

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque
/ / / / / / / / / / / / / / / /

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INPG

Spécialité : Océan, Atmosphère, Hydrologie

préparée au laboratoire
Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement
UMR 5564 (CNRS – INPG – IRD – UJF)

dans le cadre de l'Ecole Doctorale *Terre, Univers, Environnement*

présentée et soutenue publiquement
par

Maud BALME-DEBIONNE

le 20 décembre 2004

**ANALYSE DU REGIME PLUVIOMETRIQUE SAHELIN
DANS UNE PERSPECTIVE HYDROLOGIQUE ET AGRONOMIQUE.
ETUDE DE L'IMPACT DE SA VARIABILITE SUR LA CULTURE DU MIL.**

Directeur de thèse :

Thierry LEBEL

Co-encadrante :

Sylvie GALLE

JURY

Philippe BOIS
Serge JANICOT
Pierre RIBSTEIN
Thierry LEBEL
Michael DINGKUHN

Professeur Emérite INP-Grenoble, Président
Directeur de recherche à l'IRD, Rapporteur
Professeur à l'Université Paris VI, Rapporteur
Directeur de recherche à l'IRD, Directeur de thèse
Directeur de recherche au CIRAD, Examineur

Une aventure s'achève aujourd'hui. Je garde en mémoire les rencontres faites au fil de ces trois années au LTHE, riches en échanges et en sourires. J'ai une pensée pour chaque membre du personnel.

Je tiens à adresser un immense merci à Thierry Lebel, dont l'efficacité et l'intelligence m'ont beaucoup impressionnée et qui a su accueillir les heures d'enthousiasme scientifique comme les moments de doute avec patience. Je voudrais aussi remercier Sylvie Galle, qui a co-encadré mes travaux ; Serge Janicot et Pierre Ribstein, qui ont accepté de les évaluer. Les journées au laboratoire n'auraient pas été celles qu'elles étaient sans les histoires croustillantes en hydrologie de Philippe Bois, qui a accepté de présider mon jury de soutenance, et de Charles Obled, qui m'a fait découvrir l'Oisans familial sous un autre regard. Enfin, toute la partie agronomique de mon travail n'aurait pas existé sans la disponibilité et la générosité de Christian Baron, la persévérance informatique de Vincent Bonnal et l'expertise de Michael Dingkuhn.

Ces années au laboratoire ont été ponctuées de joies et de rires avec Noémie Varado et Abdou Ali. Les couloirs du LTHE et du laboratoire voisin ont accueilli beaucoup de grandes nouvelles et de questions existentielles partagées avec Aude Royon-Lebeaud. Quant à Samuel Debionne, il est allé jusqu'à travailler au LTHE pour pouvoir surveiller mon travail de près. Mes pensées et mes remerciements vont aussi à tous les comités de soutien – amicaux et familiaux – dont les membres préfèrent rester anonymes.

Aux habitants de Banizoumbou...

Grenoble, le 2 février 2005

ANALYSE DU REGIME PLUVIOMETRIQUE SAHELIEN
DANS UNE PERSPECTIVE HYDROLOGIQUE ET AGRONOMIQUE.
ETUDE DE L'IMPACT DE SA VARIABILITE SUR LA CULTURE DU MIL.

RESUME : Cette étude fait la synthèse des connaissances nouvelles acquises sur le régime pluviométrique sahélien et sa variabilité, à partir de l'analyse combinée de la série des pluies journalières de Niamey (Niger) de 1950 à 2002 et des données à haute résolution de l'observatoire AMMA-CATCH Niger de 1990 à 2002. L'accent est mis sur des échelles peu documentées jusqu'à présent, comme celles de l'événement pluvieux et des intensités des pluies. Dans une deuxième partie, on analyse l'impact de la variabilité pluviométrique sur la culture du mil, qui constitue la ressource alimentaire principale des populations de la région. Cette étude est menée à partir de simulations faites avec le modèle de cultures SARRA-H, qui simule le rendement potentiel sous la contrainte hydrique.

MOTS-CLES : Sahel, variabilité des pluies, échelles hydrologiques et agronomiques, événements pluvieux, intensités des pluies, mise en place de la mousson, rendement en mil.

ABSTRACT: This thesis sums up the new accumulated knowledge concerning the Sahelian rainfall regime and its variability, by using both the daily rainfall data registered in Niamey Airport (Niger) from 1950 to 2002 and a high space-time resolution data set in the area of Niamey, namely the AMMA-CATCH Niger observatory from 1990 to 2002. The study stresses the event scale and the rain intensity scale, which are rarely well-documented. In a second part, we studied the influence of the rainfall variability on millet yields, being one of the major cereal crops for the population of the area. The analysis is carried out with the agronomical model SARRA-H, which models the potential yield under water stress.

KEY WORDS: Sahel, rainfall variability, hydrological and agronomical scales, rain events, rain rates, monsoon onset, millet yield.

INTRODUCTION	9
PARTIE I CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET DONNEES DISPONIBLES	13
PARTIE II LE REGIME PLUVIOMETRIQUE SAHELIEEN : CARACTERISTIQUES MOYENNES ET VARIABILITE	23
1. UN REGIME PLUVIOMETRIQUE DE MOUSSON	25
1.1. LA MISE EN PLACE DE LA MOUSSON AFRICAINE : DES AVANCEES RECENTES	25
1.2. LE CYCLE SAISONNIER DES PLUIES (1970-2000)	26
2. LA VARIABILITE DECENNALE RECENTE	30
2.1. 1970-1989 : UNE PERIODE SECHE PARTICULIEREMENT INTENSE.....	30
2.2. 1990-2002 : UN RETOUR VERS DES CONDITIONS MEILLEURES ?	32
3. LES CARACTERISTIQUES MOYENNES DU REGIME PLUVIOMETRIQUE AUX ECHELLES HYDROLOGIQUES	34
3.1. L'EVENTEMENT PLUVIEUX : UNE ECHELLE PIVOT	34
3.2. DEFINITION « PONCTUELLE » OU « SPATIALE » DE L'EVENTEMENT PLUVIEUX.....	35
3.3. CARACTERISTIQUES MOYENNES GENERALES DES EVENEMENTS PLUVIEUX SAHELIENS.....	37
3.4. MODELISATION DES SERIES PONCTUELLES PAR LA LOI DES FUITES	41
3.5. ANALYSE SPATIALE DES PARAMETRES DE LA LOI DES FUITES	50
3.6. CYCLE SAISONNIER A L'ECHELLE DE L'EVENTEMENT PLUVIEUX.....	54
4. FLUCTUATIONS INTERANNUELLES ET DECENNALES DU REGIME PLUVIOMETRIQUE	61
4.1. VARIABILITE INTERANNUELLE.....	61
4.2. RETOUR SUR LA VARIABILITE DECENNALE.....	66
5. LA VARIABILITE SPATIALE : UNE COMPOSANTE INTRINSEQUE DU REGIME PLUVIOMETRIQUE SAHELIEEN	69
5.1. ZOOM SUR LE GRADIENT PLUVIOMETRIQUE NORD-SUD DU SAHEL	69
5.2. INCIDENCE SUR L'ESTIMATION D'UN INDICE PLUVIOMETRIQUE.....	71
5.3. IMPLICATIONS POUR LE DIMENSIONNEMENT D'UN RESEAU DE MESURES.....	72
5.4. IMPACT SUR LES DISTRIBUTIONS STATISTIQUES DES LAMES D'EAU SPATIALISEES	74
6. LES INTENSITES DE PLUIE	76
6.1. QUELLES DONNEES FAUT-IL UTILISER ?	76
6.2. ANALYSE DES SERIES Δt ELEMENTAIRES.....	76
6.3. ANALYSE DES SERIES REECHANTILLONNEES A $\Delta t = 5$ MINUTES	79
6.4. VARIABILITE SPATIALE ET TEMPORELLE	80
7. SYNTHESE DE L'ANALYSE DU REGIME PLUVIOMETRIQUE SAHELIEEN.....	84
7.1. MODIFICATION DU REGIME PLUVIOMETRIQUE A PARTIR DE 1970.....	84

7.2.	APPORTS DES DONNEES A HAUTE RESOLUTION	86
7.3.	ENSEIGNEMENTS PLUS GENERAUX A TIRER DES DONNEES AMMA-CATCH NIGER	88
PARTIE III IMPACT DE LA VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE SUR LA CULTURE DU MIL.....		91
1.	FACTEURS CLIMATIQUES IMPORTANTS POUR LA CULTURE DE MIL	95
1.1.	DEMARRAGE DE LA SAISON DES PLUIES	95
1.2.	PHASES SECHES AU COURS DE LA SAISON DES PLUIES	113
2.	SIMULATION DU RENDEMENT AVEC LE MODELE AGRONOMIQUE SARRA-H.....	124
2.1.	LE MODELE AGRONOMIQUE SARRA-H	124
2.2.	SIMULATIONS DE TRENTE PARCELLES DE MIL	126
2.3.	SEMIS A UNE DATE OPTIMALE SUR CHAQUE PARCELLE.....	127
2.4.	SENSIBILITE DU RENDEMENT SIMULE A LA DATE DE SEMIS	135
2.5.	IMPACT DES PHASES SECHES SUR LE RENDEMENT SIMULE : LE CAS DE 1997	142
3.	SYNTHESE DE L'IMPACT DE LA VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE SUR LA CULTURE DU MIL ET PERSPECTIVES	146
3.1.	ANALYSE CLIMATIQUE AVEC LES DONNEES PLUVIOGRAPHIQUES.....	146
3.2.	ANALYSE DES RENDEMENTS SIMULES AVEC LE MODELE DE CULTURES.....	147
3.3.	PERSPECTIVES DE L'ANALYSE AGRONOMIQUE	149
SYNTHESE GENERALE ET PERSPECTIVES		151
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		155

Introduction

L'épisode de sécheresse qui a touché l'Afrique de l'Ouest dans sa globalité depuis le début des années 1970 et jusqu'au milieu des années 1990 a conduit la communauté scientifique à s'interroger sur les mécanismes responsables de cet événement (Janicot et Fontaine, 1993). Il s'avère que cet épisode est seulement une marque de la variabilité du climat de l'Afrique de l'Ouest, dont les échelles temporelles vont de l'intrasaisonnier au décennal. Etant donné les impacts importants de cette variabilité sur les ressources en eau et l'agriculture, il est fondamental de mieux comprendre les mécanismes physiques de celle-ci de manière à améliorer la prévision saisonnière. Ceci est rendu difficile par la complexité des interactions entre l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère qui semblent contrôler la dynamique de la mousson ouest-africaine et le cycle de vie des systèmes pluviométriques (Livre Blanc sur la Mousson d'Afrique de l'Ouest, 2002). Motivé par l'ensemble de cette problématique, le projet de recherche AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) combine observations et modélisation dans le but :

- D'améliorer la compréhension de la mousson ouest-africaine et de son influence sur l'environnement physique, chimique et de la biosphère aux échelles régionale et globale,
- Et de produire les connaissances qui permettront de relier la variabilité du climat aux problèmes de santé, de ressources en eau et de sécurité alimentaire pour les nations d'Afrique de l'Ouest et définir les stratégies de surveillance appropriées.

Dans ce contexte multidisciplinaire, les travaux présentés ici visent :

- A actualiser les acquis concernant le régime pluviométrique sahélien,
- Et à identifier l'impact de la variabilité pluviométrique sur la culture du mil.

Le premier objectif résulte de deux interrogations : d'une part, savoir si l'épisode de sécheresse à partir de 1970 a entraîné une modification pérenne du régime pluviométrique, et d'autre part, si les travaux récents sur la mise en place de la mousson ouest-africaine et l'investigation à de fines échelles

spatio-temporelles permettent une description plus pertinente du régime pluviométrique. L'étude du régime pluviométrique est menée en combinant deux séries d'observations complémentaires : la série pluviométrique de Niamey Aéroport (Niger) de 1950 à 2002, une série longue mais unique dans la zone de Niamey, et les séries recueillies sur l'observatoire de recherche AMMA-CATCH Niger (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine, Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique), de 1990 à 2002, courtes mais de haute résolution spatio-temporelle.

Décrire le régime pluviométrique à de fines échelles spatio-temporelles soulève naturellement la question de l'impact de la variabilité pluviométrique sur les activités humaines, principalement celles liées à l'hydrologie et l'agronomie. Parmi ces deux thématiques, nous avons opté pour l'agronomie et choisi d'étudier l'impact des fluctuations pluviométriques sur la culture du mil. Au Sahel, la sécurité alimentaire d'une majorité de la population dépend de la culture de céréales vivrières comme le mil (FAO et ICRISAT, 1997). L'accroissement démographique des 50 dernières années, combiné à une augmentation de la proportion des surfaces cultivées et à une diminution de la période de jachère, a entraîné une saturation de l'espace exploitable, dans un environnement agroclimatique déjà peu fertile. Une des priorités des institutions de recherche en Afrique de l'Ouest est d'assurer un certain degré de stabilité des rendements des récoltes aux agriculteurs (Sivakumar, 1988). Dans cette optique, il est nécessaire de mieux comprendre les interactions entre la variabilité des pluies et celle des rendements en mil, ce que nous essayons en combinant les observations AMMA-CATCH Niger à des simulations de rendements en mil réalisés avec le modèle de cultures SARRA-H (Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques).

Ce mémoire s'articule autour de trois parties :

- i) La première partie retrace le contexte géographique de l'étude, insistant sur les multiples définitions du Sahel et rappelant les grands traits du climat de cette région. On expose les motivations qui nous invitent à actualiser et revisiter le régime pluviométrique sahélien et on décrit les données de pluie utilisées par la suite : la série pluviométrique de Niamey Aéroport de 1950 à 2002 et les séries recueillies sur l'observatoire AMMA-CATCH Niger.
- ii) La seconde partie s'attache à définir finement le régime pluviométrique sahélien, qui est associé à la mousson ouest-africaine (chapitre 1). Cette description s'inscrit dans un contexte de forte variabilité décennale, évoqué dans le chapitre 2, le Sahel ayant connu depuis 1950 un cycle de vingt années humides suivi d'un cycle de vingt années sèches. Les conditions pluviométriques au Sahel depuis 1990, sujettes à de nombreuses discussions au sein de la communauté scientifique, sont examinées tout au long de cette seconde partie. La description du régime pluviométrique s'appuie sur deux facettes de celui-ci : ses caractéristiques moyennes et sa variabilité, analysées aux échelles de l'événement pluvieux et des intensités de pluies, accessibles grâce aux données AMMA-CATCH Niger. L'événement pluvieux, qui fait l'objet

du chapitre 3, est un élément essentiel pour la compréhension des mécanismes qui régissent le régime pluviométrique sahélien, mais difficile à saisir, que ce soit à partir des données haute résolution (séries ponctuelles ou spatialisées) ou de la modélisation quand ces dernières ne sont pas disponibles. La combinaison des observations AMMA-CATCH Niger et de la série de Niamey Aéroport de 1950-2002 nous permet d'examiner la variabilité temporelle (chapitre 4) du régime de manière pertinente. Le comportement moyen d'une année ou d'une période sèche est décrit en terme de cycle saisonnier des pluies, de caractéristiques des événements pluvieux et d'intensités des pluies. De même pour la variabilité spatiale, examinée dans le chapitre 5, les analyses faites avec les observations AMMA-CATCH Niger soulèvent la subjectivité de la définition d'une année « sèche » suivant qu'elle est faite localement ou à l'échelle de la région, ceci ayant évidemment des conséquences considérables sur les diagnostics hydrologiques ou agronomiques. Les intensités de pluie, caractéristique également importante d'un régime pluviométrique, sont traitées de manière indépendante dans le chapitre 6.

- iii) La dernière partie est consacrée à l'étude de l'impact de la variabilité pluviométrique sur la culture du mil. Le chapitre 1 s'applique à décrire les facteurs climatiques qui semblent importants pour la culture du mil, à savoir le démarrage de la saison des pluies et l'occurrence de phases sèches au cours de la saison, en se basant sur les données AMMA-CATCH Niger. Ces considérations restent d'un intérêt agronomique limité puisque les interactions entre le sol, l'atmosphère et la plante ne sont pas prises en compte, d'où le recours à la modélisation dans le chapitre 2 pour examiner les réponses en terme de rendement simulé aux chroniques des pluies des trente stations AMMA-CATCH Niger en fonction de la date de semis du mil.

Partie I

**Contexte géographique et
données disponibles**

Le Sahel, un rivage difficile à délimiter

Le mot « Sahel », d'origine arabe, signifie « rivage » : un rivage où le climat et l'environnement rendent à nouveau la vie possible après le franchissement des milliers de kilomètres de désert saharien s'étendant au sud des pays du Maghreb. Ce terme évoque bien le caractère mouvant du Sahel et la difficulté à le circonscrire.

Pour Leisinger et Schmitt (1996), le climat, l'agriculture et le mode de vie sont relativement unitaires d'un pays sahélien à l'autre. Ils optent pour une définition de type climatique, affirmant qu'en général la délimitation du Sahel n'est pas examinée sous des aspects politiques ou géographiques, mais en fonction de la quantité de précipitations annuelles. Dans le nord, à la frontière séparant le Sahel du Sahara, les précipitations sont de l'ordre de 200 à 300 mm par an, alors que dans le sud, leur cumul atteint 600 à 700 mm à la frontière de la zone soudanaise ; la saison des pluies durant trois à cinq mois suivant la latitude considérée.

Pour les écologues, le Sahel comprend trois zones distinctes (GEPIS, Groupe d'Experts des Plaines d'Inondation Sahéliennes, 2000) :

- i) une zone sahélo-saharienne, limite nord des cultures, plutôt vouée à l'élevage transhumant de saison des pluies ;
- ii) une zone sahélienne vraie, caractérisée par une végétation steppique (c'est aussi la zone de la brousse tigrée), la culture du petit mil (*Pennisetum*) sur sable et l'élevage sédentaire ;
- iii) une zone soudano-sahélienne, caractérisée par une végétation de savane à grande herbe pérenne, plus ou moins arborée, la culture du sorgho sur sols limoneux ; zone d'élevage sédentaire mais aussi lieu de transhumance des troupeaux du nord.

Quant à Retaillé (1997), s'interrogeant sur la notion d'espace légitime, il refuse ce type de définitions et avance qu'il faut définir le Sahel autrement que par une délimitation pluviométrique ou par la confrontation nomades et sédentaires (deux stéréotypes). Il mentionne que, par les pratiques locales, le Sahel apparaît plus comme un ensemble de réseaux que comme une zone, ce qui est essentiel pour des projets efficaces de développement.

La disparité des définitions citées ci-dessus, suivant la sensibilité disciplinaire des auteurs, montre que la délimitation du Sahel n'a rien d'anodine. Même au sein d'une même communauté – les climatologues, par exemple – les descriptions divergent. Nicholson et Palao (1993) montrent que le Sahel dans son ensemble ne peut pas être considéré comme homogène au regard de la variabilité des pluies. Ils délimitent trois zones homogènes en Afrique de l'Ouest : Sahel central, Côte Ouest et Côte guinéenne. Nicholson (1994) suggère de définir le Sahel central comme la région bornée entre les longitudes 15° ouest et 20° est et les latitudes 13° nord et 20° nord. Les travaux de Janicot (1992a) recoupent en partie ceux de Nicholson et Palao (1993) en identifiant trois grands sous-ensembles pluviométriques en Afrique de l'Ouest : une bande au sud et deux sous-ensembles au nord, mais les limites proposées sont différentes, avec notamment une séparation entre le sud et le nord localisée à 10°N. Les travaux subséquents de Le Barbé et al. (2002) et Lebel et al. (2003) confirment l'existence

d'une zone de transition vers 10°N, correspondant approximativement au sud de la région concernée par le saut de mousson, une notion essentielle pour comprendre la dynamique du climat en Afrique de l'Ouest sur laquelle nous reviendrons plus loin.

Entre une définition basée sur les isohyètes interannuelles et une définition basée sur des considérations dynamiques, il existe nécessairement des différences, ne serait-ce que parce que les isohyètes se sont déplacées vers le sud lors de la sécheresse 1970-1990. Ainsi la latitude 13°N mentionnée par Nicholson (1994) correspond à une pluviométrie de 700 mm durant la période 1950-1970 et à une pluviométrie de 520 mm durant la période 1970-1990. Pendant cette même période, l'isohyète 700 mm était située entre 11 et 12°N.

Dans leur monographie sur le fleuve Niger, Brunet-Moret et al. (1986) introduisent, en plus des critères quantitatifs pluviométriques, des considérations plus qualitatives sur l'hydrologie et la végétation pour définir le domaine sahélien (Figure 1). Le passage du régime « tropical » au régime sahélien est indiqué par les critères suivants : pluviométrie annuelle moyenne de 700 à 800 mm, disparition des karités et apparition des épineux, disparition des marigots à écoulement permanent, apparition de vastes zones inondables, tendance à l'endoréisme. La transition entre le régime sahélien et le régime subdésertique survient quand les écoulements superficiels deviennent presque exceptionnels et que les crues se font rares. On remarque que d'après la Figure 1, le régime sahélien des hydrologues correspond dans la classification des climatologues de l'époque à l'ensemble des deux variantes de climat : soudanien nord (700-800 mm à 400-500 mm de pluie) et sahélien sud (400-500 mm à 200-300 mm).

Ces éléments illustrent la difficulté à laquelle est confrontée la communauté scientifique lorsqu'elle cherche à caractériser un signal climatique régional « sahélien », les analyses dépendant de l'échantillon de données choisi. Néanmoins, quel que soit le domaine privilégié, ces signaux d'ampleur régionale cachent de grandes disparités. Le travail présenté ici s'attache à montrer qu'il est essentiel, pour mieux appréhender les mécanismes de la pluviométrie sahélienne, de travailler à des échelles spatio-temporelles fines, pertinentes pour les applications locales, qu'elles soient hydrologiques ou agronomiques.

