MENSUELLE POUR LES MOIS DE JUIN, JUILLET, AOÛT ET SEPTEMBRE, DE 2000 À 2005, SUR BASE DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES BRUTES NORMALISÉES DU FAKARA.	48
FIGURE 37 : VARIOGRAMMES DES ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX, MOYENNÉS PAR MOIS ET SUR SIX ANNÉES (2000 À 2005), SUR BASE DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES BRUTES NORMALISÉES DU FAKARA.	48
FIGURE 38 : VARIOGRAMMES DES ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX, MOYENNÉS SUR BASE MENSUELLE, POUR LES MOIS DE JUIN, JUILLET, AOÛT ET SEPTEMBRE, DE 2000 À 2005, À PARTIR DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES BRUTES DU FAKARA.	49
FIGURE 39 : VARIOGRAMMES ÉVÉNEMENTIELS MOYENS POUR LES ANNÉES 2000 À 2005, POUR LES MOIS DE JUIN, JUILLET, AOÛT ET SEPTEMBRE.	51
FIGURE 40 : VARIOGRAMMES DES ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX MOYENNÉS SUR BASE MENSUELLE POUR LES MOIS DE JUIN, JUILLET, AOÛT ET SEPTEMBRE, DE 2000 À 2006, SUR BASE DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES TRANSFORMÉES ET NORMALISÉES DU FAKARA.....	52
FIGURE 41 : VARIOGRAMMES DES ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX, MOYENNÉS PAR MOIS ET SUR SIX ANNÉES (2000 À 2005), SUR BASE DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES TRANSFORMÉES ET NORMALISÉES DU FAKARA.....	53
FIGURE 42 : VARIOGRAMMES DES ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX MOYENNÉS SUR BASE MENSUELLE, POUR LES MOIS DE JUIN, JUILLET AOÛT ET SEPTEMBRE, DE 2000 À 2005, À PARTIR DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES TRANSFORMÉES.....	54
FIGURE 43 : VARIOGRAMMES ÉVÉNEMENTIELS MOYENS POUR LES ANNÉES 2000 À 2005, POUR LES MOIS DE JUIN, JUILLET, AOÛT ET SEPTEMBRE SUR BASE DES DONNÉES TRANSFORMÉES.	55
FIGURE 44 : VARIOGRAMMES PLUIE/PLUIE NULLE POUR LES ÉVÉNEMENTS DES MOIS DE JUIN, JUILLET, AOÛT ET SEPTEMBRE, POUR LES ANNÉES 2000 À 2005 AU FAKARA.	56
FIGURE 45 : VARIOGRAMMES PLUIE/PLUIE NULLE POUR LES ÉVÉNEMENTS DES MOIS DE JUIN, JUILLET, AOÛT ET SEPTEMBRE, REPRÉSENTÉS PAR ANNÉE, DE 2000 À 2005.	57
FIGURE 46 : VARIOGRAMMES PLUIE/PLUIE NULLE MOYENNÉS SUR LES 6 ANNÉES POUR LES MOIS DE JUIN, JUILLET AOÛT ET SEPTEMBRE.	58
FIGURE 47 : VARIOGRAMMES DES PLUIES CUMULÉES SUR 31, 25, 19, 15, 9, 5 JOURS ET DES PLUIES JOURNALIÈRES, POUR LES MOIS DE JUIN, JUILLET, AOÛT ET SEPTEMBRE, POUR LE FAKARA.	59
FIGURE 48 : VARIOGRAMMES DES CUMULS PLUVIOMÉTRIQUES SAISONNIERS SUR LA ZONE DU FAKARA, DE 2000 À 2006.....	60

Table des tableaux

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES DU RÉSEAU PLUVIOMÉTRIQUE DE 2000 À 2005	25
TABLEAU 2 : ILLUSTRATION DE LA TRANSFORMATION DES MATRICES DE PLUIES	28
TABLEAU 3 : ILLUSTRATION DU PRINCIPE DE FENÊTRE FLOTTANTE POUR UN CUMUL SUR 5 JOURS	30
TABLEAU 4 : ILLUSTRATION DES NOMBRES DE COUPLES DE POINTS DES VARIOGRAMMES.....	31
TABLEAU 5 : CARACTÉRISTIQUES PLUVIOMÉTRIQUES DU FAKARA DE 2000 À 2005	33

1. Introduction :

L'eau est le problème essentiel des vastes étendues du Niger. Les conditions climatiques arides ou semi-arides qui règnent sur la plus grande partie du pays font que les ressources renouvelables en eaux superficielles sont très irrégulières dans le temps et dans l'espace car la circulation de l'eau dans un bassin est entièrement gouvernée par la distribution spatiale et temporelle de la pluie. La pluviométrie étant inadéquate sur plus d'un tiers du pays, l'agriculture est concentrée dans les régions frontalières du Sud et du Sud-Ouest.

Dans un pays sec et enclavé comme le Niger, les cultures sont essentiellement pluviales. Elles sont semées pendant la saison des pluies et leur productivité dépend de la pluviosité. Une pluviosité irrégulière et des techniques de gestion des sols et des cultures inadéquates entraînent une baisse des rendements et un taux de production annuel variable. Toute planification des cultures au Niger nécessite une bonne compréhension du climat et surtout de la variabilité de la pluviométrie.

La pluviométrie est indispensable au développement des cultures. Elle a également une grande influence sur le choix des variétés les plus adaptées aux risques qu'elle impose par sa variabilité. De même, la réponse à l'engrais dépend essentiellement de la pluviométrie. Une analyse des risques pour les cultures dans cette région passe donc obligatoirement par une analyse de la variabilité pluviométrique qui, en plus de répondre aux besoins essentiels en eau des plantes, régit la réponse à l'engrais.

Cette étude s'insère dans le cadre d'un projet financé par la DGCD (Direction Générale de la Coopération au Développement belge) et coordonné par l'ICRISAT (Institut de Recherche sur les Cultures des Tropiques Semi-Arides) en collaboration avec d'autres organismes tels que la FAO et l'UCL. Le projet vise le développement de systèmes d'aide à la décision à l'usage des décideurs, ONG et projets de développement, afin de mieux cibler les propositions d'intensification et de diversification agricole pour les petits agriculteurs.

L'objectif de ce travail est de caractériser la variabilité de la pluie dans une zone de 500 km² à l'Ouest du Niger, le Fakara. A partir de données récoltées sur un réseau d'une cinquantaine pluviomètres, nous allons pouvoir analyser les caractéristiques de la pluie. Nous utiliserons les variogrammes pour mettre en évidence la structure spatiale de la pluie. Différentes échelles d'agrégation temporelle, de l'événement pluvieux à la saison des pluies, seront analysées à travers ces variogrammes. Cette caractérisation de la variabilité de la pluie permettra de mieux gérer l'incertitude liée au caractère aléatoire des précipitations. En effet, s'il existe une corrélation spatiale entre les hauteurs de pluie, il est possible de mieux prévoir les risques liés à la pluie. Il serait même possible d'exploiter ces résultats dans un cadre plus vaste afin de prédire ou de simuler des pluies avec une variabilité représentative de la zone.

2. La variabilité pluviométrique au Sahel

Avant de parler de la variabilité pluviométrique, il est important de faire le point sur l'avancée des connaissances concernant les phénomènes à la base du **régime pluviométrique**. En effet, ces phénomènes influencent grandement la variabilité de la pluie.

Ensuite, nous aborderons les différentes caractéristiques liées aux **variabilités spatiale et temporelle de la pluie**. Celles-ci dépendent de l'**échelle** à laquelle on s'intéresse. Il faudra dès lors choisir les échelles spatiale et temporelle adéquates en fonction des objectifs poursuivis.

Enfin, nous ferons le point sur les **méthodes d'analyse** de la variabilité spatiale de la pluviométrie ainsi que sur les **modèles existants**.

2.1. Précisions sur le régime pluviométrique sahélien

2.1.1. Le climat

Le climat du Niger est particulièrement aride. Le pays appartient en effet à l'une des zones les plus chaudes du globe. Il connaît deux types de climats chauds : un climat désertique sur la majeure partie de sa superficie (au Nord du pays), et un climat tropical à une seule saison de pluies au Sud du pays.

Dans la zone tropicale, on distingue quatre saisons :

- une saison dite **froide** (décembre à fin février) caractérisée par des nuits très fraîches avec des températures pouvant descendre en dessous de 10 °C ;
- une saison **sèche et chaude** (de mars à mai) avec des vents brûlants et des températures qui peuvent être supérieures à 45 °C ;
- une saison des **pluies** (de juin à septembre) caractérisée par des pluies, souvent orageuses, une forte humidité et une température moyenne de 33 °C ;
- une saison **chaude sans pluie** (octobre à novembre) avec une température moyenne de l'ordre de 35 °C.

Ces différentes saisons sont visibles sur le graphique ombrothermique de Niamey (Figure 1). Nous constatons également que l'évapotranspiration (ETP) est élevée et peu variable tout au long de l'année. D'autre part, la pluie ne dépasse celle-ci qu'au mois d'août.

En effet, il est important de souligner que le bilan pluviométrique est déficitaire pour l'ensemble du pays ; l'évapotranspiration potentielle varie entre 1700 et 2100 mm d'eau par an, tandis que la pluviométrie lui est nettement inférieure, de moins de 100 mm au Nord à des valeurs de l'ordre de 800 mm au Sud du pays.

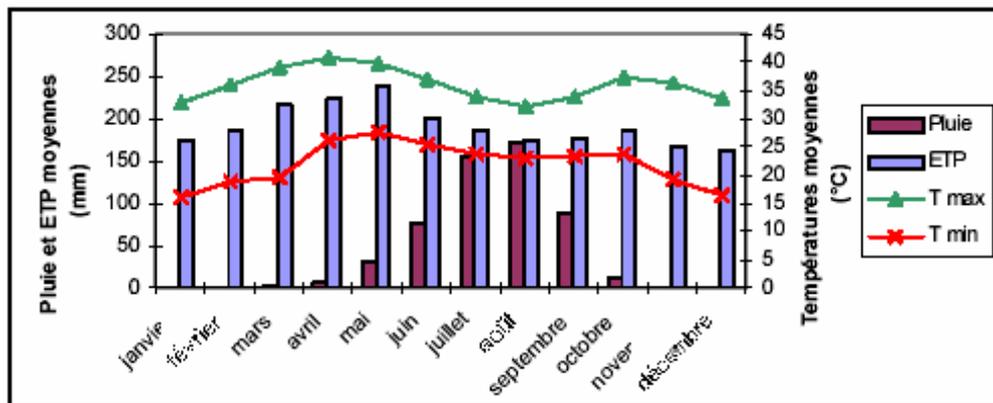


Figure 1 : Température, ETP et pluviométrie moyennes mensuelles enregistrées à Niamey- 13°30'N 2°08'E (1931-1990) (Sivakumar et al., 1993).

2.1.2. La pluviométrie

La pluviométrie au Niger est caractérisée par une forte variation dans l'espace et dans le temps. On distingue du Nord au Sud du pays (Figure 2) :

- La zone saharienne.** Cette zone très étendue, couvre tout le Nord du pays ; elle se caractérise par une pluviométrie annuelle normalement inférieure à 150 mm et une saison des pluies qui, en général, dure à peine 1 mois, si bien que l'agriculture non irriguée est presque impossible.
- La zone sahélo-saharienne.** Cette zone, qui se trouve dans le Centre-Nord du pays, se caractérise par une pluviométrie annuelle comprise entre 150 et 300 mm et une saison des pluies qui dure 1 à 2 mois. Elle convient très bien au nomadisme et la principale activité y est l'élevage itinérant, mais l'agriculture non irriguée est pratiquée çà et là dans le sud de cette zone.
- La zone sahélienne.** Située au Centre-Sud du pays, cette zone est caractérisée par une pluviométrie annuelle comprise entre 300 et 600 mm et une saison des pluies d'une durée normale de 2 à 3 mois. Domaine de l'agriculture pluviale par excellence, cette zone est à vocation agro-pastorale.
- La zone sahélo-soudanienne.** Située au Sud du pays et relativement peu étendue, cette zone se caractérise par une pluviométrie annuelle comprise entre 600 et 750 mm et une saison des pluies qui dure normalement de 3 à 4 mois.

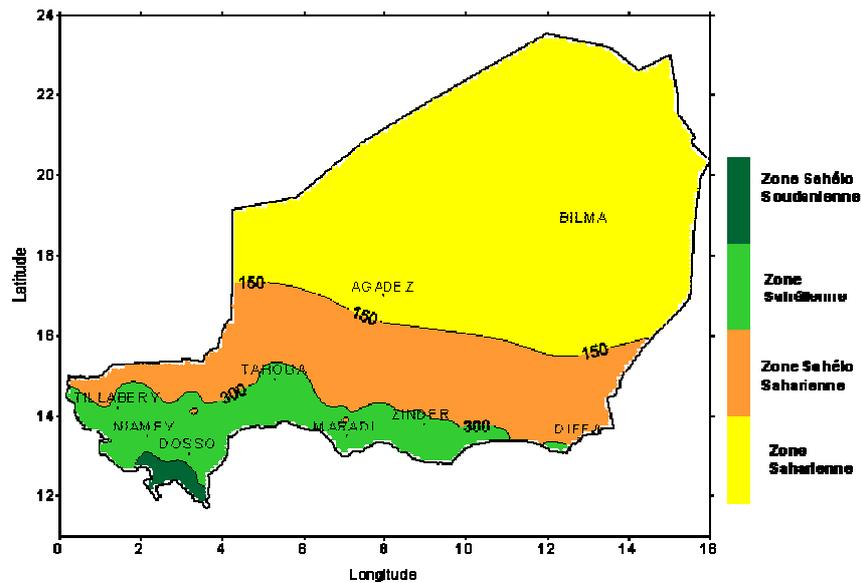


Figure 2 : Principales zones agro-climatiques (Météorologie nationale du Niger).

2.1.3. La mise en place de la mousson africaine

En tant que zone tropicale, la région sahélo-soudanaise est caractérisée par un climat influencé par deux phénomènes : les passages de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) et les moussons.

La ZCIT est la zone où convergent les masses d'air circulant entre la ceinture des basses pressions équatoriales et les masses de hautes pressions (anticyclones subtropicaux), situées au-dessus du désert du Sahara, en ce qui concerne l'hémisphère nord. Les vents secs engendrés par cette circulation Nord-Sud (les alizés) sont déviés par la force de Coriolis, ce qui leur confère une orientation Sud-Ouest.

A cause de la configuration du continent africain et suite à la remontée estivale de la ZCIT, on assiste à la rencontre d'un air très chaud et très sec venant du Sahara, et d'air plus frais et plus humide venant du Golfe de Guinée (Figure 3, schéma supérieur). A la convergence de ces masses d'air, un front se forme (le front intertropical, ou FIT).

A cet endroit, l'air humide s'enfonce en coin sous l'air sec avec une surface de contact fortement inclinée vers le Sud tandis que l'air sec s'élève au-dessus du FIT emportant sa charge potentielle en aérosols au-dessus de l'Atlantique.

Quelques cumulus signalent le passage de la zone de convergence au sol. A mesure que l'on s'éloigne vers le Sud (ou que le FIT monte vers le Nord), la couche d'air humide s'épaissit, les cumulus deviennent plus abondants (Figure 3, schéma inférieur) et les précipitations augmentent, les vents d'Est dirigeant les perturbations vers l'Ouest. Les pluies suivent le passage du FIT de 200 à 300 km.

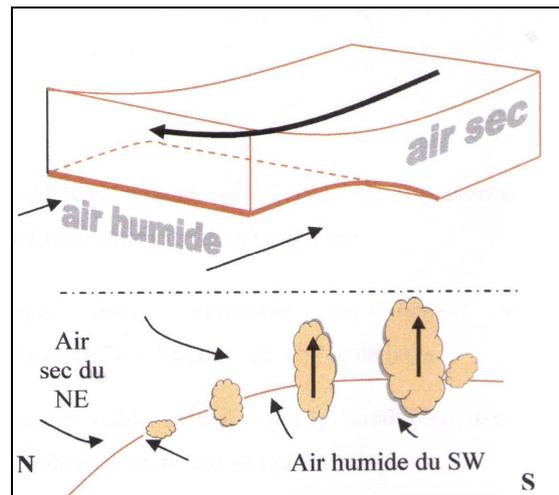


Figure 3 : Représentation de la ZCIT au niveau de l'Afrique de l'Ouest en été et génération de nuages de la mousson. (Schayes, 2000).

La mousson ouest africaine (MAO) se développe au Sahel pendant le printemps et l'été septentrionaux. La longueur de la saison des pluies diminue du Sud au Nord. La ZCIT et le maximum de pluie combiné à celle-ci arrivent à leur point le plus au Nord au mois d'août.

Au Niger, le mouvement latitudinal de la ZCIT induit une zonalité forte des variables climatiques, avec du Sud au Nord, une diminution progressive de la pluviométrie (environ 1 mm/km) et de l'humidité, une concentration de la saison des pluies et une augmentation de la température (Balme-Debionne, 2004).

C'est donc la fluctuation de la position des centres d'action (anticyclones subtropicaux, ZCIT et zone dépressionnaire) qui régule les saisons et les précipitations. La ZCIT oscille autour de l'équateur géographique suivant les lieux .

Le déplacement latitudinal de la ZCIT et l'installation progressive des pluies qui lui est associée sont des caractéristiques climatologiques moyennes, évidemment soumises à la variabilité interannuelle. La Figure 4 illustre l'évolution des précipitations annuelles de 1936 à 2003 pour la station de Gouré au Niger. Nous pouvons clairement distinguer trois périodes : une période humide (1936-1967), une période de sécheresse (1968-1987) et enfin la période actuelle (1988-2003). La transition entre la période humide et celle de sécheresse fut brutale et de grande ampleur (Ozer et al, 2005), caractérisée par un déficit pluviométrique de 40%.

D'autre part, nous constatons que la période actuelle est caractérisée par une moyenne pluviométrique supérieure à celle connue pour la période de sécheresse. Cependant, cette valeur s'éloigne encore fortement de celle de la période humide des années antérieures à 1970.

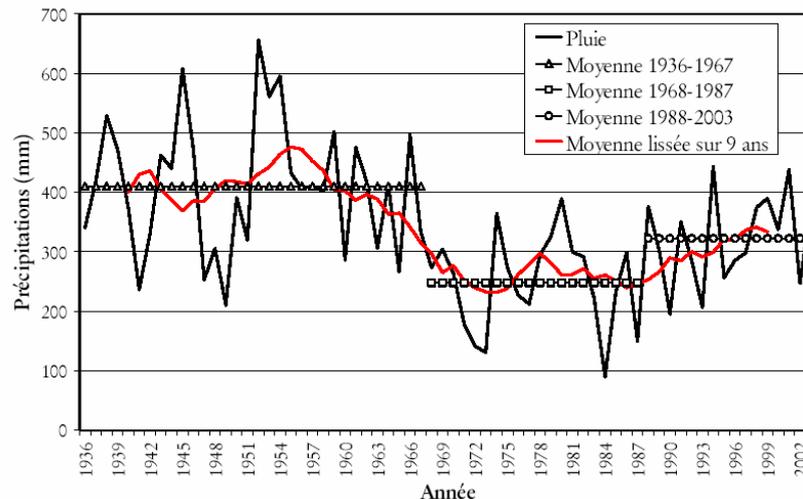


Figure 4 : Précipitations annuelles et moyenne des sous-séries pluviométriques au cours des trois périodes « humide », de « sécheresse » et « actuelle » à Gouré, Niger. (Ozer et al, 2005).

Cette constatation peut s'étendre à l'ensemble du Sahel. En effet, selon Ali (2004), le Sahel a connu des conditions climatologiques très sèches durant deux décennies (1971-1990). La période actuelle (1991-2003) n'a pas encore vu le retour aux conditions humides des années 1940-1970, mais, comme à Gouré, des différences avec la période précédente sont tout de même à signaler. Deux années très pluvieuses (1994 et 1999) dont les valeurs ont approché les records enregistrés, ainsi qu'une année bien arrosée (1998) ont en effet été observées. Cependant, ces améliorations ont été plus marquées au niveau du Sahel Est, l'Ouest étant resté plus sec. D'autres scientifiques ne partagent pas encore cet avis de retour à un régime plus humide, le débat est, dès lors, encore très présent (Nicholson, 2005 ; Dai et al, 2004).

La Figure 5 représente l'évolution annuelle des précipitations à Gouré exprimée en fonction de l'indice d'anomalie pluviométrique développé par Lamb, à savoir la différence entre la pluviométrie annuelle et la pluviométrie moyenne divisée par l'écart type de la série de 1936 à 2003. Les données proviennent de la station de Gouré, où le cumul annuel est de l'ordre de 350 mm, mais l'évolution des pluies semble refléter la situation pour le Niger dans son ensemble. Nous pouvons constater que lors des décennies humides (1936-1967) les cumuls pluviométriques étaient nettement supérieurs à la moyenne. C'est en quelques années à peine que la transition s'est faite entre des années fortement arrosées et des années à déficits hydriques importants. Nous constatons aussi que ces dernières années (1988-2003) les cumuls pluviométriques sont, en majorité, proches de la moyenne, avec néanmoins deux années marquées par un déficit pluviométrique anormal (avec $\sigma < -1$), mais aucune année n'a encore été exceptionnellement arrosée.

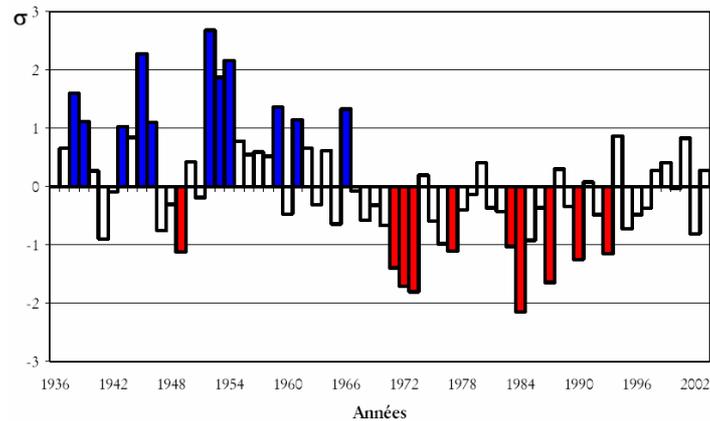


Figure 5 : Evolution des précipitations à Gouré de 1936 à 2003 exprimée en fonction de l'indice d'anomalie pluviométrique selon la méthode de Lamb (d'après Ozer et al, 2005).

A la latitude de Niamey ($13^{\circ}00' N$), la saison des pluies dure en moyenne un peu plus de 5 mois. La moyenne interannuelle du cumul saisonnier a été de 650 mm sur la période humide de 1950-1969 et de 490 mm sur la période sèche de 1970-1989 (Ali, 2004). Sur les années récentes (1990-2002), la pluviométrie moyenne est remontée à 515 mm, essentiellement du fait de quelques années plus humides en fin de période. Il faut noter que plus de 50 % de ce cumul annuel tombe sur une durée cumulée de 4h. Quant à la variabilité intra-saisonnière, elle est caractérisée par un maximum de pluie pour le mois d'août.

2.1.4. Avancées récentes de l'analyse du système pluviométrique sahélien

Les précipitations au Sahel dépendent presque exclusivement de la position du FIT (front inter-tropical) séparant l'Harmattan (masse d'air sec et chaud sur le Sahara) de la mousson guinéenne (masse d'air humide et frais) (Figure 6). Mais la pluie résulte aussi d'une série de mécanismes qui s'étendent sur une large gamme d'échelles (Lebel et al., 2000). Pour près de 80 %, elles ont une origine convective, que ce soit sous forme de cumulo-nimbus isolés ou d'amas nuageux organisés de plusieurs centaines de kilomètres de large, qui se déplacent d'Est en Ouest (Taupin et al 2001).

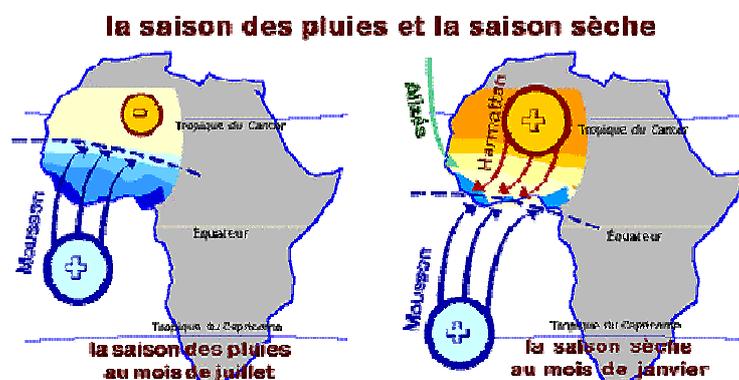


Figure 6 : Influence de la position du FIT sur le climat sahélien.

Le régime pluviométrique sahélien a été décrit plus haut. Des études récentes (Balme-Debionne, 2004) ont cependant mis en évidence le caractère brusque de l'installation des pluies sur le continent ouest africain. Selon l'auteur, la mise en place de la mousson ouest africaine (MAO) s'effectue en deux stades :

- A la mi-mai, le front intertropical (FIT) atteint le Sahel (15°N), accompagné d'une instabilité locale et de phénomènes pluvieux intermittents qui marquent les premières pluies de la saison (Sultan et Janicot, 2004). Cependant, bien que le FIT soit arrivé à 15°N , la zone de convergence intertropicale (ZCIT) reste centrée à 5°N . Ce début de saison des pluies est marqué par une montée du FIT très irrégulière, faite d'incursions et de retraits. L'instabilité des masses d'air reste donc faible et localisée, donnant naissance à de rares orages isolés et de faibles hauteurs de pluie (les cumuls pluviométriques des événements sont de faible hauteur) (Taupin et al, 2001).
- Pendant la deuxième décennie de juin, la ZCIT se déplace brusquement de sa position quasi-stationnaire à 5°N en mai-juin à une autre position quasi-stationnaire à 10°N en juillet-août (Ali, 2004 ; Balme-Debionne, 2004). Ce phénomène, appelé saut de Mousson, est accompagné par des nuages à développement vertical plus important, responsables de pluies intenses (Sultan et Janicot, 2004). Le milieu de saison est ainsi caractérisé par des pluies abondantes en nombre ainsi qu'en cumul mensuel (Taupin et al 2001).