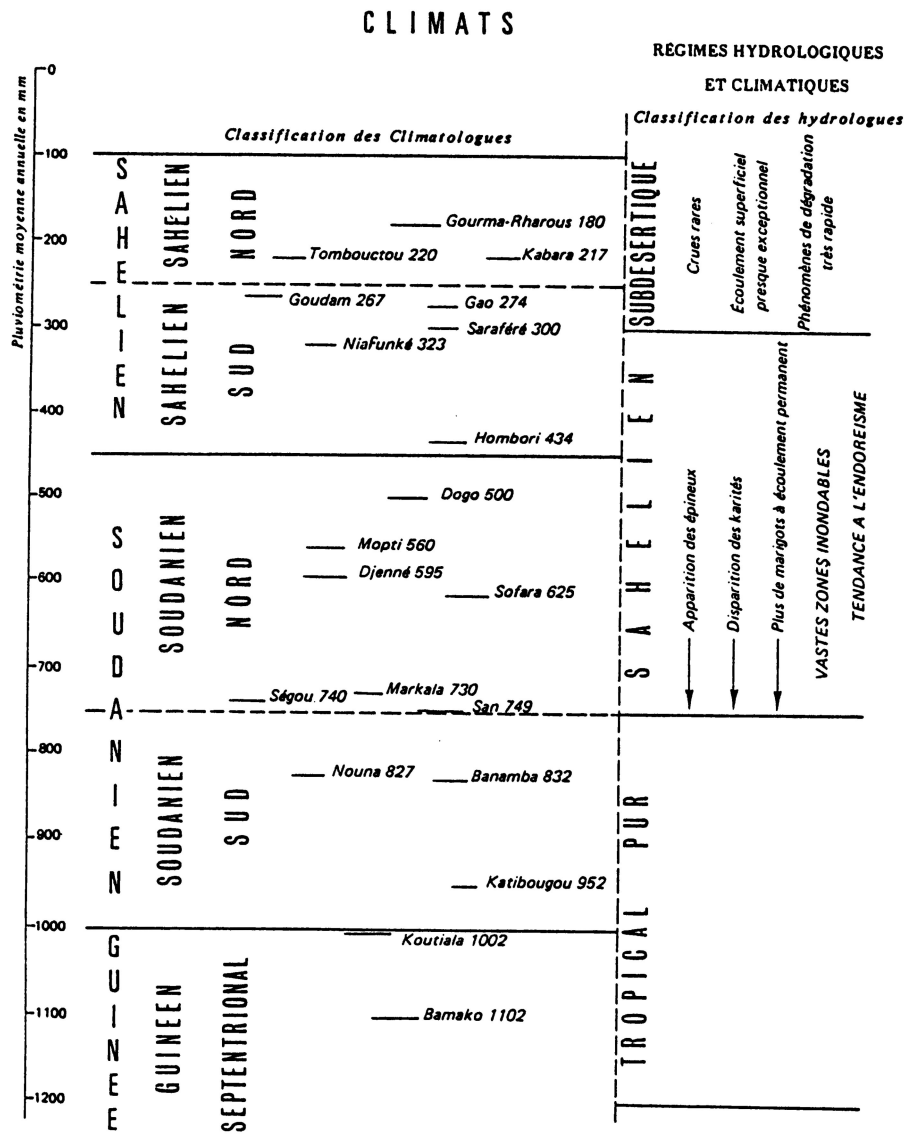


Figure 1 – Classification des climats suivant les climatologues et les hydrologues (Brunet-Moret et al., 1986)

Caractéristiques générales du climat sahélien

Le régime sahélien est caractérisé par une saison sèche en hiver et une unique saison des pluies en été. Le passage d'une saison à l'autre est régi par le déplacement de la zone de convergence intertropicale (ZCIT), zone de contact entre deux masses d'air : l'une sèche provenant du Sahara, l'autre humide, provenant du Golfe de Guinée. Le mouvement latitudinal de la ZCIT induit une zonalité forte des variables climatiques, avec du sud au nord, diminution progressive de la pluviométrie et de l'humidité, concentration de la saison des pluies, augmentation de la température (Brunet-Moret et al., 1986), comme l'illustrent la Figure 2 et la Figure 3. On note par ailleurs sur la Figure 2 que la pluie n'est supérieure à l'évapotranspiration potentielle que trois mois par an à Niamey, ce qui a de fortes conséquences pour l'agronomie.

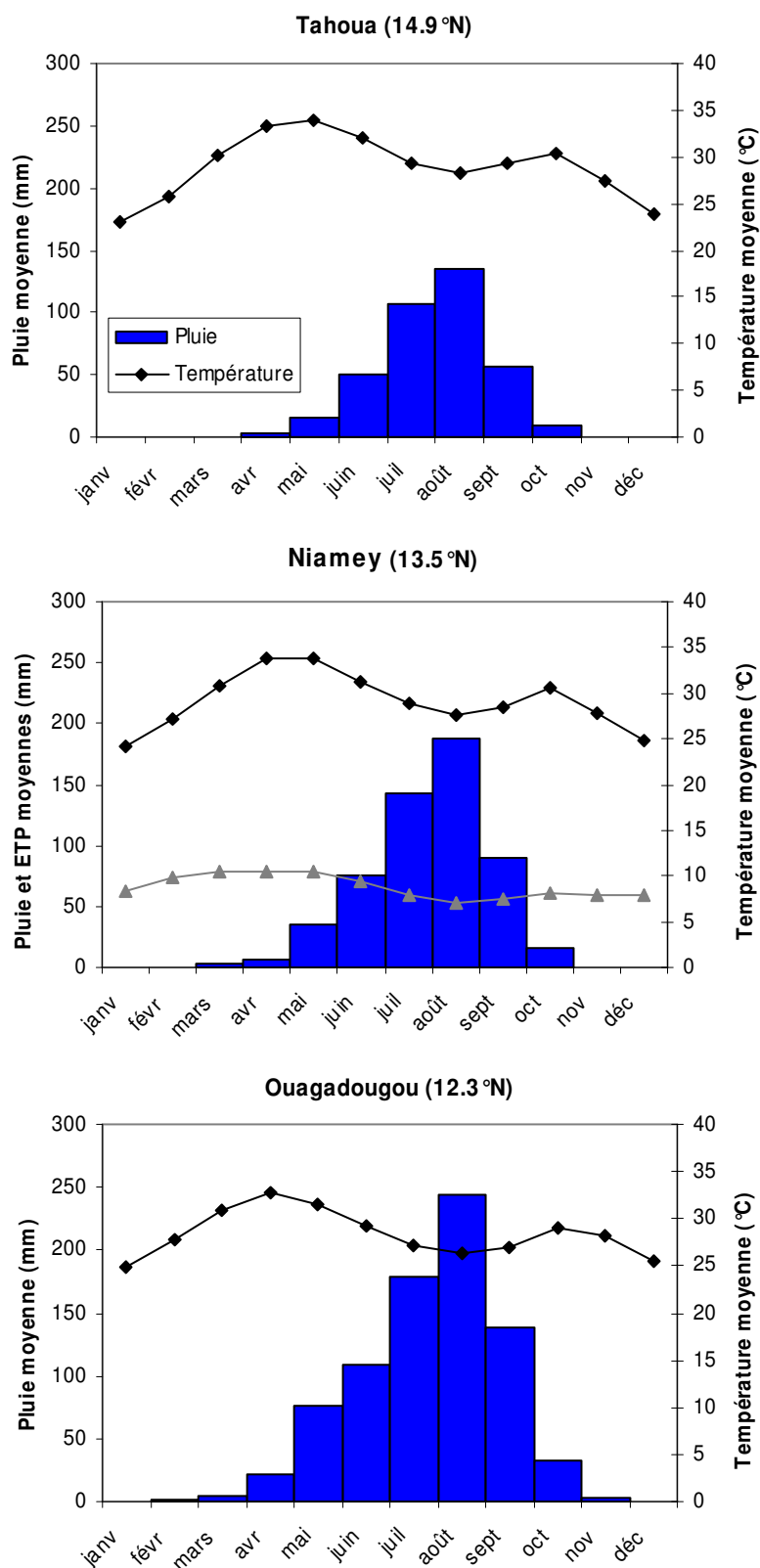


Figure 2 – Variations saisonnières moyennées par mois des températures et des pluies enregistrées à Tahoua (T° :1951-1990 ; P :1921-1989), à Niamey (T° et P : 1905-1990, ETP en gris : 1981-2003) et à Ouagadougou (T° :1924-1990 ; P : 1902-1990) (source GHCN 1, <http://www.worldclimate.com>).

L'organisation zonale des cumuls pluviométriques sur l'Afrique de l'Ouest est particulièrement marquée au nord de l'isohyète 1000 mm, avec un gradient d'environ 1 mm par kilomètre, comme le montre la carte des cumuls moyens annuels des précipitations sur la période 1970-2000 (Figure 3). La pente de l'isohyète 1000 mm met toutefois en évidence un gradient pluviométrique orienté vers l'Ouest. Au sud de cette limite, la variation spatiale du cumul pluviométrique est dominée par deux maxima centrés sur la Guinée et sur le Cameroun, liés aux influences orographiques du Fouta-Djalon à l'ouest et du Mont Cameroun à l'est (Sultan, 2002).

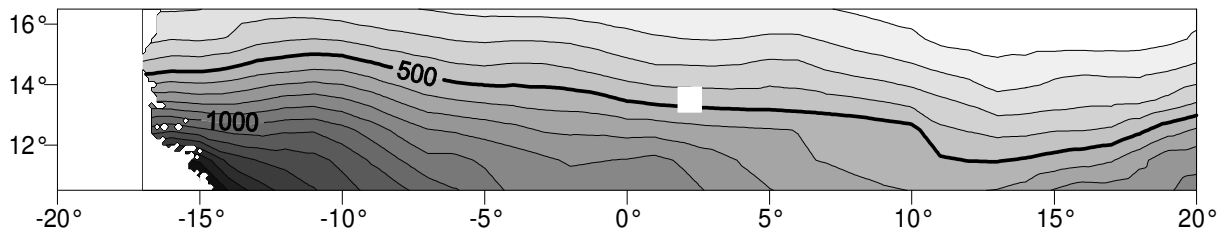


Figure 3 – Isohyètes moyennes annuelles de 1970 à 2002 sur le Sahel (isohyètes espacées de 100 mm, longitude et latitude indiquées en degrés) et localisation de la station de Niamey.

Actualiser et revisiter le régime pluviométrique sahélien

Dans un premier temps, ce travail propose de documenter les caractéristiques moyennes du régime pluviométrique sahélien et sa variabilité. On peut s'interroger sur l'intérêt et l'originalité de cette étude, après avoir décrit les traits déjà connus du régime sahélien. Nous allons exposer ici les motivations qui nous conduisent à revisiter les acquis antérieurs concernant le régime pluviométrique sahélien :

- i) A partir des années 1970, le Sahel a subi un épisode de sécheresse sévère et d'une durée inégalée au cours de ce siècle. Cet épisode a été examiné par de nombreux chercheurs, dans l'optique d'identifier des facteurs explicatifs de la sécheresse (Janicot et Fontaine, 1993, en proposent une synthèse). Parmi ces études, seule une minorité a cherché à déceler si cet épisode de sécheresse avait entraîné une modification du régime pluviométrique sahélien, et si oui, sous quelle forme : rétrécissement de la saison des pluies, réduction du nombre d'événements pluvieux, affaiblissement de l'intensité des événements, déficit pluviométrique localisé ou réparti sur toute la saison des pluies ? Le Barbé et Lebel (1997) ont été les premiers à affirmer que le déficit pluviométrique observé sur l'ensemble du Niger en comparant les périodes 1950-1969 et 1970-1989 était lié à une diminution du nombre d'événements en cœur de saison des pluies. A la lumière de l'échelle privilégiée qu'est l'événement pluvieux, de nombreux travaux restent à faire pour différencier les années sèches des années humides, que ce soit en comparant les périodes 1950-1969 et 1970-1989 ou en étudiant la décennie récente 1990-2002.
- ii) La sécheresse est seulement l'une des signatures de la variabilité du climat en Afrique de l'Ouest. Vu les impacts de cette variabilité à l'échelle régionale sur les activités humaines, il est

essentiel de mieux comprendre les mécanismes physiques de cette variabilité de manière à améliorer la prévision saisonnière. Le programme AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) vise à améliorer la compréhension du lien entre la dynamique régionale du climat et le cycle de l'eau. Ces préoccupations nouvelles et les travaux récents qui s'y rattachent – on peut citer les travaux de Sultan et Janicot (2003) sur la mise en place de la mousson africaine – nous amènent à examiner les caractéristiques du régime pluviométrique sous un nouvel angle.

- iii) Les travaux concernant la variabilité interannuelle récente des précipitations au Sahel se sont contentés d'étudier la pluie à de larges échelles spatio-temporelles. Pour décrire les précipitations dans la « Monographie hydrologique du fleuve Niger », Brunet-Moret et al. (1986) s'en tiennent, d'un point de vue spatial, à une station de référence par régime et d'un point de vue temporel aux variations saisonnières mensuelles et journalières de la pluie (forme de l'averse, nombre de jours de précipitations, précipitations exceptionnelles); or l'une des fortes caractéristiques du régime sahélien est la variabilité spatio-temporelle des pluies. Les échelles spatiales et temporelles choisies en général pour décrire les précipitations au Sahel ne permettent pas de bien documenter la variabilité. Si les pluies de fréquence rare au Sahel ont été étudiées (Cadot et Puech, 1982, pour le Niger), le lien entre les précipitations au pas de temps journalier et les événements pluvieux est ignoré. Or la considération des pluies à l'échelle de l'événement pluvieux, voire à des échelles encore plus fines, est fondamentale pour l'hydrologie et l'agronomie. Nous verrons par la suite que l'analyse à de fines échelles spatio-temporelles ouvre de nouvelles perspectives dans la compréhension de la variabilité des précipitations au Sahel.

Données disponibles

Peu d'observations à haute résolution sont disponibles dans la région ; les quelques longues séries existantes, via les réseaux nationaux de pluviomètres, permettent de renseigner la variabilité historique des pluies, mais les pluviomètres sont trop dispersés géographiquement pour permettre d'étudier la variabilité spatiale des pluies aux échelles fines. Ces données pluviométriques historiques, initialement réparties dans deux banques de données (Tapsoba, 1997) :

- celle du Centre Régional AGRHYMET (Centre régional de formation et d'application en agrométéorologie et hydrologie opérationnelle) élaborée pour la rédaction de l'Atlas Agrométéorologique des pays membres du CILSS (Comité permanent Inter états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel) : Burkina Faso, Cap Vert, Gambie, Guinée Bissau, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal, Tchad, regroupant les relevés de la création des stations à nos jours,
- celle de l'IRD (Institut de recherche pour le développement, ex-ORSTOM) élaborée à l'occasion d'une convention passée entre cet institut, le CIEH (Centre Interafricain d'Etudes Hydrauliques) et l'ASECNA (Agence pour la SECurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à

Madagascar), regroupant les données collectées jusqu'en 1980 sur les 13 pays membres du CIEH,

ont été rassemblées en une base unique dénommée BADOPLU (BAse de DONnées PLUviométriques), couvrant la période 1950-1990. Les observations plus récentes, de 1991 à 2002, sont gérées par le Centre Régional AGRHYMET. Le réseau d'observations, inchangé entre les deux périodes, est représenté Figure 4.

Dans la base de données BADOPLU, on a sélectionné la série des pluies journalières enregistrées à Niamey Aéroport depuis 1950, cette station servant de référence pour représenter le régime pluviométrique sahélien de 1950 à 2002, un choix qui était déjà celui de Brunet-Moret et al. (1986). Bien qu'on montre par la suite que le choix d'une seule station pour représenter une zone de 10 000 km² (ou plus) est contestable, la faible densité du réseau historique ne nous permet pas d'étudier la variabilité spatiale des précipitations en détail, mais l'intérêt de ces données d'un point de vue historique reste néanmoins indiscutable. Malgré les discussions évoquées ultérieurement concernant la stationnarité des conditions climatiques au Sahel, la période sèche 1970-2000 paraît suffisamment cohérente pour être choisie, dans le cadre de notre étude, pour caractériser quantitativement le régime pluviométrique sahélien moyen. De plus, la durée de cette période – trois décennies – correspond à la norme de l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale) pour décrire un régime pluviométrique. On travaillera donc sur la période sèche 1970-2000 et on s'intéressera ensuite à la période humide 1950-1969 et plus généralement aux contrastes entre années sèches et années humides dans une section consacrée à la variabilité temporelle.

Pour examiner les pluies plus finement, il existe un observatoire dont les données satisfont au critère de fine résolution spatio-temporelle : le degré carré de Niamey. Initié en 1990 dans le cadre de l'expérience EPSAT (Estimation des Pluies par Satellite), le suivi pluviographique du degré carré de Niamey (Lebel et al., 1992) est aujourd'hui intégré dans l'Observatoire de Recherche en Environnement AMMA-CATCH (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine, Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique). Equipé d'une centaine de pluviographes combinés avec un radar météorologique de 1990 à 1994, l'observatoire AMMA-CATCH Niger continue de couvrir, avec un réseau de trente pluviographes à augets, une zone de 16 000 km², comprise entre 1.6°E et 3.2°E en longitude et 13.0°N et 14.0°N en latitude (Figure 4).

La gestion des pluviographes est assurée par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) et la DMN-Niger (Direction de la Météorologie Nationale du Niger), avec un sérieux qui permet d'obtenir des données d'excellente qualité, comme le montrent les faibles pourcentages de lacunes calculés pour la période du 1^{er} mai au 31 octobre (Tableau 1). Le fonctionnement du système d'observations est bien décrit dans les rapports de campagne d'EPSAT-Niger (ex. Taupin et al., 1992). On se limite dans cette section à fournir quelques statistiques des pluies annuelles enregistrées sur l'observatoire (Tableau 1), pour illustrer la forte variabilité spatio-temporelle des pluies (visible aussi Figure 30). Du fait de sa densité spatiale et de sa haute résolution temporelle, ce jeu de données permet

également de définir des événements pluvieux en fonction de leur extension spatiale et d'explorer la variabilité aux échelles des cellules convectives.

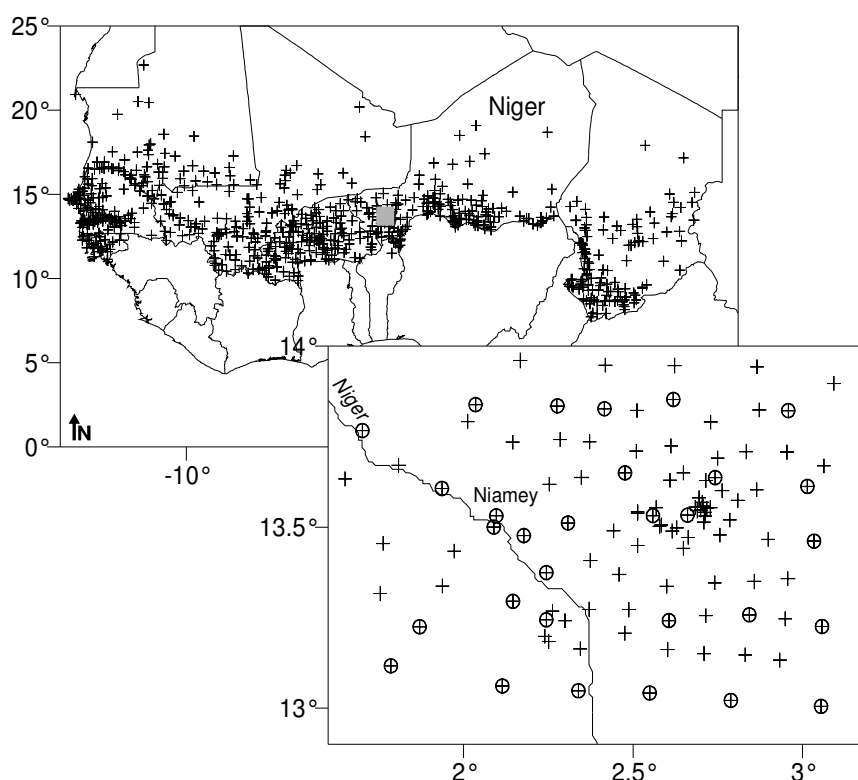


Figure 4 – Réseau CILSS sur le Sahel (740 stations) et localisation de l’observatoire AMMA-CATCH Niger, équipé de plus de 100 pluviographes (croix) pendant les 4 premières années et de 30 pluviographes (rond) pendant toute la période d’observations, longitude et latitude des cartes en degrés.

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Pluie moyenne	399	507	538	460	676	498	499	414	672	559	438	471	551
Ecart-type	73	89	72	88	100	77	56	68	138	98	73	51	122
Maximum	659	711	706	622	863	636	597	536	1044	797	584	566	917
Minimum	271	385	410	315	498	323	374	273	451	416	255	383	360
Lacunes (%)	10.1	8.4	2.1	4.2	2.1	1.8	2.5	3.1	2.8	2.7	1.1	1.0	3.0

Tableau 1 – Statistiques annuelles (mm) des pluies enregistrées aux 30 stations AMMA-CATCH Niger et pourcentage annuel de lacunes au pas de temps journalier du 1^{er} mai au 31 octobre.

Deux jeux de données seront donc majoritairement utilisés par la suite : la chronique des pluies de Niamey de 1950 à 2002 et le jeu de données AMMA-CATCH Niger. Par ailleurs, l'utilisation conjointe de ces jeux de données servira à étudier le passage d'échelle entre données journalières et données événementielles. La majorité des résultats issus de l'expérience AMMA-CATCH Niger étant à l'échelle de l'événement, il est intéressant de trouver des passerelles entre données journalières et événementielles pour pouvoir confirmer ou infirmer ces résultats pour les zones voisines.

Partie II

Le régime pluviométrique sahélien : caractéristiques moyennes et variabilité

1. Un régime pluviométrique de mousson

1.1. La mise en place de la mousson africaine : des avancées récentes

La pluie sur l'Afrique de l'Ouest est contrôlée par l'advection d'air humide provenant du Golfe de Guinée dans les basses couches de l'atmosphère. Suivant les migrations méridionales de la position zénithale du soleil et le maximum d'énergie solaire reçue associé, la mousson ouest africaine (MAO) se développe sur cette région du continent africain pendant le printemps et l'été septentrionaux, amenant la zone de convergence intertropicale (ITCZ), et le maximum de pluie combiné, à leur point le plus au nord au mois d'août (Hastenrath, 1991, cité par Sultan et Janicot, 2003). Dans la vision classique de la dynamique de la mousson, le déplacement de la ZCIT du sud au nord entraîne une installation progressive et régulière des pluies sur le continent. Une zone de subsidence suit le bord sud de la ZCIT. Les régions côtières guinéennes sont marquées par un régime bimodal, avec deux saisons des pluies au printemps et à l'automne, séparées par une courte saison sèche (Nicholson et Palao, 1993 ; Sultan, 2002). Cette zone ne dépasse pas 7°N ou 8°N. Au nord de ces latitudes, le cycle saisonnier est un régime avec une unique saison des pluies. La longueur de la saison des pluies varie de 8 mois au sud à 3 mois au nord du Sahel, puisque la ZCIT atteint cette région uniquement en juin et se retire en septembre (Lebel et al., 2003). 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. Néanmoins, dans cette vision classique de la dynamique de mousson, le trait principal du régime pluviométrique sahélien est une transition progressive entre un régime bimodal sur la côte et un régime monomodal au Sahel.

Des études récentes (Eltahir et Gong, 1996 ; Le Barbé et al., 2002) ont mis en évidence le caractère brusque de l'installation des pluies sur le continent ouest africain (Lebel et al., 2003). Sultan (2002) et Sultan et Janicot (2003) font ressortir deux stades importants dans la mise en place de la MAO. La première étape correspond à l'arrivée à 15°N du front intertropical (FIT), à savoir la confluence entre les vents sud ouest de mousson et l'Harmattan sec du nord, amenant suffisamment d'air humide pour permettre le développement de systèmes convectifs isolés dans la zone soudano-sahélienne, alors que la zone intertropicale de convergence (ZCIT) est encore centrée à 5°N. La date moyenne de cette étape pour la période 1968-1990 est le 14 mai et l'écart-type vaut 9.5 jours. Ce signal peut être considéré comme le « preonset » (la préinstallation) de la mousson ouest africaine puisqu'il correspond aux premières pluies significatives sur la région soudano-sahélienne. Le saut de mousson, ou « onset » est associé au brusque déplacement latitudinal de la ZCIT d'une position quasi-stationnaire à 5°N en mai juin à une autre position quasi-stationnaire à 10°N en juillet août. Le saut de mousson a lieu en moyenne pour la période 1968-1990 le 24 juin, avec un écart-type de 8 jours (Sultan et Janicot, 2003). En plus des travaux de Sultan et Janicot, on peut citer également ceux de Louvet et al. (2003), qui décrivent l'installation de la mousson ouest africaine comme une succession de phases actives et de

pauses à l'aide des données CMAP (CPC Merged Analysis Precipitation, pas de temps de 5 jours, moyennes sur des pavés $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, sur la période 1979-2000). Ils divisent l'installation de la mousson sur la région soudano-sahélienne en 4 sous périodes, chacune composée d'une période d'équilibre (ou pause) suivie d'une augmentation rapide des pluies (ou phase active). Les phases actives suivant les pauses commencent autour des 8-9 avril, 11-15 mai, 24 juin et 5 août. On retrouve les dates de « preonset » et « onset » décrites par Sultan et Janicot (2003).