Le cycle pluvieux saisonnier moyen au-dessus des régions sahéliennes, illustré à la Figure 7, montre une augmentation graduelle des précipitations du printemps à l'été, puis une diminution rapide en automne qui marque la fin de la saison humide (Sultan et Janicot, 2004). Le lissage des pluies avec des moyennes mobiles met en évidence plusieurs ruptures (indiquées par les flèches) que l'on peut associer au déplacement de la structure FIT/ZCIT à travers les deux étapes expliquées ci-dessus. En effet, nous pouvons constater que le début de la saison des pluies est caractérisé par des pluies de cumul relativement faible, mais qu'à la mi-juin, intervient une réelle rupture à partir de laquelle les cumuls deviennent plus importants.

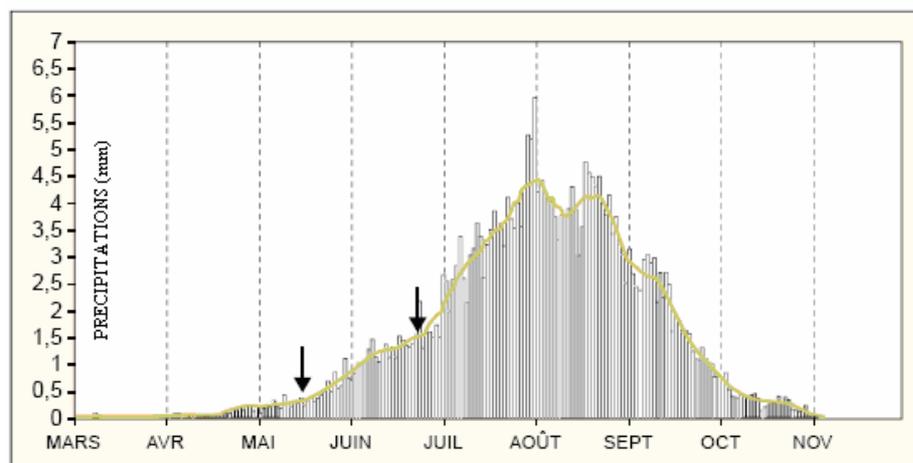


Figure 7 : Moyenne des précipitations journalières (mm/jour) entre 10° Ouest et 10° Est à la latitude 15° Nord sur la période 1968-1990 (Sultan et Janicot, 2004).

Peut-on affirmer dès lors que la saison des pluies commence effectivement aux premières pluies ? Une distinction peut être faite entre cette vision classique du démarrage de la saison des pluies et la notion de mise en place de la mousson. La vision classique se fonde principalement sur l'arrivée du FIT aux latitudes sahéniennes à laquelle est associée une forte convection locale. Par contre, la notion de mise en place de la mousson caractérise l'installation de la mousson et le cœur de la saison humide (après le saut de Mousson).

2.2. Description de la variabilité pluviométrique au Sahel

La variabilité de la pluie peut être considérée à plusieurs niveaux. Nous parlerons des variabilités **spatiale** et **temporelle** de la pluie.

La variabilité spatiale

Jusqu'à présent, toutes les études s'accordent sur le fait que la variabilité spatiale des pluies au Sahel est très forte et cela à toutes les échelles de temps, de l'événement pluvieux à la saison (Taupin, 2003). Selon Ali (2003), le phénomène à la source de cette grande variabilité spatiale est l'intermittence spatiale des processus pluvieux (Figure 8).

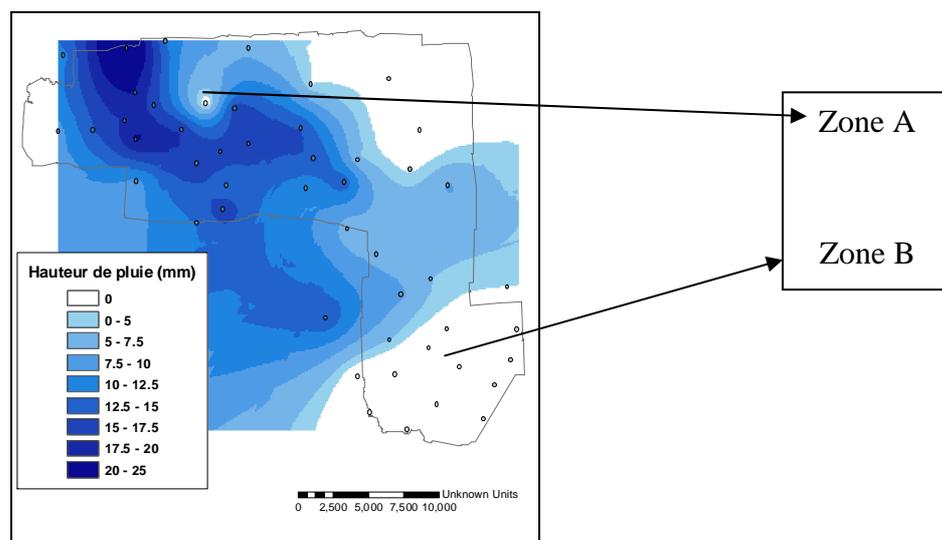


Figure 8 : Illustration des phénomènes d'intermittence spatiale de l'événement du premier juin 2000, pour le réseau de pluviomètres du Fakara.

L'intermittence spatiale peut être définie comme une accumulation de valeurs nulles (pluie nulle) dans une zone donnée de l'aire d'étude (zones A et B de la Figure 8). Celle-ci est plus marquée à l'échelle de l'événement pluvieux. A cette échelle, surtout quand la pluie convective est dominante, de grandes zones de pluie nulle sont souvent enclavées dans des zones de pluie (Zone A de la Figure 8). Mais quand les pluies sont cumulées sur plusieurs événements, ces zones de pluie nulle tendent à disparaître. De ce fait, à l'échelle saisonnière, il aura plu partout et, au sens strict, l'intermittence aura disparue. Kundu et Bell (2005)

affirment ainsi que la structure spatiale des précipitations dépend, d'un point de vue non-trivial, de l'échelle temporelle sur laquelle la pluie est moyennée.

L'organisation spatiale des cumuls de pluie au Sahel est commandée par deux processus dominants (Ali, 2004).

- Tout d'abord, les événements pluvieux sont associés à des systèmes convectifs organisés en nombre relativement faible mais qui apportent plus de 80 % de la pluie totale de la saison. Ces systèmes convectifs pluviogènes de méso-échelle sont organisés en un emboîtement de structures d'échelles différentes (cellules convectives, front convectif, partie stratiforme). La variabilité des pluies associée à ces processus constitue la **variabilité interne** de l'événement pluvieux.
- A plus grande échelle, la climatologie régionale est contrôlée par les mouvements saisonniers de la ZCIT qui impliquent des structures d'échelles dominées par une dérive Nord-Sud. Cette variabilité peut être qualifiée de **variabilité externe** aux événements.

La variabilité temporelle

Le lien entre l'environnement grande échelle et la pluie est matérialisé par les systèmes convectifs (Ali, 2004). La pluviométrie associée à ces systèmes convectifs a des **caractères relativement stables**, en année humide ou en année sèche, sans différenciation, même si par ailleurs les champs de pluie constitués par des cumuls d'événements pluvieux présentent une grande variabilité sur une large gamme d'échelles temporelles (décennale, interannuelle et intra-saisonnière). En effet, il a été montré que la pluviométrie associée aux événements pluvieux est caractérisée par une faible variabilité interannuelle des paramètres tels que la fréquence de pluie nulle, la moyenne événementielle et la variance. De plus, selon Taupin (1997), il n'y a également pas de corrélation entre hauteur de pluie et durée de l'événement ; cela est lié à la structure des précipitations qui sont de type orageux, souvent caractérisées par un front très pluvieux (30 % du temps moyen de l'averse pour environ 80 % du cumul moyen) suivies d'une traîne variable et peu pluvieuse.

L'**origine** de la majeure partie de la variabilité interannuelle des cumuls saisonniers ne dépend principalement que de la **variabilité interannuelle du nombre d'événements** pluvieux (Figure 9). La variabilité spatiale du champ de pluie saisonnier demeure très forte, contrairement à une vision classique qui suppose un fort lissage spatial des champs de pluie pour des laps de temps de cumul assez grand (Ali, 2004). En effet, Lebel et al. (1997) ont observé une différence de plus de 50 % du cumul saisonnier de deux stations, pourtant distantes de moins de 10 km. Sachant que la pluie saisonnière est l'accumulation de plusieurs dizaines d'événements pluvieux, on aurait supposé un lissage important de la variabilité observée à l'échelle événementielle.

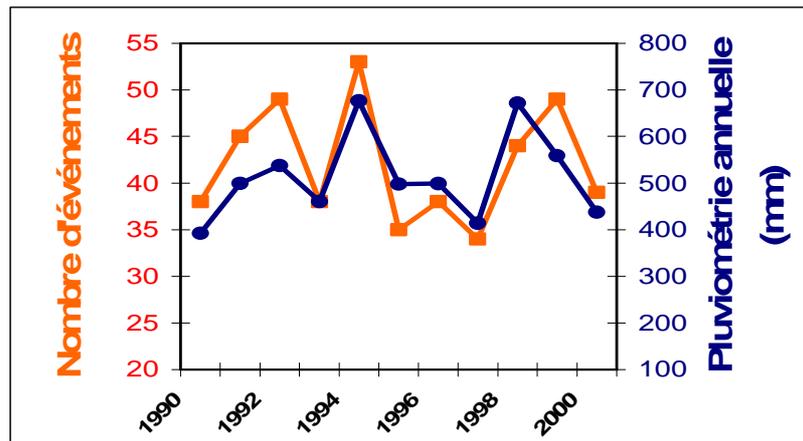


Figure 9 : Variabilité interannuelle du nombre d'événements pluvieux et cumuls pluviométriques annuels associés (Ali, 2003).

Une analyse composite comparant des années sèches et humides a révélé que le déficit des années sèches était essentiellement concentré au niveau du cœur de la saison des pluies. Durant les années sèches, la pluie tombant pendant les mois de régime océanique (période de la saison des pluies précédant le saut de Mousson) est de quantité égale ou légèrement supérieure à la normale. La moyenne pluviométrique par événement des larges systèmes convectifs caractérisant le régime continental (cœur de la saison des pluies) ne montre pas non plus de différences significatives entre les années sèches et humides. Ce n'est donc pas la longueur de la saison des pluies qui est réduite. La variabilité interannuelle des précipitations sahéniennes est effectivement largement contrôlée par les fluctuations annuelles du nombre de systèmes convectifs (Lebel et al., 2003) et donc du nombre d'événements pluvieux. Ce résultat est important dans une perspective hydrologique car le ruissellement est affecté différemment par une diminution du nombre d'événements pluvieux que par une diminution de la moyenne de ces événements.

Sur de grandes distances, la variabilité apparaît comme plus importante dans la direction Nord-Sud que dans la direction Est-Ouest (Ali et al, 2003). Cela est lié à la direction moyenne de déplacement d'Est en Ouest des systèmes convectifs qui produisent dès lors une corrélation plus grande dans cette direction que celle Nord-Sud. Ce type de direction dominante de déplacement des systèmes convectifs se retrouve dans la plupart des régions tropicales. Cependant, cette différence de corrélation commence à être significative à des échelles temporelles supérieures à un mois. Dès lors, à des échelles temporelles plus petites, la source dominante de variabilité spatiale est causée par la variabilité intrinsèque du champ pluvieux événementiel.

En dehors de la variabilité spatiale, l'intermittence temporelle* est aussi un aspect critique de la pluie. Sous les tropiques, où la pluie est essentiellement d'origine convective,

* L'intermittence temporelle peut être définie comme l'accumulation de jours sans pluie entre des jours où l'on observe au moins un événement pluvieux.

cette intermittence est contrôlée en premier lieu par une succession de systèmes convectifs. En général, ces systèmes produisent des précipitations qui ne durent que quelques heures à une localisation donnée, car leur vitesse de déplacement est relativement élevée. Ces périodes de pluie sont séparées par plusieurs heures ou jours sans pluie (Lebel et al, 2003).

2.3. Echelles pertinentes pour l'étude de la variabilité pluviométrique

La pertinence de l'échelle, qu'elle soit spatiale ou temporelle, dépend de l'objectif poursuivi par l'étude et les contraintes pratiques et financières. Dans cette partie, nous essayerons de mettre en évidence la pertinence des échelles spatiale et temporelle choisies dans le cadre de ce travail.

Le manque de données à haute résolution, que ce soit d'un point de vue temporel ou spatial, est un des problèmes les plus limitants pour les études hydrologiques et agronomiques dans la plupart des régions du Sahel (Balme-Debionne, 2004). Dans ce travail nous avons eu la chance d'avoir à notre disposition des données à **l'échelle événementielle**. En effet, bien que ce soit une échelle courante, l'événement pluvieux est une échelle clef pour étudier le régime pluviométrique sahélien car, plus que nulle part ailleurs, les événements pluvieux se présentent comme des objets individuels, facilement identifiables et dotés de caractéristiques stables dans le temps et dans l'espace (Ali, 2004).

L'échelle temporelle

Beaucoup d'études préliminaires considéraient les précipitations à des échelles spatio-temporelles larges, en utilisant les cumuls pluviométriques mensuels comme données de base. Plus récemment, afin de mieux comprendre comment les différents facteurs peuvent influencer le régime pluviométrique sahélien et l'impact sur le cycle régional de l'eau, on a commencé à considérer le temps à des échelles plus fines. Quelles sont les raisons de ce changement ?

- Premièrement, la pluie sahélienne est en majorité d'origine convective. Mathon et al. (2002) estiment que les systèmes convectifs de méso-échelle produisent 90% de la pluie au cœur de la saison sur le Sahel central. Ils montrent aussi qu'il y a une forte co-fluctuation entre le nombre de systèmes convectifs de méso-échelle et le cumul pluvieux annuel.
- Deuxièmement, d'un point de vue agronomique, l'étude des champs de pluie aux échelles temporelles fines est indispensable pour comprendre l'impact de la variabilité temporelle des pluies sur les ressources en eau. Pour comprendre l'impact hydrologique des périodes sèches et des sécheresses, il est aussi nécessaire de décrire le régime pluviométrique à l'échelle de ces événements pluvieux.

Au Sahel, deux saisons des pluies à cumuls identiques peuvent générer des récoltes très différentes. Un grand nombre d'événements pluvieux de relativement faible volume n'a

effectivement pas le même impact qu'un plus petit nombre à volume moyen plus élevé. L'étude du régime pluviométrique sahélien s'articulera donc autour de cette échelle temporelle clef qu'est l'événement pluvieux. Malheureusement, la définition d'un événement pluvieux est éminemment subjective, dépendant de l'auteur et des observations disponibles. On peut se baser sur des caractéristiques aussi diverses que la proportion du réseau touché par la pluie journalière, la hauteur minimum de pluie enregistrée ou encore des enregistrements radars.

L'échelle spatiale

Il n'y a pas que l'échelle temporelle qui soit importante. La possibilité de mettre en évidence la régularité de la structure spatiale de corrélation de la pluie est liée au nombre de paires de stations utilisées pour l'analyse. La densité du réseau est donc un point crucial pour la déduction du comportement du modèle de corrélation spatiale (Bacchi et Kottegoda, 1994).

Il existe cependant une relation entre variabilité spatiale et variabilité temporelle. L'analyse de la distribution spatiale des pluies devient plus simple quand l'échelle temporelle augmente mais le phénomène, même sur des échelles agrégées, dépendra des fluctuations des intensités des précipitations, à petite échelle dans l'espace, qui ont été perdues dans l'agrégation.

La possibilité d'estimer la distribution spatiale de la pluie à partir de mesures ponctuelles dépend de l'existence de relations spatiales entre les hauteurs de pluies. Cette corrélation est interprétée à partir des relations entre les valeurs aux points mesurés. Il est donc possible de vérifier expérimentalement que le phénomène pluvieux observé à des points généraux a des caractéristiques assez similaires quand les points sont proches. Cependant, on peut aussi observer une valeur élevée de pluie à une station alors qu'une autre, à son voisinage, enregistre une valeur faible. Cela implique un certain degré de corrélation négative dans les interrelations qui peut seulement être traité comme un comportement aléatoire. De manière générale, la corrélation entre deux valeurs de pluie à deux points donnés aura tendance à diminuer lorsque la distance entre ces points augmente.

2.4.Méthode d'analyse de la variabilité spatiale de la pluie

2.4.1. Le variogramme (Bogaert, 2005)

Le variogramme est couramment utilisé pour analyser la dépendance spatiale d'observations. Il est donné par :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] \quad \forall x \in D$$

Avec - Z , une variable aléatoire de nature continue (la pluviométrie dans notre cas) mesurée aux points x_1, \dots, x_n .

- Le vecteur $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{id})$ désigne la coordonnée du $i^{\text{ème}}$ point auquel on s'intéresse ; les points x_i appartiennent à un domaine $D : x_i \in D \subseteq R^d$

- Le vecteur distance h entre deux points arbitraires x_i et x_j est défini par:
 $h_{ij} = x_i - x_j = (x_{i1} - x_{j1}, \dots, x_{id} - x_{jd})$

Le variogramme mesure la dissimilitude entre des valeurs séparées d'une distance h . Il permet ainsi de déterminer si la distribution du ou des paramètres étudiés est régionalisée (i.e. possède une structure spatiale), aléatoire ou périodique.

Le semi-variogramme $\gamma(h)$ possède certaines **propriétés** :

- $\gamma(0) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x)] = 0 \quad \forall x \in D$

Il prend toujours la valeur 0 pour une distance nulle

- Pour un champ stationnaire d'ordre 2*, $\gamma(h) = \sigma^2$ si $\|h\| = \infty$.
les valeurs tendent vers un plateau pour $\|h\| \rightarrow \infty$.
- Le plus souvent, $\gamma(h)$ est une fonction monotone croissante

L'estimateur classique du variogramme, si le champ est stationnaire d'ordre 1[†] et stationnaire intrinsèque[‡], est:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{N(h)} [z(x_i) - z(x_j)]^2$$

Où $N(h)$: nombre de couples de points distants de h

$z(x_i)$: hauteur de pluie au point de mesure x_i

* Un variogramme est dit stationnaire d'ordre 2 si celui-ci ne dépend que de h , la distance séparant deux points de mesure. $\text{Var}[Z(x_i), Z(x_i + h)] = \text{Var}[Z(x_j), Z(x_j) + h]$

† Stationnarité d'ordre 1 : l'espérance est invariante par translation : $E[Z(x_i)] = E[Z(x_i + h)]$

‡ Stationnarité intrinsèque : les incréments du champ sont stationnaires d'ordre 2.

En pratique, si les points x_1, \dots, x_n ne sont pas disposés régulièrement le long d'une grille, il y a peu ou pas de paires de points séparées exactement du même vecteur h . C'est pourquoi, on définit des intervalles de tolérances (Δ) sur h . On remplace ensuite h par l'intervalle $[h-\Delta, h+\Delta]$. Toutes les paires de points appartenant aux mêmes intervalles sont utilisées pour calculer $\hat{\gamma}(h)$.

Le variogramme est sensible au choix des classes de distances. De ce fait, certaines précautions s'imposent pour le calcul de $\hat{\gamma}(h)$:

- Obtenir assez d'intervalles de distance pour estimer correctement l'allure de $\gamma(h)$
- Obtenir assez de paires de points par intervalle de distance pour obtenir une estimation fiable de $\gamma(h)$
- Ne pas estimer $\gamma(h)$ pour des distances trop grandes
- Il faut se souvenir que les valeurs $\gamma(h)$ sont corrélées, de par :
 - l'utilisation des mêmes $Z(x_i)$ dans plusieurs intervalles
 - la corrélation spatiale qui existe entre les $Z(x_i)$
- Toutes les fluctuations de $\gamma(h)$ ne sont pas interprétables !

Le choix des classes de distance est arbitraire mais doit être réfléchi. Généralement, on évite de prendre pour le semi-variogramme une distance maximale supérieure à la moitié de la longueur de la surface couverte par le réseau. Cela évite de se retrouver avec des classes de distances ne contenant que quelques couples de points avec une valeur souvent reprise au sein de ces couples (Figure 10).

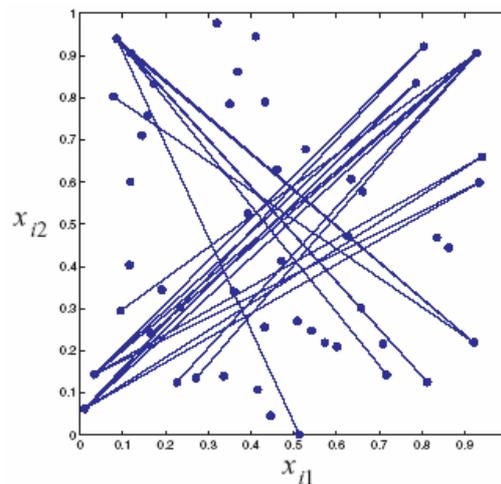


Figure 10 : Illustration des problèmes rencontrés si la distance considérée entre les points est trop importante. Représentation des couples de points étant séparés par une distance supérieure à 1 (Bogaert, 2005).

Il faut également tenir compte de la distance minimale séparant deux pluviomètres pour ne pas considérer une classe de distance inférieure à celle-ci qui ne contiendrait aucun couple de points.

La Figure 11 est une illustration d'un variogramme. Il est caractérisé par : son **comportement à l'origine** (quand $h=0$), son **comportement à longue distance** (palier et portée) et son **comportement directionnel**.

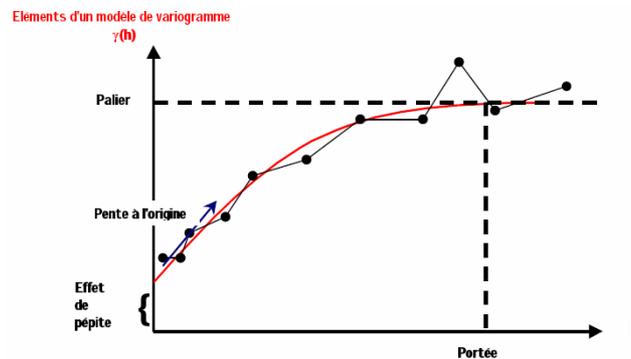


Figure 11 : Eléments d'un modèle de variogramme (Drapeau).

Son **comportement à l'origine** est une mesure de la continuité du phénomène. Une discontinuité à l'origine peut être le reflet d'erreurs de mesure qui se traduit par un effet de pépité.

A **longue distance** le variogramme est borné. Les données ont un maximum d'hétérogénéité qui s'illustre par le palier (variance = palier). La portée, elle, est la distance à laquelle le palier est atteint. Théoriquement, deux points séparés par une distance supérieure à la portée sont non corrélés.

Enfin, un variogramme peut dépendre de la **direction** dans lequel on le considère. Cette dissimilitude est le reflet d'une anisotropie du phénomène. On est en présence d'anisotropie si le phénomène ne dépend plus seulement de la distance séparant les données mais aussi de la direction du vecteur séparant les points donnés.

2.4.2. Les analyses préalables de la variabilité pluviométrique au Sahel

Différents facteurs influencent la variabilité de la pluie en Afrique de l'Ouest. Nous pouvons citer entre autre, les conditions atmosphériques, les conditions océaniques et celles de la surface continentale, la vitesse et la direction des vents et les conditions de surfaces. Ces facteurs interagissent apparemment de manière complexe et il est possible d'imaginer que l'importance de chacun de ceux-ci a varié au fil des années. De ce fait, la corrélation entre les conditions océaniques et les précipitations sahéliennes a varié en fonction du temps et dépend de la période prise en compte pour l'étude (Lebel et al, 2003).

Le point clef est de quantifier l'organisation spatiale des champs de pluie à l'aide d'une fonction de corrélation spatiale. Pour ce faire, les variogrammes sont des outils efficaces qui permettent d'analyser la structure spatiale des pluies sans connaître la moyenne des champs

de pluie. En plus, le formalisme le plus sophistiqué des fonctions de covariance généralisée permet de traiter des données qui ne sont pas stationnaires de premier ordre (dont la moyenne varie en fonction du lieu où l'on se trouve). C'est une possibilité intéressante puisque l'on sait que le processus pluvieux est connu pour avoir certaines tendances, comme le gradient Nord-Sud interannuel de la pluie au Sahel (Lebel et Le Barbé, 1997).

La variabilité de la pluie est double : la variabilité interne (ou intermittence interne) et la variabilité externe (ou intermittence externe) de l'événement pluvieux (Ali, 2003). Ces variabilités sont représentées par les variables H (cumul de pluie événementielle) et I (variable indicatrice de l'événement pluvieux). La variable I indique s'il y a eu événement ($I = 1$) ou non ($I = 0$). Chacune des deux variables est caractérisée par son variogramme γ_e et γ_I en tenant compte des emboîtements d'échelles et des anisotropies. Le modèle global est une fonction de ces deux invariants (γ_e et γ_I) et le facteur d'échelle est le nombre total d'événement (N_T) enregistré pendant la période ΔT sur la zone considérée.

A l'échelle de l'événement pluvieux, deux facteurs déterminent la structure spatiale des champs de pluies. L'un est la variabilité spatiale de la pluie conditionnelle H^* ($H > 0$), représentée par son variogramme γ_e^* . L'autre est l'intermittence dont la structure spatiale est décrite par le variogramme indicateur γ_I . Les intermittences interne et externe ne sont pas différenciées. Cependant, cela pourrait être le cas, mais il faudrait alors être en possession de données satellitaires.

Lors de l'expérience Epsat-Niger (1989 à 1995), la variabilité spatiale de la pluie a été étudiée sur un réseau couvrant le degré carré de Niamey (16000 km²). Pour les années 1990 à 1992, les variogrammes climatologiques (Figure 12) sont caractérisés par deux grands points : un effet pépité de l'ordre de 10 à 15 % de la variance du champ et une portée d'environ 30 km. Manifestement, ces valeurs reflètent toutes les deux des propriétés intrinsèques de ces champs de pluie et des caractéristiques d'échantillonnage des mesures du réseau (Lebel et Le Barbé, 1997). Les deux points qui semblent influencer les paramètres des variogrammes d'Epsat-Niger sont l'échelle des observations d'une part, et l'homogénéité statistique de l'ensemble d'autre part.

Après trois années d'observations, l'étude a montré que les petites structures associées aux cellules convectives avaient très peu de chances d'être observées au sein du réseau puisque leur taille est de l'ordre de 1 à 2 km. La forte probabilité de ne pas détecter ces cellules convectives par le réseau Epsat-Niger explique une grande partie de l'effet pépité observé sur le variogramme climatologique. D'autre part, les structures supérieures à 100 km ne sont pas détectables non plus, ce qui entraîne l'impossibilité d'observer un système pluvieux entier. Ces limitations ne peuvent être comblées qu'en utilisant d'autres sources de données (radar ou satellites). Mais cela montre combien il est difficile de retrouver les propriétés statistiques des « véritables » champs de pluie à partir des réalisations disponibles.

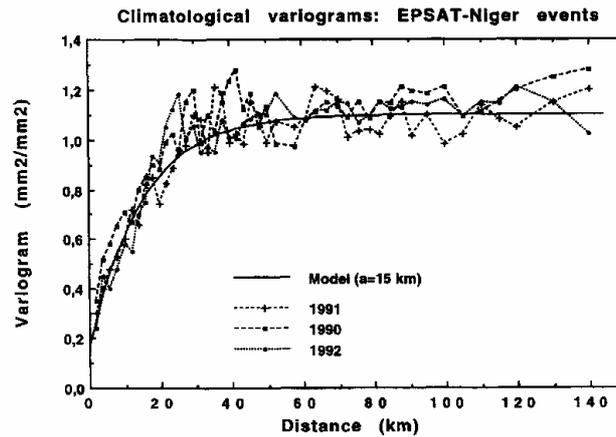


Figure 12 : Variogrammes climatologiques du réseau Epsat-Niger (Lebel et Le Barbé, 1997).

Un sous-réseau plus dense composé de 25 pluviographes disposés sur une surface d'environ 1 km² a complété, en 1994, l'expérience Epsat-Niger. De cette expérimentation, Taupin (1997) en a conclu que la variabilité pluviométrique des pluies sahéliennes s'avère non négligeable à une échelle comprise entre la centaine de mètres et le kilomètre. Cette variabilité du champ pluvieux peut être faible, voire seulement due aux erreurs de mesures, mais dans ce cas elle ne concerne, le plus souvent, que les pluies inférieures à 5 mm. Selon Taupin (1997), trois types de fonction de structure vont modéliser le comportement spatial des pluies plus importantes (Figure 13). Le premier type est celui de l'effet pépité pur qui illustre un champ de pluie à variabilité non structurée. Ensuite, d'autres champs de pluie peuvent être modélisés par un variogramme de type puissance. Enfin, pour les événements restants, 30 % des champs sont modélisés par un variogramme borné dont la portée pourrait indiquer la délimitation de petites cellules actives d'ordre kilométrique qui seraient l'élément de base de la convection.

Taupin (1993) a également mis en évidence la faible portée des variogrammes climatologiques, ce qui implique une grande variabilité des précipitations saisonnières. La portée oscille entre 20 et 40 km pour les années 1989 à 1991. Ces valeurs sont proches de celles trouvées à l'échelle événementielle, ce qui contredit l'idée courante d'une augmentation progressive de la portée de corrélation avec le cumul temporel.

La corrélation entre les stations tend à augmenter pour les stations à des distances similaires si l'échelle temporelle d'agrégation augmente. Par exemple, les données mensuelles sont plus corrélées que les données journalières pour des distances correspondantes. Même des stations qui sont séparées d'une grande distance peuvent être corrélées de manière significative si on considère les données pluviométriques au niveau des cumuls annuels. De même, on observe une diminution rapide des coefficients de corrélation pour des données agrégées sur des échelles temporelles plus fines, par exemple des données horaires en comparaison à des données journalières.

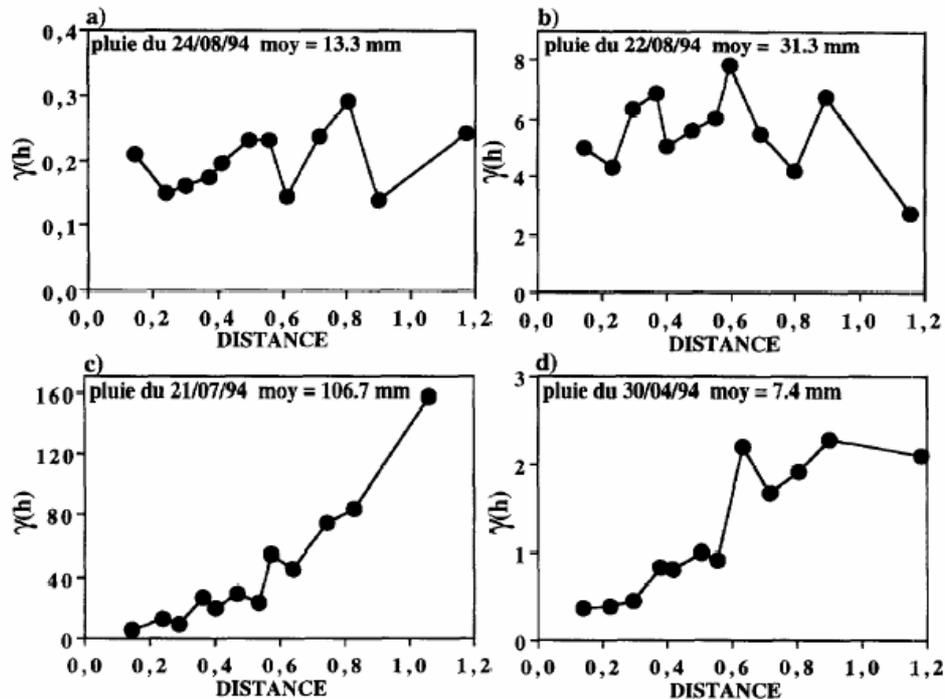


Figure 13 : Différents types de fonction de structure caractérisant les événements sur un réseau dense dans la région de Niamey. a) et b) Variogrammes présentant un effet de pépite pur ; c) variogramme de type puissance ; d) variogramme de type gaussien. (Taupin, 1997).

En pratique, on ne connaît pas la véritable forme de la distribution de probabilité des précipitations et celle de la structure de la covariance des hauteurs de pluie en fonction de la distance entre les points de mesure. Il est seulement possible de faire des déductions raisonnables sur base de l'analyse des variogrammes expérimentaux et appliquer des modèles afin d'interpréter certaines des nombreuses caractéristiques de la véritable variabilité du processus.

Les relations entre les paramètres et les intervalles de temps d'agrégation représentent la manière dont la corrélation spatiale évolue dans le temps. Il a été montré qu'il y a une similarité significative de la corrélation à travers les différentes échelles temporelles d'agrégation des données. Ce type d'analyse peut être appliqué de manière similaire pour développer des méthodes d'étude de l'effet de l'agrégation spatiale.

2.5. Modèles existants

Les modèles disponibles sont généralement reliés à des échelles spatiale et temporelle requises pour l'analyse en question (Sansó et Guenni, 1998). En ce qui concerne l'échelle spatiale, il y a des modèles ponctuels et d'autres qui représentent la pluie simultanément à différentes localisations (modèles multisites). Il y a aussi beaucoup de modèles qui représentent la pluie en continu dans l'espace.

Les modèles peuvent être classés en trois types : les modèles statistiques empiriques, les modèles dynamiques et les modèles stochastiques intermédiaires. L'idée à la base de cette classification est la quantité de réalisme physique incorporé dans la structure du modèle. Dans le cas empirique, on n'essaye pas d'incorporer de modélisation physique de l'atmosphère mais on adapte des modèles stochastiques empiriques aux données disponibles (Sansó et Guenni, 1998). Si les seconds types de modèles sont purement basés sur la physique, le troisième groupe est une combinaison des deux méthodes, avec certains processus physiques de la structure de la pluie qui sont décrits sur base d'une approche stochastique.

La modélisation stochastique permet de reproduire la variabilité pluviométrique requise dans la planification des ressources en eau et agricole. En combinant celle-ci avec des valeurs moyennes prédites par d'autres outils comme des modèles de circulation générale atmosphérique, on peut obtenir un résultat assez prometteur.

La prédiction de la pluviométrie sahélienne peut être également faite en fonction des informations de températures de surface marine (TSM). Pourtant, ce type de prédicateur n'est, a priori, pas le meilleur, pour au moins deux raisons :

- La mousson ouest africaine est très sensible aux conditions de surface continentale.
- Les TSM sont autant le reflet que la cause de la circulation atmosphérique (Philippon et Fontaine, 1999).

Dès lors, on gagne en efficacité si l'on intègre dans les modèles statistiques des prédicteurs décrivant la variabilité des états de surface continentale à l'échelle régionale, et notamment les gradients méridiens d'énergie, à l'origine même de la circulation de la mousson.

Dans la formulation d'un modèle hydrologique, il doit être ajouté aux caractéristiques de la pluie (moyenne, variance essentiellement) l'effet de l'échelle temporelle d'agrégation des données pluviométriques d'intérêt en fonction de la particularité du problème hydrologique à régler.

3. Matériels et méthodes

3.1. Site de l'étude

3.1.1. Contexte global : Le Niger

Le Niger est un pays totalement enclavé au Nord-Ouest du continent africain, qui s'inscrit entre les parallèles 11°40' et 23°30' Nord et les méridiens 16°00' Est et 0°10' Ouest. Il est limité par l'Algérie et la Libye au Nord, le Mali à l'Ouest, le Burkina Faso et le Bénin au Sud-Ouest, le Nigéria au sud et le Tchad à l'Est (Figure 14). Sa frontière la plus proche du littoral est à plus de 600 km du Golfe de Guinée. Le Niger s'étend sur une superficie de 1.267.000 km². Cependant, en raison de conditions climatiques ou de sols défavorables, seule la moitié de celle-ci est habitable (FAO, 2005).

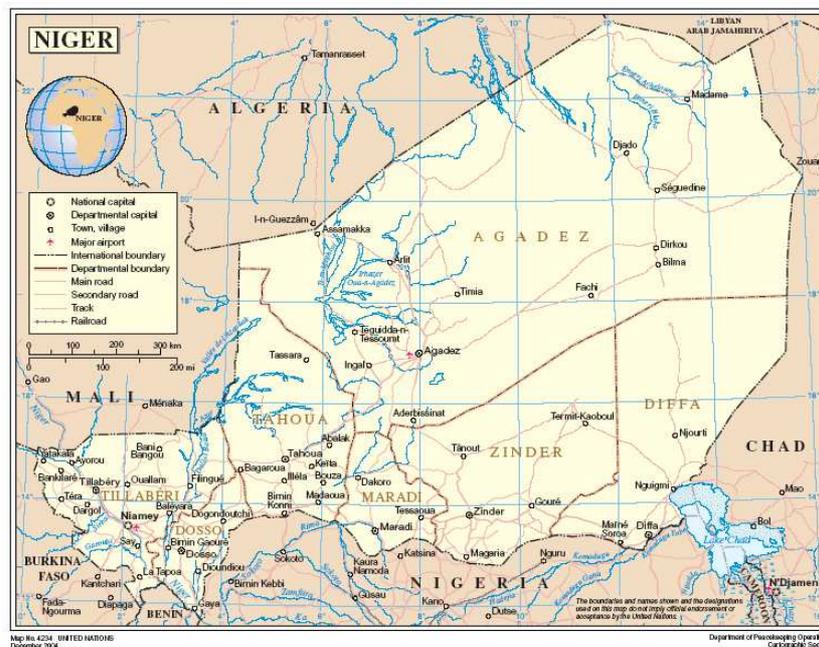


Figure 14 : Carte détaillée du Niger (ONU)

3.1.2. Contexte local : Le Fakara

Les informations reprises ci-dessous sont issues essentiellement d'un rapport d'activités de recherche sur le Fakara (Hiernaux et Ayantunde, 2004).

3.1.2.1. Situation géographique

L'étude de la pluviométrie a été effectuée sur une zone de 500 km² (entre 13°20'N et 13°35'N ; 2°35'E et 2°52'E) incluse dans le canton du Fakara. Cette zone comprend

10 villages mais s'étend aussi sur les terres d'autres villages. En 1998, environ 6000 individus vivaient dans cette zone.

Le Fakara est situé dans une petite région naturelle de l'Ouest du Niger. Il couvre une superficie d'environ 6000 km² entre les vallées confluentes du fleuve Niger à l'Ouest et la vallée fossile du Dallol Bosso à l'Est (Figure 15). La capitale administrative du canton est la petite ville de Dantiandou (13°24'45''N ; 2°45'23''E) située à 75 km à l'est de la capitale de l'état du Niger, Niamey.

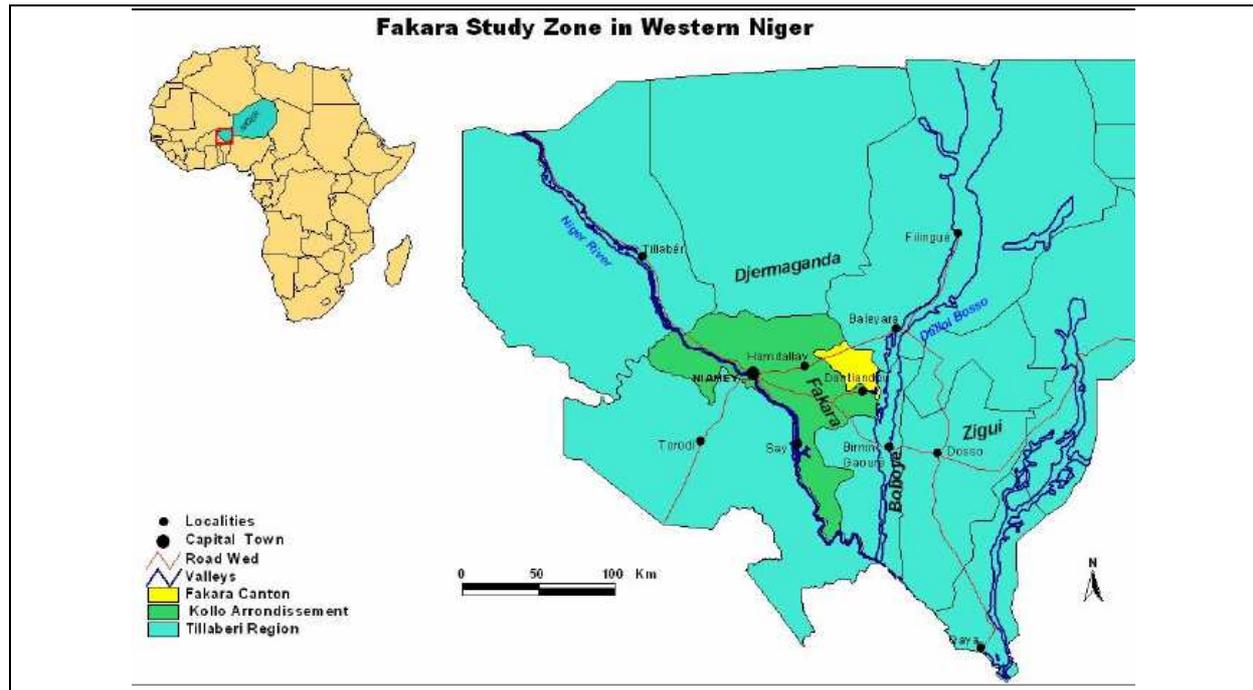


Figure 15 : Situation géographique de la zone d'étude : le Fakara (Hiernaux et Ayantunde, 2004).

3.1.2.2. Climat

Le climat du Fakara est de type tropical semi-aride avec une pluviosité annuelle moyenne de 560 mm (1905-1989) et de 495 mm seulement pour la période allant de 1968 à 1989. Le Fakara fait partie de la zone bioclimatique centrale du Sahel (zone sahélienne). Les pluies tombent en été quand les jours sont longs, les températures ambiantes sont élevées et l'évapotranspiration potentielle est haute.

La distribution des pluies est strictement monomodale, centrée sur le mois d'août, avec une saison des pluies longue de 4 à 5 mois. La longue saison sèche est caractérisée par une humidité de l'air extrêmement basse (minimum quotidien inférieur à 5 %) pendant deux à trois mois, accompagnée de températures et de densités d'aérosols importantes.

3.1.2.3. Hydrographie

Au sein du site d'étude, il n'y a aucun réseau hydrographique permanent. L'eau utilisée pour la consommation humaine et l'irrigation provient essentiellement de forages dans les nappes phréatiques qui sont artésiennes dans les environs de Dantiandou.

Cependant, durant la saison des pluies, l'eau du ruissellement peut s'accumuler localement : sur les plateaux peu perméables, dans de petites dépressions à mi-pente ou dans les parties les plus basses du lit des rivières fossiles. L'eau collectée dans ces dépressions, souvent sur de très petits bassins versants, s'évapore assez rapidement. Une très petite fraction est consommée par le bétail, tandis qu'une proportion variable s'infiltre, alimentant la nappe phréatique.

3.2. Dispositif expérimental

3.2.1. Les pluviomètres

Les pluviomètres installés sont de simples pluviomètres, à lecture directe, faits de plastique profilé, en un seul morceau et résistants aux intempéries (Figure 16). Une échelle de graduation mesurant de 0,1 mm à 150 mm de précipitations est marquée de façon permanente sur le plastique. La surface réceptrice des pluviomètres est de 63,5 mm x 57 mm, soit 36,2 cm². Ces pluviomètres sont maintenus par un support en métal sur une planche de bois plantée dans le sol. De ce fait, le capteur du pluviomètre est maintenu à l'horizontale. De plus, le pluviomètre peut aisément être retiré de son promontoire. Les lattes de bois sont enfoncées dans le sol de manière à ce que les pluviomètres soient bien ancrés et que ceux-ci ne bougent pas durant la saison des pluies.

3.2.2. Réseau de pluviomètres

Depuis l'année 2000, un réseau de pluviomètres (Figure 17) a été mis en place afin de suivre l'évolution spatio-temporelle des pluies dans la zone d'étude du Fakara. Ce réseau est évolutif quant au nombre de pluviomètres le composant. En effet, chaque année, les pluviomètres sont retirés en fin de saison de pluies (fin octobre) et remplacés début avril. De ce fait, la position des pluviomètres varie d'une année à l'autre. Les positions des différents pluviomètres sont repérées par GPS lors de l'installation de ceux-ci. Les retraits et replacements des pluviomètres sont indispensables afin d'éviter toute dégradation et vol



Figure 16 :
Pluviomètre

lors de la saison sèche. D'autre part, cette dynamique permet d'impliquer une plus grande partie de la population. En effet, les responsables des pluviomètres peuvent également varier d'une année à l'autre. De ce fait, le système ne favorise pas que certains cultivateurs. En effet, les collecteurs reçoivent une contribution en échange de la surveillance et des relevés des pluviomètres.

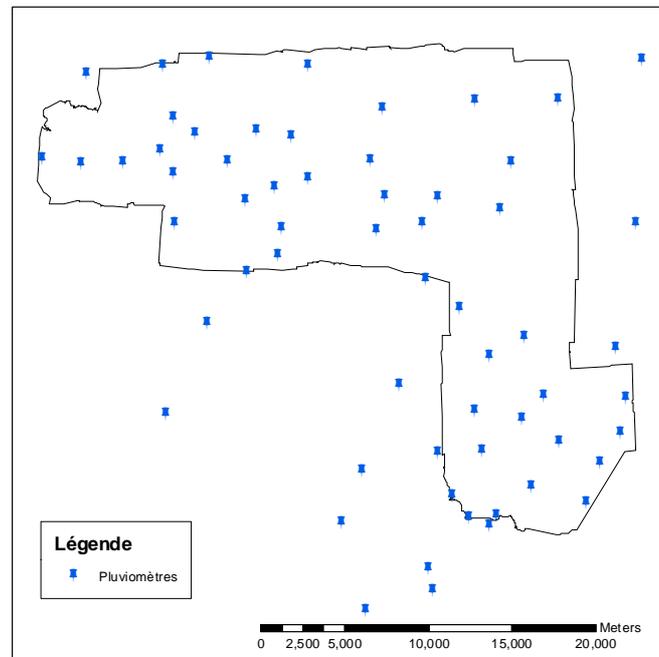


Figure 17 : Carte du réseau de pluviomètres du Fakara en 2005.

La gestion du réseau, l'installation et la reprise des pluviomètres en début et fin de saison se fait en collaboration avec l'association Mooriben dont M. Boubaka est responsable. Mooriben est une association de cultivateurs qui a développé, entre autres, un petit magasin d'intrants. M. Boubaka, connaissant la région et les cultivateurs, est pour nous l'intermédiaire idéal.

Le Tableau 1 reprend les principales caractéristiques du réseau de pluviomètres en fonction des années. En 2000, le réseau comptait 51 pluviomètres sur une surface d'approximativement 500 km², soit une densité d'environ 1 pluviomètre pour 10 km². Malheureusement, certains pluviomètres n'ont pu être utilisés dans l'étude parce qu'ils n'étaient soit pas géoréférencés, soit parce que leur position était trop éloignée de la zone d'intérêt (deux pluviomètres ont été disposés dans des cantons voisins, mais leur grand éloignement (une dizaine de kilomètres du réseau) par rapport aux autres pluviomètres aurait induit des erreurs dans les analyses statistiques). Ou, enfin, parce que les données n'étaient pas complètes sur l'année en cours.

Tableau 1 : Caractéristiques du réseau pluviométrique de 2000 à 2005

Année	Nombre de pluviomètres installés	Nombre de pluviomètres utilisables	Nombre de pluviomètres pour 10 km ²
2000	51	49	0.98
2001	63	53	1.06
2002	71	62	1.24
2003	65	62	1.24
2004	56	56	1.12
2005	61	61	1.22

Malgré les différents changements intervenus d'une année à l'autre, le nombre de pluviomètres dont les données sont exploitables est resté relativement constant. La densité de pluviomètre est donc également restée relativement constante.

3.2.3. Méthode de collecte

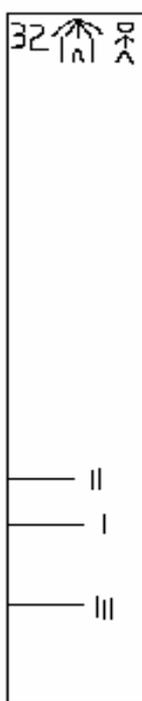


Figure 18 :
Illustration
d'une bandelette
de collecte

Etant donné que les relevés se font, pour moitié, par des cultivateurs illettrés, une méthode simple de collectes des données pluviométriques a été mise en place. Des bandelettes de couleur sont distribuées une fois par mois aux collecteurs. Sur ces bandelettes est indiqué le numéro du pluviomètre auquel elles correspondent. Après chaque événement pluvieux, ceux-ci apposent la bandelette sur le pluviomètre, le bas de la bandelette au niveau du zéro de celui-ci, et tracent une ligne horizontale au niveau de l'eau dans le pluviomètre (Figure 18 et Figure 19). Ils doivent ensuite numérotter les pluies par des petites barres verticales (une pour la première pluie, deux pour la deuxième et ainsi de suite) apposées à côté du trait horizontal de la hauteur de la pluie (Figure 18). Afin d'éviter toute erreur quant à la disposition de la bandelette, Boubaka (responsable de terrain du réseau de pluviomètres) dessine un petit bonhomme en haut de la bandelette. Ainsi, les collecteurs peuvent se référer au dessin et s'assurer que le bonhomme est bien dans le bon sens. Les collecteurs responsables de plus d'un pluviomètre disposent de bandelettes de couleurs différentes sur lesquelles Boubaka dessine une case ou du mil pour faire référence à l'endroit où est implanté le pluviomètre, à savoir le village ou le champ par exemple.

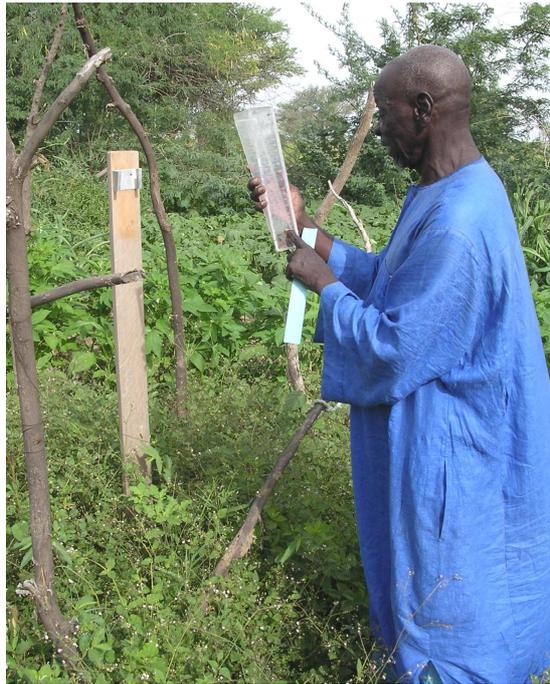


Figure 19 : Méthode de collecte des données pluviométriques.

Les collecteurs lettrés (chefs de village ou professeurs) notent, en plus de la hauteur de pluie tombée, la date de l'événement pluvieux. De ce fait, et grâce à des regroupements en fonction de la position spatiale relative des différents pluviomètres, tous les événements pluvieux relevés peuvent être datés. La carte de la Figure 20 représente la répartition des différents pluviomètres en fonction de l'inscription ou non des dates par les collecteurs.

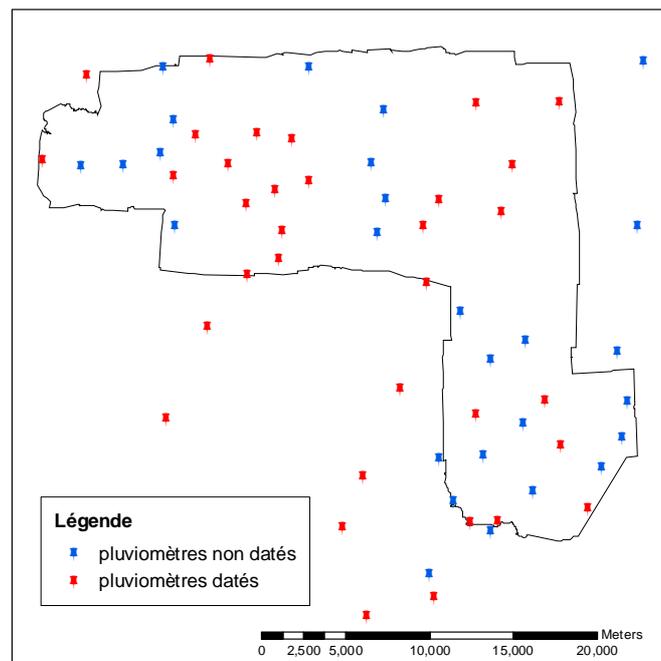


Figure 20 : Carte de la répartition des pluviomètres dont les événements pluvieux sont datés et ceux dont les événements ne sont pas datés, réseau de pluviomètres de l'année 2005.

Une fois par mois, M. Boubaka effectue la tournée du réseau, récolte toutes les bandelettes complétées et en redistribue des nouvelles. Ces tournées sont aussi l'occasion de contrôler la manière dont le collecteur effectue ses relevés et de répondre à ses questions. Afin que les collectes soient assurées avec un minimum d'erreurs, les collecteurs sont appelés à suivre une formation en début de saison.