Le Barbé et al. (2002) font ressortir également le caractère non linéaire de la dynamique de la mousson et décomposent le signal pluviométrique en deux : étudiant d'une part l'évolution du nombre d'événements pluvieux par jour, et d'autre part l'évolution de la hauteur pluviométrique moyenne par événement au cours de l'année sur le continent ouest africain. Ils montrent que la hauteur pluviométrique par événement décroît en progressant sur le continent jusqu'à 8.5°N , puis un noyau de plus fortes valeurs est visible au Sahel entre mi-juin et août quand le régime est installé. En ce qui concerne le nombre d'événements pluvieux, leur évolution est exactement la même que celle du signal pluviométrique global, avec une brusque augmentation fin juin, correspondant au saut de mousson. Il ressort de ces travaux que l'analyse du régime d'Afrique de l'Ouest en termes d'occurrence et d'intensité des événements pluvieux permet d'approcher plus finement la dynamique pluviométrique associée à la MAO. Ceci souligne l'intérêt de documenter l'événement pluvieux.

1.2. Le cycle saisonnier des pluies (1970-2000)

Le mouvement méridien de la zone de convergence intertropicale et de la circulation atmosphérique associée se traduit en terme de cycle saisonnier sur la bande sahélienne par une unique saison des pluies, de mai à octobre. Le cycle saisonnier moyen des pluies enregistrées à la station de Niamey Aéroport sur la période 1970-2000 est représenté Figure 5 avec une fenêtre glissante soit de 5 jours, soit de 11 jours. Les oscillations du cycle saisonnier restent encore très visibles avec la fenêtre de 5 jours, bien que la pluie soit moyennée sur 31 années (soit 155 valeurs). La progression des pluies paraît plus longue (3 mois vs. 2 mois) et plus fluctuante (cf. fenêtre glissante de 5 jours) que leur diminution. Cinq phases peuvent être clairement identifiées dans le cycle saisonnier des pluies. Les pluies commencent début mai, augmentent ensuite brusquement mi mai (phase 1) avant d'atteindre un palier au mois de juin (phase 2). Ces deux premières phases constituent la préinstallation de la mousson (ou « preonset »). A la fin du mois de juin, les pluies augmentent à nouveau brusquement, passant de 2 à 6 mm par jour (phase 3), avant d'atteindre un nouveau palier fin juillet début août (phase 4). Les phases 3 et 4 représentent la période où la mousson est bien établie. Enfin, à partir de la fin du mois d'août, les pluies commencent à diminuer et s'arrêtent au mois d'octobre (phase 5). La phase 5 marque le retrait de la mousson.

Sultan et Janicot (2003) retrouvent la même allure de cycle saisonnier à l'échelle régionale, avec deux brusques augmentations mi-mai (preonset, 14 mai) et fin juin (onset, 24 juin) pour la période 1968-

1990, en moyennant les points de grille situés entre 10°O et 10°E, le long de 15°N (données compilées par l'IRD, l'ASECNA et le CIEH et interpolées sur les grilles de 2.5°×2.5° du NCEP-NCAR).

Sur la Figure 5, on distingue également une diminution des pluies très prononcée entre le 8 août et le 18 août, avec une valeur minimale de 4.4 mm/jour le 11 août, encadrée par 5.8 mm/jour le 8 et 5.5 mm/jour le 18. Le cycle saisonnier moyen présenté par Sultan et Janicot (2003) présente le même creux, mais il est délicat de déterminer ce qui occasionne cette diminution : est-ce la marque d'un affaiblissement à grande échelle de l'activité convective (Sultan, 2002) ou un simple artéfact ? Sultan (2002) détecte un minimum de l'activité convective survenant au cœur de la saison des pluies (en filtrant entre 25 et 60 jours la moyenne régionale des pluies entre 12.5°N-15°N et 10°W-10°E) à la date moyenne du 12 août (écart-type de 18 jours) pour la période 1968-1990. Sultan et Janicot (2003) montrent aussi un cycle saisonnier moyen composite qu'ils ont formé en recalant chaque année pour superposer les dates annuelles de « preonset » à la date moyenne du 14 mai. Celui-ci présente la diminution des pluies d'une manière progressive, sans creux, et de la même durée que l'augmentation des pluies (80 jours, du 14 mai au 2 août). Le creux apparu Figure 5 pourrait être dû à la variabilité de la date de « preonset » (écart-type de 9.5 jours). Il faut néanmoins rester prudent dans ces considérations, puisque les travaux de Sultan (2002) et Sultan et Janicot (2003) présentés ici sont à l'échelle régionale.

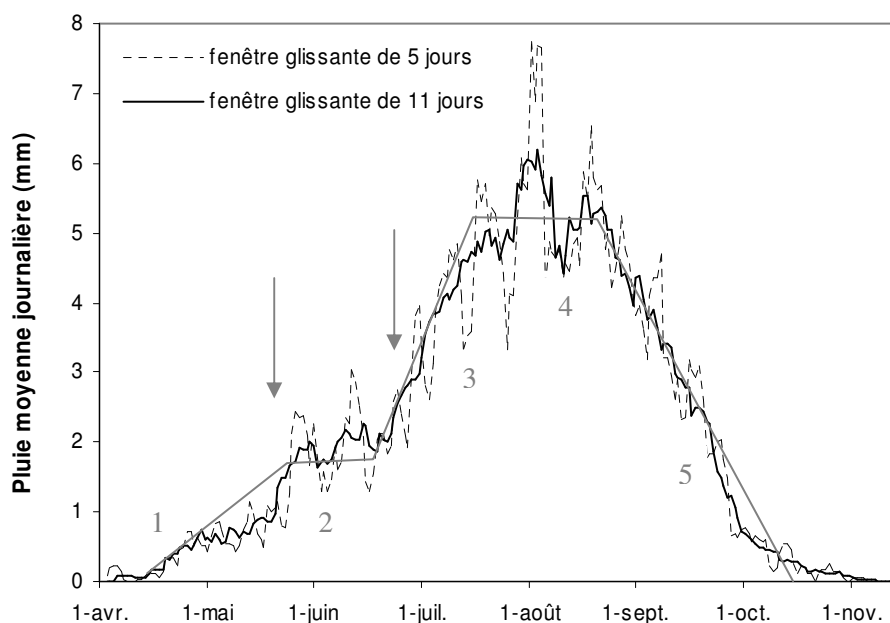


Figure 5 – Cycle saisonnier moyen des pluies à Niamey Aéroport sur la période 1970-2000

La modulation du cycle saisonnier des pluies au Sahel suivant la latitude est représentée sur la Figure 6. Les stations sahéliennes : Gao (16.3°N), Tahoua (14.9°N), Niamey (13.5°N) et Ouagadougou (12.3°N), présentent toutes un cycle saisonnier similaire, dont l'extension décroît du sud au nord, en

durée et en intensité. Les étapes décrivant le cycle saisonnier des pluies à Niamey – préinstallation de la mousson, mousson établie, retrait de la mousson – restent valables pour les autres stations, même si elles paraissent moins nettes pour la station de Gao. Les dates d’occurrence des étapes changent néanmoins d’une station à l’autre, s’échelonnant dans le temps du sud au nord. Elles sont indiquées de manière approximative dans le Tableau 2, qui résume la contribution au cumul annuel des différentes périodes pour les stations de Gao, Tahoua, Niamey et Ouagadougou. La forte proportion du cumul annuel liée à la « mousson établie » (entre 46% et 62%) souligne l’intérêt de mieux analyser cette période-clé.

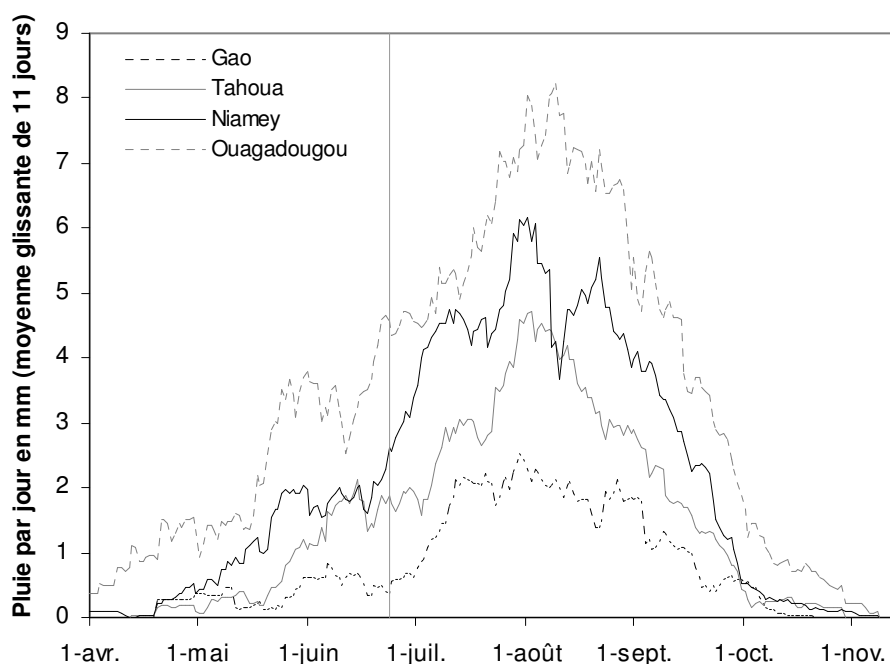


Figure 6 – Cycle saisonnier moyen des pluies à Gao, Tahoua, Niamey et Ouagadougou, sur la période 1970-1990 (moyenne glissante de 11 jours). Le trait gris indique la date moyenne de mise en place de la mousson à l’échelle régionale (24 juin, pour la période 1968-1990, Sultan et Janicot, 2003).

	Installation	Retrait	Préinstallation (1+2)	Mousson établie (3+4)	Retrait (5)
Gao (16.3°N)	6 juillet	14 août	19%	46%	35%
Tahoua (14.9°N)	5 juillet	15 août	22%	46%	33%
Niamey (13.5°N)	19 juin	25 août	15%	62%	23%
Ouagadougou (12.3°N)	15 juin	28 août	19%	59%	21%

Tableau 2 – Dates approximatives d’installation et de retrait de la mousson, pourcentages du cumul pluvieux annuel associés à chaque phase (moyennés sur la période 1970-1990).

Documenter le régime pluviométrique à des échelles décennales ou mensuelles est utile vis-à-vis des modèles de circulation générale atmosphérique (MCGA), qui actuellement ne donnent pas toujours une bonne représentation du cycle saisonnier. Onibon (2001), qui a analysé les performances du modèle du LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique) sur le Sahel, montre un décalage entre les scénarios de pluie simulés et la pluie observée ; la saison des pluies est déclanchée prématurément et finit tardivement.

La représentation du cycle saisonnier à l'échelle décennale permet également d'examiner les modifications du cycle entre la période humide 1950-1969 et la période sèche 1970-1989 (Figure 27). Par contre, pour d'autres utilisations en hydrologie ou en agronomie, comme des études d'érosion et de ruissellement, le cycle saisonnier présenté ci-dessus donne une vision trop globale de la distribution des pluies, filtrant la variabilité de moins de 10 jours. On cherche donc à décrire le régime pluviométrique à une échelle plus fine. En utilisant le modèle de la loi des fuites, il est possible à partir des données journalières de Niamey Aéroport (1970-2000) d'atteindre l'échelle de l'événement pluvieux, échelle clé pour décrire le régime pluviométrique sahélien, comme cela est décrit dans le chapitre 3.

2. La variabilité décennale récente

2.1. 1970-1989 : une période sèche particulièrement intense

Depuis la fin des années 60, le Sahel a subi un épisode de sécheresse intense et continu (cf. Sircoulon, 1976 ; Nicholson, 1981 ; Lamb, 1982 ; Folland et al., 1986 ; Hastenrath, 1990 ; Lamb et Pepler, 1992 ; Le Barbé et Lebel, 1997), avec des pics en 1972-1974 et 1983-1985. La sécheresse a eu des conséquences dramatiques : famines, ruine de certaines cultures d'exportation, disparition de la moitié du bétail, migrations de millions de réfugiés vers les villes (Graetz 1991, Nicholson et al., 1998). Alors que la décennie 1990 voyait progressivement un certain retour vers des conditions plus humides, le déficit pluviométrique sur le Sahel s'est poursuivi jusqu'en 2002, bien que de manière atténuée, comme le montre l'indice I de la Figure 7, calculé de la manière suivante :

$$I = (P_i - \bar{P}) / \sigma \quad (\text{Équation 1})$$

avec P_i la pluviométrie de l'année i , \bar{P} la pluviométrie moyenne krigée sur la période 1950-2002, et σ l'écart-type krigé sur cette même période), évalué sur la fenêtre 10°N-20°N, 20°W-20°E, à partir des données CILSS cartographiées sur la Figure 4.

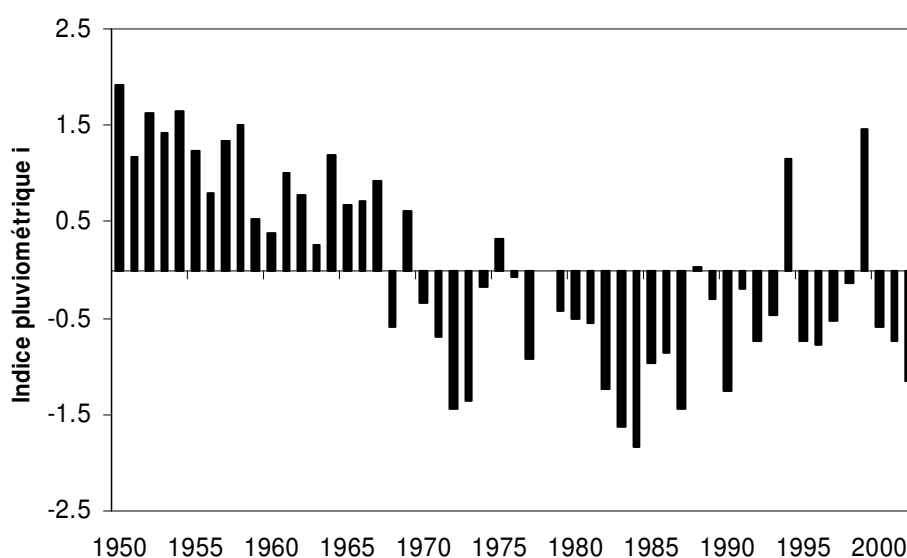


Figure 7 – Indice pluviométrique sahélien $I = (P_i - \bar{P}) / \sigma$, représenté de 1950 à 2002, avec $\bar{P} = 470$ mm, $\sigma = 80$ mm, sur une fenêtre de 20°W à 20°E et de 10°N à 20°N, à partir des données CILSS (environ 740 stations) krigées sur des pavés de 0.5° de côté.

En terme d'impact hydrologique, le déficit pluviométrique enregistré pour la période sèche 1970-1989 (de l'ordre de 20 à 30% dans la région de Niamey par rapport à la période humide 1950-1969), a entraîné une baisse de 60% du débit du fleuve Niger à Malanville (Lebel et al., 2003). Cette

amplification marque l'importance de modéliser les phénomènes aux échelles hydrologiques pour étudier l'impact de la variabilité climatique. Par ailleurs, à l'échelle du globe, des modifications climatiques d'une telle ampleur sur une région aussi vaste ont une influence sur la circulation générale atmosphérique. La corrélation significative entre les cyclones tropicaux dans l'Atlantique et les précipitations de l'Ouest du Sahel est un exemple de la relation entre la mousson africaine et le climat dans d'autres régions du monde (Landsea et Gray 1992). La variabilité pluviométrique associée à la MAO a donc des impacts régionaux et globaux. Ceci souligne la nécessité de bien la caractériser pour fournir des éléments d'une compréhension améliorée des mécanismes qui la gouvernent.

De nombreuses études ont cherché à identifier les facteurs qui contrôleraient cette variabilité (on se reportera à Janicot et Fontaine, 1993, pour une synthèse), considérant les températures de surface océaniques (Folland et al., 1986), les conditions de surface continentales (Charney, 1975 ; Taylor et Lebel, 1998, plus récemment) ou les structures atmosphériques. Les facteurs présumés explicatifs doivent être confrontés aux questions suivantes (Foley et al., 2003) :

- i) le mécanisme présumé est-il suffisamment important pour déclencher une sécheresse de cette ampleur ?
- ii) est-ce que ce mécanisme a entretenu la sécheresse pendant trois décades (alors que l'atmosphère ne garde pas en mémoire l'année précédente) ?
- iii) et finalement, pourquoi le mécanisme a-t-il causé une transition aussi brusque d'un mode « Sahel humide » (1945-1960) à un mode « Sahel sec » (depuis 1969) ?

Tous les facteurs cités interagissent vraisemblablement d'une manière assez complexe. Zeng et al. (1999) suggèrent que la sécheresse a été initiée par des changements de températures de surface océaniques, mais que son ampleur et sa persistance multidécadaire ont été causées par une réaction (« feedback ») non linéaire entre le couvert végétal et l'atmosphère. Suivant Zeng et al. (1999) et Wang and Eltahir (2000), la dynamique de la végétation joue un rôle intégrateur qui entretient la mémoire d'une année à l'autre au sein du système climatique. Cette hypothèse semble avoir trouvé une confirmation empirique dans les travaux de Philippon et Fontaine (2002) montrant que la pluie de l'année n au Sahel était corrélée à la quantité de pluie tombée au cours de la deuxième saison des pluies de l'année $(n-1)$ au sud.

Quels que soient les interprétations proposées pour expliquer la sécheresse, la majorité des études citées ci-dessus considère la pluie à des échelles larges, spatiales comme temporelles, utilisant des données au pas de temps mensuel. Or pour mieux comprendre la manière dont les différents facteurs influencent les pluies sahéniennes et agissent sur les ressources en eau, il est primordial de considérer des échelles plus fines (Lebel et al., 2003).

2.2. 1990-2002 : un retour vers des conditions meilleures ?

S'il existe une certaine unanimité pour dater le début de l'épisode de sécheresse autour des années 1970, avec à l'appui des tests statistiques de rupture (comme celui de Pettitt, 1979), un débat existe concernant sa fin. Un article récent de L'Hôte et al. (2002) a déclenché une discussion (Ozer et al., 2003 ; L'Hôte et al., 2003 ; Balme et al., 2004a) pour savoir si l'on pouvait considérer que l'on était toujours dans la « sécheresse », les tests statistiques de rupture utilisés pour l'affirmer par L'Hôte et al. (2002) ne permettant guère d'inférence fiable du fait de leur faible robustesse selon Ozer et al. (2003). Bien qu'intéressante au plan méthodologique, cette discussion n'apporte aucun éclairage particulier sur les mécanismes qui peuvent expliquer cette récurrence exceptionnelle d'années sèches, ni sur la manière dont elles affectent le cycle de l'eau continental sur la région. Dans la mesure où le climat sahélien n'est qu'une composante d'un système climatique plus large, contrôlée par la mousson ouest-africaine, le fait qu'un retour à des conditions plus humides ait été constaté en certaines régions sahéliennes pour la décennie 1990-1999 plaide pour différencier cette décennie des deux précédentes. Ce point de vue est illustré par la Figure 8, qui compare les écarts à la pluviométrie moyenne par décennie de 1950 à 1999, établis l'un pour la partie ouest du domaine sahélien, l'autre pour sa partie centrale (ligne de partage située à 5° de longitude ouest, issue de la classification proposée par Janicot, 1992a). Contrastant avec la relative similitude de comportement de 1950 à 1989, on voit apparaître une différence significative entre le Sahel Ouest et le Sahel Central lors de la décennie 1990-1999.

Cette différence illustre la difficulté à laquelle on est confronté lorsque l'on cherche à caractériser un signal climatique à partir d'indices pluviométriques de ce type. L'objectif étant de mettre en évidence un signal d'ampleur régionale on est amené à travailler sur de grands domaines, tout en veillant à rester dans une zone réputée « homogène », ce qui est possible en tenant compte des grandes structures de la circulation atmosphérique. D'un autre côté, ces grands domaines masquent inévitablement des disparités, lesquelles ne sont pas nécessairement stables dans le temps. D'un point de vue climatique, il est important d'étudier ces hétérogénéités et leur variation temporelle, parce qu'elles peuvent mener vers l'identification de facteurs explicatifs (Janicot, 1992b). D'un point de vue hydrologique, les hétérogénéités spatiales de petite échelle jouent un grand rôle dans le calcul des bilans d'eau (Peugeot et al., 2003; Cappelaere et al., 2003). Ceci est particulièrement vrai au Sahel où le cloisonnement de l'espace en systèmes endoréiques limite l'homogénéisation liée à l'intégration spatiale lorsque l'on travaille sur de grands bassins versants (Desconnets et al., 1997).

Balme et al. (2004a) montrent qu'il faut rester circonspect quant à l'interprétation des valeurs d'indices pluviométriques sahéliens (Figure 7), qui permettent de différencier les années sèches des années humides. Ces derniers sont très sensibles à la superficie considérée ainsi qu'à la densité du réseau de mesure. Une certaine prudence s'impose donc dans la mesure où, à ce jour, aucune zone de travail ni aucun réseau d'observations n'a été défini comme référence pour calculer ces indices.

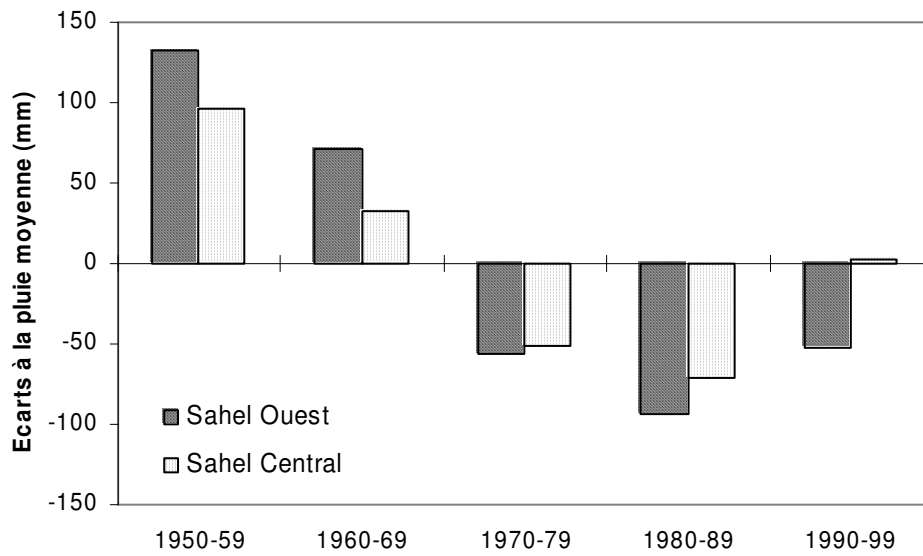
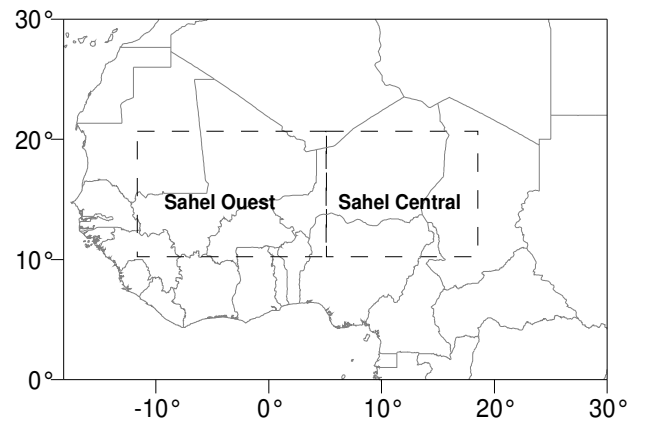


Figure 8 – Ecart à la pluie moyenne de 1950 à 1999 (470 mm) sur le Sahel, pour deux zones différentes : Sahel ouest et Sahel est (ligne de partage à 5° de longitude ouest).