3.2.4. Méthode d'enregistrement

Tahirou Saley, technicien de l'ICRISAT, est responsable de l'acheminement des bandelettes des villages au centre de recherches de l'ICRISAT à Sadoré. Chaque bandelette est inspectée et les pluies sont retranscrites. Les dates sont attribuées en fonction des pluviomètres pour lesquels on dispose de ces renseignements. Pour ce faire, on compare le nombre d'événements pluvieux enregistrés par pluviomètre et la distance qui les séparent. De ce fait, les données temporelles des pluies ne sont pas fiables à 100 % puisque nous ne disposons pas des dates précises pour chaque événement de chacun des pluviomètres, mais grâce à la méthode utilisée, l'incertitude sur ces données temporelles est diminuée au maximum. Ces données brutes sont stockées dans un fichier informatique.

3.3. Analyse des données

3.3.1. Procédure de contrôle et « nettoyage » des données

Les données pluviométriques brutes, par leur mode de collecte, peuvent être entachées d'erreur. Nous avons donc commencé par retirer les valeurs aberrantes. Pour ce faire, nous avons calculé, par événement, la moyenne des hauteurs de pluie en ne prenant pas en compte les pluviomètres où la hauteur de pluie était nulle. Nous avons donc obtenu, par événement, une valeur représentant la moyenne effective du champ de pluie. De même, nous avons calculé l'écart-type de ces valeurs de pluie non nulles pour chacun des événements. Nous avons considéré comme aberrantes les valeurs qui s'écartent de la moyenne de plus de 3 écart-types. Ces valeurs ont été remplacées par une valeur nulle pour la construction des variogrammes, mais pour l'analyse de la structure spatiale des champs de pluie, nous avons considéré qu'il avait plu en ce point. Nous avons effectué le même contrôle sur les cumuls annuels.

3.3.2. Analyse de la variabilité spatiale des pluies

Nous avons analysé la structure spatiale de la pluie en deux temps : l'analyse de la structure spatiale des champs de pluie et l'analyse de la corrélation entre les hauteurs de pluie. La structure spatiale des champs de pluie est la répartition spatiale des zones de pluie et celles où il n'avait pas plu sur le réseau. La corrélation entre les hauteurs de pluie a été analysée pour les pluviomètres où la pluie était non nulle et cela événement par événement. Pour cette étape, nous avons supposé que la pluviométrie n'était pas un phénomène dont la nature était

totalelement imprévisible, mais que deux observations situées l'une près de l'autre devaient, en moyenne, se ressembler davantage que deux observations éloignées.

Afin que l'étude de la variabilité spatiale soit possible, nous avons du poser certaines hypothèses quant aux caractéristiques statistiques de la pluie. Tout d'abord, nous avons considéré que la pluie était une variable aléatoire qui suivait une loi Normale de moyenne μ et de variance σ . Cette hypothèse est importante pour le traitement des données à l'aide de semi-variogrammes car ceux-ci donnent des résultats plus robustes s'ils sont appliqués sur des variables normales.

Nous avons donc représenté les distributions des pluies par événement afin de vérifier si la distribution pouvait être assimilée à une distribution normale. Les données de départ présentant une distribution de type lognormale, nous avons effectué plusieurs transformations des données pluviométriques. Les transformations utilisées sont : la transformation logarithmique (logarithme népérien ou logarithme en base dix de la valeur de départ), la transformation $1/x$ et enfin la transformation racine carrée. L'hypothèse de normalité est vérifiée après transformation des données.

3.3.2.1. Analyse de la structure spatiale des champs de pluies

Pour pouvoir analyser la structure des champs pluvieux sur le territoire, nous avons dû modifier les matrices de pluies existantes. La méthode consistait à élever à un toutes les valeurs de pluies non nulles. De ce fait, les matrices de pluie pour les six années étudiées ne comportaient plus que des valeurs égales à zéro ou à un. Nous avons donc réduit notre variable aléatoire à une variable de Bernouilli prenant ces deux valeurs (Tableau 2).

Tableau 2 : Illustration de la transformation des matrices de pluies

0	2.5	6	⇒	0	1	1
15	0	7.3		1	0	1
21	3	11		1	1	1

Pour rappel, la loi de Bernouilli s'intéresse à la réalisation ou à la non-réalisation d'un événement A (Bogaert, 2003). Dans ce cas précis, l'événement A représente le fait qu'il pleuve sur le réseau de pluviomètres. Généralement, on associe le nombre 1 à la réalisation de l'événement A et 0 à sa non-réalisation (A^*). De ce fait, on a que $P(A) = P(X = 1) = p$ et $P(A^*) = P(X = 0) = 1-p$. Le domaine de variation de X est donc $R_X = \{0,1\}$, avec

$$p(x) = \begin{cases} p & \text{si } x = 1 \text{ (A réalisé)} \\ 1-p & \text{si } x = 0 \text{ (A* réalisé)} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

La variable aléatoire qui suit une loi de Bernoulli ne dépend dès lors que d'un paramètre p , qui est la probabilité de A .

Sachant que les données à traiter sont des variables de Bernoulli, les variogrammes, issus de l'analyse de celles-ci, auront des caractéristiques spécifiques. En effet, si p est la probabilité qu'il pleuve lors d'un événement pluvieux sur le réseau, alors le plateau du variogramme relatif à cet événement sera égal à sa variance, à savoir : $p(1-p)$. Cela implique qu'une probabilité égale à un recouvrement de 20 % du réseau de pluviomètre présentera le même plateau qu'une probabilité de recouvrement de 80 %.

3.3.2.2. Analyse de la structure spatiale des hauteurs de pluie

Le but de l'analyse de la structure spatiale des hauteurs de pluie est de mettre en évidence la corrélation qui peut exister entre les hauteurs de pluie enregistrées à deux points de mesure en fonction de la distance qui sépare ces deux points. Intuitivement, on suppose que la corrélation entre deux valeurs diminuera lorsque la distance entre elles augmente.

Le nombre de données étant réduit, nous avons décidé d'analyser les données pluviométriques en groupant les événements par série temporelle. Nous avons supposé que s'il existe une différence dans la structure spatiale des pluies, celles des mois de juin et d'août doivent être différentes. En début de saison (mois de mai et de juin), les événements pluvieux sont généralement plus localisés et peu réguliers dans le temps. Au cœur de la saison (mois d'août), les pluies sont bien installées, couvrent généralement de plus grandes étendues et sont plus régulières. L'outil utilisé afin de mettre en évidence la structure spatiale des hauteurs de pluie est le **semi-variogramme**.

Comme dit précédemment, l'utilisation du semi-variogramme nécessite le choix préalable de classes de distance. Notre réseau s'étendant sur une superficie d'environ 500 km², nous avons choisi des classes de distances comprises entre 1 et 22 km et dont l'étendue est de 1,5 km.

Etant donné que la variabilité spatiale des pluies sahéliennes est un fait avéré, nous nous attendons à ce que les semi-variogrammes présentent une portée très courte. Aucune hypothèse n'est posée quant au plateau puisque celui-ci est le reflet de la variance des événements pluvieux et dépendra de si l'on considère chaque événement pluvieux séparément ou ces différents événements cumulés.

Le variogramme va nous permettre de mettre en évidence différentes caractéristiques de la pluviométrie au Sahel. Par exemple, si le phénomène ne présente aucune structure spatiale, autrement dit que les variables sont indépendantes, le phénomène sera dit de type « bruit blanc » (voir Figure 21) et le variogramme pourra être typiquement représenté par un modèle

effet de pépite pur (valeur de zéro à l'origine et égale à la variance pour toutes les valeurs supérieures à zéro).

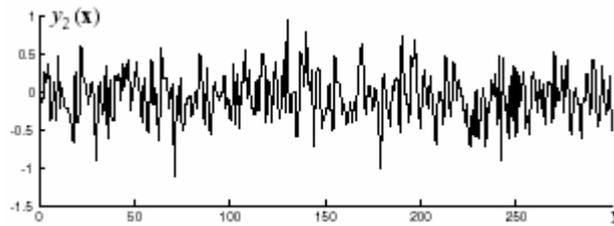


Figure 21 : Illustration d'un phénomène de type « bruit blanc » (Bogaert, 2005)

3.3.3. Analyse de la composante temporelle de la structure spatiale de la pluie

La composante temporelle n'a pas pu être analysée en tant que telle dans le cadre de ce travail. Cependant, nous avons essayé de définir le temps de cumul le plus court à partir duquel apparaît une dépendance spatiale des hauteurs de pluie.

Des variogrammes ont été construits sur des temps de cumuls de plus en plus longs. Ces cumuls ont été effectués sur une **fenêtre flottante**. Prenons l'exemple d'un cumul effectué sur une durée de 5 jours. La fenêtre flottante sera donc égale à cinq jours. On centre alors sur le jour j concerné et on effectue le cumul de $j-2$ à $j+2$ (Tableau 3). Si l'on passe au jour suivant $j+1$, le cumul s'effectuera de $j-1$ à $j+3$ et ainsi de suite. Nous obtenons donc un nouveau tableau avec le même nombre de valeurs mais où celles-ci correspondent au cumul sur x jours centré sur le jour de la colonne concernée.

Tableau 3 : Illustration du principe de fenêtre flottante pour un cumul sur 5 jours

Cumul pour $j = 3$	1	2	3	4	5	6	7	8
Jour j	1	2	3 →	4	5	6	7	8
Cumul pour $j = 4$	1	2	3	4	5	6	7	8

Des variogrammes de temps de cumuls de plus en plus longs peuvent être ainsi construits. Ceux-ci seront effectués sur des laps de temps égaux à 5, 9, 15, 19, 25 et 31 jours en plus des variogrammes des pluies événementielles.

La comparaison de l'allure de ces différents variogrammes permettra d'évaluer l'évolution de la structure spatiale de la pluie en fonction du temps de cumul.

3.3.4. Moyenne des variogrammes

Afin de modéliser le variogramme événementiel moyen mensuel, à partir des variogrammes événementiels, deux méthodes pouvaient s'appliquer, à savoir la méthode de la moyenne pondérée et la méthode des distances.

La **moyenne pondérée** est une méthode simple, qui consiste à moyenniser les valeurs de la semi-variance, classe par classe, en pondérant chaque valeur en fonction du nombre de couples de points utilisés pour trouver cette valeur. En effet, chaque variogramme (γ_j) est constitué d'un point de variance par classe de distance (d). Pour une classe de distance (d_i), le point de variance représente la moyenne de la variance des couples de points séparés par une distance comprise dans la classe de distances d_i . Le nombre de couples de points considéré (n_i), varie donc d'une classe à l'autre et d'un variogramme à l'autre. Ce nombre de couples de points varie pour les variogrammes des hauteurs de pluie puisque ces variogrammes sont construits à partir des valeurs pluviométriques non nulles exclusivement. Le nombre de pluviomètres touchés par la pluie lors d'un événement variant d'un événement pluvieux à l'autre, le nombre de couples de points varie également (n_i), et cela au sein d'une même année.

Tableau 4 : Illustration des nombres de couples de points des variogrammes.

	d_1	d_2	d_3	...	d_i
γ_1	n_{11}	n_{12}	n_{13}		n_{1i}
γ_2	n_{21}	n_{22}	n_{23}		n_{2i}
...					
γ_j	n_{j1}	n_{j2}	n_{j3}		n_{ji}
total	n_{tot1}	n_{tot2}	n_{tot3}		n_{toti}

Le poids considéré pour la pondération est le rapport entre le nombre de couples de points utilisés pour le γ_j pour la classe de distance d_i (n_{ji}) et le nombre total de couples de points pour tous les variogrammes considérés (n_{toti}) (Tableau 4). On donne ainsi plus d'importance aux points de variance issus d'un nombre plus important de couples de points.

La **méthode des distances** consiste à rassembler toutes les valeurs de pluie dans le même vecteur et créer une matrice de coordonnées associée à ce vecteur, en ajoutant une distance importante aux coordonnées à chaque événement. De ce fait, tous les événements pluvieux sont considérés comme sur un même territoire, mais ils doivent être suffisamment éloignés l'un de l'autre de telle sorte qu'un couple de valeurs de pluie de deux événements distincts ne puisse pas être compris dans une classe de distance considérée dans l'évaluation du variogramme.

Afin de vérifier que ces deux méthodes soient équivalentes, nous avons pris le jeu de données de l'année 2000 et appliqué les deux méthodes de moyenne sur différents groupes d'événements.

La Figure 22 illustre les moyennes obtenues à partir des deux méthodes. Les différents graphiques a, b, c et d, sont issus respectivement d'un groupe de 3, 13, 16 et enfin 5 événements pluvieux. Nous constatons que les deux méthodes donnent exactement le même résultat. Par la suite, puisque les deux méthodes sont équivalentes, nous effectuerons les moyennes par la méthode des distances, puisque celle-ci est plus simple d'utilisation.

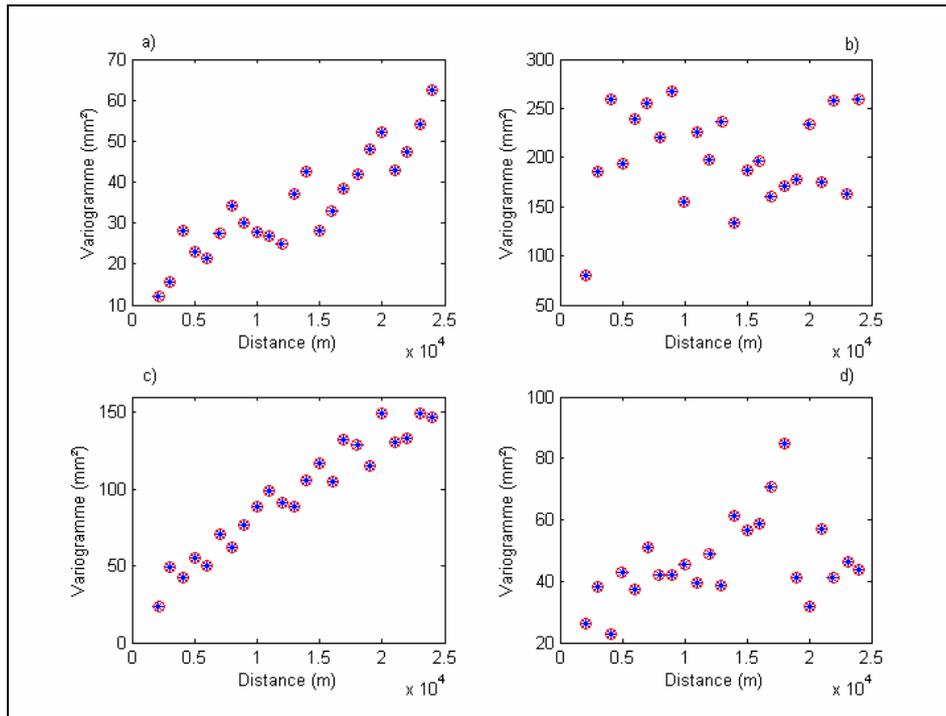


Figure 22 : Comparaison des deux méthodes de calcul de moyenne des variogrammes pour des groupes de 3 (a), 13 (b), 16 (c) et 5 (d) événements pluvieux.

Légende : * moyenne pondérée, o moyenne par la méthode des distances.

4. Résultats et discussions

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats concernant l'**analyse exploratoire** des données, l'analyse de la **variabilité spatiale** de la pluie et enfin l'analyse de la **composante temporelle de la structure spatiale de la pluie**.

4.1. Analyse exploratoire des données

4.1.1. Début et fin de la saison des pluies et cumuls pluviométriques

Dans un premier temps, nous avons pu identifier certaines variables caractéristiques de la pluviométrie au sein de la zone d'étude, à savoir les dates de début et de fin de la saison des pluies, le nombre d'événements pluvieux au sein de celle-ci, la hauteur moyenne de pluie par événement, la moyenne du cumul pluviométrique annuel sur toute la zone ainsi que le maximum et le minimum de ce cumul. Ces différents résultats, pour chacune des années, sont présentés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Caractéristiques pluviométriques du Fakara de 2000 à 2005

Année	Première pluie	Dernière pluie	Nombre d'événements pluvieux moyen par pluviomètre	Hauteur moyenne par événement (mm)	Moyenne du cumul annuel par pluviomètre (mm)	Minimum du cumul annuel (mm)	Maximum du cumul annuel (mm)	Ecart entre maximum et minimum (mm)
2000	1 juin	1 octobre	28 ± 2	13 ± 9	417 ± 81	251	664	413
2001	29 mai	11 octobre	27 ± 3	12 ± 7	390 ± 49	300	503	203
2002	23 mai	5 octobre	25 ± 4	17 ± 11	451 ± 88	277	662	385
2003	3 juin	26 octobre	24 ± 4	17 ± 8	457 ± 90	292	655	363
2004	19 mai	29 septembre	19 ± 3	19 ± 9	392 ± 73	222	547	324
2005	3 mai	14 octobre	34 ± 3	11 ± 6	437 ± 57	305	548	243
Moyenne	23 mai	9 octobre	26 ± 3	15 ± 8	424 ± 73	274	596	322

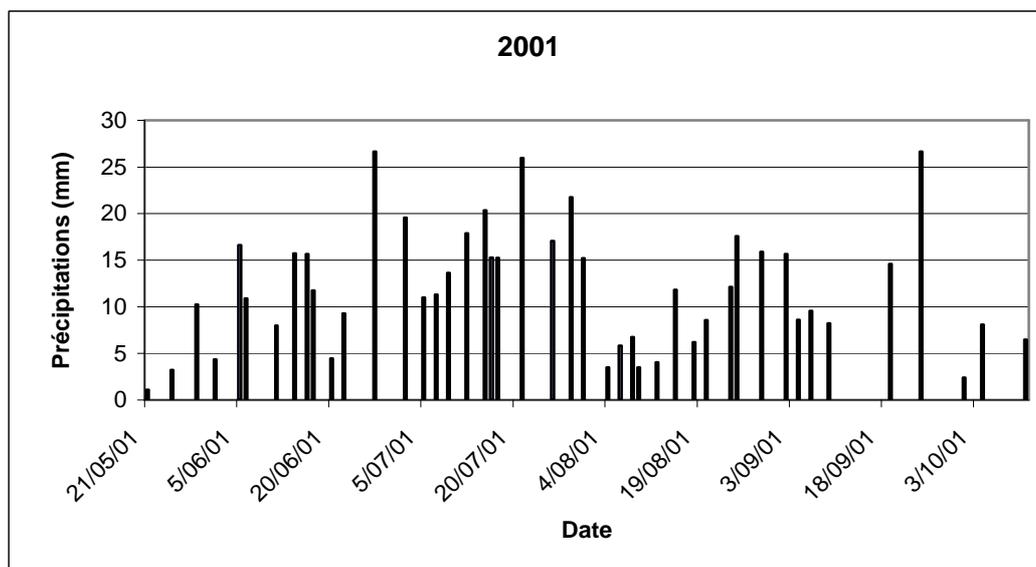
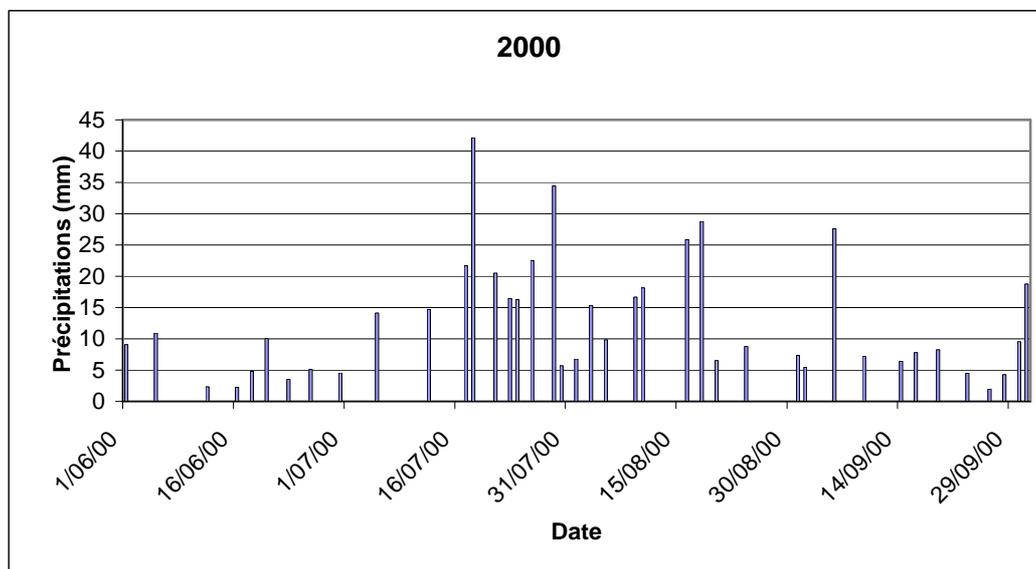
Nous pouvons constater que les dates de début et de fin de saison des pluies s'étalent sur environ un mois. Toute hauteur de pluie supérieure à zéro a été considérée comme événement pluvieux au niveau d'un pluviomètre. Nous n'avons donc pas défini de critères quant à une proportion minimale du réseau touché où une hauteur minimum de pluie pour considérer une hauteur de pluie comme « événement pluvieux réel ».

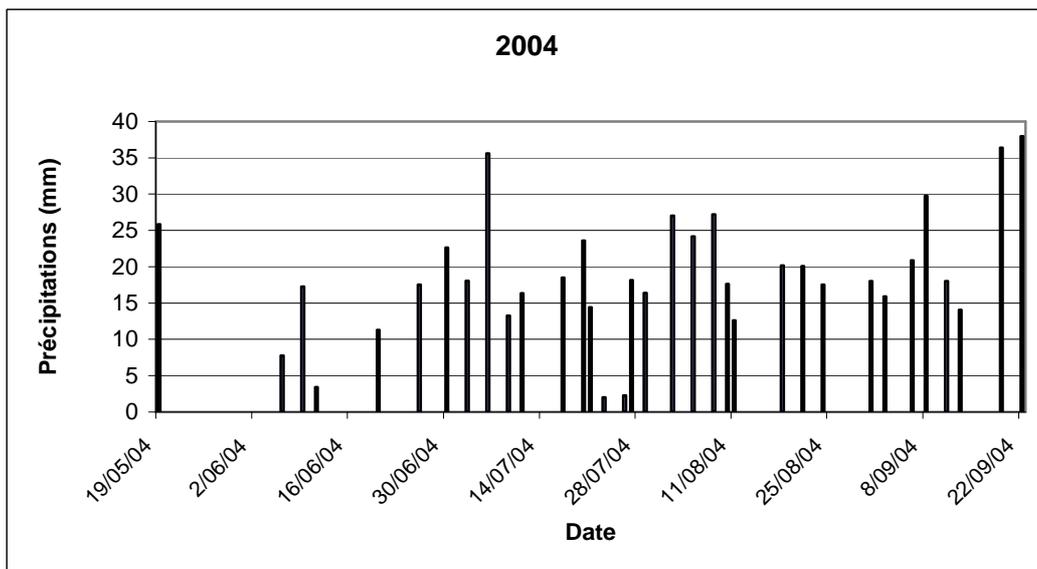
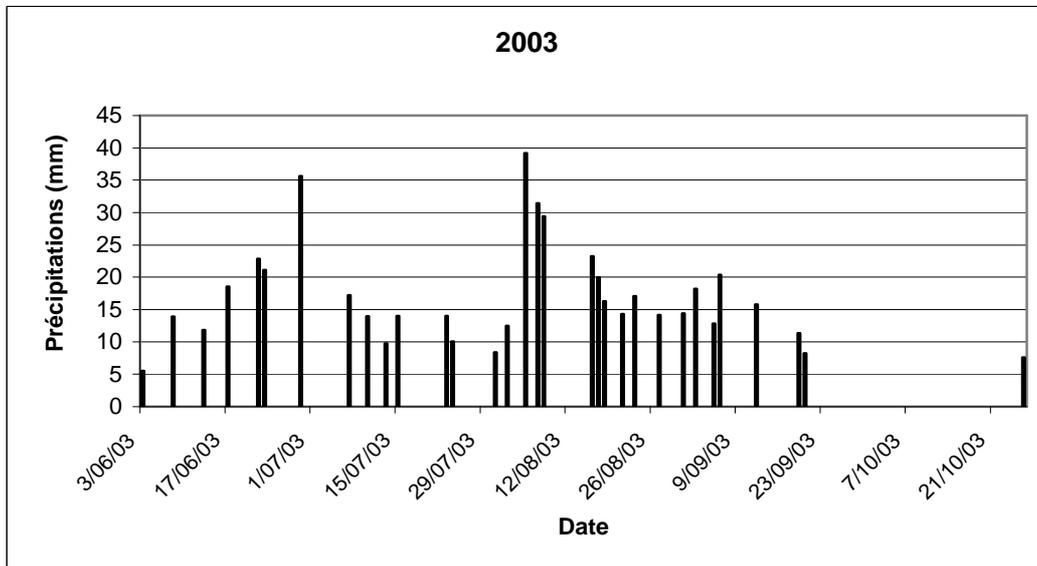
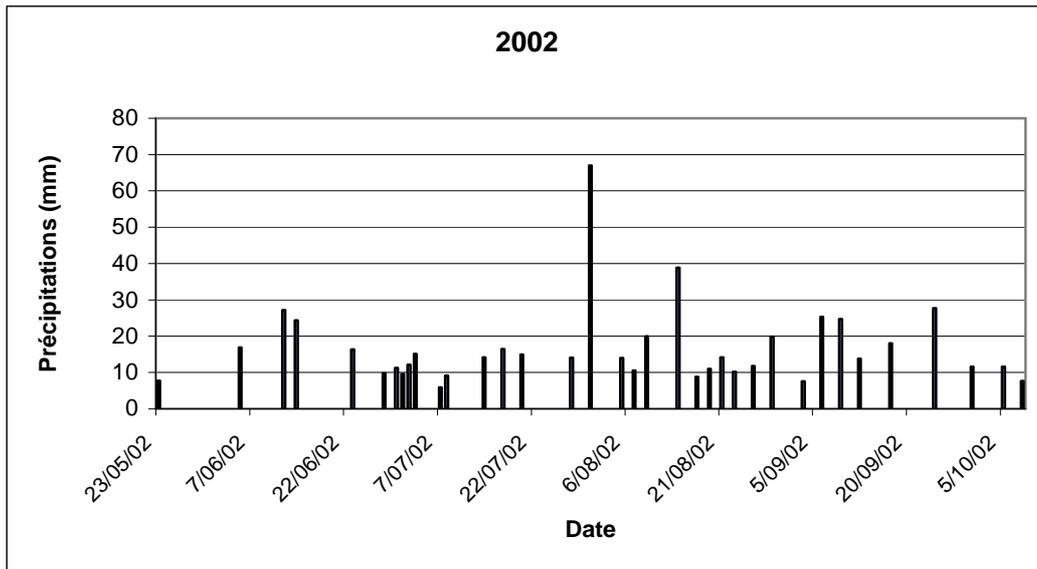
Dans le Tableau 5, les quatre dernières colonnes contiennent les valeurs des moyennes, maxima, minima et écarts maxima des cumuls pluviométriques annuels. Nous pouvons constater un écart important entre le minimum et le maximum du cumul annuel, de l'ordre de plusieurs centaines de millimètres (322 mm en moyenne). Ceci illustre la grande variabilité spatiale de la pluie au Sahel.

Ce tableau illustre aussi la variabilité interannuelle des cumuls pluviométriques saisonniers. L'écart maximum entre deux cumuls annuels moyens (ceux de 2001 et 2003) est de 67 mm. Sur ces six années, aucune tendance n'est visible, la moyenne semble stable dans le temps et oscille autour de 420 mm.

L'analyse exploratoire des données a aussi permis d'observer l'évolution des moyennes des événements pluvieux en fonction du temps (Figure 23). Ces valeurs sont donc la moyenne, par événement, des hauteurs de pluie enregistrées sur l'ensemble du réseau de pluviomètres. La moyenne est effectuée sur toutes les valeurs pluviométriques non nulles.

Nous constatons qu'il n'y a pas de réelle augmentation de la moyenne par événement au cœur de la saison mais le cumul, plus important à cette période, est influencé par une augmentation du nombre d'événements. Aucune tendance ne se dégage clairement de l'évolution des moyennes de hauteur de pluie par événement.





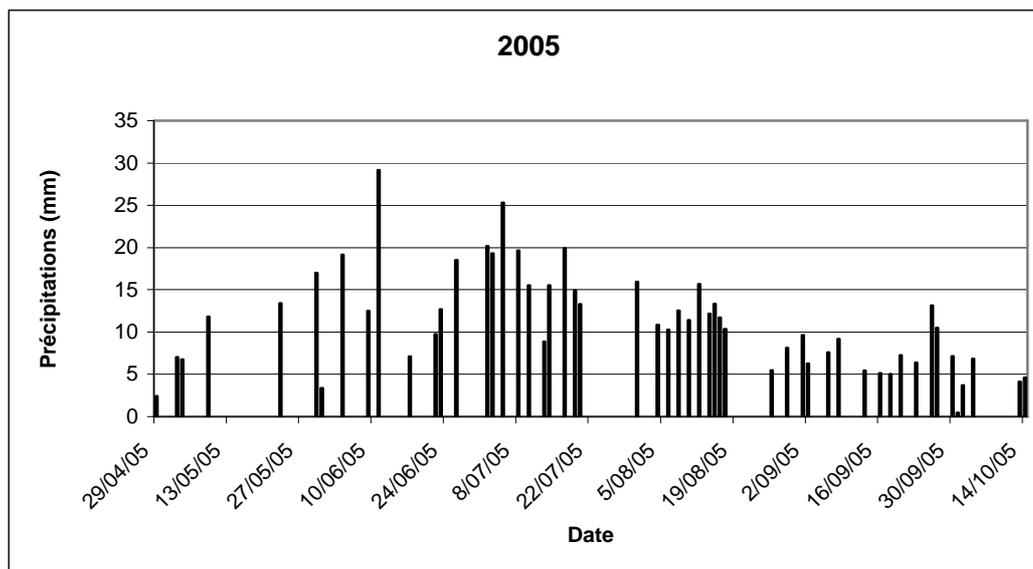


Figure 23 : Evolution de la moyenne de la hauteur de pluie tombée par événement de 2000 à 2005 au Fakara.

4.1.2. Variabilité interannuelle du nombre d'événements pluvieux et hauteur moyenne des pluies

Selon Ali (2003), l'origine de la majeure partie de la variabilité interannuelle des cumuls saisonniers ne dépend principalement que de la variabilité interannuelle du nombre d'événements pluvieux. De ce fait, il existerait une corrélation importante entre cumul pluviométrique annuel et nombre d'événement pluvieux sur l'ensemble de la saison. Cette relation entre le cumul pluviométrique annuel moyen et le nombre annuel moyen d'événements pluvieux par pluviomètre (Figure 24), avec un coefficient de corrélation de 0,07, n'est pas confirmée au Fakara pour la période étudiée.

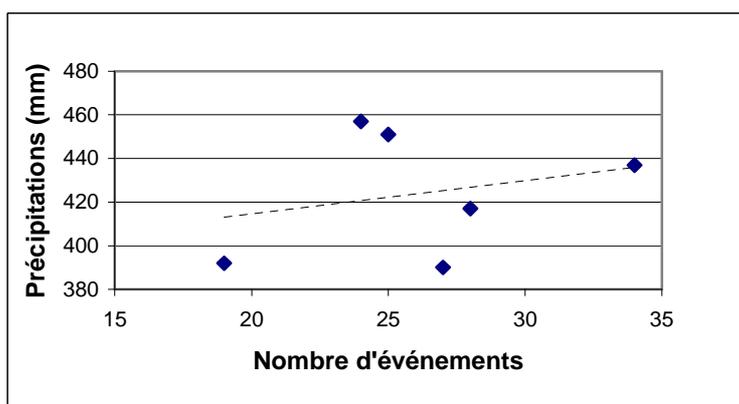


Figure 24 : Corrélation entre le nombre d'événements pluvieux moyen et le cumul pluviométrique annuel moyen pour les années 2000 à 2005 pour le réseau pluviométrique du Fakara.

Nous arrivons à la même conclusion en prenant les cumuls annuels de chaque pluviomètre pour les six années de mesure (Figure 25). Tout ces points ensemble présente une corrélation faiblement positive ($R^2 = 0.08$)

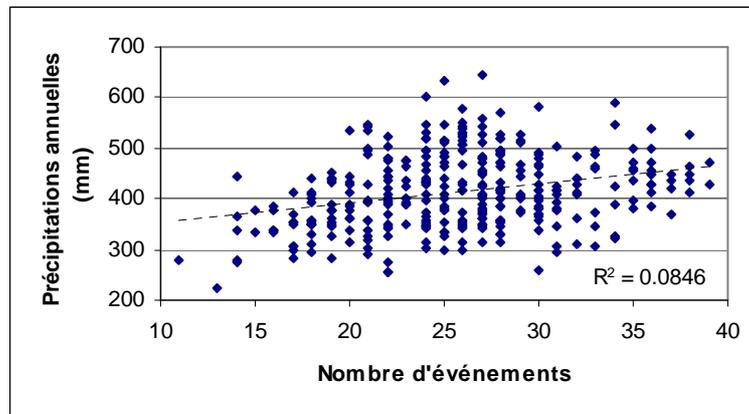


Figure 25 : Corrélation entre le nombre d'événements pluvieux et le cumul pluviométrique annuel pour tous les pluviomètres du réseau pluviométrique du Fakara de 2000 à 2005.

Sur notre zone d'étude, les cumuls annuels les plus élevés (2002 et 2003) sont reliés à des années où le nombre d'événements pluvieux est de l'ordre de la moyenne (25 ou 24 ± 4 événements, Tableau 5). C'est en 2000 et 2004 que les cumuls annuels sont les plus faibles. Cependant les nombres annuels d'événement pour ces deux années sont vraiment différents (respectivement 28 et 19 événements en moyenne). Le nombre d'événements est donc plus élevé pour l'année 2000 mais la hauteur moyenne de pluie pour cette année est inférieure à celle de 2004 (13 mm en 2000 contre 19 mm en 2004 avec la même variabilité). De ce fait, un nombre supérieur d'événements sur la saison mais de hauteur moyenne plus faible a mené à des cumuls égaux.

D'autre part, nous constatons également que l'année 2005, qui présente le nombre d'événements total le plus élevé (34 événements pluvieux en moyenne), a aussi un cumul pluviométrique annuel relativement élevé (437 mm). Mais malgré son nombre d'événements clairement supérieur aux autres années, le cumul annuel n'est pas le plus élevé car la moyenne par événement est la plus faible de toutes les années de mesure.

Trois raisons semblent avoir mené à ces résultats. Premièrement, le lien entre cumul pluviométrique annuel et nombre d'événements pluvieux a été établi sur des jeux de données de séries chronologiques plus longues. Une série de six années est vraisemblablement trop courte pour pouvoir mettre cette corrélation en évidence. Deuxièmement, un réseau plus étendu dans l'espace aurait pu enregistrer les hauteurs de pluie représentatives de l'ensemble du système convectif. De ce fait, un réseau plus étendu pourrait enregistrer un même nombre d'événements pluvieux mais des cumuls pluviométriques annuels moyens différents. Un réseau moins étendu peut, en effet, enregistrer seulement les hauteurs de pluie de la périphérie d'un système convectif sans capter les pluies fortes du centre du système si celui-ci se déplace

en bordure de la zone d'étude. Enfin, durant les deux dernières années, les collecteurs ont été mieux formés et suivis durant la collecte. Les données sont, de ce fait, peut-être plus fiables car moins entachées d'erreurs.

Selon Lebel et al. (2003), les années sèches, par rapport aux années plus humides, présentent un déficit au niveau du nombre d'événements pluvieux au cœur de la saison ce qui entraînent un cumul saisonnier plus faible. Une corrélation entre ces deux paramètres sera peut-être plus importante que celle liant le cumul saisonnier au nombre total d'événements sur la saison.

En observant l'évolution du nombre d'événements au cœur de la saison en comparaison au cumul pluviométrique annuel (Figure 26), nous constatons que le nombre d'événements du cœur de la saison ne présente aucune corrélation avec le cumul annuel que le nombre total d'événements pluvieux sur la saison. La courbe de tendance montre même une légère corrélation négative entre ces deux paramètres ($R^2 = 0,04$). Cette valeur n'est cependant pas suffisamment significative pour pouvoir rejeter catégoriquement l'hypothèse d'une corrélation entre le nombre d'événements pluvieux de la saison et cumul pluviométrique saisonnier. La répartition de ces événements tout au long de la saison peut avoir un impact sur le cumul pluviométrique annuel.

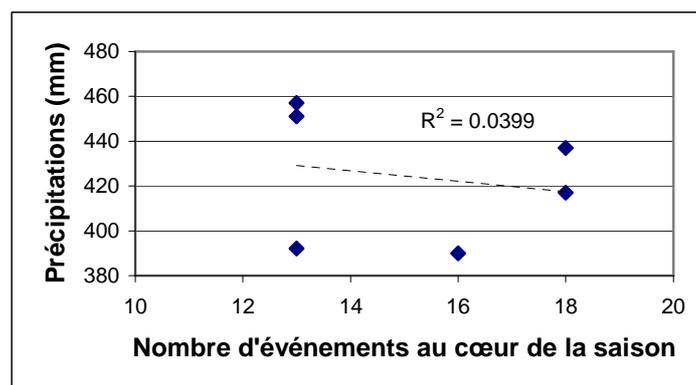


Figure 26 : Corrélation entre le nombre d'événements pluvieux du cœur de la saison et le cumul pluviométrique annuel pour le réseau pluviométrique du Fakara.

Il n'y a donc pas de corrélation claire entre cumul pluviométrique saisonnier et nombre d'événements pluvieux. Dans notre jeu de données, la moyenne de hauteur de pluie par événement peut être considérée comme constante au sein d'une même année, mais la variation interannuelle est importante. De ce fait, il n'y a pas seulement un effet de la variabilité interannuelle du nombre d'événements pluvieux, mais la variabilité interannuelle de la hauteur moyenne des précipitations par événement influence également les cumuls pluviométriques saisonniers. Ce jeu de données (six années seulement) n'est sans doute pas assez étoffé pour pouvoir mettre en évidence, et sans équivoque, une corrélation quelconque entre ces deux paramètres.

4.1.3. Variabilité intra-annuelle du nombre d'événements pluvieux et hauteur moyenne des pluies

Comparons maintenant la répartition des événements pluvieux durant la saison des pluies (Figure 27). L'évolution du nombre d'événements par mois illustre bien la dynamique de la pluie au Sahel. Le nombre d'événements est faible en mai, augmente jusqu'en août pour ensuite diminuer jusqu'en octobre.

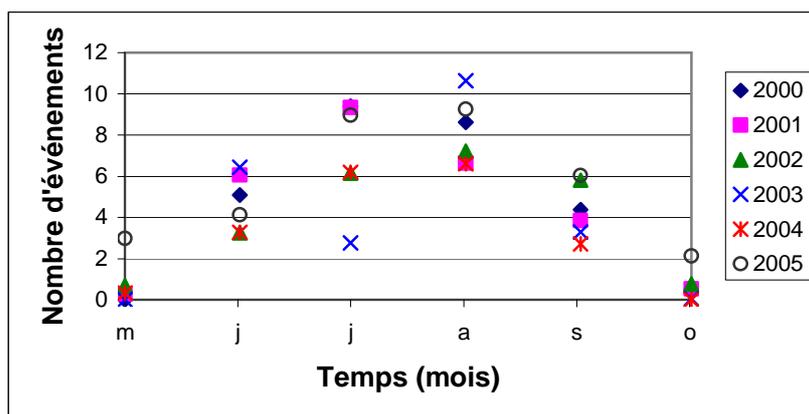


Figure 27 : Evolution du nombre moyen d'événements pluvieux par mois et par pluviomètre sur le réseau du Fakara de 2000 à 2005.

Bien que le nombre d'événements pluvieux total soit variable d'une année à l'autre, le nombre d'événements, par mois, est relativement constant d'une année à l'autre. Seule l'année 2003 accuse un déficit clair du nombre d'événements durant le mois de juillet (seulement 3 événements en moyenne).

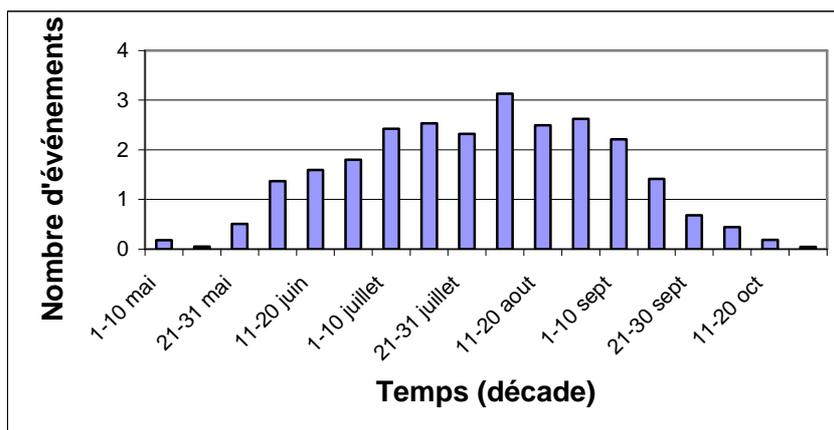


Figure 28 : Evolution décadaire du nombre moyen d'événements pluvieux par pluviomètre. Moyenne pour les six années (2000 à 2005), au Fakara.

En calculant le nombre moyen d'événements par pluviomètre et par décade (pour les six années confondues), nous obtenons le graphique représenté à la Figure 28. Une tendance s'y

dégage clairement. Le nombre moyen d'événement par décade reste toujours inférieur à 4. Ce nombre reste relativement constant (entre 2 et 3 événements par décade sauf pour la première décade du mois d'août) durant les mois de juillet et d'août. Il est légèrement inférieur (entre 1 et 2 événements par décade sauf pour la première décade de septembre) pour les mois de juin et septembre et devient presque nul pour les mois de mai et octobre.

De même, nous pouvons représenter les moyennes des précipitations par décade (voir Figure 29). Cette moyenne présente une allure en plateau de début juin à fin septembre. Seuls les mois de mai et d'octobre ne suivent pas cette stationnarité.

De début juin à fin septembre, la hauteur moyenne par événement est constante et de l'ordre de 15 mm. En mai et octobre, les hauteurs de pluie par événement sont plus faibles avec une moyenne de 7 mm (si l'on ne considère pas la deuxième décade de mai).

La deuxième décade de mai présente un cumul très élevé (26 mm). La hauteur des précipitations a été surestimée pour cette décade à cause d'un événement exceptionnel survenu pendant l'année 2004. Le jeu de données ne comprenant pas d'autre événement pluvieux pour la deuxième décade de mai, la moyenne de cette décade est égale à la moyenne de cet événement.

La stationnarité de la moyenne de la hauteur de pluie durant toute la saison est une hypothèse qui semble satisfaisante quand les données sont moyennées sur les six années disponibles. Il y aurait donc une stationnarité à long terme mais les événements gardent leur variabilité intrinsèque. Avec un jeu de données plus complet, la moyenne pour les mois de mai et octobre serait peut-être plus élevée.

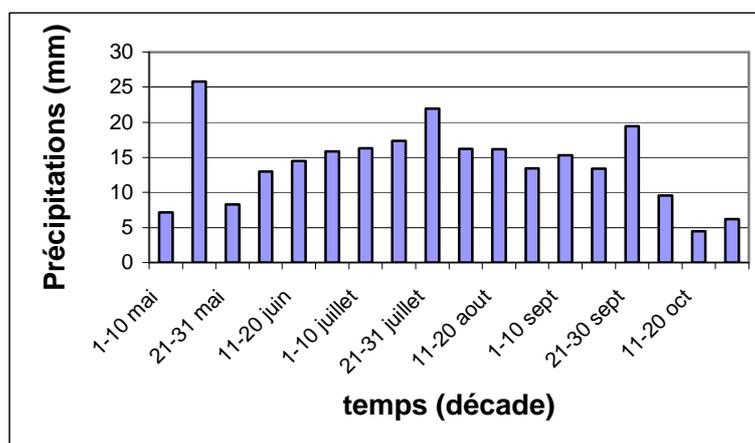


Figure 29 : Evolution décadaire de la moyenne de hauteur de pluie par événement. Moyenne sur six ans, de 2000 à 2006, pour la zone du Fakara.

Connaissant l'évolution du nombre d'événements par décade et celle de la moyenne par événement, il est aussi intéressant de représenter l'évolution du cumul décadaire au sein de la saison des pluies (Figure 30).

Sur cette figure, nous pouvons constater que les cumuls décadaires suivent une courbe d'apparence gaussienne légèrement tirée vers la droite. Les précipitations augmentent progressivement de mai à juillet pour ensuite diminuer de la mi-août à octobre. Il y a une concentration des précipitations pendant les mois de juillet et d'août. Le maximum est atteint lors de la première décade d'août. Les mois de mai et d'octobre, avec des cumuls décadaires inférieurs à 10 mm, ne participent que très légèrement au cumul saisonnier. Pour les mois de juin et septembre, les cumuls décadaires moyens dépassent à peine les 30 mm.

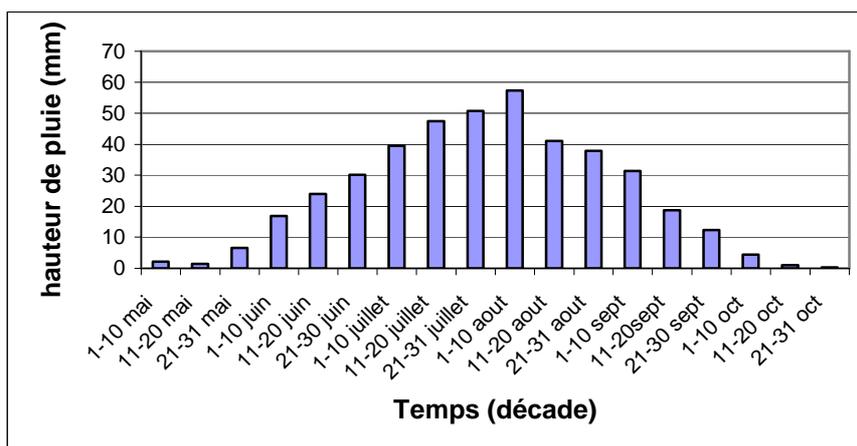


Figure 30 : Evolution décadaire du cumul pluviométrique. Moyenne sur les six années de mesure (2000 à 2006), au Fakara.

Cette figure met en évidence l'influence combinée des moyennes par événements et de la proportion du réseau touché par événement. La moyenne de hauteur de pluie par événement n'est de ce fait pas stationnaire car l'évolution des cumuls pluviométriques par décade ne suit pas exactement celle du nombre d'événement par décade.

4.1.4. Distribution des pluies

Afin de visualiser la distribution de la pluie, nous avons moyenné sur les six années de mesures (2000 à 2005) les histogrammes de valeurs non nulles de pluie par décade. Pour ce faire, nous avons d'abord normalisé toutes les valeurs de pluie, par événement, avant de calculer la moyenne. Nous avons représenté à la Figure 31 les distributions des pluies de deux décades prises au hasard, à savoir la troisième décade de juin et la première décade de juillet. La distribution de la pluie montre une évolution dont les valeurs sont « tirées » vers les faibles hauteurs de pluie. En effet, la pluie est une variable bornée à zéro au niveau inférieur, mais peut prendre des valeurs très élevées mais très rares d'autre part.

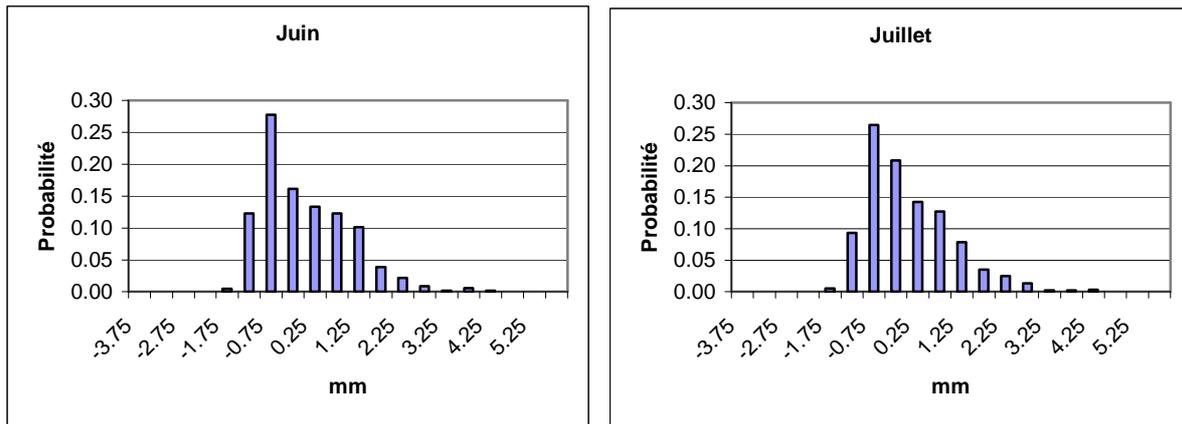


Figure 31 : Distribution des pluies normalisées, moyennée sur 6 années (2000-2005), pour la troisième décade de juin et la première décade de juillet, pour la zone du Fakara.

Vu que les résultats liés à l'emploi des variogrammes sont plus robustes si l'hypothèse de base de normalité des données est satisfaite, nous avons effectué une transformation simple des données, en prenant le logarithme népérien des valeurs de pluie. De cette manière, nous pourrions effectuer l'analyse sur les données brutes et les données transformées et évaluer l'impact de ces différences.

La Figure 32 représente la distribution de la pluie après que les données aient subi la transformation logarithmique. Nous pouvons constater que la transformation logarithmique n'a pas permis d'arriver à une distribution normale de la pluie. La tendance montre, cette fois, un biais vers les hauteurs de pluie élevées.

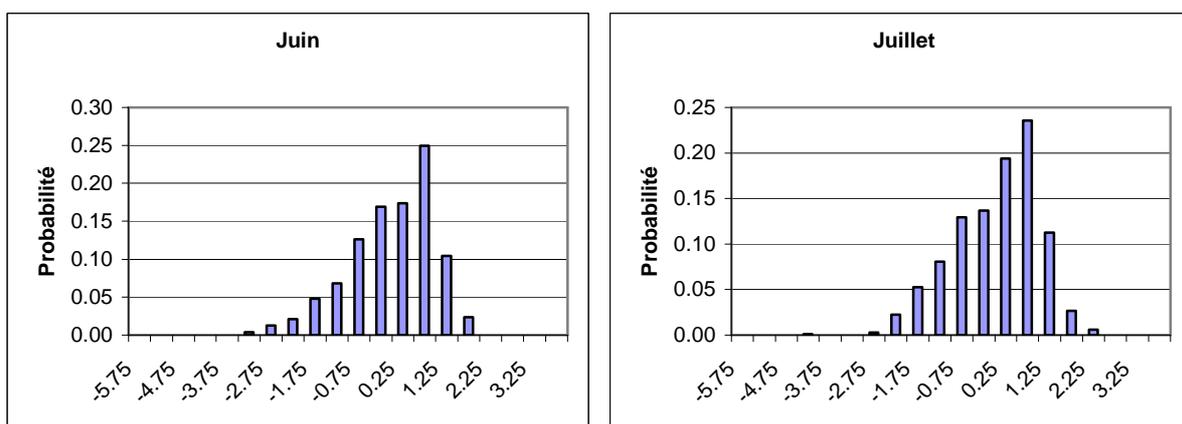


Figure 32 : Distribution des pluies normalisées après transformation logarithmique, moyennée sur 6 années (2000-2005), pour la troisième décade de juin et la première décade de juillet, pour la zone du Fakara.

Nous avons ensuite cherché par « essais erreurs » la transformation qui permettrait d'arriver à une distribution normale. La transformation qui consiste à prendre la racine carrée des valeurs initiales de pluie (Figure 33) s'est avérée être celle qui donne les meilleurs

résultats. Les données ainsi transformées peuvent maintenant être assimilées à des variables aléatoires normales.