3. Les caractéristiques moyennes du régime pluviométrique aux échelles hydrologiques

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. L'utilisation de données de pluie de qualité médiocre pour étudier des problèmes complexes tels que l'infiltration dans le sol, le lessivage des sols imperméables, l'érosion des sols par la pluie, provoque des incertitudes importantes sur les résultats (Sivakumar et al., 2001). Or les données à haute résolution sont rares, particulièrement en Afrique de l'Ouest – ce qui fait l'originalité et la richesse de l'observatoire AMMA-CATCH Niger – et on est en général réduit à chercher des passerelles pour passer de l'échelle journalière à l'échelle événementielle.

Dans cette partie, on montre en quoi l'événement pluvieux est une échelle clé pour étudier le régime pluviométrique sahélien. Grâce aux données pluviographiques de l'observatoire AMMA-CATCH Niger, on caractérise dans un premier temps les événements pluvieux sur la région de Niamey. Puis, dans un deuxième temps, on décrit un modèle pour accéder à l'information événementielle à partir de données de pluies journalières quand ces dernières sont les seules disponibles. L'utilisation combinée des données haute résolution lorsqu'elles sont disponibles et du modèle pour les années où elles ne le sont pas va permettre d'étudier la variabilité temporelle du régime pluviométrique sahélien aux échelles hydrologiques pour les 50 dernières années.

3.1. L'événement pluvieux : une échelle pivot

Les pluies sahéliennes sont principalement 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. Il s'avère donc essentiel de bien caractériser ces systèmes sur la région et d'étudier les structures synoptiques influençant leur occurrence (Lebel et al., 2003). De plus, d'un point de vue hydrologique comme agronomique, l'étude des champs de pluie aux échelles fines est indispensable pour comprendre l'impact de la variabilité des pluies sur les ressources en eau. Au Sahel, deux saisons des pluies à cumuls identiques peuvent générer des écoulements très différents, de même que des récoltes très différentes. Un grand nombre d'évènements pluvieux de relativement faible intensité (cas de 1999) provoqueront moins de ruissellement qu'un plus petit nombre à intensité moyenne plus forte (cas de 1998). L'étude du régime pluviométrique sahélien s'articulera donc autour de cette échelle clé qu'est l'événement pluvieux, conciliant ainsi atmosphériciens, hydrologues et agronomes.

La période de sécheresse au Sahel a été suffisamment longue pour permettre de comparer, en termes de distribution spatio-temporelle des pluies, la période sèche 1970-1989 et la période humide 1950-1969. Les travaux de Le Barbé et Lebel (1997), basés sur l'utilisation d'un modèle statistique que nous décrirons ultérieurement, ont permis de caractériser les fluctuations spatio-temporelles des moyennes pluviométriques sur une longue période en différenciant les variations concernant le nombre de systèmes convectifs et celles concernant la hauteur moyenne apportée par chaque système. Ils utilisent le modèle de la loi des fuites pour caractériser la climatologie des pluies du Sahel Central (0°-5°E, 11°-15°N) pour chacune des deux périodes 1950-1969 et 1970-1989 et montrent que ce modèle est parfaitement adapté à la description du régime pluviométrique sahélien à l'échelle régionale, fournissant des jeux de paramètres cohérents de l'échelle journalière à l'échelle mensuelle. Les modifications associées à la sécheresse sont d'une grande cohérence spatiale. Sur toute la zone d'étude, la baisse de la pluviométrie est liée à la diminution du nombre d'événements pluvieux, excepté dans l'extrême sud. Cette diminution est particulièrement marquée au cœur de la saison des pluies (juillet et août), mais au nord (14° à 15°N), elle est observée pour toute la saison. Par contre, la hauteur moyenne de pluie par événement varie peu. La longueur de la saison des pluies n'a pas changé entre les deux périodes étudiées. Le déficit pluviométrique à partir de 1970 s'explique principalement par une diminution du nombre d'événements pluvieux.

Si le modèle mis en œuvre par Le Barbé et Lebel (1997) permet de bien caractériser les pluies à l'échelle événementielle, les observations AMMA-CATCH Niger offrent la possibilité d'atteindre directement une climatologie de ces événements, sans avoir recours à la modélisation. Il est intéressant de comparer les résultats obtenus par les deux approches – définition directe de l'événement ou passage par la loi des fuites – ce qui fera l'objet de la section 3.4 ci-après.

3.2. Définition « ponctuelle » ou « spatiale » de l'événement pluvieux

La notion d'événement pluvieux va permettre de faire le lien entre la dynamique atmosphérique (systèmes convectifs) et l'hydrologie (lames d'eau au sol). La définition d'un événement pluvieux est éminemment subjective, dépendante de l'auteur et des observations disponibles. Les informations dérivées des images satellite (ou radar) offrent une vision globale du phénomène alors que les données au sol offrent une indication sur la trace de l'événement au sol, directement utilisable pour l'hydrologue ou l'agronome, et à des échelles beaucoup plus fines.

Définition spatiale – événement pluvieux AMMA-CATCH Niger

Lors d'une première étude de synthèse, D'Amato (1998) a comparé différents critères permettant de définir des événements pluvieux sur la zone AMMA-CATCH Niger et a opté, après une série de tests de sensibilité, pour la définition suivante. Un événement pluvieux est caractérisé ainsi : au moins 30% des stations du réseau doivent enregistrer de la pluie, au moins une des stations doit enregistrer plus de

1 mm de pluie et enfin, la pluie ne doit pas s’interrompre plus de 30 minutes sur tout le réseau (sinon on considère que l’événement est terminé). En appliquant cette définition aux données AMMA-CATCH Niger, on obtient une liste de 548 événements – que nous nommerons désormais événements AMMA-CATCH Niger – observés sur un réseau de 30 stations pendant 13 années de mesures (1990-2002). Des études récentes (Mathon et al., 2002) basées sur une archive de 9 années de données Météosat ont montré que les événements pluvieux ainsi définis à partir de l’observatoire AMMA-CATCH Niger constituaient une population proche des événements nuageux pluvio-gènes définis à partir de l’information satellite seule et correspondant à plus de 90% de la pluie totale enregistrée entre le 1er juillet et le 15 septembre. Les événements AMMA-CATCH Niger apportent $\alpha = 90\%$ de la pluie annuelle dans la région de Niamey. Comme le montre la Figure 9, cette proportion peut varier d’une année à l’autre (α est compris entre 84% et 93% sur notre échantillon de 13 années), mais ne dépend pas du cumul pluviométrique annuel P : la corrélation linéaire entre α et P présente un R^2 inférieur à 0.01.

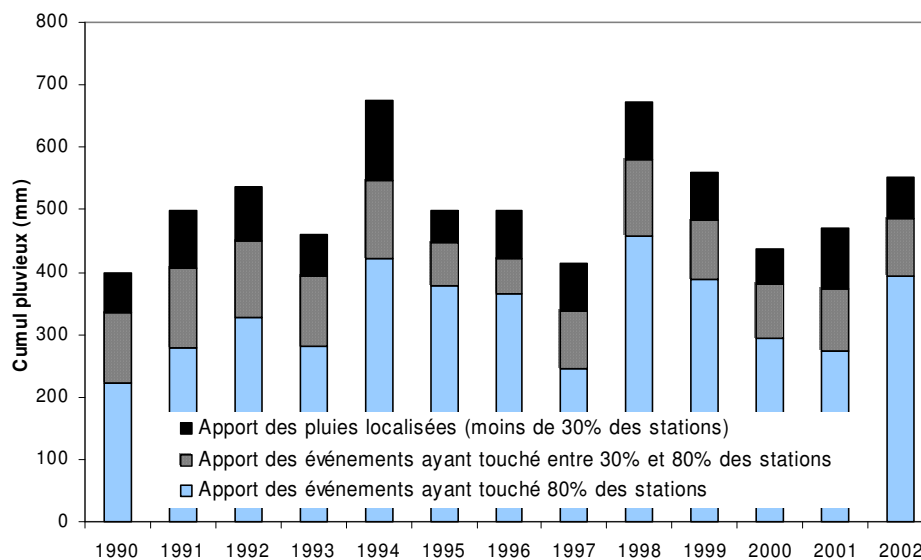


Figure 9 – Proportion du cumul pluvieux moyen sur l’observatoire AMMA-CATCH Niger associée aux événements en fonction de leur extension spatiale.

Définition ponctuelle – événement pluvieux défini à la station

Un autre type d’événement est défini cette fois-ci en chaque station, avec les mêmes critères concernant le seuil de pluie (1 mm) et la durée d’interruption de pluie (inférieure à 0h30) mais en omettant le critère d’extension spatiale. Les caractéristiques des événements définis à la station seront comparées par la suite aux paramètres du modèle de la loi des fuites afin de confirmer ou d’infirmier l’intérêt de la modélisation. Les événements définis à la station vont servir à valider le modèle de la loi des fuites. Néanmoins, quand des données à haute résolution spatio-temporelle sont disponibles,

comme c'est le cas sur l'observatoire, définir des événements pluvieux en tenant compte de leur extension spatiale est plus pertinent, puisque cela permet de faire le lien avec les systèmes convectifs observés. C'est pourquoi on s'attardera davantage sur les caractéristiques moyennes des événements AMMA-CATCH Niger.

3.3. Caractéristiques moyennes générales des événements pluvieux sahéliens

Hauteurs moyennes par événement AMMA-CATCH Niger

D'Amato (1998) avait mis en évidence la stationnarité de la hauteur moyenne de pluie par événement à l'échelle interannuelle. Nous allons chercher ici à confirmer ou infirmer ces résultats avec un échantillon plus important (13 années contre 6 ; 548 événements contre 258) qui inclut une plus grande diversité d'années sèches et d'années humides.

On rappelle que les événements AMMA-CATCH Niger sont définis sur l'ensemble des 30 stations, et non par station. Lors d'un événement pluvieux, certaines stations peuvent ne pas recevoir de pluie. Pour chaque station k , on calcule, sur l'ensemble de la période 1990/2002, les caractéristiques moyennes suivantes :

- i) Moyennes et écarts types « non conditionnels » ($\bar{H}_k, \sigma_{\bar{H}_k}$), établis à partir des hauteurs de pluie par événement enregistrées à la station, y compris les valeurs nulles,

$$\bar{H}_k = \frac{1}{N_k} \sum_{j=1}^{N_k} h_{jk} \quad (\text{Équation 2})$$

$$\sigma_{\bar{H}_k} = \sqrt{\left(\frac{1}{N_k} \sum_{j=1}^{N_k} (h_{jk} - \bar{H}_k)^2 \right)} \quad (\text{Équation 3})$$

- ii) Moyennes et écarts types « conditionnels à zéro » ($\bar{H}_k^*, \sigma_{\bar{H}_k^*}$), établis à partir des hauteurs de pluie par événement strictement supérieures à zéro enregistrées à la station

$$\bar{H}_k^* = \frac{1}{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} h_{jk} \quad h_{jk} > 0 \quad (\text{Équation 4})$$

$$\sigma_{\bar{H}_k^*} = \sqrt{\left(\frac{1}{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} (h_{jk} - \bar{H}_k^*)^2 \right)} \quad h_{jk} > 0 \quad (\text{Équation 5})$$

iii) Intermittence $F_0(k)$, pourcentage de hauteurs de pluie nulles enregistrées à la station,

$$F_0(k) = \frac{N_k - n_k}{N_k} \quad (\text{Équation 6})$$

Les notations utilisées sont les suivantes :

j : indice de l'événement considéré

k : indice de la station considérée

N : nombre total d'événements sur la période ($N = 548$)

N_k : nombre total d'événements observés à la station k ($N_k \neq N$, à cause des lacunes éventuelles à la station k).

n_k : nombre d'événements dont le cumul est strictement supérieur à zéro

h_{jk} : hauteur de pluie enregistrée par la station k pour l'événement j

Le Tableau 3 compare les cinq caractéristiques décrites ci-dessus pour les événements des périodes 1990-1995 et 1990-2002 moyennées sur les 30 stations de l'observatoire. Malgré l'enrichissement de l'échantillon entre les deux périodes – le nombre d'événements observés a doublé – les paramètres décrivant les événements sont restés très stables. Ceci souligne la pertinence des critères choisis pour déterminer les événements pluvieux.

	\bar{P}	nombre moyen par an	\bar{H}	$\sigma_{\bar{H}}$	\bar{H}^*	$\sigma_{\bar{H}^*}$	F_0
1990/2002	515 mm	42	10.6	14.5	14.8	15.2	0.28
1990/1995	508 mm	43	10.6	14.1	14.3	14.7	0.26

Tableau 3 – Caractéristiques moyennes des événements pluvieux : moyennes conditionnelle à zéro et non conditionnelle (mm), écart-types correspondants (mm) et F_0 , pourcentage de cumuls nuls, pour deux périodes différentes : 1990-1995 et 1990-2002.

Ajustement exponentiel des hauteurs de pluie par événement

548 événements AMMA-CATCH Niger ont été observés sur l'observatoire de 1990 à 2002. En chacune des 30 stations, on dispose d'une série de hauteurs de pluie événementielle (valeurs non nulles) à laquelle on cherche à ajuster une fonction de répartition. Pour le même type de données, mais sur une période plus courte (6 ans d'observations, soit 258 événements), Guillot (1998) choisit une loi Gamma à 2 paramètres pour représenter les séries des hauteurs de pluie non nulles.

Dans le cadre de cette modélisation, on cherche une loi avec le moins de paramètres possibles. On ajuste une loi exponentielle aux échantillons, couramment utilisée en hydrométéorologie et déjà validée sur la zone AMMA-CATCH Niger (Lebel et al., 1997). On réalise un test de Kolmogorov pour

juger de la qualité de l'ajustement réalisé, décrit par Guillot (1998). Il s'agit de mesurer l'écart entre la distribution empirique pour un échantillon (x_1, \dots, x_n) de taille n et la distribution théorique :

$$D_n = \text{Sup}_i |F_n^*(x_i) - F(x_i)| \quad (\text{Équation 7})$$

Dans le cas où l'échantillon est tiré de la loi $F(x)$, cette distance D_n suit une loi de probabilité dite de Kolmogorov Smirnov à un paramètre égal au nombre n de données. Pour un seuil α fixé, on acceptera l'hypothèse H_0 (l'échantillon est issu de la loi F), si la distance D_n est inférieure aux valeurs $V_{1-\alpha,n}$ lues sur la table de Kolmogorov.

Le test calculé sur les 548 événements donne des résultats décevants. Au seuil de 10%, H_0 est rejetée pour 23 stations sur 30 pour une loi exponentielle, en gardant le même paramètre pour toutes les stations, pour 22 stations sur 30, en choisissant un paramètre différent pour chaque station. Le test est légèrement meilleur pour la loi gamma, 17 stations rejetées (1 même jeu de paramètres pour toutes les stations), 13 stations rejetées (un paramètre par station), pourtant le paramètre de forme trouvé pour toute la zone (0.94) indique une distribution proche de l'exponentielle.

Le Barbé et Lebel (1997) ayant montré que la hauteur de pluie par événement n'est pas stationnaire tout au long de la saison des pluies, on peut supposer que cette non-stationnarité influe sur la qualité des ajustements statistiques. En conséquence, on a restreint l'échantillon aux 308 événements des mois de juillet et août, ce qui améliore significativement les résultats pour l'ajustement de la loi exponentielle (Figure 10). H_0 est rejetée pour 6 stations sur 30 au seuil de 10% avec 1 paramètre par station, pour 10 stations sur 30 au seuil de 10% avec le même paramètre pour toute la zone. En ce qui concerne la loi gamma, H_0 est rejetée pour 10 stations sur 30 au seuil de 10% avec 1 jeu de paramètres par station, et pour 13 stations sur 30 avec le même jeu de paramètres pour toute la zone.

Dans les deux cas, le taux de rejet du test reste relativement élevé. Dans le cas où H_0 est vraie, on doit s'attendre à rejeter H_0 à tort une fois sur dix en moyenne, soit trois fois sur notre échantillon, ce qui est dépassé dans chaque cas. Plusieurs explications peuvent être proposées. La première est liée au fonctionnement du test d'hypothèses lui-même, dont le pouvoir de discrimination augmente avec le nombre de réalisations. La seconde est inhérente à la variable étudiée, que l'on a définie arbitrairement, et qui peut être entachée d'erreurs de mesure. La troisième est associée à la non-stationnarité des hauteurs de pluie par événement, que la restriction aux mois de juillet et août n'a pas complètement éliminée. Enfin, il n'y a aucune raison que la nature s'adapte exactement à un modèle statistique. Les résultats du test étant néanmoins meilleurs pour la loi exponentielle que pour la loi gamma, on pourra faire l'hypothèse par la suite que la loi exponentielle décrit assez bien la distribution des hauteurs de pluie événementielles enregistrées aux stations.

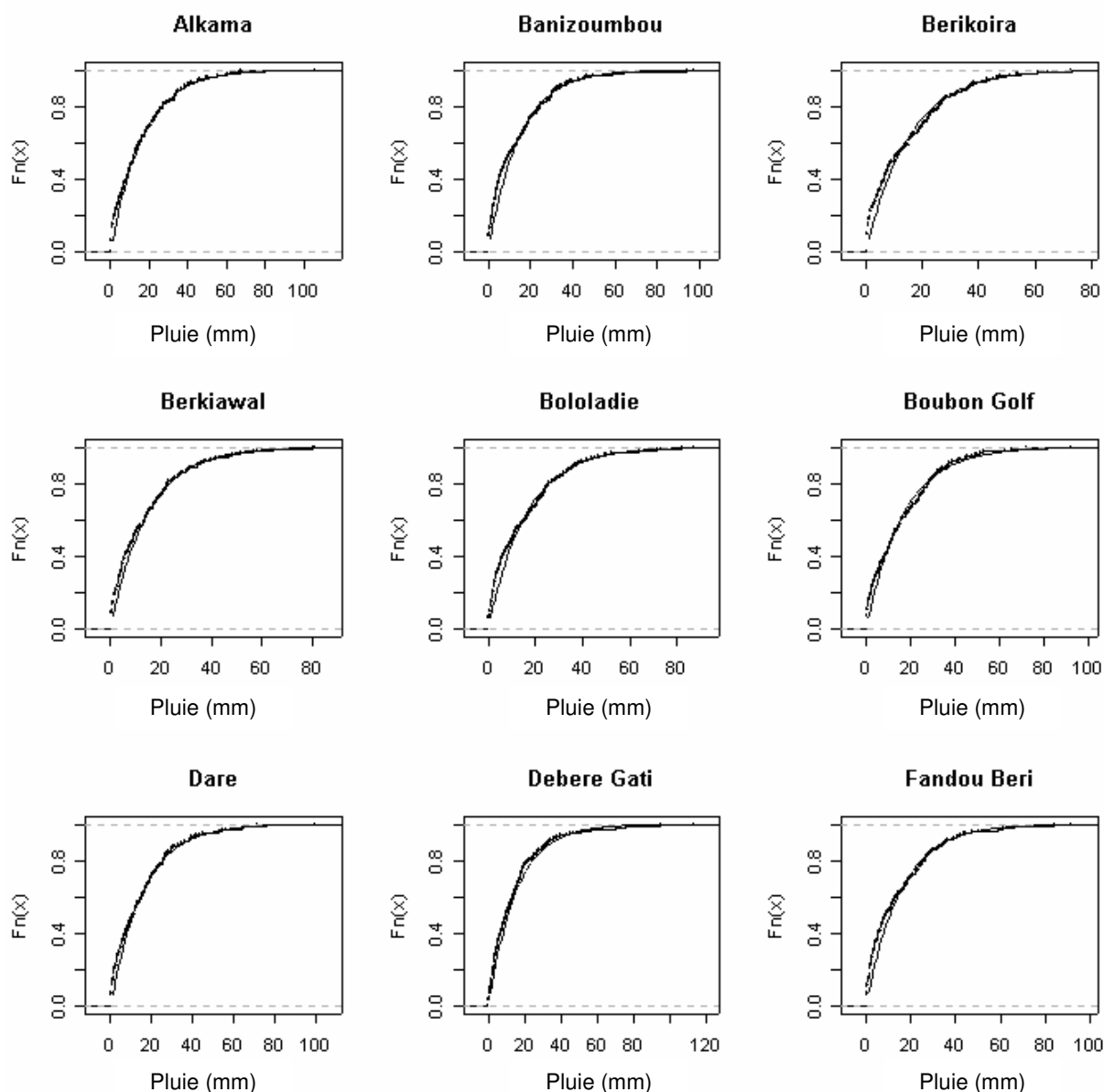


Figure 10 – Fonctions de répartition observées et ajustements exponentiels des séries de 308 événements AMMA-CATCH Niger (juillet et août 1990-2002) pour 9 stations AMMA-CATCH Niger.

Stationnarité spatiale des hauteurs de pluie moyennes par événement

La stationnarité temporelle des cumuls événementiels entre les périodes 1990-1995 et 1990-2002 a été mentionnée précédemment (Tableau 3). D'un point de vue spatial, la hauteur moyenne par événement, établie à partir des cumuls événementiels strictement supérieurs à zéro enregistrés à la station considérée de 1990 à 2002 (Figure 11), ne dépend pas de la position géographique de celle-ci ($R^2 = 0.06$) et peut être considérée comme stationnaire sur l'ensemble de la zone AMMA-CATCH Niger. Autrement dit, lors d'un événement pluvieux, il ne pleut pas plus abondamment au sud qu'au nord, et inversement. Comme il existe un gradient sud/nord de la pluie annuelle, ce résultat (sur lequel nous reviendrons plus loin) confirme que ce gradient est surtout lié au nombre d'événements pluvieux.

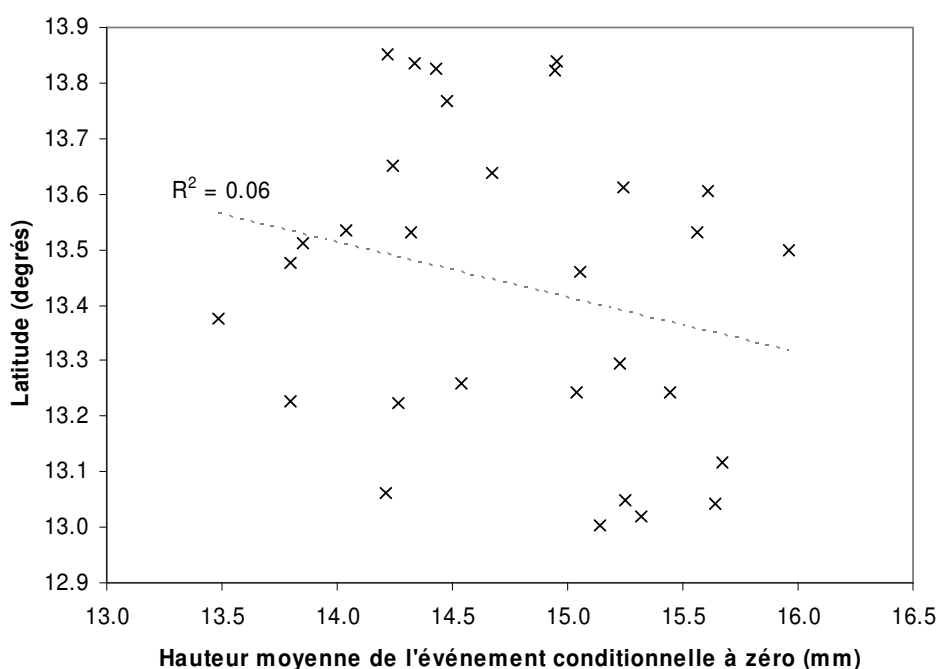


Figure 11 – Hauteur pluviométrique (conditionnelle à zéro) moyenne enregistrée en chacune des stations AMMA-CATCH Niger sur 548 événements (1990-2002).