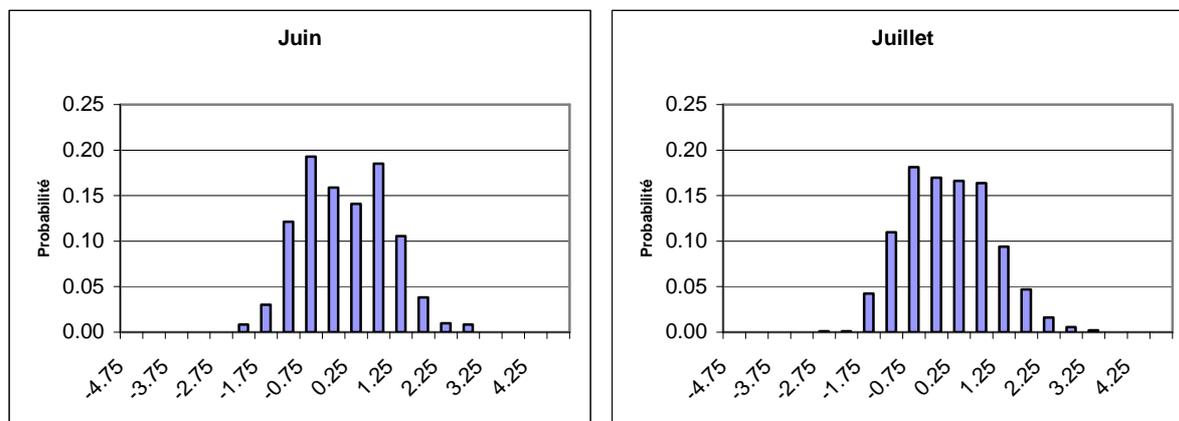


Figure 33 : Distribution des pluies normalisées après transformation par la racine carrée, moyennée sur 6 années (2000 à 2005), pour la troisième décade de juin et la première décade de juillet, pour la zone du Fakara.

4.1.5. Evolution de l'intermittence spatiale sur le réseau pluviométrique

A l'instar de la pluie, nous avons compilé les différents pourcentages de recouvrement du réseau de pluviomètres par décade (Figure 34). Les moyennes ont donc été effectuées sur l'ensemble des six années de mesures. De ce fait, nous obtenons une valeur de probabilité pour chaque décade comprise entre le premier mai et le 31 octobre.

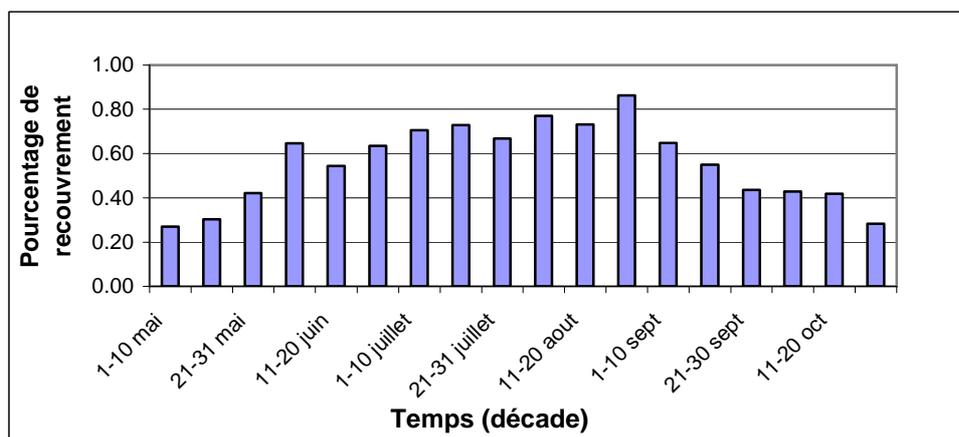


Figure 34 : Evolution décadaire de la probabilité de recouvrement du réseau de pluviomètres du Fakara, moyennée sur 6 ans (2000 à 2005).

Nous constatons que l'évolution de ces probabilités suit une courbe normale tronquée. Il serait donc relativement aisé de modéliser celle-ci afin de l'intégrer dans un modèle de simulation des pluies. Les champs pluvieux recouvrent donc, en moyenne, une surface plus étendue du réseau en juillet et août qu'en mai et octobre.

L'évolution du degré de recouvrement illustre la dynamique des systèmes pluvieux sahéliens. En effet, en début de saison, les champs de pluie sont en général plus disparates et recouvrent des surfaces restreintes. Au cœur de la saison, une fois la mousson installée, les systèmes convectifs sont plus organisés et couvrent des surfaces plus importantes. De ce fait, en juillet et août un événement recouvre en moyenne 70 % du territoire du Fakara.

Cette évolution du degré de recouvrement du réseau, en plus de la hauteur de pluie et du nombre d'événements plus faibles pour les mois de mai et d'octobre, entraîne un cumul pluviométrique plus faible en particulier pour ces deux mois-là.

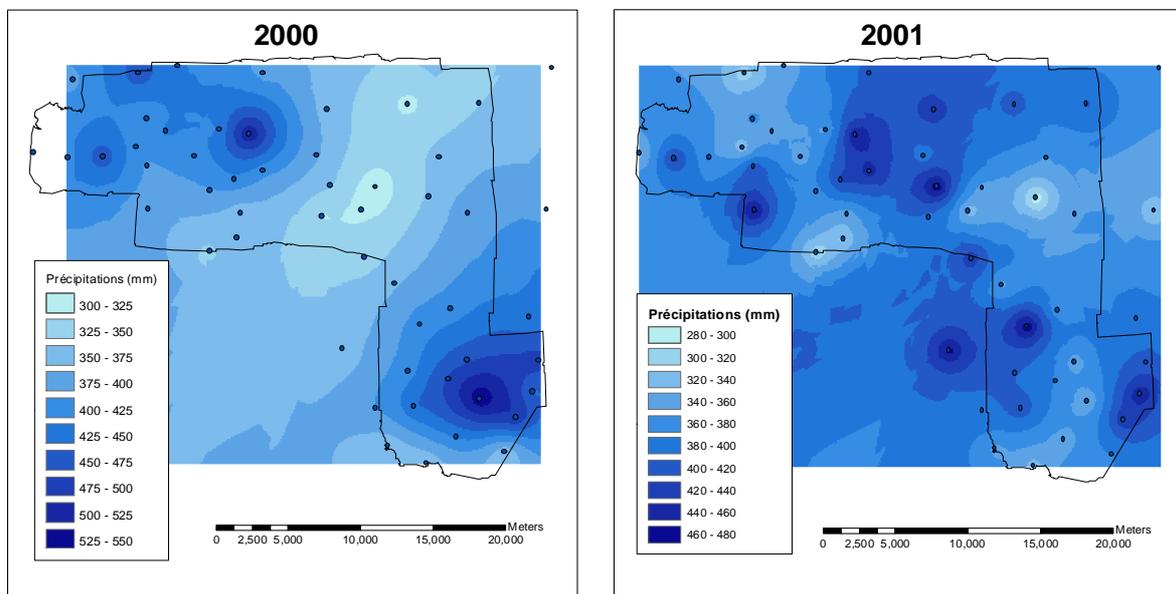
4.2. Analyse de la variabilité spatiale de la pluie

4.2.1. Variabilité spatiale des cumuls pluviométriques saisonniers

Les représentations des cumuls annuels pour les différentes années de mesure (Figure 35) permettent de mettre clairement en évidence les variabilités spatiale et temporelle importantes dans la zone du Fakara.

D'un point de vue spatial, nous pouvons observer la grande variabilité des cumuls annuels sur chacune des cartes. Pour l'année 2000 nous remarquons qu'une zone de cumul de l'ordre de 300 mm est espacée d'environ 5 km d'une zone où le cumul annuel dépasse les 500 mm. Pour certaines années (2000, 2003 et 2004) nous observons un nombre restreint de larges zones plus humides et plus sèches. En 2001 et 2005 par contre, les cumuls annuels sont organisés en zones plus humides et plus sèches restreintes et dont l'organisation est très hétérogène.

D'un point de vue temporel, nous observons que les zones les plus humides ou les plus sèches dans la région du Fakara ne sont pas les mêmes d'une année à l'autre. Il n'y a pas de zones au Fakara où la variabilité de la pluie est plus faible, où les précipitations paraissent plus prévisibles.



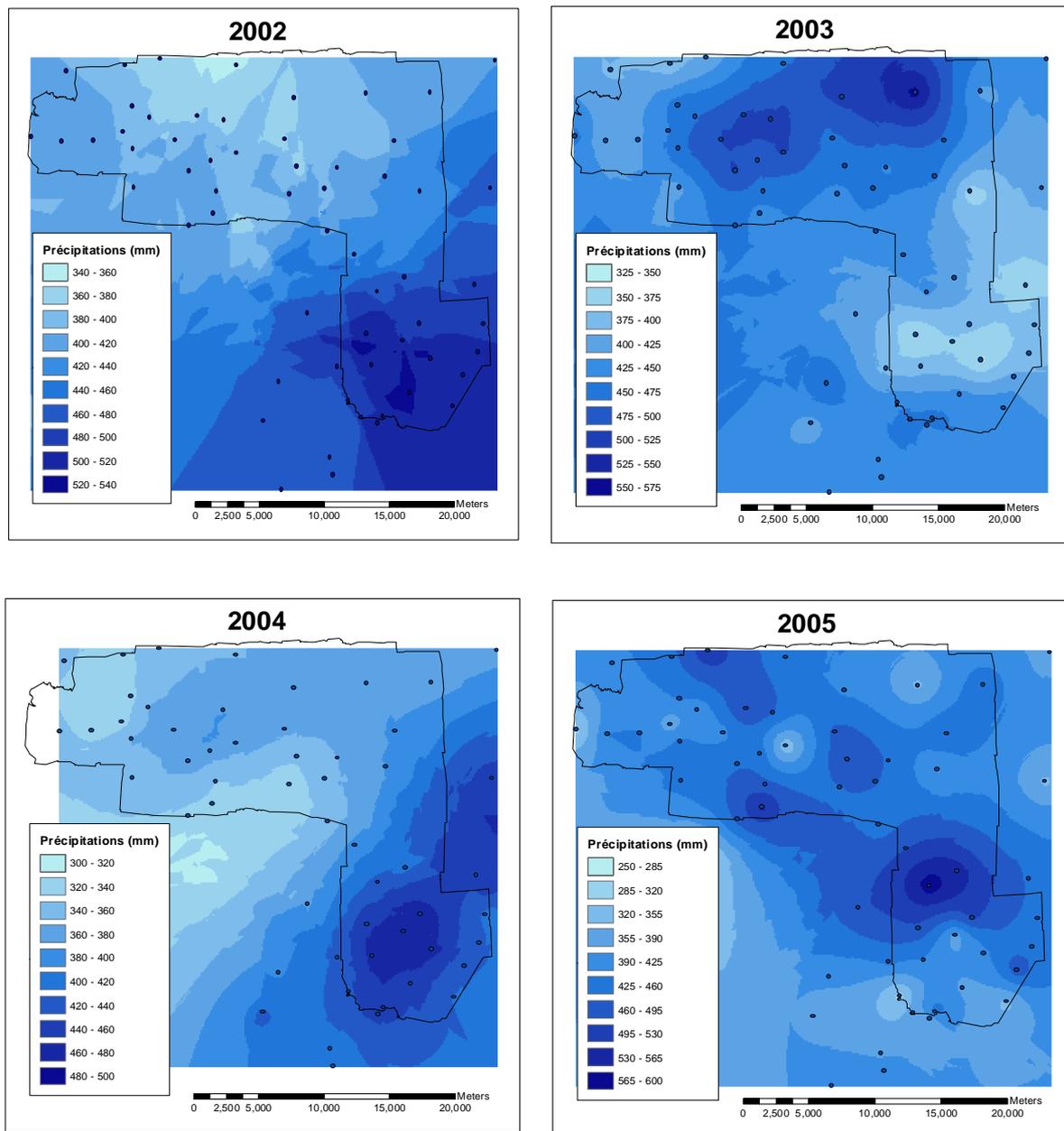


Figure 35 : Cartes de la répartition des cumuls pluviométriques saisonniers pour les années 2000 à 2005 au Fakara.

4.2.2. Analyse de la structure spatiale des hauteurs de pluie

Nous allons analyser successivement les variogrammes des données pluviométriques brutes normalisées et non normalisées et ensuite ceux des données transformées (transformation par racine carrée) normalisées et non normalisées.

Nous avons choisi d'analyser la structure spatiale de la pluie en divisant la saison en quatre parties, sur base temporelle, à savoir : juin, juillet, août et septembre. Ces divisions sont éminemment arbitraires. Il aurait été peut-être plus judicieux de séparer les données en parties correspondant aux différents stades de la saison des pluies. Ces stades ne sont pas

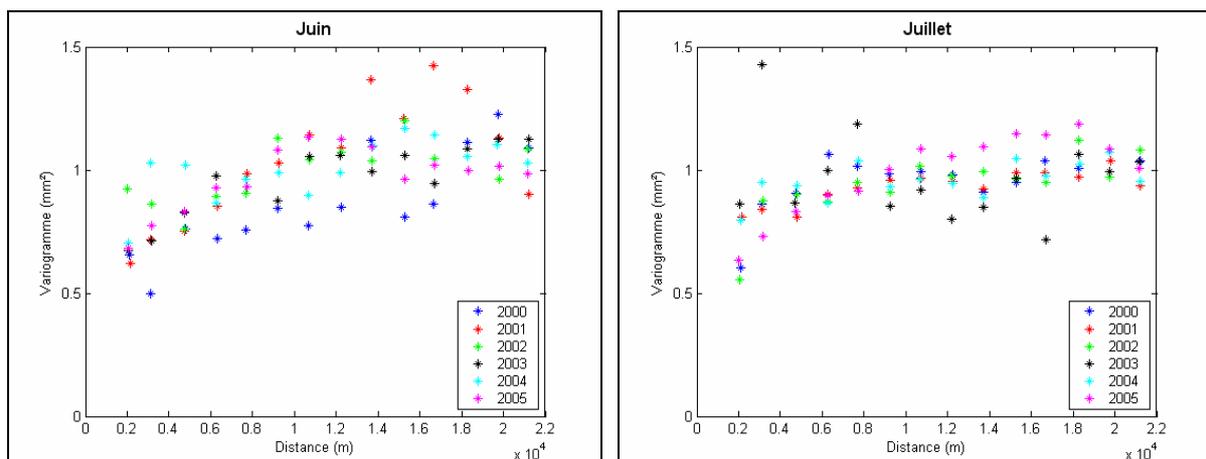
identifiables à partir de nos données. Il aurait fallu être en possession de données satellites qui permettraient de juger de la position du FIT, et donc si le saut de Mousson a eu lieu ou non. De ce fait, la division mensuelle nous a paru la plus adaptée au vu des données disponibles et cela malgré la variabilité interannuelle de la date d'établissement des pluies et de celle du saut de mousson.

Les variogrammes suivants représentent la structure spatiale existante entre les différentes données pluviométriques supérieures à zéro, pour l'échelle événementielle. Les variogrammes pour chaque mois sont donc la moyenne des variogrammes de tous les événements pluvieux qui ont eu lieu au sein de ce mois. Les valeurs nulles n'ont pas été considérées dans cette partie de l'analyse. Nous reviendrons sur la structure spatiale des champs (zones) de pluie à valeur nulle et non nulle dans le point suivant.

4.2.2.1. Variogrammes des données pluviométriques brutes normalisées

Nous allons commencer par les variogrammes des données pluviométriques brutes normalisées. La normalisation des données permet de réduire la variance de toutes les pluies à 1. De ce fait, tous les variogrammes présentent le même palier (de valeur 1) et nous pouvons alors comparer la structure de base de ces variogrammes.

Les différents variogrammes des événements pluvieux, moyennés sur base mensuelle pour les mois de juin, juillet, août et septembre (pour les années 2000 à 2006) sont représentés à la Figure 36. Nous constatons directement que la structure des variogrammes est assez homogène pour chaque mois.



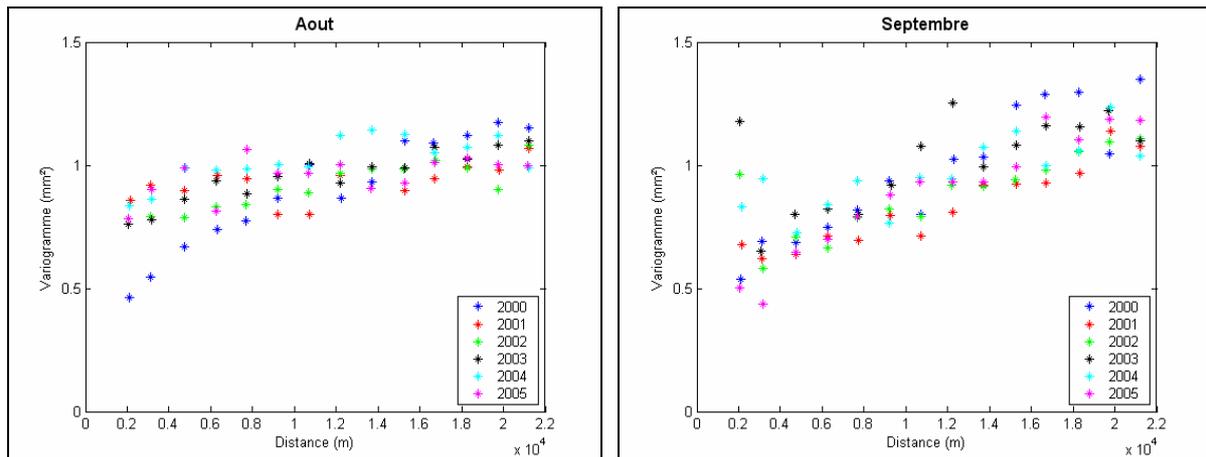


Figure 36 : Variogrammes des événements pluvieux moyennés sur base mensuelle pour les mois de juin, juillet, août et septembre, de 2000 à 2005, sur base des données pluviométriques brutes normalisées du Fakara.

Pour les mois de juin, juillet et août, les variogrammes ne présentent aucune structure lorsqu'ils sont analysés année par année. Les variogrammes peuvent être assimilés à des droites horizontales, ils pourront donc être modélisés par un modèle effet de pépite pur. Quand les distances diminuent, la semi-variance tend à diminuer, mais cette tendance reste très faible. Si des pluviomètres séparés l'un de l'autre de moins de 2 km étaient ajouté au réseau, il serait alors possible de vérifier si la semi-variance diminue pour des distances plus faibles.

Les variogrammes du mois de septembre ont une tendance linéaire croissante. Seules les valeurs de semi-variance relatives à la classe de distances la plus petite, très variables et élevées, s'écartent de cette structure.

La structure spatiale des pluies pouvant être considérée comme homogène sur nos six années, nous avons moyenné les semi-variances, par mois, sur les années 2000 à 2005. La Figure 37 représente ces variogrammes moyens.

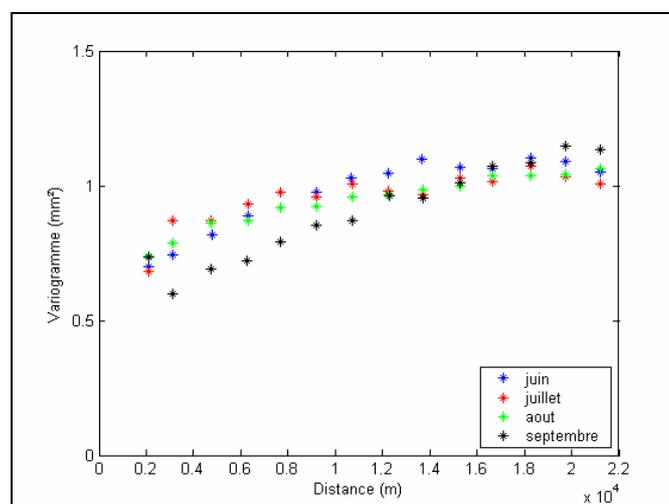


Figure 37 : Variogrammes des événements pluvieux, moyennés par mois et sur six années (2000 à 2005), sur base des données pluviométriques brutes normalisées du Fakara.

La structure des événements pluvieux ne semble pas présenter de différences intra-saisonnières. Les variogrammes sont assez plats ; seules les valeurs de semi-variance pour des distances de moins de 6 km ont tendance à être plus faibles. Seul le variogramme du mois de septembre présente une allure moins plate, elle est plutôt linéaire croissante.

4.2.2.2. Variogrammes des données pluviométriques brutes non normalisées

L'analyse des variogrammes des données non normalisées permet d'identifier les différences concernant la variance des événements pluvieux. Nous pouvons mettre en évidence la variabilité intra- et interannuelle des paramètres des variogrammes (portée et palier). La Figure 38 montre l'évolution des variogrammes événementiels moyennés sur une durée mensuelle pour les mois de juin à septembre et ce, pour les six années de mesures (2000 à 2005).

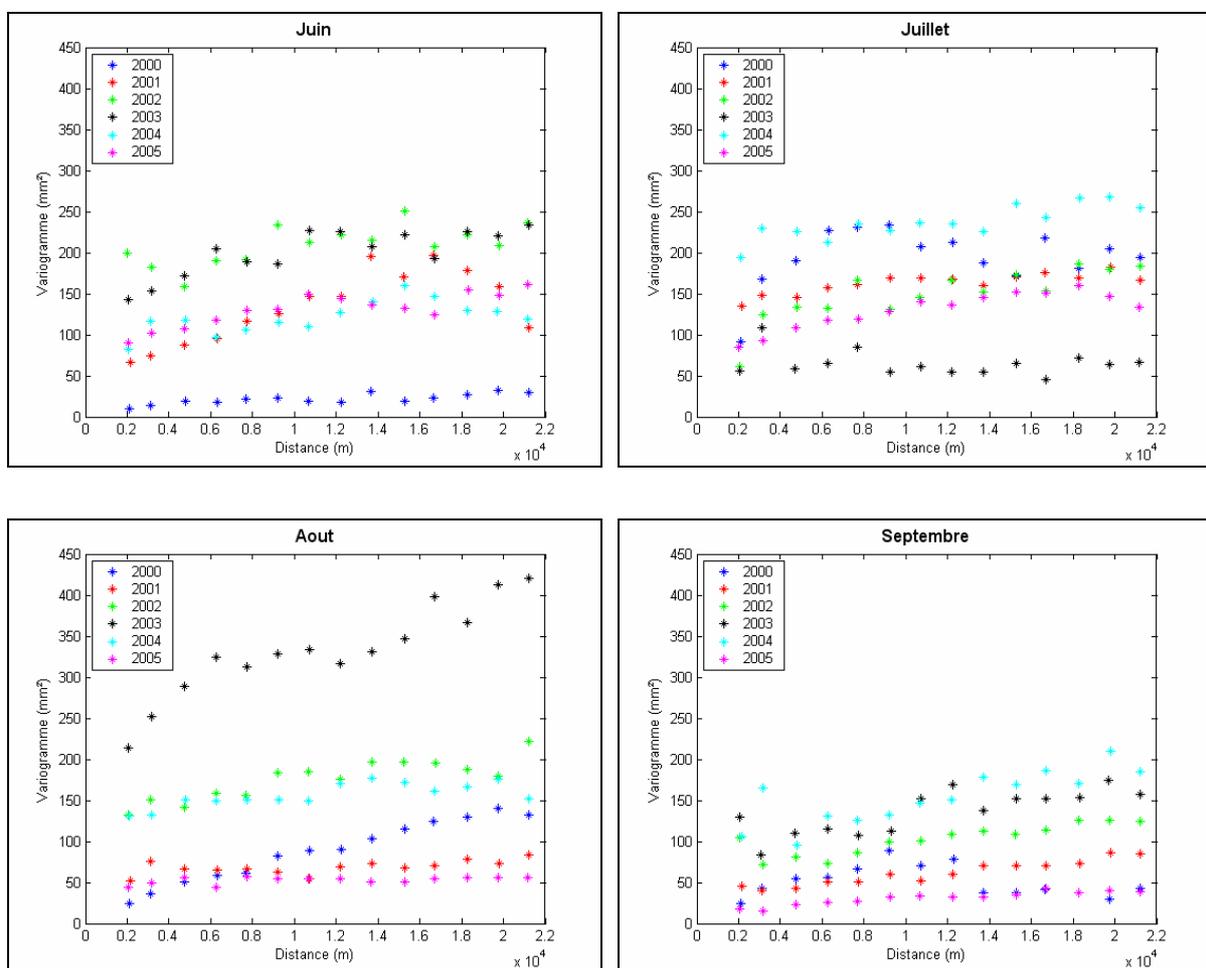


Figure 38 : Variogrammes des événements pluvieux, moyennés sur base mensuelle, pour les mois de juin, juillet, août et septembre, de 2000 à 2005, à partir des données pluviométriques brutes du Fakara.

Sur base de la représentation graphique des variogrammes, nous constatons que les variogrammes présentent, en général, une allure stationnaire ou linéaire croissante. Il existe

une grande variabilité interannuelle de la variance des hauteurs de pluie par événement. Pour le mois de juin, l'année 2000 présente une semi-variance nettement inférieure à celle des autres années. Au mois d'août, ce sont les événements de l'année 2003 qui se distinguent de ceux des autres années par une semi-variance nettement supérieure.

Pour le mois de juin, le variogramme de l'année 2004 (les coefficients de corrélation avec les semi-variances des autres années allant de 0,43 à 0,49 sauf pour la corrélation entre 2004 et 2001 où la valeur est égale à 0,80^{*}) est celui dont l'allure s'éloigne le plus de l'allure des variogrammes des autres années, bien que les valeurs de semi-variances soient dans la moyenne de l'ensemble des 6 années.

Pour le mois de juillet, le variogramme de l'année 2003 ne présente pas de structure particulière. Son allure pourrait être caractérisée par une droite horizontale. Les autres variogrammes présentent une légère tendance linéaire croissante. Sur base des variogrammes des données brutes normalisées (variogramme plat), nous pouvons affirmer que cette tendance ne démontre pas qu'il y ait une structure spatiale des hauteurs de pluie par événement au mois de juillet.

Les événements du mois d'août ont une structure spatiale différente d'une année à l'autre. En 2001 et 2005, aucune structure spatiale n'est visible, le variogramme est représenté par une droite horizontale. Les autres années (2000, 2002, 2003 et 2004), la semi-variance tend à augmenter avec la distance séparant les points de mesure. Cependant, la semi-variance n'augmente significativement que pour les années 2000 et 2003, avec une différence de plus de 100 mm² entre les valeurs des points distants de 2 km et ceux distants de 20 km.

Enfin, en septembre, seule l'année 2000 présente une structure différente des autres. En effet, la semi-variance présente un maximum pour des distances de l'ordre de 10 kilomètres puis diminue et se stabilise. La tendance à la baisse pour des distances supérieures à 10 kilomètres est suspecte. Un phénomène comme la pluie présente normalement des valeurs de variance croissant en fonction de la distance qui séparent deux points de mesure.

Si nous considérons que la structure spatiale des pluies à l'échelle de l'événement est relativement stable malgré une certaine variabilité interannuelle qui est une des caractéristiques intrinsèques du régime pluviométrique sahélien, nous pouvons construire les variogrammes événementiels moyens par mois sur les six années de mesures (Figure 39).