Invariance dans la structure spatiale des champs de précipitation sahéliens

Ali et al. (2003) ont montré dans des travaux récents que la connaissance de la structure spatiale des champs de pluie à l'échelle de l'événement AMMA-CATCH Niger permettait de déterminer la structure spatiale des champs de pluie à des échelles temporelles supérieures (de l'échelle journalière à l'échelle saisonnière, voire interannuelle), uniquement en connaissant le nombre d'événements enregistrés pendant ladite période. La structure spatiale des champs de pluie à l'échelle de l'événement dépend de deux facteurs : la variabilité spatiale de la hauteur conditionnelle et l'intermittence spatiale, représentées par deux variogrammes. La structure spatiale des champs de pluie aux échelles supérieures est dérivée de ces deux variogrammes, en prenant en compte l'anisotropie et la non-stationnarité qui peuvent les affecter, qui sont deux invariants temporels du processus de la pluie.

Ces résultats soulignent le rôle fondamental de l'événement pluvieux, y compris pour travailler à des échelles supérieures, la pertinence de la définition des événements AMMA-CATCH Niger ainsi que la nécessité de modéliser ces événements quand des données à haute résolution sont indisponibles.

3.4. Modélisation des séries ponctuelles par la loi des fuites

Pour caractériser la distribution de la pluie au cours de la saison plus précisément qu'à partir des séries journalières, Le Barbé et Lebel (1997) ont proposé d'utiliser un modèle de type « processus poissonien

composé » permettant de désagréger une série de pluies journalières en une série d'événements pluvieux. Dans ce modèle, la pluie est représentée comme une succession d'événements pluvieux. La durée séparant le début de deux événements consécutifs est distribuée exponentiellement. La hauteur de pluie tombée lors d'un événement pluvieux suit elle aussi une loi exponentielle. La loi de distribution associée à ce processus est une loi des fuites (Babusiaux, 1969 ; Ribstein, 1983).

On propose dans cette section dans un premier temps d'appliquer le modèle de la loi des fuites aux séries de pluies journalières des 30 stations du réseau AMMA-CATCH Niger et dans un deuxième temps, de comparer les deux approches : définition directe de l'événement (événements « observés ») et passage par la loi des fuites (événements « modélisés »), de manière à valider ou infirmer le modèle de Le Barbé et Lebel (1997). Dans une partie ultérieure concernant la variabilité temporelle (chapitre 4), le modèle de la loi des fuites nous permettra d'analyser finement la période 1990-2002 sous forme de composites secs et humides.

Présentation du modèle de la loi des fuites et inférence de ses paramètres

L'application de la loi des fuites à la pluviométrie a fait l'objet de plusieurs travaux (Ribstein, 1983 ; Le Barbé et Lebel, 1997 ; Tapsoba, 1997 ; Tapsoba et al., 2002 ; Le Barbé et al., 2002). On se reportera à eux pour plus de détails théoriques, seuls quelques éléments de compréhension étant donnés ici.

La loi des fuites est un cas particulier des processus poissonniens composés, résultant de la distribution exponentielle des hauteurs de pluie par événement. L'analyse statistique des hauteurs de pluie réalisée en section 3.3 a montré qu'une loi exponentielle s'ajustait correctement à la distribution des hauteurs des événements des mois de juillet et d'août, du fait de leur relative stationnarité sur cette période. On peut donc supposer que la loi des fuites est appropriée à la modélisation du régime pluviométrique sahélien à partir des observations AMMA-CATCH Niger.

La loi des fuites est caractérisée par deux paramètres, s (hauteur pluviométrique moyenne par événement en mm) et λ (nombre moyen d'événements par jour).

La fonction de répartition (au non-dépassement) de la loi des fuites s'écrit ainsi :

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda} \times e^{-u} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\lambda^{i+1}}{(i+1)!} \sum_{j=0}^i \frac{u^j}{j!} \text{ avec } u = \frac{x}{s} \text{ (Équation 8)}$$

Les paramètres de la loi des fuites s et λ (hauteur moyenne par événement en mm et nombre moyen d'événements par jour) peuvent être déterminés par différentes méthodes (Ribstein, 1983). Le Barbé et Lebel (1997) optent pour la méthode suivante parce qu'elle présente les variances d'échantillonnage des paramètres les plus faibles pour cette taille d'échantillon :

$$\lambda = -\ln\left(\frac{n_0}{n}\right) \text{ (Équation 9)}$$

où n_0 est le nombre de séquences sèches observées de durée T et n le nombre total de séquences observées de durée T dans l'échantillon (le choix de l'intervalle de temps T minimum dépend des caractéristiques des pluies de la région considérée ; au Sahel, on pourra étudier les pluies sur une base journalière, soit T = 1 jour, Ribstein, 1983).

$$s = \frac{m_x}{\lambda} \quad (\text{Équation 10})$$

avec m_x la moyenne de l'échantillon.

L'inférence des paramètres repose sur l'hypothèse de stationnarité du processus. Or, à la vue du cycle saisonnier des pluies, il semble difficile de trouver une période où les pluies sont stationnaires et d'une longueur suffisante pour pouvoir ajuster le modèle de la loi des fuites. On fait l'hypothèse que les pluies peuvent être considérées comme relativement stationnaires sur une fenêtre de 11 jours. On évalue les paramètres de la loi des fuites pour le jour J à l'aide d'une fenêtre de J-5 à J+5 pour les 13 années (soit 143 observations), puis on fait glisser la fenêtre pour évaluer les paramètres au jour J+1. Les paramètres journaliers sont ensuite moyennés par mois, de juin à septembre.

Pertinence des paramètres obtenus

Les paramètres s et λ (hauteur moyenne par événement en mm et nombre moyen d'événement par jour) sont estimés pour les 30 séries de pluies journalières seuillées à 1 mm (≥ 1 mm) par la méthode utilisant le rapport entre le nombre d'observations nulles et le nombre d'observations totales. Le seuil de 1 mm a été choisi après plusieurs tests de sensibilité de seuils de 0.5 mm à 5 mm. Le seuil de 0.5 mm, en réalité le minimum enregistré par le pluviographe à augets, induisait une forte dispersion des paramètres calculés avec différentes méthodes de détermination. Le seuil de 1 mm était le premier à partir duquel les écarts entre les paramètres déterminés par des méthodes différentes étaient insignifiants au vu de l'intervalle de confiance de 90%.

La question posée par cette description du régime pluviométrique à partir des paramètres de la loi des fuites est bien évidemment celle de sa validation. Comme on dispose de données pluviographiques sur l'observatoire AMMA-CATCH Niger, on peut définir objectivement les événements pluvieux en chaque station à l'aide de critères traditionnels : seuil de pluie minimal, fixé ici à 1 mm, et durée d'interruption de la pluie, devant ici dépasser 30 minutes pour marquer la fin de l'événement en cours. On obtient ainsi pour chaque station et chaque mois un couple de valeurs – pluie moyenne par événement et nombre moyen d'événements par mois – estimées d'une part à partir de la loi des fuites, et d'autre part calculées sur la série des événements aux stations. Les caractéristiques des événements définis à la station moyennées sur toute la saison des pluies (de juin à septembre) sont proches de celles des paramètres de la loi des fuites, respectivement 11.2 mm et 0.33 événement par jour, 11.6 mm et 0.32 événement par jour. Le Tableau 4 montre la bonne adéquation entre ces deux séries, moyennées mois par mois sur l'ensemble des 30 stations. Le rôle clé du nombre d'événements dans

l'évolution de la saison des pluies apparaît dans les observations (événements définis à la station) et dans les paramètres estimés. En comparant l'évolution des caractéristiques des événements observés (et des paramètres estimés) de juin à septembre, on s'aperçoit effectivement que le cycle saisonnier est régi essentiellement par l'évolution du nombre d'événements pluvieux (paramètre λ), de 0.24 au mois de juin à 0.45 au mois d'août (de 0.21 à 0.47), alors que la hauteur moyenne par événement (paramètre s) semble moins fluctuer, 10.2 mm en juin à 12.4 mm en août (11 mm et 12.5 mm, cette différence n'étant pas significative au vu des intervalles de confiance à 90% indiqués). En particulier, les hauteurs par événement aux mois de juillet et d'août peuvent être considérées comme à peu près stationnaires, ce qui justifie a posteriori notre choix dans la section 3.3 concernant l'ajustement exponentiel des événements.

Le Tableau 4 indique également les paramètres directement issus de la pluie journalière. Par comparaison, l'approche simplifiée consistant à assimiler la pluie journalière à la pluie d'un événement pluvieux induit un biais, en assimilant plusieurs événements pluvieux par jour ou au contraire en les découpant en deux. Le signal sur le nombre de jours pluvieux se lit moins sur les caractéristiques des pluies journalières, avec un nombre de jours pluvieux variant de 0.19 en juin à 0.36 en août, bien plus faible que les nombres d'événements (observés ou modélisés) et une évolution parallèle en terme de cycle saisonnier pour la hauteur pluviométrique, de 12.5 mm à 15.4 mm. La déduction directe des caractéristiques (nombre de jours pluvieux et hauteur moyenne journalière) à partir des pluies journalières conduit à une surestimation des hauteurs moyennes par événement de 15 à 20% et à une sous-estimation des taux d'occurrence dans les mêmes proportions.

		juin	juillet	août	septembre
Paramètres	λ	0.21 ± 0.03	0.36 ± 0.05	0.47 ± 0.05	0.26 ± 0.04
loi des fuites	s (mm)	11.0 ± 1.8	12.2 ± 1.6	12.5 ± 1.4	10.9 ± 1.6
Événements à la station	nombre par jour	0.24 (0.03)	0.34 (0.03)	0.45 (0.04)	0.27 (0.03)
	hauteur (mm)	10.2 (1.2)	12.1 (0.9)	12.4 (0.8)	10.2 (1.0)
Pluies journalières	nombre par jour	0.19 (0.02)	0.29 (0.02)	0.36 (0.02)	0.21 (0.02)
	hauteur (mm)	12.5 (1.4)	14.4 (0.9)	15.4 (0.9)	12.9 (1.3)

Tableau 4 – Nombre moyen d'événements pluvieux par jour et hauteur de pluie moyenne par événement (moyennés par mois, sur les 30 stations AMMA-CATCH, sur la période 1990-2002), issus du modèle de la loi des fuites (encadrés par un intervalle de confiance de 90%) ou des observations (événements définis à la station, pluies journalières, écarts-types indiqués entre parenthèses).

La similitude des paramètres de la loi des fuites avec les statistiques calculées directement sur les événements (définis à la station) ne signifie pas que l'on retrouve, à l'aide de la loi des fuites, exactement les caractéristiques des événements définis en chaque station, dont la sensibilité vis-à-vis du critère de durée est non négligeable et la définition subjective. Néanmoins, la loi des fuites permet de construire à partir des pluies journalières des « objets » représentant la variabilité du régime

pluviométrique avec plus de pertinence, du moins d'un point de vue temporel. La section 3.5 examinera ce qu'il en est du point de vue spatial.

On peut confronter les caractéristiques des trois objets pluvieux étudiés précédemment avec celles des événements AMMA-CATCH Niger, définis spatialement. Le Tableau 5 donne deux types de caractéristiques des événements pluvieux AMMA-CATCH Niger, déjà décrites dans la section 3.3 :

- Les caractéristiques « conditionnelles à zéro », \bar{H}^* (hauteur moyenne par événement) et \bar{n} (nombre moyen d'événements par jour), sont établies à partir de cumuls pluvieux strictement supérieurs à zéro. Ces dernières, bien que décrivant des événements organisés spatialement, s'apparentent davantage aux caractéristiques ponctuelles décrites précédemment. Si l'on prend l'exemple du mois d'août : une station de l'observatoire enregistre en moyenne de la pluie provenant de 9.9 événements, d'une hauteur moyenne de 16.2 mm.
- Les caractéristiques « non conditionnelles », \bar{H} (hauteur moyenne par événement) et \bar{N} (nombre moyen d'événements par jour) sont moyennées sur l'observatoire en prenant en compte les zéros et l'intermittence spatiale F_0 précise le pourcentage moyen de cumuls nuls. Reprenons l'exemple précédent : au mois d'août, une station voit passer en moyenne 13 événements (9.9 événements l'arrosent, les autres non), d'une hauteur moyenne de 12.5 mm (en prenant en compte les 3.1 événements non pluvieux en cette station).

En terme de cumul pluvieux moyen (nombre d'événements x hauteur par événement), les événements AMMA-CATCH Niger apportent 86% du cumul moyen enregistré de juin à septembre, alors que les trois représentations ponctuelles des événements pluvieux (événements définis à la station, paramètres de la loi des fuites, pluies journalières) apportent respectivement 96%, 99.5% et 95% du cumul moyen enregistré entre juin et septembre (475 mm pour la période 1990-2002). Les orages localisés ne sont pas pris en compte dans le cas des événements AMMA-CATCH Niger, comme il s'agit d'événements organisés d'un point de vue spatial. Ceci aboutit à des statistiques d'occurrence plus faible que les événements définis ponctuellement, mais de hauteur plus forte, en ce qui concerne les caractéristiques conditionnelles à zéro. Du coup, ces valeurs sont plus proches de celles calculées directement sur les pluies journalières. Cette coïncidence ne doit pas faire perdre de vue que ces deux objets sont deux représentations complètement différentes de la pluie.

On note par ailleurs qu'il y a plus de jours de pluie que d'événements AMMA-CATCH Niger (concernant les caractéristiques conditionnelles à zéro, soit \bar{n}) : en moyenne, les événements pluvieux associés aux gros systèmes convectifs sont coupés sur deux jours. Quant au nombre d'événements pluvieux issus de la modélisation, il est toujours supérieur au nombre de jours pluvieux. Il semblerait que le modèle de la loi des fuites aille chercher des échelles inférieures à la journée, pour satisfaire la condition de distribution exponentielle des durées inter-événements. Donc l'événement semble plutôt correspondre à une averse qu'à un système convectif.

Si le modèle de la loi des fuites donne des résultats très satisfaisants en terme de modélisation des événements définis à la station, la question d'une passerelle entre pluies journalières et événements AMMA-CATCH Niger reste ouverte.

	juin	juillet	août	septembre
\bar{n} (par jour)	0.15 (0.02)	0.24 (0.02)	0.32 (0.02)	0.17 (0.02)
\bar{H}^* (mm)	14.1 (1.6)	15.3 (1.0)	16.2 (1.0)	13.8 (1.4)
\bar{N} (par jour)	0.23 (0.01)	0.33 (0.01)	0.42 (0.01)	0.23 (0)
\bar{H} (mm)	9.3 (1.7)	11.1 (1.2)	12.5 (1.1)	10.3 (1.4)
F_0	0.34	0.27	0.23	0.26

Tableau 5 – Caractéristiques mensuelles des événements AMMA-CATCH Niger, moyennées sur les 30 stations et sur la période 1990-2002 (les écarts-types sont indiqués entre parenthèses).

Validation du modèle de la loi des fuites à des échelles temporelles supérieures (upscaling)

Afin de tester la qualité de l'ajustement du modèle de la loi des fuites, on compare pour chacune des 30 stations la distribution observée des pluies journalières et la distribution de la loi des fuites avec les paramètres ajustés, encadrée par un intervalle de confiance à 90%, mois par mois. La Figure 12 illustre les différents types d'ajustements obtenus pour le mois d'août : en haut, un bon ajustement (pas d'observations hors de l'intervalle de confiance), qui concerne 6 stations sur 30, au milieu, un ajustement correct (une ou deux observations hors de l'intervalle), pour 21 stations sur 30, et en bas, un ajustement médiocre (plus de deux observations hors de l'intervalle), qui concerne 3 stations sur les 30 observées.

Une fois le modèle calibré pour une période de temps T (ici $T = 1$ jour) avec des paramètres s et λ , la loi des fuites peut être conservée pour étudier le régime des pluies à des pas de temps supérieurs. La distribution des cumuls pluviométriques cumulés sur $k \times T$ suit encore une loi des fuites, de paramètres s et $k \times \lambda$. Ainsi, les pluies décadaires suivent une loi des fuites de paramètres s et $\lambda' = 10 \times \lambda$.

On compare, mois par mois et en chacune des 30 stations, la distribution observée des pluies décadaires à la distribution de la loi des fuites de paramètres s et $\lambda' = 10 \times \lambda$, s et λ ayant été calés sur les séries de pluies journalières. La Figure 13 illustre la qualité variable des ajustements pour le mois d'août : en haut, un bon ajustement (pas d'observations hors de l'intervalle de confiance), qui concerne 15 stations sur 30, au milieu, un ajustement correct (une ou deux observations hors de l'intervalle), pour 14 stations sur 30, en bas, un ajustement médiocre (plus de deux observations en dehors), pour 1 station sur 30.

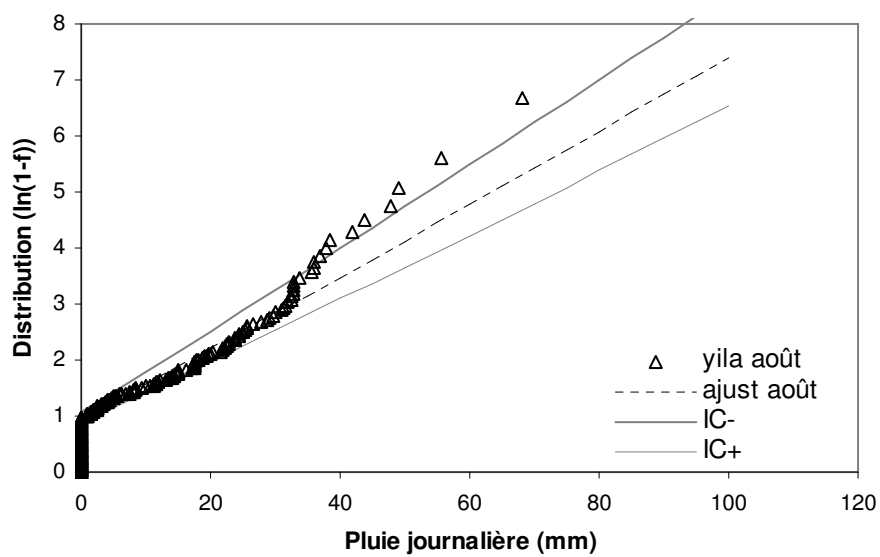
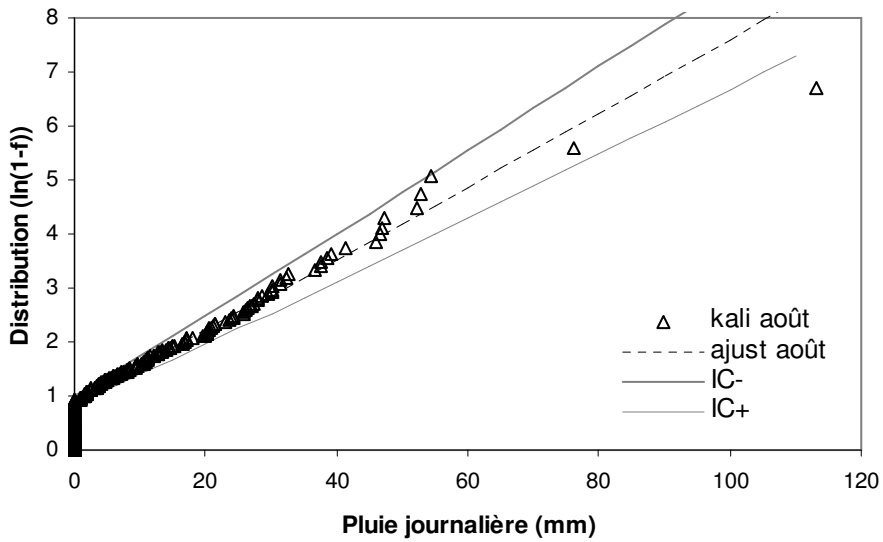
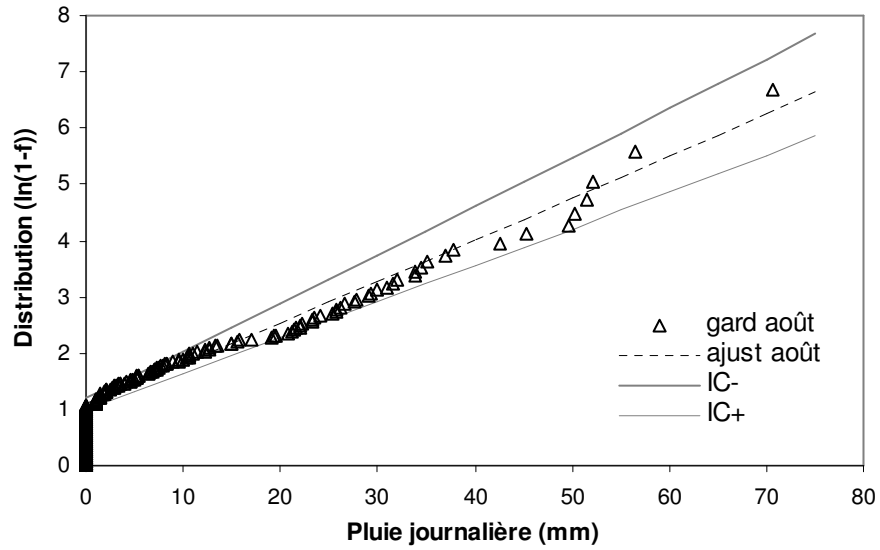


Figure 12 – Distributions observées des pluies journalières seuillées à 1 mm de 3 stations AMMA-CATCH Niger (1990-2002) et ajustement par la loi des fuites.

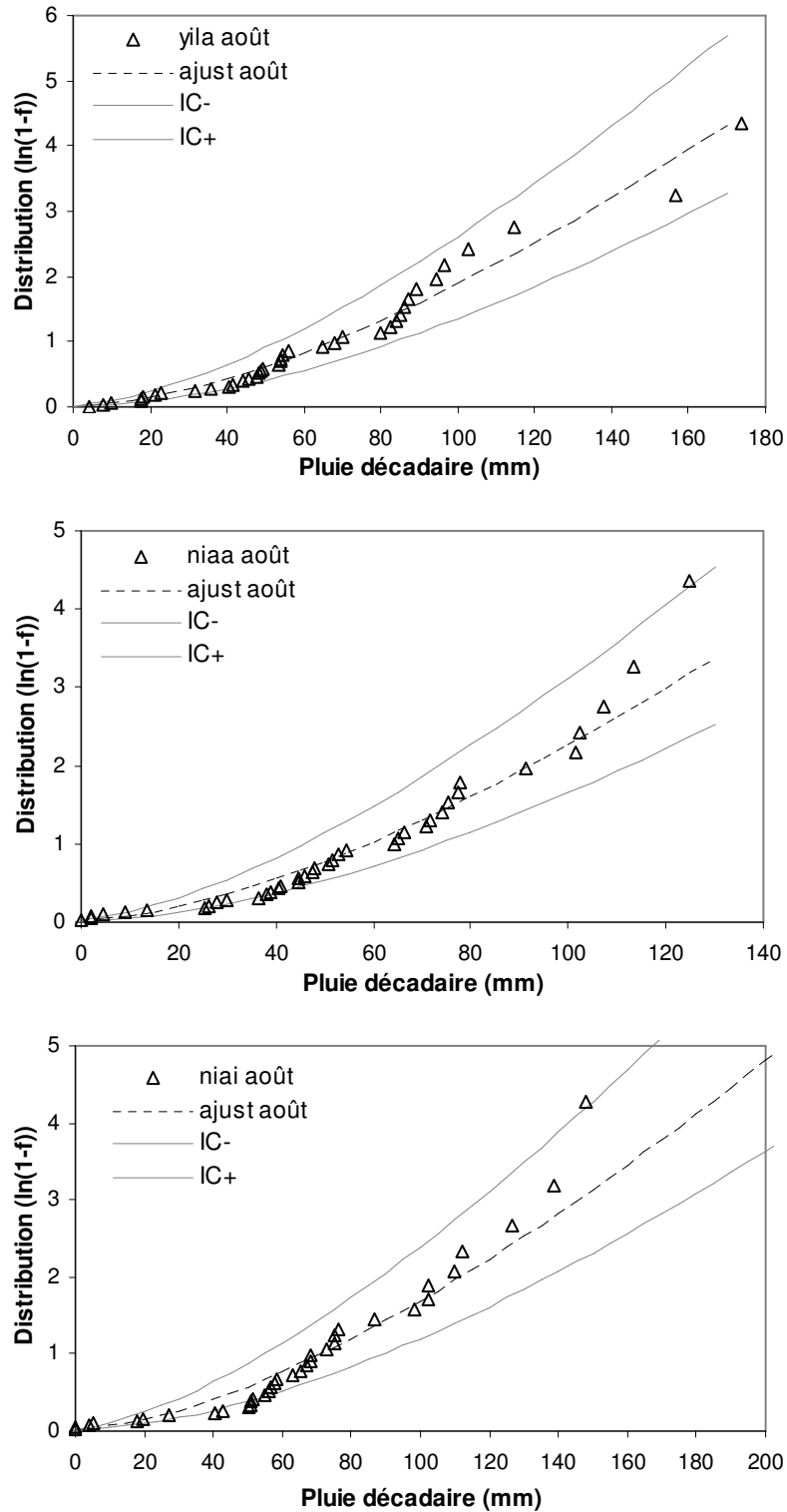


Figure 13 – Distributions observées des pluies décadaires ($N=6 \times 13$, 6 décades, 13 années) et distribution de la loi des fuites avec les paramètres calibrés sur les séries de pluies journalières

On peut réitérer l'expérience aux pas de temps mensuels. On compare, mois par mois et en chacune des 30 stations, la distribution observée des pluies mensuelles à la distribution de la loi des fuites de paramètres $\lambda' = 30 \times \lambda$ ou $\lambda' = 31 \times \lambda$ et s , λ et s ayant été calés sur les séries de pluies journalières.

La Figure 14 illustre la qualité changeante des ajustements pour le mois d'août : en haut, un bon ajustement (pas d'observations hors de l'intervalle de confiance), qui concerne 20 stations sur 30, au milieu, un ajustement correct (une ou deux observations hors de l'intervalle), pour 9 stations sur 30, en bas, un ajustement médiocre concernant 1 station sur 30 (au moins deux observations hors de l'intervalle).

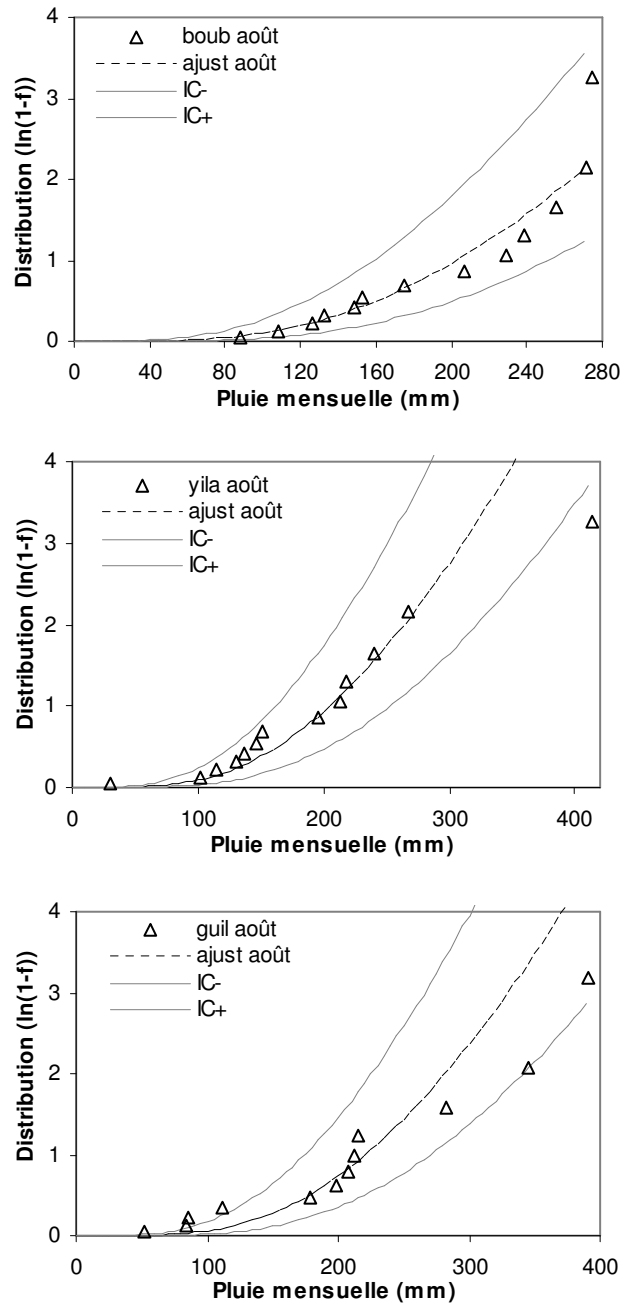


Figure 14 – Distributions observées des séries de pluies mensuelles et distribution de la loi des fuites, paramètres calibrés sur les séries des pluies journalières.

Les Tableau 6 et Tableau 7 récapitulent la qualité des ajustements au pas de temps décadaire et mensuel pour les quatre mois étudiés. Les résultats sont moins probants pour les mois de juin et septembre au pas de temps mensuel. On peut supposer que les intervalles de confiance sont moins significatifs avec de faibles valeurs de λ . Pour les autres cas, les résultats sont vraiment satisfaisants, même s'il faut nuancer cette conclusion à l'échelle mensuelle, dont les ajustements ne comprennent que 13 points.

	juin	juillet	août	septembre
Bon	18	17	15	18
Correct	11	13	14	8
Médiocre	1	0	1	4

Tableau 6 – Qualité des ajustements au pas de temps décadaire

	juin	juillet	août	septembre
Bon	12	15	20	11
Correct	11	14	9	11
Médiocre	7	1	1	8

Tableau 7 – Qualité des ajustements au pas de temps mensuel

Globalement le modèle ajusté supporte bien le passage à des échelles de temps supérieures (ou « upscaling ») dès lors que l'on respecte à peu près la stationnarité en travaillant mois par mois. La similarité des distributions observées et ajustées constitue une bonne validation du modèle présenté ici. Il est possible d'utiliser un unique modèle à deux paramètres pour décrire la distribution des pluies sahéniennes de l'échelle journalière à l'échelle mensuelle.

3.5. Analyse spatiale des paramètres de la loi des fuites

La Figure 15 présente la dispersion des couples de paramètres mensuels s et λ (ajustés aux 30 séries AMMA-CATCH Niger) autour des valeurs moyennées sur l'observatoire et indiquées dans le Tableau 4. Bien que ces valeurs spatialisées soient relativement significatives au vu des intervalles de confiance encadrant chaque valeur de paramètre, on dénote une certaine variabilité spatiale des paramètres de la loi des fuites. En ce qui concerne les hauteurs moyennes par événement (paramètres s), elles paraissent plus resserrées autour des valeurs moyennes en juillet et en août, en période de mousson établie. D'un mois à l'autre, on ne relève pas d'organisation particulière des paramètres s . Les nombres moyens d'événements (paramètres λ), quant à eux, paraissent plus organisés dans l'espace : les mêmes stations paraissent d'un mois à l'autre être plutôt supérieures (ou inférieures) à la moyenne spatialisée. Toutefois, ces conclusions sont légèrement faussées par l'effet de compensation

qui se joue à l'intérieur des couples de paramètres, puisque le paramètre s est déterminé en fonction du cumul et du paramètre λ .

Un des intérêts de la loi des fuites est que ses deux paramètres ont une signification physique – nous avons pu d'ailleurs les comparer directement aux observations. Sur la Figure 16, où sont cartographiés les paramètres s et λ moyennés par mois, de juin à septembre, on s'aperçoit que le paramètre s , soit la hauteur de pluie par événement, paraît assez stationnaire dans l'espace (les variations de s ne sont pas significatives vis-à-vis de l'intervalle de confiance des estimations à 90%, donné dans Le Barbé et Lebel, 1997) et ne co-fluctue pas avec la latitude (les coefficients de corrélation R^2 valent 0.103, 0.0000004, 0.006, 0.003, de juin à septembre). Par contre, on repère un gradient nord/sud sur la carte du paramètre λ , soit le nombre d'événements par jour, confirmé par le calcul des coefficients de corrélation avec la latitude ($R^2 = 0.71, 0.56, 0.59, 0.72$). Les variations du paramètre λ sont significatives vis-à-vis de l'intervalle de confiance des estimations à 90%. Les paramètres de la loi des fuites, déterminés à partir des séries de pluies journalières, résument bien l'information obtenue en étudiant les événements pluvieux observés, définis à partir de séries ponctuelles ou spatialisées. L'intensité des événements ne varie pas en fonction de la position géographique de la station, par contre, une station située au sud de l'observatoire reçoit plus d'événements (dans le cas d'événements définis ponctuellement) ou est plus souvent arrosée (dans le cas d'événements spatialisés AMMA-CATCH Niger, c'est l'intermittence spatiale qui entre alors en jeu) qu'une station située au nord.

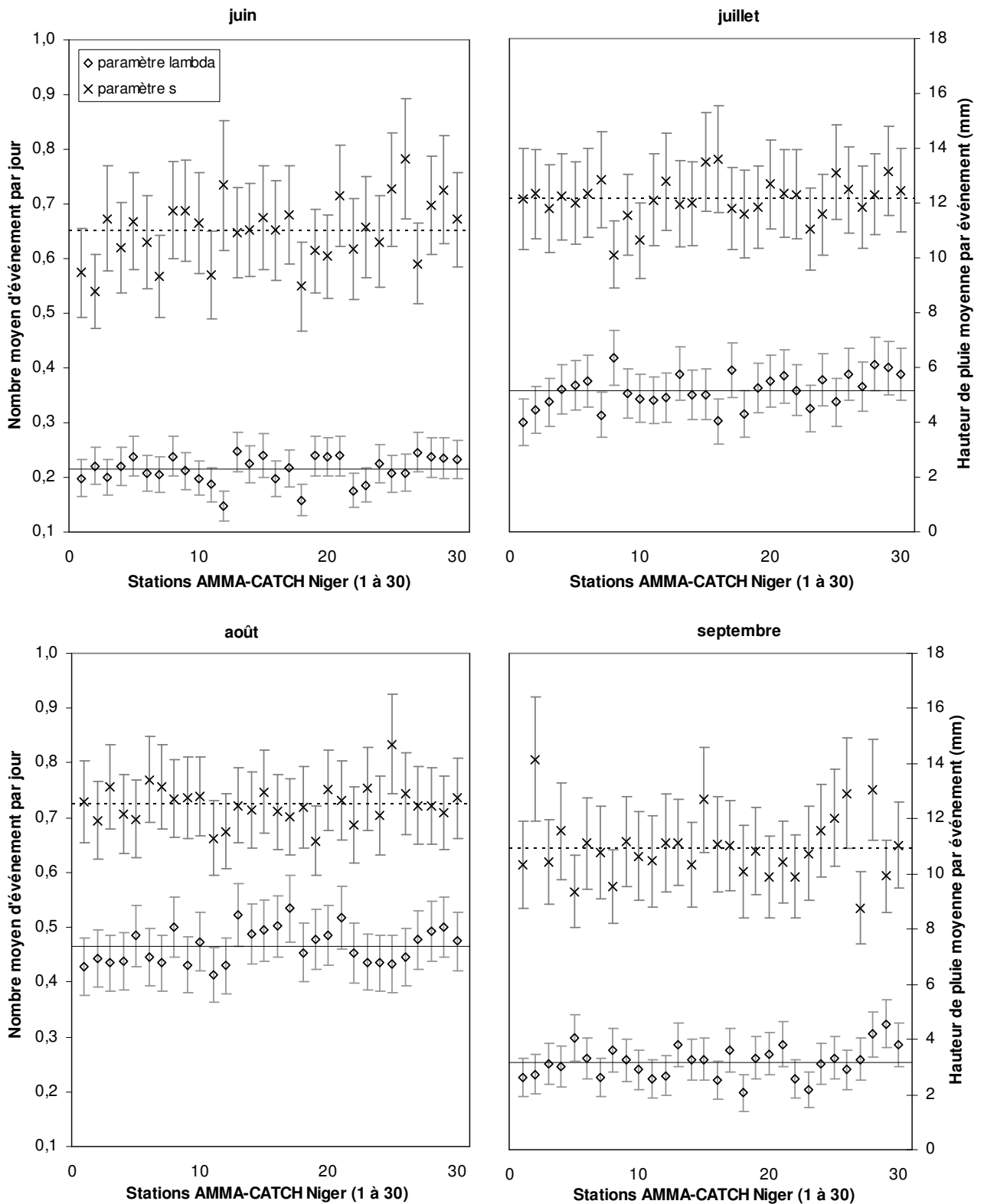


Figure 15 – Moyennes mensuelles des paramètres λ (losange, axe de gauche) et s (croix, axe de droite, en mm) de la loi des fuites estimés à partir des 30 séries de pluies journalières de 1990 à 2002 de l’observatoire, encadrées par un intervalle de confiance à 90%.

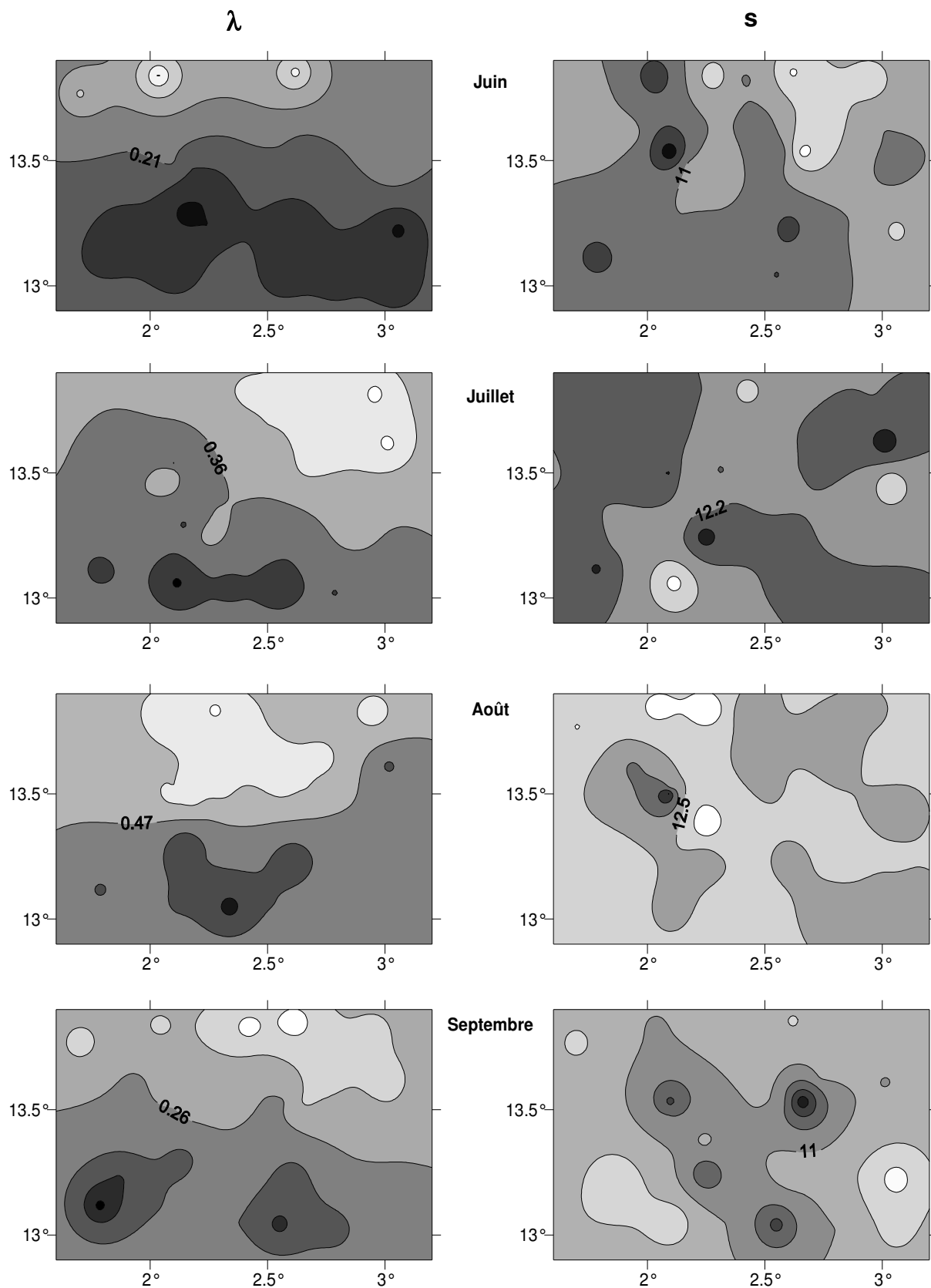


Figure 16 – Paramètres λ (à gauche) et s (à droite) de la loi des fuites, ajustés aux séries des pluies journalières seuillées à 1 mm des 30 stations du réseau AMMA-CATCH Niger (fenêtre glissante de 11 jours x 13 années, soit 143 observations) puis moyennés par mois. Les chiffres indiqués représentent la moyenne des paramètres sur l'observatoire. Les contours sont espacés de la moitié de l'intervalle de confiance à 90% mensuel moyen (indiqué dans le Tableau 4 : de 0.015 à 0.025 pour λ , de 0.7 à 0.9 pour s).

3.6. Cycle saisonnier à l'échelle de l'événement pluvieux

La section 1.2 présentait le cycle saisonnier moyen des pluies à Niamey pour la période 1970-2000. Les observations AMMA-CATCH Niger permettent d'examiner l'évolution des pluies au cours de la saison sous deux angles différents : d'une part, l'évolution du nombre d'événements pluvieux et, d'autre part, l'évolution de la hauteur de pluie moyenne par événement, dissociant ainsi fréquence d'occurrence et intensité des événements pluvieux. Détecter la manière dont ces deux paramètres évoluent peut améliorer la compréhension des mécanismes atmosphériques mis en jeu au cours de la saison des pluies. La section 3.6 est organisée comme suit : on s'intéresse d'abord au cycle saisonnier des hauteurs de pluie enregistrées à la station au passage des événements AMMA-CATCH Niger, affranchi de l'influence du nombre d'événements et de l'intermittence spatiale. On observe ensuite le cycle saisonnier des paramètres de la loi des fuites, et enfin, on examine le cycle saisonnier du nombre d'événements AMMA-CATCH Niger et celui des pluies spatialisées sur l'observatoire.

Cycle saisonnier des séries ponctuelles

Le cycle saisonnier des hauteurs de pluie par événement AMMA-CATCH Niger est influencé par deux paramètres : le nombre d'événements pluvieux et l'intermittence spatiale F_0 (pourcentage moyen de cumuls nuls). Le cycle saisonnier du nombre d'événements pluvieux étant très marqué, ce signal prédomine sur l'évolution de la hauteur par événement et on ne peut discerner si les événements AMMA-CATCH Niger sont plus intenses en période de mousson établie ou simplement plus nombreux. De même, le deuxième paramètre, l'intermittence spatiale, a tendance à faire augmenter la hauteur de pluie moyenne par événement AMMA-CATCH Niger au cœur de la saison, puisque les événements ont tendance à toucher plus de stations quand la mousson est bien établie. Afin de se défaire de l'influence de ces deux paramètres, on utilise les hauteurs conditionnelles à zéro enregistrées en chaque station au passage d'un événement AMMA-CATCH Niger et on moyenne celles-ci sur un nombre constant d'événements (ici 31). Le cycle saisonnier de la hauteur de pluie par événement obtenu ainsi est représenté Figure 17 pour quatre stations, alignées le long d'un transect nord sud situé à 2.7°E: Yiladde (13.02°N), Koure Sud (13.24°N), Banizoumbou (13.53°N), Kokorbe Fandou (13.85°N). Les hauteurs de pluie par événement en une station donnée sont très bruitées tout au long de la saison des pluies. Les hauteurs fluctuent également beaucoup entre les stations pour une même date (entre 4 mm de différence en août à plus de 10 mm en juin). Les hauteurs par événement restent néanmoins confinées dans une bande située entre 10 à 20 mm, exceptés deux extrêmes à 7 et 24 mm. En tous cas, on ne perçoit pas d'organisation zonale significative (avec des hauteurs croissantes en allant vers le sud par exemple), excepté peut-être pour la station de Kokorbe Fandou (koko), situé le plus au nord du transect. On peut supposer que la mousson est moins bien établie pour la zone située le plus au nord et que l'évolution saisonnière des hauteurs événementielles reste visible.

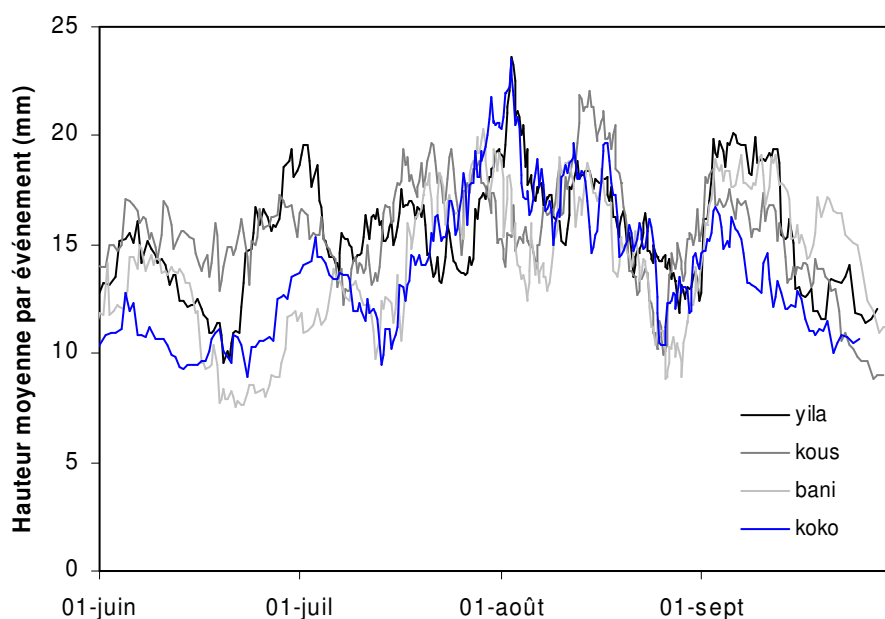


Figure 17 – Cycle saisonnier des hauteurs moyennes de pluie par événement AMMA-CATCH Niger (fenêtre glissante sur 31 événements) enregistrées en 4 stations alignées le long d’un transect sud nord à 2.7°E : Yiladde (13.02°N), Koure Sud (13.24°N), Banizoumbou (13.53°N), Kokorbe Fandou (13.85°N)

Cycle saisonnier des paramètres de la loi des fuites

Le cycle saisonnier moyen des paramètres de la loi des fuites estimés sur une fenêtre glissante de 11 jours pour la période 1990-2002 est représenté Figure 18 pour la station de Niamey Aéroport, de juin à septembre. On retrouve le fort caractère saisonnier de l’évolution du paramètre λ (nombre d’événements par jour) – déjà relevé dans le Tableau 4 – mais l’élément le plus frappant sur le cycle saisonnier du paramètre λ est la baisse prononcée du nombre d’événements pluvieux entre le 8 et le 15 août. Cette brusque diminution a déjà été décelée sur le cycle saisonnier des pluies à Niamey pour la période 1970-2000 (Figure 5). On peut s’interroger sur la nature de cette diminution des pluies en pleine mousson établie. Cette baisse est-elle aussi présente sur les cycles saisonniers des paramètres des autres stations de la période 1990-2002 (Figure 19) ? Sur le cycle saisonnier du paramètre λ de la station de Niamey représenté sur une période plus longue (Figure 20) ?