* Voir annexes pour les tableaux de corrélation

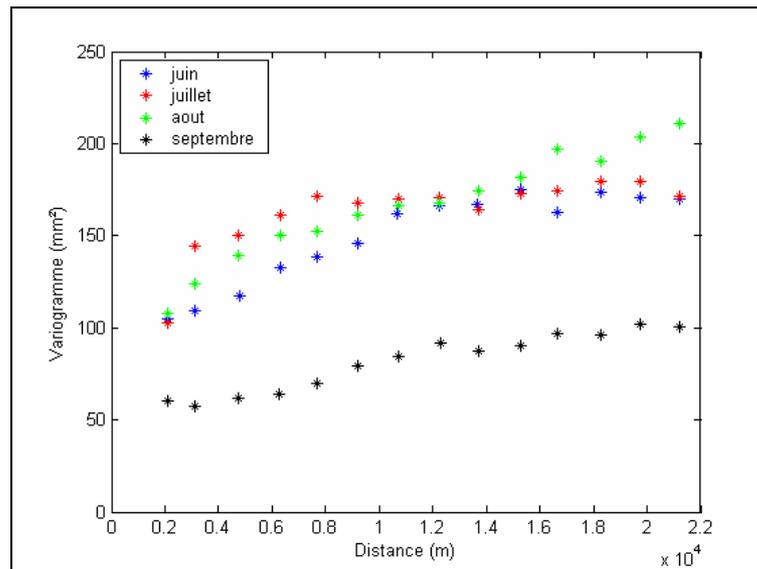


Figure 39 : Variogrammes événementiels moyens pour les années 2000 à 2005, pour les mois de juin, juillet, août et septembre.

En moyennant les variogrammes, nous constatons que ceux-ci présentent une allure linéaire croissante pour les mois d'août et septembre. Ceux des mois de juin et juillet ont une allure qui se rapproche plus d'un modèle exponentiel. Cependant, cette allure ne démontre aucune structure spatiale claire car l'effet de pépité est bien plus important que le reste de la semi-variance expliquée par cette structure. D'autre part, le variogramme climatologique du degré carré de Niamey, construit à partir de distances beaucoup plus importantes (jusqu'à 140 km), présente une structure exponentielle dont la portée est de l'ordre de 45 à 50 km. La tendance linéaire croissante remarquée ici est peut-être le reflet du début d'un variogramme de type exponentiel. Nous pouvons également observer que la semi-variance du mois de septembre est, en moyenne, inférieure à celle des autres mois avec un maximum de 100 pour une distance de l'ordre de 20 km contre une valeur de 175 pour les autres mois à cette même distance.

Si la semi-variance correspondant à une distance nulle est différente de zéro, le modèle du variogramme est caractérisé par un effet de pépité. Ces valeurs peuvent être entraînées par des erreurs de mesure ou une variabilité inhérente au phénomène. Dans le cas de notre système de pluviomètres au Sahel, ces deux caractéristiques sont présentes et l'effet pépité est très visible. Pour les mois de juin, juillet et août, l'effet pépité explique plus de la moitié de la semi-variance (100 sur une semi-variance d'environ 175). En septembre, l'effet pépité explique la moitié de la semi-variance des événements pluvieux (50 sur environ 100).

D'ordre général, les événements pluvieux, même moyennés sur des périodes d'un mois et sur les six années de mesures, ne présentent aucune structure spatiale significative pour une échelle spatiale allant de 2 à 20 km. Il faudrait disposer de données pour des distances plus importantes avant de pouvoir conclure à une absence totale de corrélation entre les hauteurs de pluie au Fakara.

4.2.2.3. Variogrammes des données pluviométriques transformées et normalisées

Dans l'analyse exploratoire des données, nous sommes arrivés à la conclusion que la transformation de données « racine carrée » permettait d'arriver à un jeu de données dont la distribution suivait une loi normale. Les données transformées peuvent donc être considérées comme des variables aléatoires normales. De ce fait, les données peuvent être entièrement caractérisées grâce à la moyenne et à la matrice de corrélation. Si les variogrammes sont utilisés dans le but de prédire et de simuler des données pluviométriques, il est dès lors important d'effectuer la transformation de données pour avoir de meilleurs résultats pour les prédictions et simulations.

La Figure 40 représente les variogrammes des pluies événementielles moyennées par mois, pour les mois de juin, juillet, août et septembre, construits à partir des données transformées et normalisées.

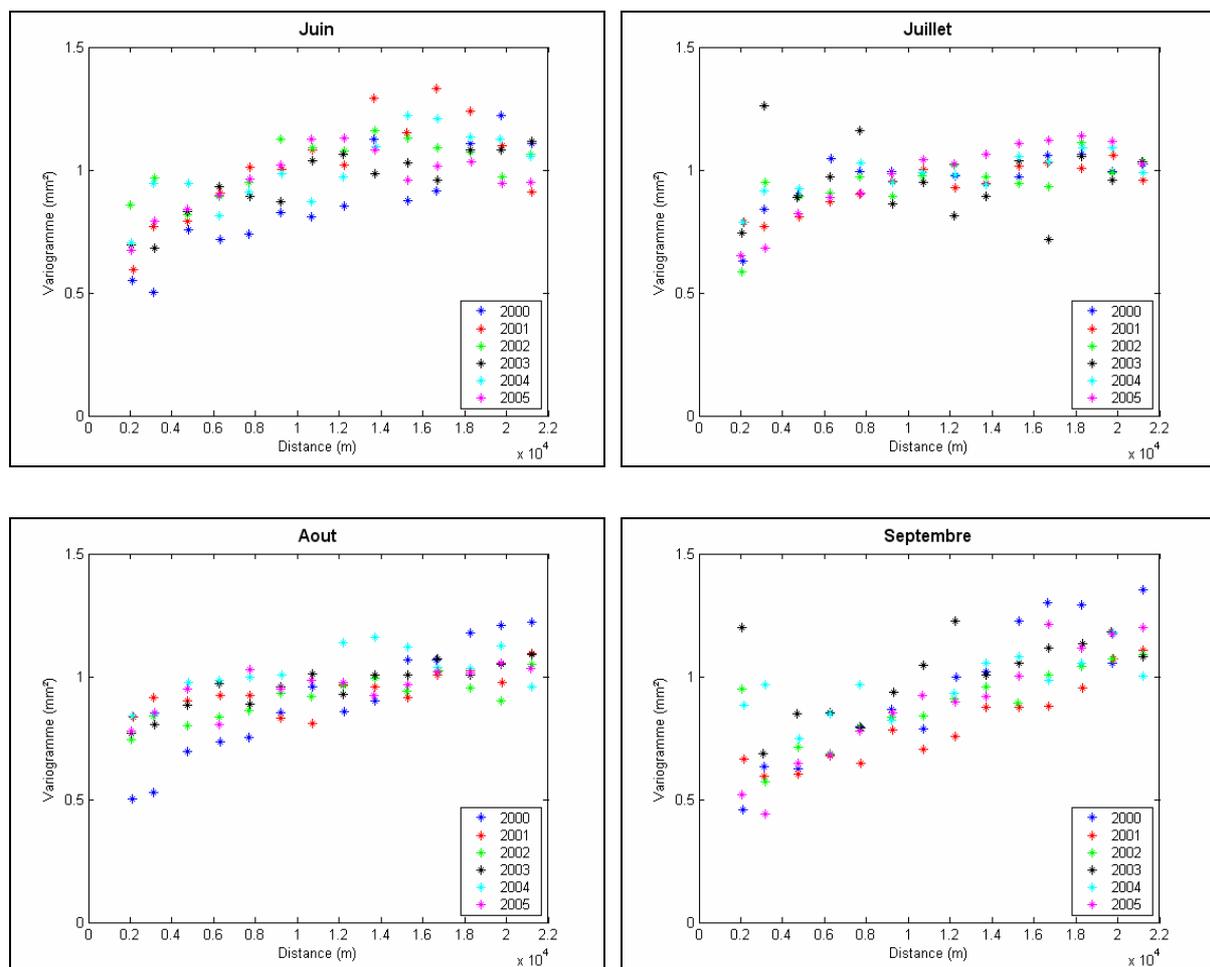


Figure 40 : Variogrammes des événements pluvieux moyennés sur base mensuelle pour les mois de juin, juillet, août et septembre, de 2000 à 2006, sur base des données pluviométriques transformées et normalisées du Fakara.

Nous remarquons que ces variogrammes sont très semblables à ceux issus des données brutes normalisées. Cependant, la tendance croissante est plus claire. Les variogrammes des différentes années sont assez homogènes. L'effet pépite représente toujours la moitié de la semi-variance de la pluie.

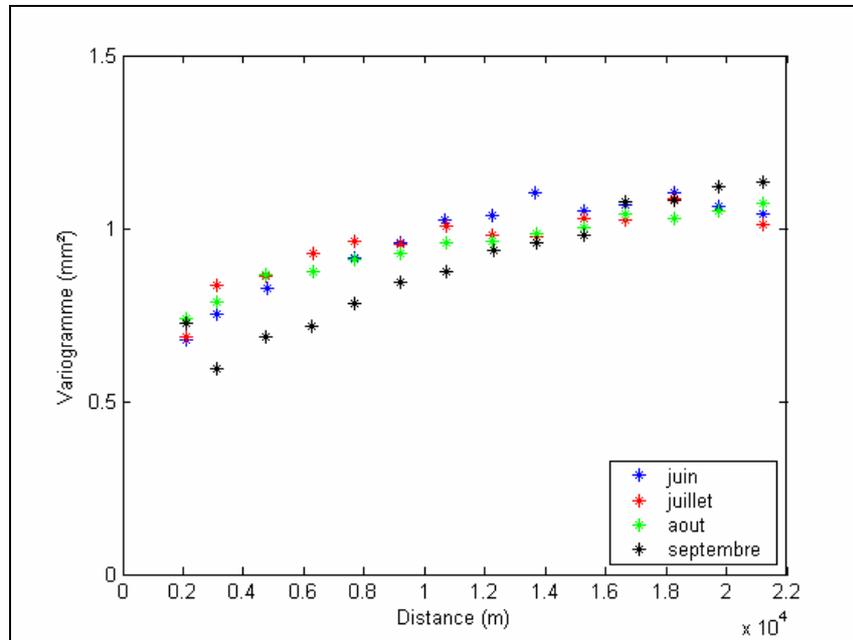


Figure 41 : Variogrammes des événements pluvieux, moyennés par mois et sur six années (2000 à 2005), sur base des données pluviométriques transformées et normalisées du Fakara.

Comme constaté précédemment, les variogrammes des quatre mois présentent la même allure que les variogrammes des données brutes normalisées (Figure 41). Cependant, la croissance du variogramme du mois de septembre est plus importante que celle des autres variogrammes. De plus, l'effet de pépite pour ce mois-là paraît légèrement inférieur.

4.2.2.4. Variogrammes des données pluviométriques transformées non normalisées

Les variogrammes représentés ci-dessous (Figure 42) représentent la structure spatiale des événements pluvieux moyennés par mois et qui ont été construits à partir des données transformées mais non normalisées.

Sur base de ces variogrammes, nous constatons que les tendances restent les mêmes. Le variogramme du mois de juin de l'année 2000 présente aussi une semi-variance plus faible par rapport aux autres variogrammes. De même, les événements pluvieux du mois d'août de l'année 2003 présentent toujours une semi-variance plus élevée que celle des autres années.

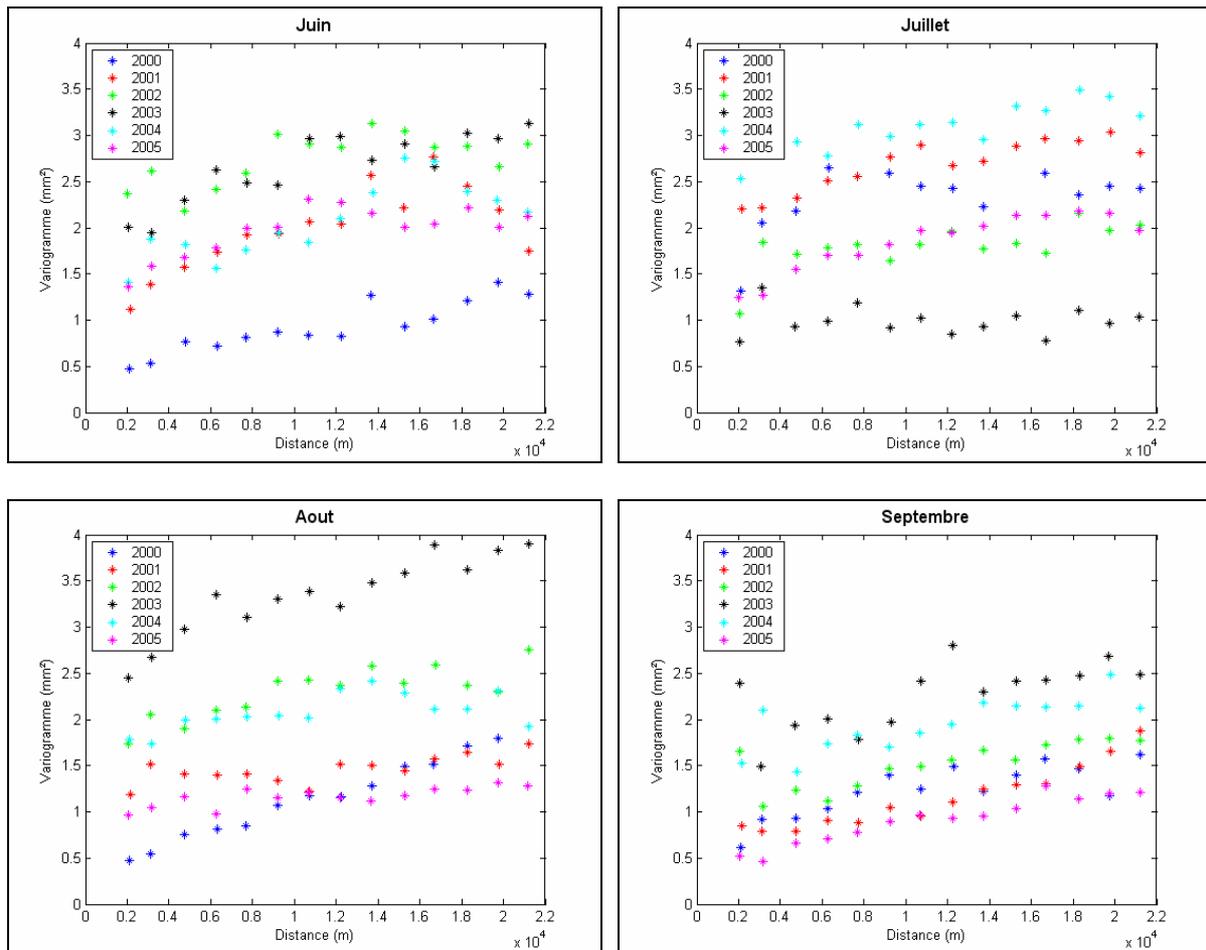


Figure 42 : Variogrammes des événements pluvieux moyennés sur base mensuelle, pour les mois de juin, juillet août et septembre, de 2000 à 2005, à partir des données pluviométriques transformées.

Cependant, il y a une augmentation de la corrélation entre les variogrammes du mois de juin pour les différentes années (un coefficient de corrélation minimal de 0,53 contre 0,37 pour les données brutes). Pour le mois de juillet, seule l'année 2003 se différencie de manière significative pour la structure spatiale des événements pluvieux (corrélation légèrement négative ou positive de manière non significative : de -0,15 à 0,48). Pour le mois d'août, les différences de structure n'ont pas été modifiées par la transformation. Enfin, en ce qui concerne le mois de septembre, la corrélation des points du variogramme de l'année 2004 avec ceux des autres années diminue pour ne devenir significative qu'entre 2004 et 2001, et 2004 et 2005. Celui de l'année 2000 reste toujours peu corrélé bien que sa structure se soit rapprochée de celle de l'année 2001 et 2005.

Les variogrammes moyens sur les six années sont représentés à la Figure 43. Les variogrammes présentent un effet pépite prononcé (une valeur allant de 1 à 1,5) qui explique la plus grande partie de la variance des événements pluvieux. Comme pour les variogrammes des mêmes données mais normalisées, aucune structure spatiale n'est apparente si ce n'est une légère tendance à l'augmentation de la semi-variance en fonction de la distance. C'est encore le mois de septembre qui présente une semi-variance maximale la plus faible.

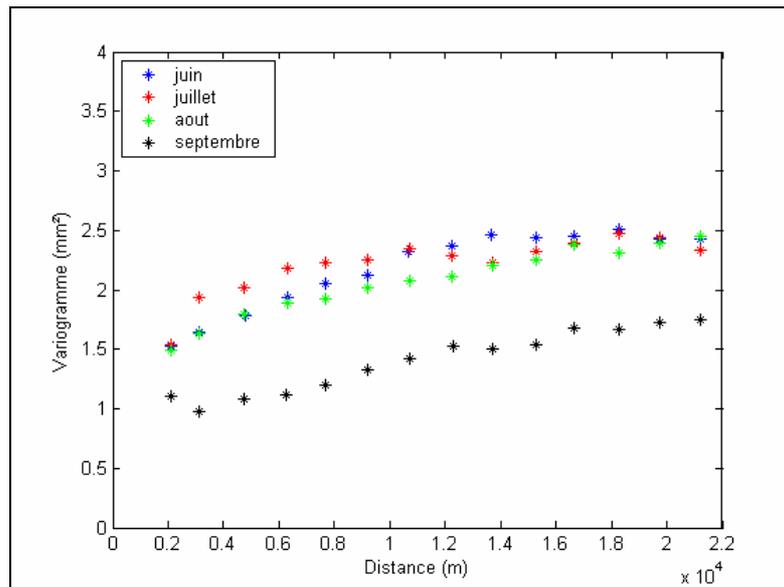


Figure 43 : Variogrammes événementiels moyens pour les années 2000 à 2005, pour les mois de juin, juillet, août et septembre sur base des données transformées.

4.2.3. Analyse de la structure spatiale des champs de pluies

L'analyse de la structure spatiale des champs de pluie permet de mettre en évidence deux grandes caractéristiques des événements pluvieux. D'une part, les semi-variogrammes illustrent la corrélation spatiale existant entre les zones du territoire où il a plu et les zones non arrosées lors de l'événement pluvieux. D'autre part, le palier des variogrammes permet de quantifier la proportion du territoire touchée par l'événement pluvieux (p). En effet, si p est la probabilité qu'il pleuve sur le territoire lors d'un événement, le plateau du variogramme est de valeur égale à $p(1-p)$. Cette caractéristique découle du fait que les variables analysées dans cette partie suivent une loi de Bernouilli.

Les différents semi-variogrammes de la Figure 44 représentent donc la structure spatiale des champs de pluie pour les événements des mois de juin, juillet, août et septembre pour les 6 années de mesures, de 2000 à 2005.

Les variogrammes sont très variables d'une année à l'autre. Nous pouvons tout de même remarquer que les paliers des variogrammes des mois de juin et septembre sont en général plus élevés que ceux des mois de juillet et d'août, ce qui démontre que la proportion du réseau touchée par la pluie au cœur de la saison (juillet et août) est, en général, plus importante qu'en juin et septembre.

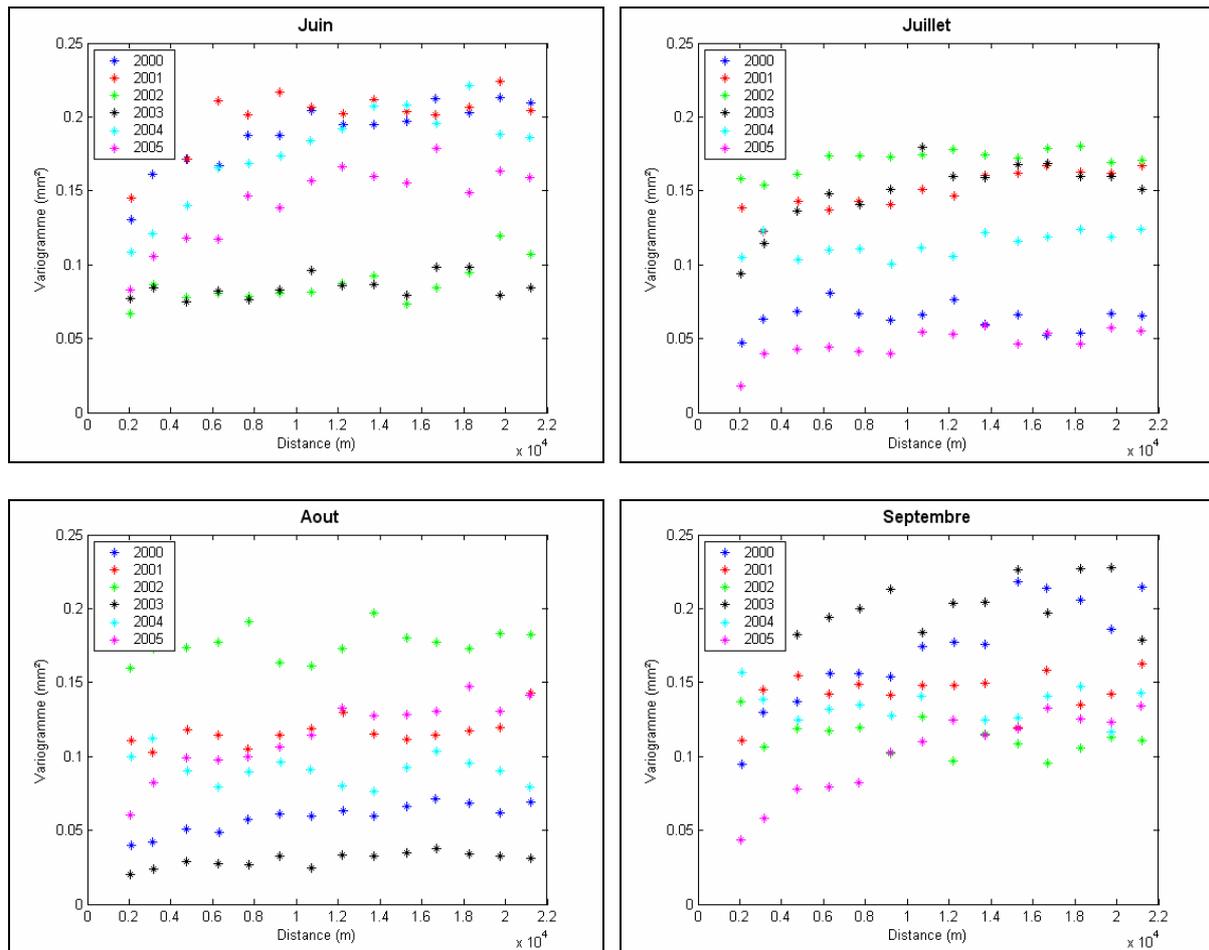


Figure 44 : Variogrammes pluie/pluie nulle pour les événements des mois de juin, juillet, août et septembre, pour les années 2000 à 2005 au Fakara.

En représentant ces différents variogrammes sur des figures reprenant pour chaque année les 4 mois, nous observons alors mieux les tendances mensuelles par rapport à la dynamique annuelle. Les différents variogrammes des mois de juillet et d'août sont, en général, très plats ou alors, présentent une tendance linéaire croissante. En juin, les variogrammes des années 2000, 2004 et 2005, les variogrammes ont une allure qui pourrait être modélisée par un modèle de type exponentiel. En septembre, les variogrammes des années 2000 et 2005 présentent également une allure de type exponentiel. Pour la majorité des années, c'est le mois de juin qui présente le palier le plus élevé (4 années sur 6). Un palier de semi-variance égale à 0,2 représente une probabilité de recouvrement de l'ordre de 70 % ou 30 %.

Les semi-variogrammes de l'année 2000 présentent des semi-variances dont les valeurs suivent exactement l'évolution attendue. Les mois de juin et septembre présentent des paliers de 0,22 (35 % ou 65 % de recouvrement) et ceux des mois de juillet et septembre sont de l'ordre de 0,07 (92 % de recouvrement). Ces valeurs reflètent la dynamique des pluies au Sahel avec des systèmes convectifs plus concentrés en début et fin de saison, et étalés sur des superficies plus importantes au cœur de la saison (juillet et août). Cependant, les

variogrammes des autres années n'ont pas la même hiérarchie. L'année 2002 présente même la tendance inverse. En effet, cette année présente un pourcentage de recouvrement moyen, pour le mois de septembre de l'ordre de 85 %, supérieur à ceux des mois de juillet et d'août.

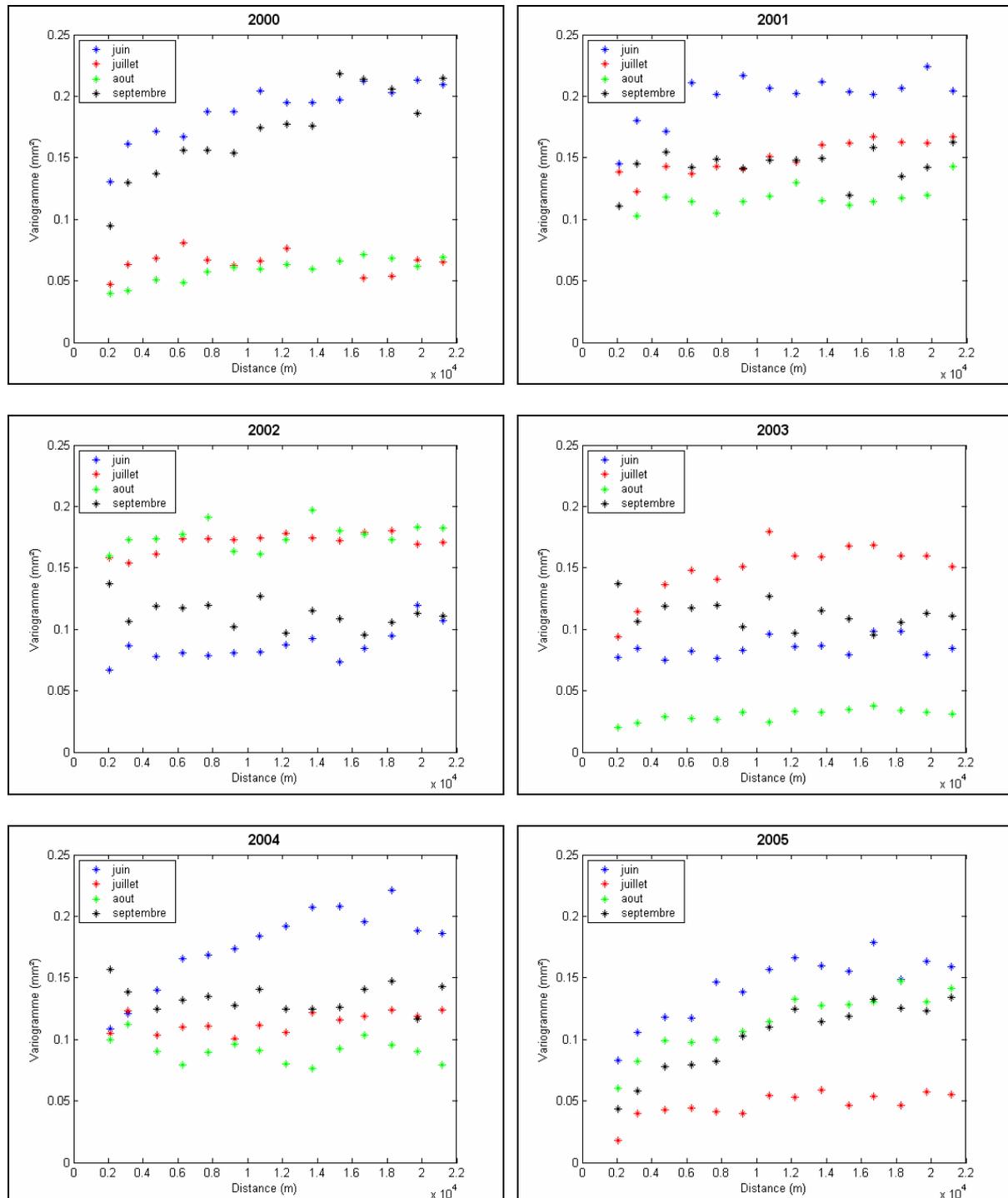


Figure 45 : Variogrammes pluie/pluie nulle pour les événements des mois de juin, juillet, août et septembre, représentés par année, de 2000 à 2005.