Le paramètre s (hauteur de pluie moyenne par événement), quant à lui, reste confiné au sein d’une enveloppe comprise entre 7 et 15 mm tout au long de la saison des pluies. Le paramètre s oscille relativement périodiquement en juin et juillet entre 8 et 13 mm, puis atteint un palier autour de 14 mm en août. Ce dernier est suivi d’une diminution du paramètre s à 9 mm, qui coïncide avec le deuxième pic du cycle saisonnier du paramètre λ .

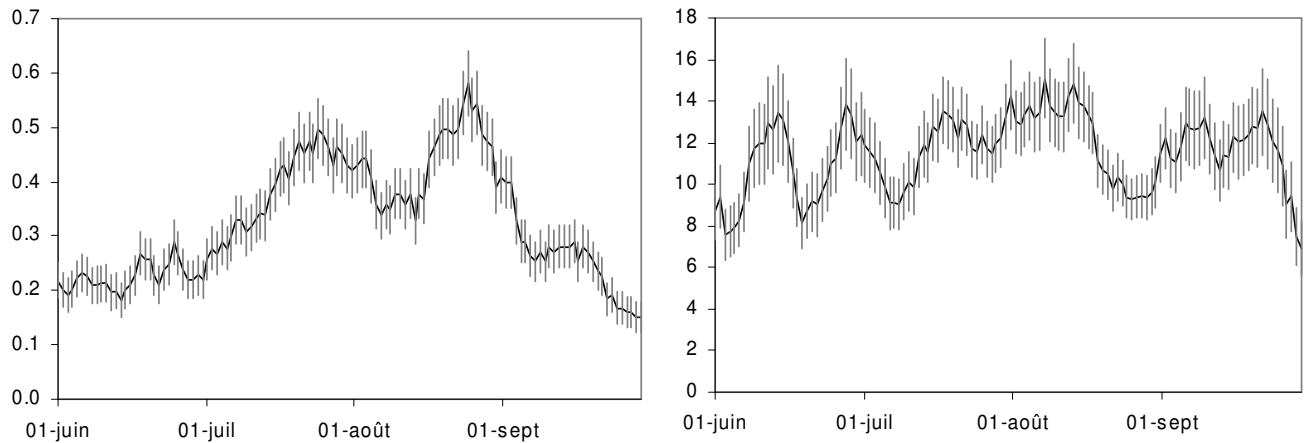


Figure 18 – Cycle saisonnier des paramètres λ (à gauche) et s (à droite) de la loi des fuites pour la station de Niamey Aéroport (1990-2002), encadrés par un intervalle de confiance à 90%.

Utilisant le même transect de stations que celui de la Figure 17, la Figure 19 représente l'évolution saisonnière des paramètres de la loi des fuites déterminées en ces 4 stations. Les cycles saisonniers des paramètres présentés ici ont la même allure que ceux des paramètres de la station de Niamey. La diminution du paramètre λ se retrouve sur les quatre cycles saisonniers, légèrement décalée dans le temps. Par contre, le pic atteint fin août par les paramètres λ est simultanément pour les quatre stations et contrebalancé par un creux des paramètres s .

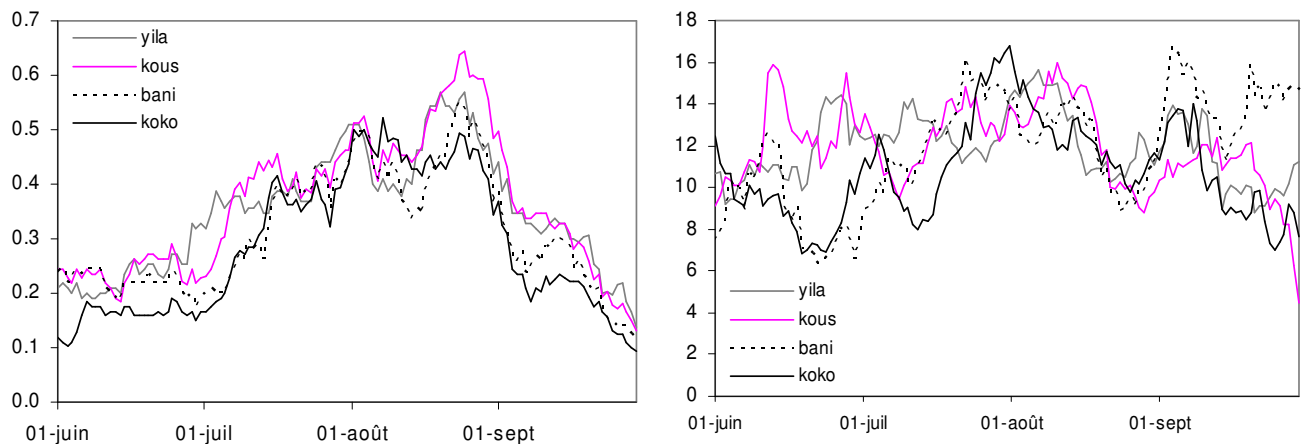


Figure 19 – Cycle saisonnier des paramètres λ (à gauche) et s (à droite) de la loi des fuites déterminées pour 4 stations alignées le long d'un transect sud nord à 2.7°E : Yiladde (13.02°N), Koure Sud (13.24°N), Banizoumbou (13.53°N), Kokorbe Fandou (13.85°N)

On revient à la longue série de Niamey Aéroport de 1970-2002, supposée plus homogène que les séries AMMA-CATCH Niger de 1990-2002, pour observer si les oscillations des paramètres deviennent moins importantes. Le cycle saisonnier des paramètres de la loi des fuites de cette série est illustré par la Figure 20. Le creux observé sur le cycle saisonnier du paramètre λ reste bien marqué. Il est centré sur le 12 août, date qui coïncide avec l'affaiblissement de l'activité convective sur le Sahel observé à l'échelle régionale par Sultan (2002). Par contre, l'opposition de comportement des deux paramètres fin août paraît moins flagrante. Le paramètre s est borné entre 9 et 13 mm, ce qui est plus resserré que pour les séries précédentes.

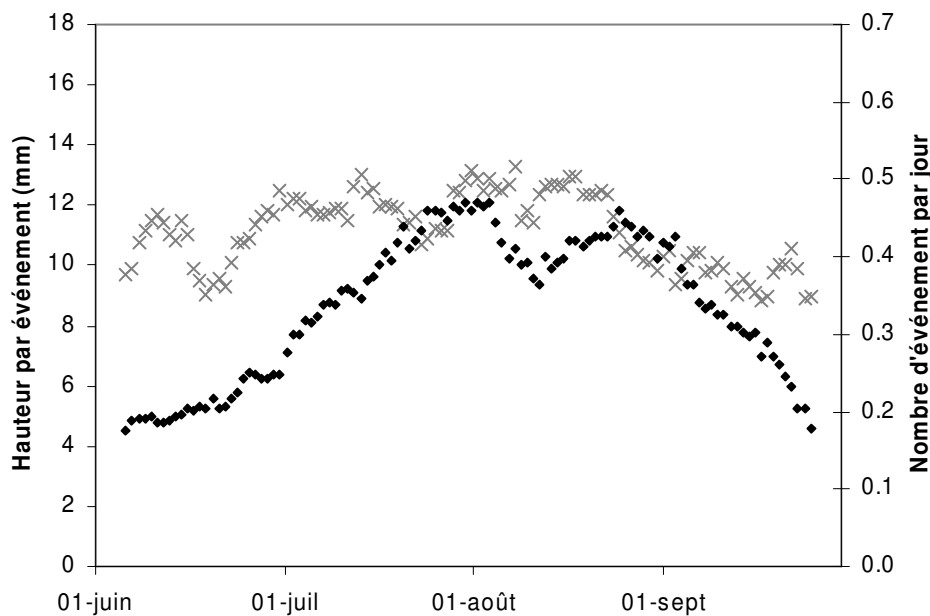


Figure 20 – Cycle saisonnier des paramètres λ (losange) et s (croix) de la loi des fuites de Niamey Aéroport sur la période 1970-2002.

Cycle saisonnier des pluies spatialisées

La Figure 21 compare le cycle saisonnier des pluies moyennées sur l'observatoire de 1990 à 2002 et celui du nombre d'événements pluvieux AMMA-CATCH NIGER sur la même période. Pour les deux cycles, la valeur affectée au jour J est une moyenne des valeurs journalières de $J-5$ à $J+5$ (fenêtre glissante de 11 jours). Les deux cycles saisonniers présentent beaucoup de similarités. La succession de paliers et de sauts brusques remarquée sur le cycle saisonnier des pluies à Niamey de 1970 à 2000 se retrouve ici sur les deux cycles. Une première brusque augmentation survient autour du 14 mai – « preonset » d'après Sultan et Janicot (2003) – suivie d'une seconde autour du 30 juin – quelques jours après la date moyenne de mise en place de la mousson donnée par Sultan et Janicot (2003). Ce léger décalage temporel, du même ordre de grandeur que l'écart-type donné par Sultan et Janicot (2003), peut ne pas sembler significatif. Il se retrouve néanmoins à chaque fois que l'on compare les cycles

saisonniers de composites d'années « sèches » et « humides » (au cœur de la période 1990-2002 dans la section 4.1 ou en confrontant 1950-1969 et 1970-1989 dans la section 4.2). Entre mi-juillet et fin août, un écart se creuse entre les deux cycles saisonniers, le nombre d'événements subit un creux mi-août – déjà observé précédemment – qui ne se répercute pas sur la pluie moyenne journalière, sûrement compensé par des événements certes moindres mais de plus forte intensité en cette période de mousson établie. On voit bien la difficulté que l'on rencontre quand on cherche à dissocier dans l'évolution saisonnière des pluies journalières l'effet dû à l'évolution du nombre d'événements et l'effet dû à l'évolution de la hauteur de pluie par événement.

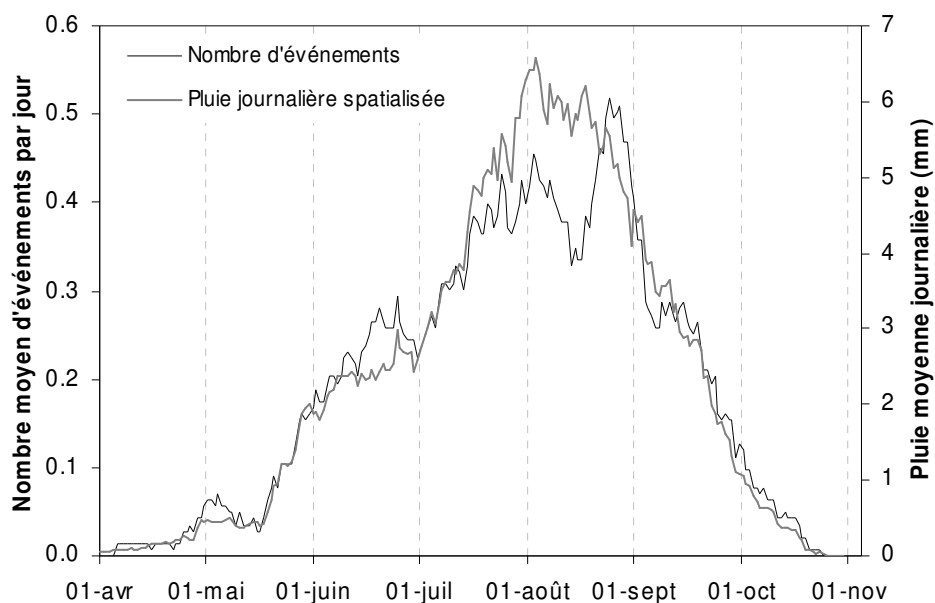


Figure 21 – Cycle saisonnier moyen du nombre d'événements AMMA-CATCH Niger, comparé au cycle saisonnier moyen des pluies sur la zone AMMA-CATCH Niger, sur la période 1990-2002 (fenêtre glissante sur 11 jours).

Le cycle saisonnier moyen de la hauteur de pluie moyenne par événement AMMA-CATCH Niger est représenté en noir continu sur la Figure 22. Il s'agit ici de la hauteur de pluie spatialisée, à la différence des hauteurs ponctuelles enregistrées au passage d'un événement montrées sur la Figure 17. Le cycle saisonnier présenté ici ne subit pas l'influence du cycle saisonnier du nombre d'événements AMMA-CATCH puisqu'il est moyenné sur une fenêtre glissante d'un nombre constant d'événements (ici 31 événements). Par contre, en présentant le cycle saisonnier moyen de la hauteur par événement pour la zone AMMA-CATCH Niger, on inclut l'effet de l'intermittence spatiale F_0 (proportion de stations non touchées par l'événement, représentée en pointillés Figure 22) qui vient s'ajouter à l'effet de l'intensité en un point. Les événements qui touchent plus de stations, par exemple au cœur de la saison, ont tendance à faire augmenter la hauteur moyenne sur la zone. L'effet « miroir » entre le cycle de la hauteur moyenne et celui de l'intermittence spatiale se voit bien sur la figure.

Le cycle saisonnier de la hauteur moyenne de pluie par événement paraît plus bruité que celui du nombre d'événements par jour ; les fluctuations de la hauteur sont importantes, même quand la mousson semble être bien établie (passage de 17.4 mm par événement le 2 août à 11.1 mm par événement le 8 août). On perçoit néanmoins une augmentation en créneau de la hauteur de pluie du 20 juin (6.9 mm par événement) au 15 août (17.2 mm par événement), suivie d'un creux fin août qui compense le pic du nombre d'événements. Cette opposition de comportement fin août est intrigante, mais paraît peu significative au vu de la série 1970-2000 de Niamey.

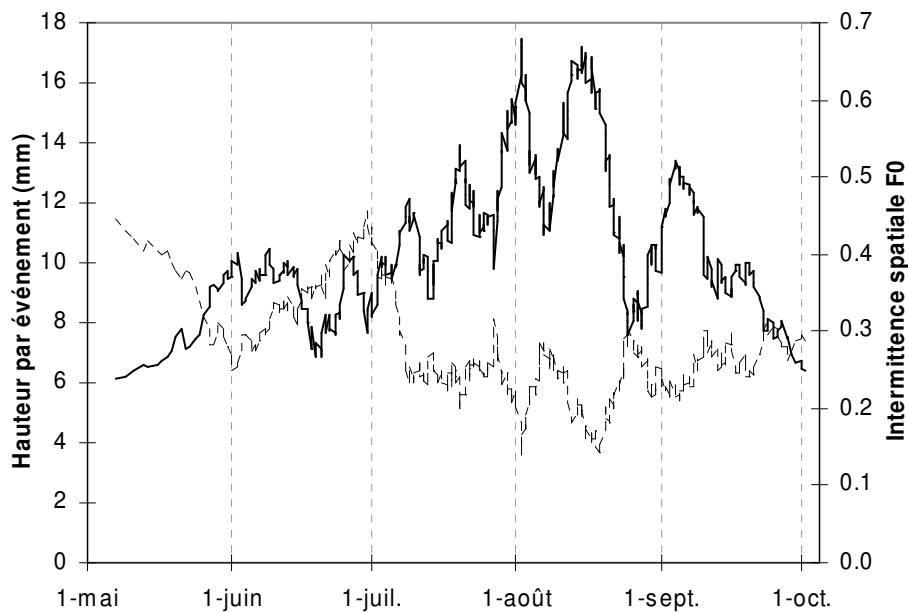


Figure 22 – Cycle saisonnier de la hauteur par événement AMMA-CATCH Niger (trait continu) et de l'intermittence spatiale F0 (en pointillés) sur la période 1990-2002.

Conclusion

On dispose désormais d'un panorama complet, bien étayé par différents calculs, de ce qu'est un événement pluvieux (qui peut-être défini de plusieurs manières) et de comment cet objet permet de décrire plus finement le régime pluviométrique moyen au Sahel. Bien entendu, il existe des différences selon que l'on s'intéresse plutôt à des événements pluvieux définis localement à partir de quelques séries prises isolément, ou plutôt à des événements pluvieux définis spatialement en considérant l'ensemble des séries AMMA-CATCH Niger. Pour autant, un certain nombre de traits dominants apparaissent que l'on peut récapituler ainsi :

- D'un point de vue temporel, les hauteurs de pluie par événement sont relativement stationnaires au cours de la saison, le cycle saisonnier des pluies est régi par l'évolution du nombre d'événements par jour.
- D'un point de vue spatial, les hauteurs de pluie moyennes par événement ne varient pas en fonction de la position géographique des stations, par contre les stations situées au sud de l'observatoire reçoivent plus d'événements (dans le cas d'événements définis ponctuellement) ou sont plus souvent arrosées (dans le cas d'événements définis spatialement) que les stations situées au nord.

Deux différences essentielles ressortent entre les séries individuelles et les séries spatiales :

- Les séries ponctuelles ne permettent vraisemblablement pas d'identifier l'événement pluvieux correspondant au passage d'un système convectif. Les caractéristiques événementielles issues des séries ponctuelles indiquent des fréquences d'occurrence plus fortes que celles des jours de pluie. On détermine apparemment plutôt des averses à une station donnée qu'un événement pluvieux organisé spatialement.
- L'utilisation des séries spatiales introduit une variable supplémentaire : l'intermittence spatiale F_0 , qui peut perturber l'analyse.

4. Fluctuations interannuelles et décennales du régime pluviométrique

Jusqu'à présent, nous avons abordé le régime pluviométrique sahélien à travers ses caractéristiques moyennes, or la principale spécificité de ce régime est sa variabilité, à la fois temporelle et spatiale. Dans un premier temps, nous étudions la variabilité temporelle à deux échelles différentes : interannuelle puis décennale.

4.1. Variabilité interannuelle

A l'échelle interannuelle, l'observatoire AMMA-CATCH Niger offre une vision privilégiée de la variabilité temporelle des pluies sahéliennes, de part la finesse de résolution de ces données, et ce malgré un nombre réduit d'années d'observations. A l'instar de l'indice pluviométrique sahélien (Figure 7), on peut représenter les cumuls annuels moyennés sur la zone AMMA-CATCH Niger sous la forme d'un indice pluviométrique (Figure 23), centré sur la moyenne annuelle de 1990 à 2002 (514 mm) – proche de la pluie moyenne à Niamey Aéroport sur 1972-2002 (500 mm) – et normalisé par l'écart type de l'échantillon (86 mm).

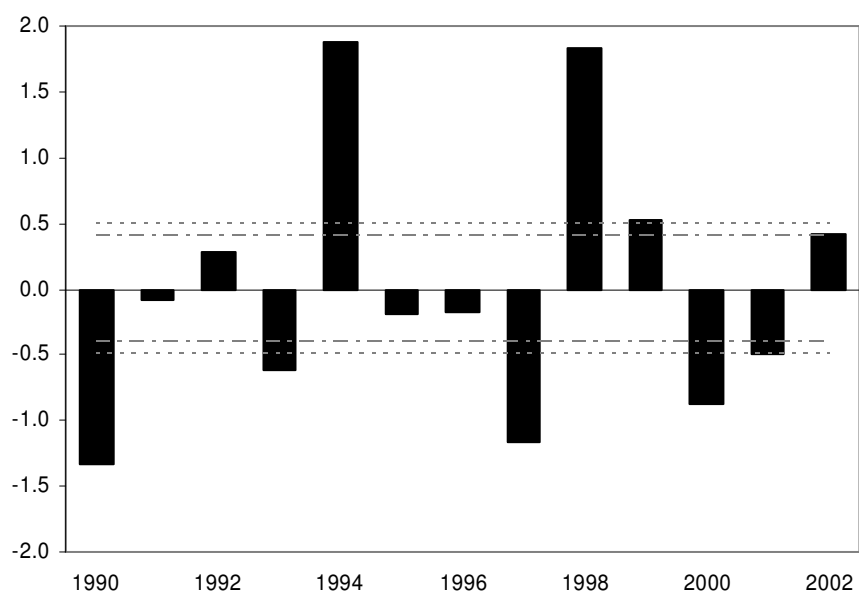


Figure 23 – Indice pluviométrique de la zone AMMA-CATCH Niger de 1990 à 2002 (centré sur la pluie moyenne = 514 mm, et normalisé par l'écart-type = 86 mm).

En considérant que les valeurs d'indices strictement supérieures (inférieures) à 0.5 (-0.5) définissent des années significativement humides (sèches), on peut déterminer dans notre échantillon de 13 années, 3 années humides (1994, 1998, 1999) et 4 années sèches (1990, 1997, 2000, 1993, par ordre

décroissant de sécheresse). Bien sûr, le choix du seuil 0.5 pour différencier une année moyenne d'une année humide est arbitraire, si on opte pour le seuil 0.4, le composite humide est composé de 4 années (1994, 1998, 1999, 2002) et le composite sec de 5 années (1990, 1997, 2000, 1993, 2001).

Ces composites secs et humides de la période récente 1990-2002 vont nous permettre de différencier les caractéristiques des années sèches et humides en terme :

- de cycle saisonnier des pluies,
- d'occurrence et d'amplitude des événements pluvieux observés et modélisés,
- d'intensités des pluies

Cycle saisonnier des pluies d'une année « sèche » et d'une année « humide »

A l'échelle du cycle saisonnier, les comportements des composites sec et humide sont comparés sur la Figure 24. La préinstallation de la mousson semble se faire de manière assez similaire en année sèche ou en année humide. Sur les composites présentés ici, le saut de mousson paraît plus précoce en année sèche qu'en année humide (24 juin vs. 12 juillet). Les cycles saisonniers des pluies de Niamey sur des séries plus longues : 1950-1969 (période humide) et 1970-1989 (période sèche) présentée plus loin (Figure 27) semblent reproduire ce décalage, de manière légèrement atténuée. Toutefois, les composites utilisés ici, élaborés à partir d'un nombre restreint d'années, sont assez hétérogènes et il faut rester prudent dans leur interprétation.

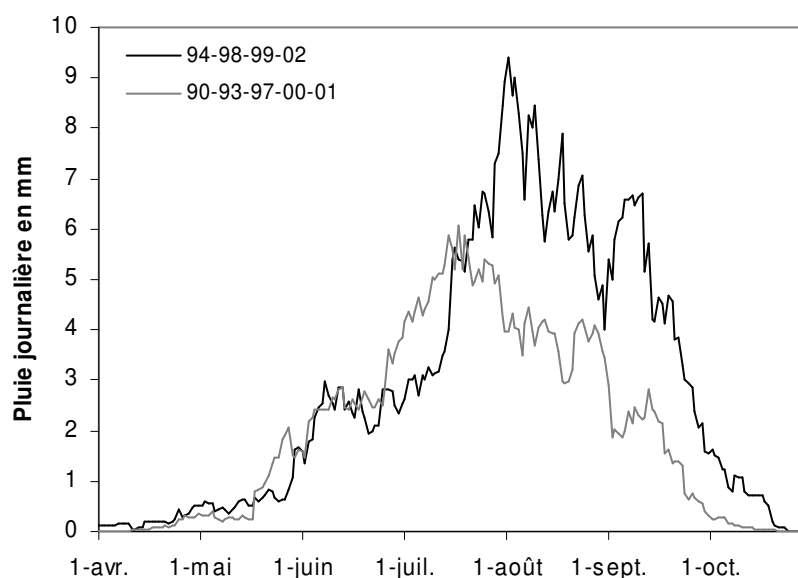


Figure 24 – Cycles saisonniers des pluies journalières du composite sec (90-93-97-00-01), du composite humide (94-98-99-02) et de toute la période d'observations (fenêtre glissante de 11 jours).

Le déficit pluviométrique en année sèche est particulièrement marqué à partir de mi juillet, avec -43% de pluie en août et -49% en septembre, vis-à-vis d'une année humide moyenne. Ce déficit pluviométrique enregistré (entre une année plutôt sèche et une année plutôt humide au sein de la période récente 1990-2002) est plus marqué que le déficit pluviométrique moyen de la période sèche 1970-1989 vis-à-vis de la période humide 1950-1969. Ceci montre que la variabilité interannuelle est une composante intrinsèque du régime pluviométrique sahélien, aussi prononcée (voire plus) que la variabilité décennale observée récemment.