La Figure 46 permet de comparer les probabilités de pluie nulle pour les événements de chaque mois. Nous pouvons immédiatement constater que les variogrammes des mois de juin

et septembre ont un plateau plus élevé que ceux des mois de juillet et d'août. La probabilité qu'il pleuve, en moyenne, sur le réseau est donc généralement plus importante pour les mois de juillet et d'août par rapport aux mois de juin et septembre.

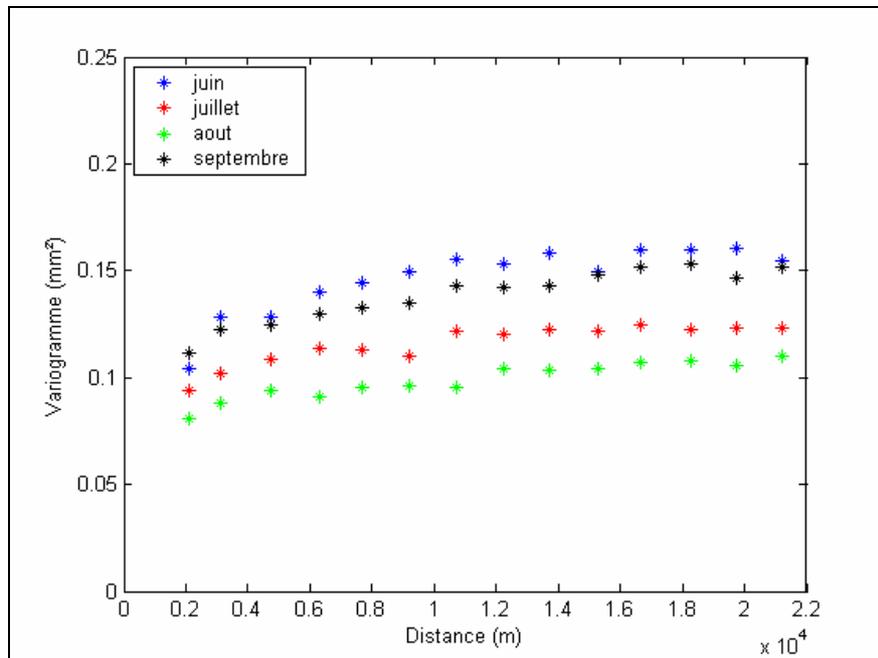


Figure 46 : Variogrammes pluie/pluie nulle moyennés sur les 6 années pour les mois de juin, juillet août et septembre.

4.3. Analyse de la composante temporelle de la structure spatiale de la pluie

Afin de mettre en évidence le lien entre structure spatiale et temporalité, nous avons construit des variogrammes à partir de données pluviométriques cumulées sur différents laps de temps, à savoir : 1 mois, 25 jours, 19 jours, 15 jours, 9 jours, 5 jours et enfin les données journalières (Figure 47). Afin de pouvoir comparer ces différents variogrammes entre eux, nous les avons moyennés sur une durée d'un mois, pour ceux dont le cumul est inférieur à 1 mois.

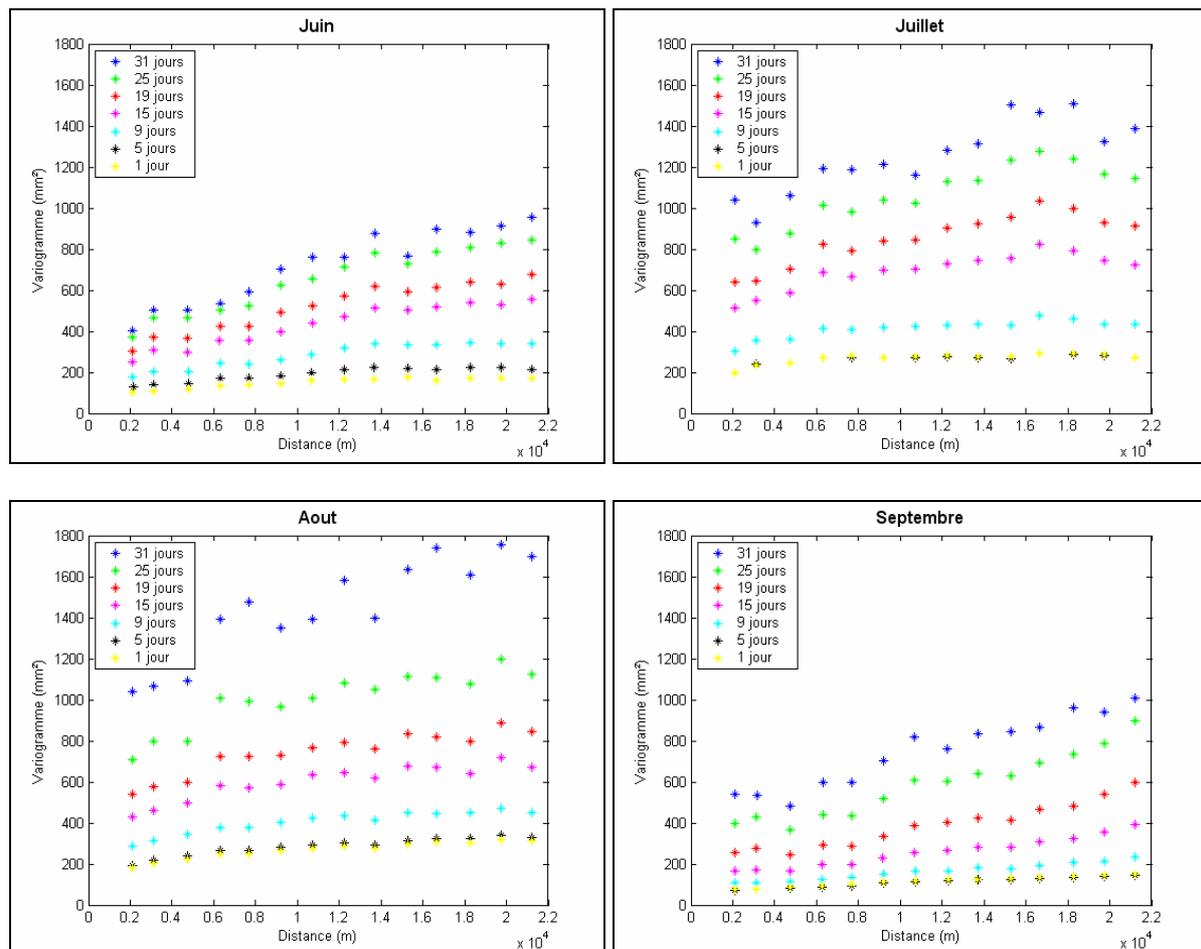


Figure 47 : Variogrammes des pluies cumulées sur 31, 25, 19, 15, 9, 5 jours et des pluies journalières, pour les mois de juin, juillet, août et septembre, pour le Fakara.

La semi-variance de la pluie augmente avec le laps de temps d'agrégation des pluies. En effet, plus le temps de cumul est grand, plus les écarts possibles entre deux valeurs de hauteur de pluie sont grands. Nous constatons que les paliers des différents variogrammes sont de même ordre de grandeur pour les mois de juin et septembre, d'une part, et pour les mois de juillet et d'août d'autre part.

Aucun variogramme ne présente une structure claire. Jusqu'à un cumul de 9 jours, les variogrammes sont même totalement plats, la pluviométrie ne présente donc pas de corrélation spatiale dans cette zone et à cette échelle de temps.

Plus le temps d'agrégation est long, plus la structure semble tendre vers un modèle exponentiel. L'effet pépité explique dans tous les cas plus de la moitié de la semi-variance de la pluie. En d'autres termes, seule une petite partie de la structure spatiale des précipitations sur le territoire du Fakara semble être expliquée par autre chose qu'un simple phénomène aléatoire.

Ainsi, si les pluies sont cumulées sur une durée mensuelle, il existe une certaine corrélation entre les hauteurs de pluie relevées en deux points en fonction de la distance qui sépare ces deux points. Cependant, cette corrélation reste entachée d'une grande marge aléatoire, représentée par la valeur élevée de l'effet de pépité des variogrammes.

Nous pouvons également calculer les variogrammes des pluies cumulées sur toute la saison. La Figure 48 représente les variogrammes de ces cumuls pour les 6 années étudiées. Nous remarquons que la semi-variance des valeurs pluviométriques cumulées sur l'année est très élevée par rapport à la semi-variance mensuelle. Ceci est encore une preuve de la grande variabilité spatiale de la pluie au Niger qui s'illustre aussi au niveau des cumuls saisonniers.

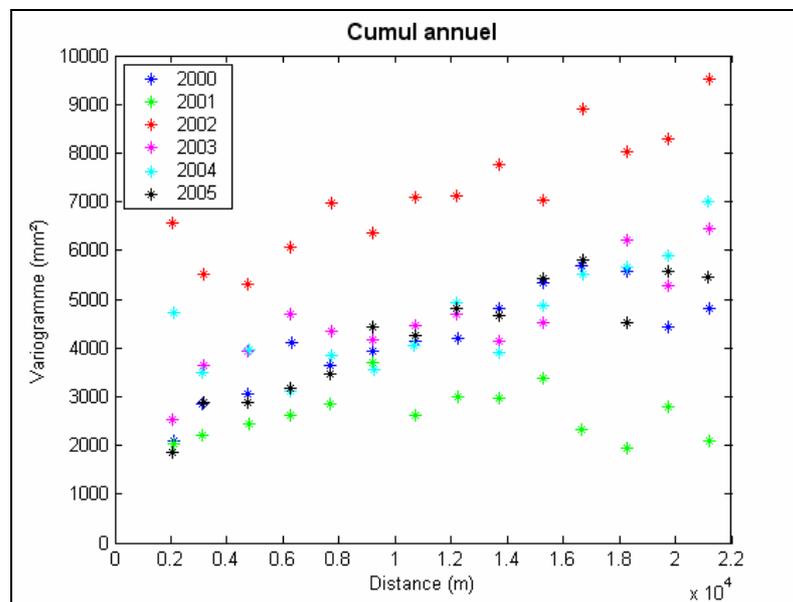


Figure 48 : Variogrammes des cumuls pluviométriques saisonniers sur la zone du Fakara, de 2000 à 2006.

Les cumuls annuels montrent une forte variabilité interannuelle de la semi-variance. En effet, le variogramme de l'année 2002 croît jusqu'à une semi-variance de l'ordre de 9000 mm² pour des distances d'une vingtaine de kilomètre alors que la semi-variance de l'année 2001 culmine à 3000 mm². Cela peut s'expliquer par la distribution spatiale de ces

cumuls (Figure 35). En 2001, les cumuls sont distribués de manière très hétérogène et aucune structure particulière entre ces cumuls n'est apparente. En 2002, par contre, la variabilité entre les cumuls est plus grande et l'organisation spatiale est plus homogène. Il y a donc une plus grande corrélation entre les hauteurs de pluie cumulées sur l'année en 2002 qu'en 2001.

4.4. Discussions

De manière générale, tous les variogrammes ne présentent pas de structure particulière. En effet, s'ils ne sont pas totalement horizontaux, seule une légère tendance linéaire croissante est visible. Les variogrammes ne nous permettent donc pas d'affirmer qu'il y ait une corrélation spatiale entre les hauteurs de pluie ou même entre les champs de pluie à cette échelle spatiale précise, soit entre 2 et 22 km.

Cependant, si nous comparons ces variogrammes au variogramme du réseau Epsat-Niger* (Lebel et le Barbé, 1997), nous constatons que la portée du variogramme climatologique n'est pas encore atteinte à une distance d'une vingtaine de kilomètres. L'absence de structure pour les variogrammes du réseau du Fakara pourrait donc être liée à l'échelle du réseau. En construisant les variogrammes sur des classes de distances plus grandes, grâce à un réseau plus étendu, les variogrammes présenteraient alors, probablement, une structure différente.

Les variogrammes décrivant la structure spatiale des champs de pluie paraissent plus structurés, surtout pour les mois de juin et septembre. Mais en moyennant ces variogrammes sur l'ensemble des années étudiées cette tendance exponentielle n'est pas clairement mise en évidence car l'effet pépète est prépondérant.

* Voir Figure 12

5. Conclusions et perspectives

5.1. Conclusions

Toutes les caractéristiques (dates de début et fin de saison des pluies, cumuls pluviométriques annuels, nombre total ou mensuel d'événements pluvieux et la semi-variance des événements pluvieux) étudiées présentent une forte variabilité inter ou intra-annuelle. Cependant, certaines tendances ont pu être observées. Le nombre mensuel moyen d'événements pluvieux, ou par décade, est faible pour le mois de mai puis augmente pour atteindre son maximum en août et diminue ensuite jusqu'en septembre. Le pourcentage de recouvrement par la pluie du réseau étudié suit la même tendance. La moyenne des hauteurs de pluie par événement suit une évolution semblable, mais la différence entre les mois de juin et septembre par rapport à juillet et août est moins importante et cette moyenne peut donc être considérée comme relativement constante au sein même d'une année. La combinaison de ces différentes caractéristiques mène à une évolution du cumul décadaire de la hauteur de pluie gaussienne plus marquée. C'est pourquoi les mois de mai, juin, septembre et octobre sont plus secs que les mois du cœur de la saison (juillet et août).

Pour des événements pluvieux individuels, la structure spatiale des hauteurs de pluie sahéniennes de la région du Fakara, à une échelle de l'ordre de quelques kilomètres ne présente aucun signe de corrélation si ce n'est une légère tendance linéaire croissante des variogrammes. Dans tous les cas, l'effet pépète est très important et largement prépondérant. De ce fait, lors d'une simulation spatiale de la pluie, sur un réseau de points distants de l'ordre de quelques kilomètres, la pluie peut être considérée comme une variable aléatoire indépendante. Cependant, et ce sur base de la structure convective des champs de pluie, il paraît évident qu'une corrélation spatiale apparaisse à des échelles plus fines (en dessous du kilomètre). Mais, le réseau en place ne nous permet pas d'affirmer cela avec certitude car nous ne disposons d'aucune donnée à cette échelle. Certes, dans ces limites d'échelle spatiale (2 à 22 km), aucune structure n'apparaît, mais la tendance linéaire croissante pourrait être le reflet d'une corrélation spatiale qui serait mise en évidence grâce à des pluviomètres distants de plus de 20 km.

Pour des temps d'agrégation temporelle plus importants (plus de 10 jours), la corrélation spatiale des hauteurs de pluie devient significative. L'effet pépète reste cependant très important pour tous les variogrammes et ce pour toutes les échelles d'agrégation temporelle. Sans plus de données pour des distances inférieures à 1 km, nous ne pouvons pas affirmer qu'il existe une corrélation entre les hauteurs de pluie à ces distances. De manière générale, le phénomène aléatoire est prépondérant sur la véritable corrélation spatiale des hauteurs de pluie.

Tous ces résultats prouvent encore la variabilité spatiale importante de la pluie au Niger. A l'échelle spatiale utilisée (2 à 22 km), il paraît donc difficile de pouvoir construire un modèle de prédiction de précipitations. Ces résultats sont néanmoins moins aléatoires sur des temps d'agrégation temporelle de l'ordre d'un mois ou d'une année.

Les variogrammes représentant la structure spatiale des champs de pluie présentent également peu de corrélation de ces champs à cette échelle spatiale. Cependant, en moyennant les résultats sur la période étudiée, le degré de recouvrement du réseau de pluviomètres est plus élevé pour les mois de juillet et d'août que pour ceux de juin et septembre.

La meilleure manière de gérer les risques liés à la pluviométrie dans l'agriculture est donc d'éparpiller les champs autour du village puisque, la probabilité qu'il pleuve à deux endroits distants de quelques kilomètres est fortement aléatoire et les hauteurs de pluie à ces deux endroits sont totalement indépendantes quand elles sont considérées à l'échelle de l'événement pluvieux. Depuis longtemps déjà, les agriculteurs dispersent leur champ autour du village. Ils ont, en effet, toujours eu conscience des risques liés à la variabilité de la pluie dans leur région.

5.2.Perspectives

Dans ce travail, nous avons découpé la saison des pluies sur base mensuelle, mais d'autres hypothèses peuvent aussi être exploitées afin d'effectuer cette scission de la saison des pluies. En distinguant les stades de la saison des pluies sur base de l'établissement des pluies, de la position du FIT, les résultats seraient peut-être différents, plus homogènes au sein des différents stades. Cependant, il faut être en possession de données qui permettent d'effectuer cette scission.

Les variogrammes manquent encore de précision puisque des zones d'ombre subsistent. Nous n'avons aucune indication pour des distances inférieures à 1,5 km et pas suffisamment pour des distances supérieures à 22 km. En améliorant la couverture du réseau par des mailles plus fines d'une part et une superficie totale plus étendue d'autre part, nous résorberions ces zones d'ombre. Nous pourrions alors vérifier si la tendance linéaire croissante des variogrammes étudiés ici est le reflet, ou non, d'une structure spatiale de la pluie à plus grande échelle.

Ces résultats pourraient également être intégrés dans un modèle de prédiction ou de simulation des pluies. De ce fait, les valeurs prédites ou simulées auraient les mêmes caractéristiques statistiques que les données pluviométriques de la zone du Fakara.

La caractérisation de la pluie effectuée au sein de ce travail se limite essentiellement à l'analyse de la structure spatiale des précipitations. Il faudrait également analyser la variabilité

temporelle de la pluviométrie afin d'arriver à une caractérisation spatio-temporelle plus complète de la pluie.

Une meilleure caractérisation de la variabilité spatiale de la pluie pourrait être effectuée en combinant des données pluviométriques de terrains, comme celles traitées dans ce travail, et des données d'échelles plus larges (images satellites ou radars). En effet, ces données supplémentaires permettraient de mettre en parallèle la structure spatiale des précipitations au sol et la structure des systèmes convectifs en altitude.

6. Bibliographie

- Ali A. (2004), Modélisation de l'invariance d'échelle des champs de pluie sahéliens Application aux algorithmes d'estimation et aux études de variabilité climatique, Thèse, LTHE, 130pp.
- Ali A., Lebel T., Amani A. (2003), Invariance in the spatial structure of sahelian rain fields at climatological scales, *Journal of Hydrometeorology*, Vol 4, 996-1011.
- Allcroft D.J., Glasbey C.A. (2004), A latent Gaussian Markov random field model for spatio-temporal rainfall disaggregation, *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, Vol 52, issue 4.
- Bacchi B. et Kottegoda N. (1995), Identification and calibration of spatial correlation patterns of rainfall, *Journal of Hydrology*, 165, 311-348.
- Balme-Debionne M. (2004), Analyse du régime pluviométrique sahélien dans une perspective hydrologique et agronomique. Etude de l'impact de sa variabilité sur la culture du mil, Thèse, LTHE, 162pp.
- Bogaert P. (2003), Probabilités pour scientifiques et ingénieurs, 1^{ère} édition, 341pp.
- Bogaert P (2005), Notes de cours d'analyse statistique des données spatiales et temporelles.
- D'Amato N., Lebel T. (1997), On the characteristics of the rainfall events in the Sahel with a view to the analysis of climatic variability, *International Journal of Climatology*, Vol 18, 955-974.
- Dai A., Lamb P.J., Trenberth K.E., Hulme M., Jones P.D., Xie P. (2004), Comment: The recent Sahel drought is real, *International Journal of Climatology*, Vol 24, 1323-1331.
- Drapeau L., Statistiques et Interpolations dans les SIG
<http://www.faocopemed.org/>
- FAO: http://www.fao.org/ag/agp/agpc/doc/counprof/frenchtrad/niger_fr/niger_fr.htm
- Goovaerts P. (1999), Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall, *Journal of Hydrology*, Vol 228, 113-129.
- Graef F., Haigis J. (2001), Spatial and temporal rainfall variability in the Sahel and its effects on farmers' management strategies, *Journal of Arid Environments*, Vol 48, 221-231.
- Hiernaux, P., Ayantunde, A. 2004. The Fakara : a semi-arid agro-ecosystem under stress. Report of research activities. First phase (July 2002-June 2004) of the DMPGEF

- Program (GEF/2711-02-4516). ILRI (International Livestock Research Institute), Niamey, Niger, pp .95.
- Kundu P.K. et Bell T.L. (2006), Space-time scaling behavior of rain statistics in a stochastic fractional diffusion model, *Journal of Hydrology*, Vol 322, 49-58.
- Lanza L.G., Ramírez J.A., Todini E. (2001), Stochastic rainfall interpolation and downscaling, *Hydrology and Earth System Sciences* , Vol 5, 169-143.
- Le Barbé L., Lebel T., Tapsoba D. (2002), Rainfall variability in West Africa during the Years 1950-90, *Journal of Climate*, Vol 15, 187-202
- Lebel T., Amani A., Taupin J.D. (1994), La pluie au Sahel : une variable rebelle à la régionalisation, *Xe journées hydrologiques – Orstom*, 353-371
- Lebel T., Delclaux F., Le Barbé L., Polcher J. (2000), From GCM scales to hydrological scales rainfall variability in West Africa, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol 14, 275-295.
- Lebel T., Diedhiou A., Laurent H. (2003), Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales, *Journal of Geophysical Research*, Vol 108, CIP 4 1-11.
- Lebel T., Le Barbé L. (1997), Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel. 1. General rainfall conditions and climatology, *Journal of Hydrology*, Vol ?, 74-96.
- Lebel T., Le Barbé L. (1997), Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel. 2. Point and areal estimation at the event and seasonal scales, *Journal of Hydrology*, Vol ?, 97-122.
- Lubès-Niel H., Séguis L., Sabatier R. (2001), Etude de stationnarité des caractéristiques des événements pluvieux de la station de Niamey sur la période 1956-1998, *Sciences de la Terre et des planètes*, Vol 333, 645-650.
- Mahé G., L'Hôte Y., Olivry J.C., Wolting G. (?), Tendances et discontinuités dans des séries de pluies régionales en Afrique de l'Ouest et Centrale – 1951-1989.
- Direction de la Météorologie Nationale du Niger. 2003. Climatologie et activités socio-professionnelles au Niger.: <http://www.meteo-niger.net/html/climatccI2.htm>
- Moron V. (1996), Trend, decadal and interannual variability in annual rainfall of subequatorial and tropical north Africa (1900-1994), *International journal of climatology*, Vol 17, 785-805.
- Nicholson S. (2005), On the question of the “recovery” of the rains in the West African Sahel, *Journal of Arid Environments* 63, 615-641.

ONU : <http://www.un.org/french/>

Ozer P., Bodart C. et Tychon Bernard (2005), Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental: récentes modifications et impacts environnementaux, *Cybergo: Revue européenne de géographie*, N°308, 24pp

Pereira B. (2002), Approche système pour une simulation prospective des territoires appliqué à la gestion de la fertilité des sols dans la région du Fakara, Niger, Mémoire, UCL, 114pp.

Philippon N. et Fontaine B. (1999), Un nouveau schéma de prévision statistique des précipitations sahéliennes de juillet-septembre (1968-1994), *Science de la terre et des planètes*, 329, 1-6.

Sansó B. et Guenni L. (1999), A stochastic model for tropical rainfall at a single location, *Journal of Hydrology*, Vol 214, 64-73.

Schayes G. (2000), Notes de cours d'agroclimatologie.

Shinoda M., Okatani T., Saloum M. (1998), Diurnal variations of rainfall over Niger in the west African Sahel : A comparison between wet and drought years, *International Journal of Climatology*, Vol 19, 81-94.

Sivakumar, M. V. K., Maidoukia, A., Stern, R. D. 1993. Agroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest: le Niger. Bulletin d'information n°5. ICRISAT, Patancheru, Inde/Direction de la météorologie nationale du Niger, Niamey, Niger, pp.116.

Sultan B. et Janicot S. (2004), La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles saisonnière et intra-saisonnière. I: mise en place de la mousson et variabilité intra-saisonnière de la convection, *Sécheresse* n°4, Vol 15, 1-14.

Taupin J.D. (1997), Caractérisation de la variabilité spatiale des pluies aux échelles inférieures au kilomètre en région semi-aride (région de Niamey, Niger).

Taupin J.D. (2003), Précision de l'estimation des précipitations au Sahel selon la densité du réseau d'observation pluviométrique, *Géosciences de surface*, Vol 335, 215-225.

Taupin J.D., Gaultier G., Favreau G., Ledux C., Marlin C. (2001), Variabilité isotopique des précipitations sahéliennes à différentes échelles de temps à Niamey (Niger) entre 1992 et 1999 : implication climatique, *C.R. Geoscience*, Vol 334, 43-50.

Taylor C. M., Saïd F., Lebel T. (1997), Interactions between the land surface and mesoscale rainfall variability during HAPEX-Sahel, *Monthly Weather Review*, Vol 125, 2211-2227.

7. Annexes