Le décalage entre les deux cycles est très prononcé sur la fin de la saison des pluies. Le retrait de la mousson se fait beaucoup plus tôt en année sèche. Ceci est confirmé par la série plus longue de Niamey analysée ultérieurement (Figure 27).

Variabilité interannuelle des caractéristiques des événements AMMA-CATCH Niger

Le cumul pluvieux saisonnier d'une année i enregistré à une station k peut s'écrire :

$$P_{ik} = n_{ik} \times \bar{H}_{ik}^* + e_{ik} \quad (\text{Équation 11})$$

avec n_{ik} le nombre d'événements non nuls enregistrés cette année à la station k , \bar{H}_{ik}^* la hauteur moyenne conditionnelle à zéro par événement pour l'année i à la station k et e_{ik} la pluie résiduelle qui tombe sous la forme d'orages isolés.

La hauteur moyenne annuelle par événement sur l'ensemble des 30 stations s'écrit :

$$\tilde{H}_i = \frac{1}{30} \sum_{k=1}^{30} H_{i,k} \quad (\text{Équation 12})$$

Deux variables caractérisent les événements pluvieux d'une année i , \tilde{H}_i et N_i , qui est le nombre total d'événements observés sur l'observatoire l'année i . Uniquement 13 années d'observations sont disponibles, ce qui rend difficile de déterminer une corrélation robuste entre P_{ik} , \tilde{H}_i et N_i . Cependant les Figure 25 et Figure 26 indiquent une confluctuation significative entre P_{ik} et N_i ($R^2 = 0.55$) alors que la corrélation entre P_{ik} et \tilde{H}_i est faible ($R^2 = 0.22$). Il se trouve que l'année 1998 est assez particulière, avec un faible nombre d'événements, d'une forte intensité. Si on exclut cette année, le coefficient de corrélation entre P_{ik} et \tilde{H}_i passe de $R^2 = 0.22$ à $R^2 = 0.04$. Ceci illustre bien qu'il faut rester prudent quant à l'interprétation de ces statistiques, étant donné que l'échantillon est limité à 13 années.

Par ailleurs, on doit remarquer que N_i et \tilde{H}_i jouent un rôle symétrique dans l'expression (Équation 11). Ils varient tous deux, ce qui veut dire que l'hypothèse de base du modèle linéaire n'est pas respectée (le coefficient linéaire n'est pas constant). Cette symétrie implique que la confluctuation la plus forte de la variable résultante sera obtenue avec la variable qui varie le plus en terme relatif. Le

nombre d'événements variant plus d'une année sur l'autre que la hauteur moyenne par événement, c'est la variable qui est le plus fortement corrélée à la hauteur totale annuelle.

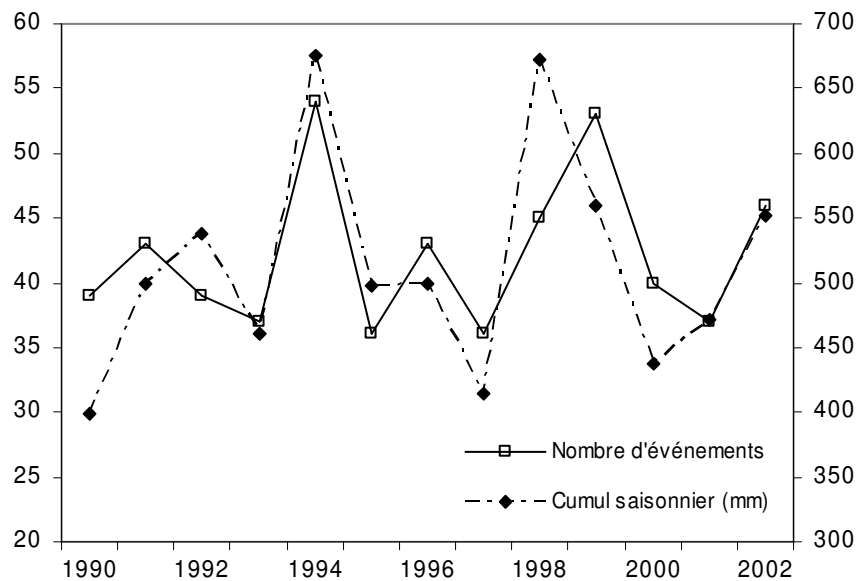


Figure 25 – Cumul saisonnier moyenné et nombre d'événements enregistrés sur la zone AMMA-CATCH Niger de 1990 à 2002.

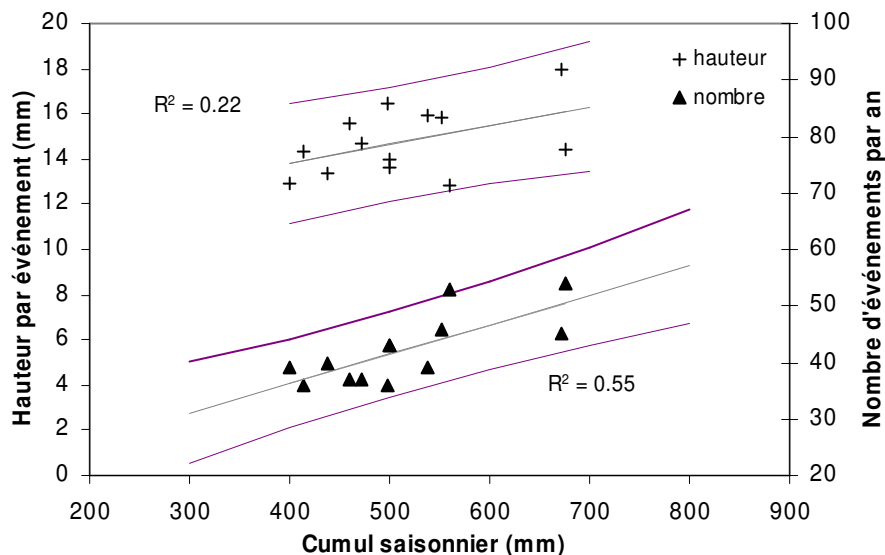


Figure 26 – Corrélation entre cumul saisonnier d'une part, nombre d'événements et hauteur moyenne annuelle d'autre part, intervalle de confiance à 90%.

La variabilité interannuelle des pluies est principalement liée à la variabilité interannuelle du nombre de systèmes convectifs, alors que leur production pluviométrique moyenne change peu d'une année à l'autre.

Variabilité interannuelle des caractéristiques des événements modélisés par la loi des fuites

L'analyse des paramètres mensuels s et λ de la loi des fuites pour les composites sec et humide conduit à des conclusions similaires (Tableau 8). La hauteur moyenne mensuelle par événement n'est pas significativement différente pour les quatre composites, au vu de l'intervalle de confiance à 90% des estimations, par contre le nombre d'événements diminue pour les deux composites secs aux mois d'août et septembre. Les années sèches sont bien caractérisées en moyenne par un déficit du nombre d'événements, particulièrement marqué en cœur et fin de saison des pluies.

		juin	juillet	août	septembre
Composite sec 1 (90, 93, 97, 00, 01)	s (mm)	11.2	12.1	12.6	10.1
	λ	0.21	0.40	0.31	0.23
Composite sec 2 (90, 93, 97, 00)	s (mm)	11.1	11.9	13.3	9.7
	λ	0.20	0.38	0.31	0.23
Composite humide 1 (94, 98, 99, 02)	s (mm)	11.2	12.6	11.7	12.8
	λ	0.23	0.37	0.58	0.35
Composite humide 2 (94, 98, 99)	s (mm)	10.8	12.7	11.3	12.6
	λ	0.21	0.38	0.66	0.38
Intervalles de confiance à 90%	s (mm)	$s \pm 2.0$	$s \pm 1.7$	$s \pm 1.6$	$s \pm 1.8$
	λ	$\lambda \pm 0.04$	$\lambda \pm 0.05$	$\lambda \pm 0.06$	$\lambda \pm 0.04$

Tableau 8 – Paramètres mensuels de la loi des fuites (s hauteur par événement, λ nombre d'événements par jour) moyennés sur la zone AMMA-CATCH Niger pour différents composites d'années sèches et humides et intervalles de confiance à 90%.

Intensités des pluies en 5 minutes

La distribution statistique des cumuls pluviométriques sur de petits pas de temps constituent à l'évidence une caractéristique importante des régimes pluviométriques. C'est pourquoi l'analyse des pluies en 5 minutes fait ici l'objet d'un chapitre séparé (chapitre 6). Il est cependant intéressant d'anticiper un peu sur ce chapitre en comparant les distributions des intensités en 5 minutes calculées sur les composites humide et sec (Tableau 9).

L'échantillon « années humides » (« années sèches ») est composé des 60 plus fortes intensités de 11 stations AMMA-CATCH Niger pour 3 années relativement humides (sèches) dans la région de Niamey : 1994, 1998 et 1999 (1990, 1997 et 2000), soit 1980 valeurs. Choisir les 60 plus fortes intensités est justifié par le fait qu'en termes de contribution pluviométrique, celles-ci apportent chaque année la moitié du cumul saisonnier (60×5 minutes = 5 heures), comme on le verra dans le chapitre 6. Les composites humide et sec ont été légèrement modifiés, vis-à-vis des composites utilisés précédemment, pour avoir deux échantillons de taille identique.

Les distributions des échantillons sec et humide sont assez différenciées, comme le montre le Tableau 9. Les intensités de pluie comprises entre 0 et 40 mm/h en 5 minutes représentent 25% de l'échantillon humide et 43% de l'échantillon sec. Les années humides sont donc caractérisées par une plus grande

proportion d'intensités moyennes, voire fortes. Par contre, en ce qui concerne les intensités maximales enregistrées, les distributions sont assez semblables : environ 6% (5%) des intensités de l'échantillon humide (sec) sont supérieures à 100 mm/h en 5 minutes. Lors d'une année sèche, des stations peuvent enregistrer des pics d'intensité pluvieuse aussi importants que lors d'une année humide.

Classe d'intensité	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	160-180	180-200	>200
Humide	0	24.6	38.3	22.1	8.5	3.9	2	0.2	0.2	0	0.2
Sec	7.5	43.3	25.8	12.5	5.7	3.6	1.0	0.4	0.2	0	0

Tableau 9 – Fréquences (en %) pour chaque classe d'intensités en 5 minutes (en mm/h) pour chacun des échantillons humide et sec.

L'analyse faite dans cette section a permis de déceler des différences de comportements entre années sèches et années humides, à différentes échelles temporelles. Les années sèches semblent se différencier des années humides :

- par un déficit pluviométrique marqué en cœur de saison des pluies,
- un retrait plus rapide de la mousson,
- un nombre total moindre d'événements pluvieux,
- et des intensités de pluie en moyenne plus faibles (excepté les extrêmes).

4.2. Retour sur la variabilité décennale

Les composites utilisés dans la section précédente 4.1 sont assez restreints en nombre d'années. On revient donc à l'analyse de la série de Niamey Aéroport (étendue de 1950 à 2002) et implicitement à la notion de variabilité décennale, déjà abordée dans le chapitre 2. L'utilisation d'une série plus longue et plus homogène nous donne la possibilité de confirmer ou d'infirmer les résultats précédents en assimilant les années humides à la période 1950-1969 et les années sèches à la période 1970-1989.

La longue série des pluies journalières enregistrées à Niamey Aéroport permet effectivement de comparer le cycle saisonnier des pluies sur différentes périodes : les deux décennies humides 1950-1969, les deux décennies sèches 1970-1989 et la dernière décennie 1990-2002 (Figure 27). Le déficit pluviométrique de 1970-1989 est localisé au cœur et à la fin de la saison des pluies : -27% au mois d'août, -47% au mois de septembre, par rapport à 1950-1969. La préinstallation de la mousson se fait de manière assez similaire quelle que soit la période étudiée, avec des paliers plus ou moins marqués. Le saut de mousson apparaît plus tardif pour le cycle humide (7 juillet vs. 22 juin). Ce décalage temporel, déjà remarqué précédemment, semble assez caractéristique. A partir de mi juillet, les signaux « sec » et « humide » se séparent. Les pluies pendant la période sèche atteignent un pic début août à 6 mm/jour puis décroissent, alors que les pluies de la période humide semblent parvenir à un

palier (entre 7 et 8 mm/jour) qui va durer près de deux mois. Le Barbé et Lebel (1997) avaient déjà remarqué que le déficit pluviométrique touchait principalement le cœur de la saison des pluies (mois d'août). Le retrait de la mousson se fait très tôt pour la période 1970-1989, comme observé en section 4.1 pour le composite sec. Ce retrait précoce de la mousson ouest-africaine paraît caractéristique d'une période ou d'une année sèche, il serait intéressant de voir quels mécanismes atmosphériques sont à l'origine de cet effondrement soudain.

En ce qui concerne le cycle saisonnier de la dernière décennie 1990-2002, une réserve s'impose, eu égard au plus faible nombre d'observations. Le signal est d'ailleurs plus bruité. La progression des pluies se fait par une succession de paliers et d'augmentations brusques, les deux plus significatives ayant lieu autour du 19 mai et du 7 juillet (comme pour la période humide 1950-1969). Le cycle saisonnier 1990-2002 semble suivre le cycle « humide » jusqu'à la fin du mois de juillet ; il s'effondre ensuite rapidement, à l'image du cycle « sec », avec un déficit pluviométrique de 25% au mois d'août et de 36% au mois de septembre par rapport à 1950-1989. Le retrait de la mousson pour 1990-2002 est similaire à celui de 1970-1989.

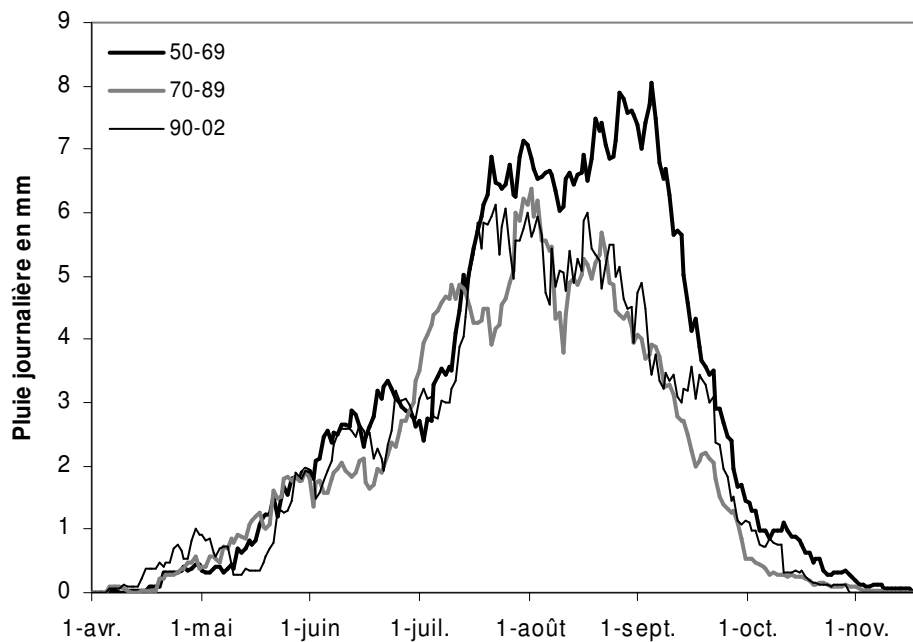


Figure 27 – Cycle saisonnier moyen des pluies enregistrées à Niamey Aéroport (fenêtre glissante de 11 jours) pour 3 périodes différentes (1950-1969, période humide, 1970-1989, période sèche et 1990-2002, période AMMA-CATCH Niger)

A l'échelle des événements, on peut s'interroger si leurs caractéristiques ont été modifiées entre les périodes 1950-1969, 1970-1989 et 1990-2002. Balme et al. (2004a) proposent de comparer les paramètres de la loi des fuites appliquée aux pluies journalières de Niamey Aéroport pour ces périodes contrastées (Tableau 10), de juin à septembre.

Si les fluctuations des hauteurs moyennes par événement entre les différentes périodes ne sont pas significatives vis-à-vis des intervalles de confiance à 90%, le nombre d'événements pluvieux est marqué par une diminution entre les périodes 1950-1969 et 1970-1989 particulièrement marquée pour les mois d'août et septembre (de 0.62/jour à 0.42/jour en août, de 0.41/jour à 0.29/jour en septembre). Cette baisse persiste pour la période 1990-2002 (0.43/jour en août, 0.25/jour en septembre).

Ce dernier échantillon est encore un peu restreint pour être comparé aux autres sans réserve, néanmoins les paramètres de la station de Niamey Aéroport se trouvent dans la lignée de la période sèche. Le manque de représentativité d'une station unique ne permet néanmoins pas de conclure à partir de cette seule comparaison que la sécheresse se poursuit sur cette dernière décennie.

		1950-1969	1970-1989	1990-2002	IC (90%)
juin	s (mm)	10.8	10.2	10.7	± 0.9
	λ	0.25	0.18	0.24	± 0.02
juillet	s (mm)	12.0	12.0	11.7	± 0.8
	λ	0.41	0.38	0.38	± 0.03
août	s (mm)	11.1	12.0	11.8	± 0.7
	λ	0.62	0.42	0.43	± 0.03
septembre	s (mm)	11.8	8.6	12.1	± 0.8
	λ	0.41	0.29	0.25	± 0.02

Tableau 10 – Comparaison des paramètres mensuels de la loi des fuites, calculés sur différentes périodes, à partir des pluies journalières seuillées à 1 mm enregistrées à la station de Niamey Aéroport, indiqués avec un intervalle de confiance de 90%.

Globalement la pluie annuelle sur Niamey a enregistré une augmentation de 10% environ pour la période récente en comparaison de la période sèche de référence (1970-1989), ce qui est en phase avec la tendance observée sur le Sahel Central (Figure 8). Par contre les pluies de juillet et août sont toujours aussi déficitaires – respectivement -10% et -27 % en prenant la période humide 1950-1969 comme référence. En conclusion, il semble clair que les conditions pluviométriques moyennes sur l'année se sont améliorées au cours de la période récente, mais que, par contre, le cycle saisonnier est durablement modifié avec un déficit particulièrement fort du nombre d'événements pluvieux en août se traduisant par une baisse de la pluie moyenne sur ce mois de 25 à 30% pour l'ensemble de la période 1970-2002.

5. La variabilité spatiale : une composante intrinsèque du régime pluviométrique sahélien

5.1. Zoom sur le gradient pluviométrique nord-sud du Sahel

La densité du réseau AMMA-CATCH Niger a permis de montrer que l'intermittence temporelle des pluies sahéliennes s'assortissait d'une variabilité équivalente dans l'espace (Lebel et al., 1997). La variabilité spatiale annuelle peut être illustrée par la comparaison des isohyètes de l'année 1992 sur le Sahel et des isohyètes de l'année 1992 sur la zone AMMA-CATCH Niger (Figure 28). A l'échelle du Sahel, le gradient latitudinal pluviométrique, dû au déplacement de la mousson ouest-africaine, est le facteur dominant de structuration des champs de pluie. Par contre, à l'échelle de l'observatoire AMMA-CATCH Niger, les hétérogénéités locales dominant par rapport au gradient latitudinal, même à l'échelle annuelle, et de forts gradients pluviométriques peuvent être relevés (275 mm pour 9 km dans le supersite, Lebel et al., 1997). Sachant que le cumul saisonnier est le résultat de l'accumulation de plusieurs dizaines d'événements pluvieux, on pourrait présumer que la variabilité observée à l'échelle de l'événement est lissée à l'échelle de l'année (Lebel et Le Barbé, 1997). Or il faut attendre plus d'une dizaine d'années pour retrouver une organisation quasi-zonale sur l'observatoire AMMA-CATCH Niger (Figure 29).

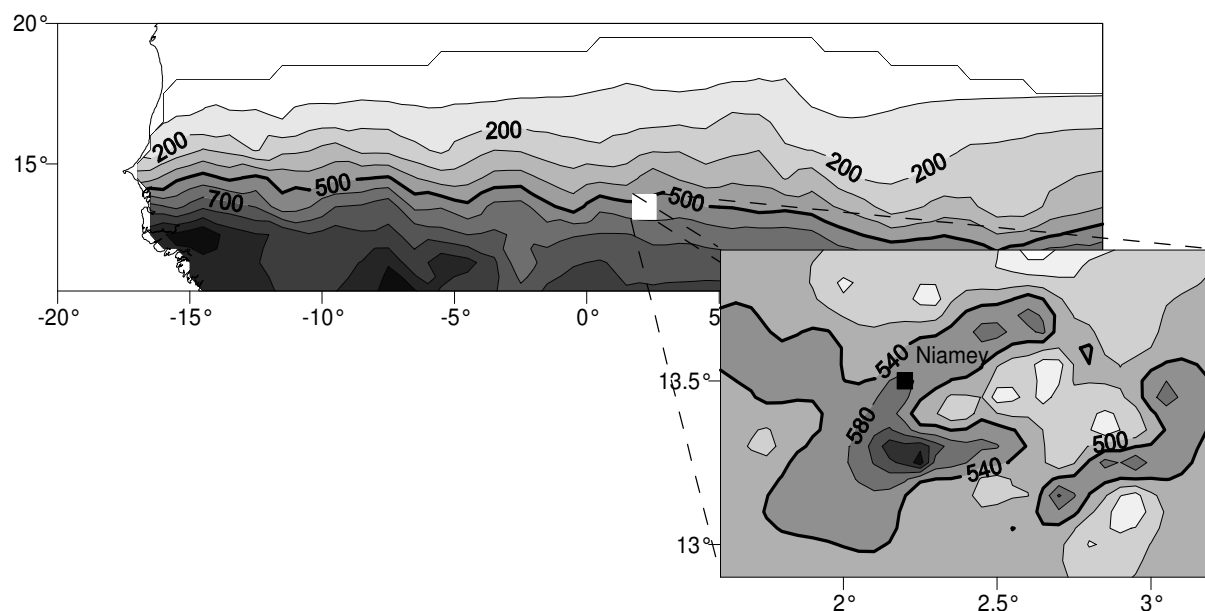


Figure 28 – Isohyètes annuelles de 1992, sur le Sahel (740 stations, isohyètes espacés de 100 mm) et l'observatoire AMMA-CATCH Niger (104 stations, isohyètes espacées de 40 mm). Longitude et latitude en degrés.

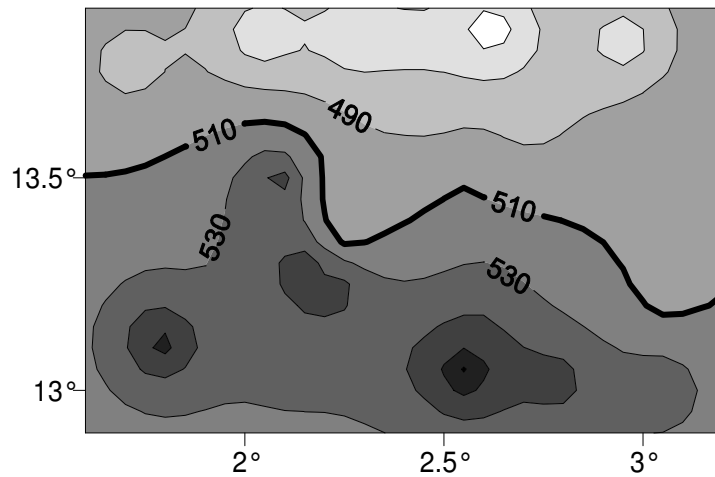


Figure 29 – Isohyètes annuelles moyennées sur l’observatoire AMMA-CATCH Niger, de 1990 à 2002 (30 stations, isohyètes espacées de 20 mm). Longitude et latitude en degrés.

Ce type d’organisation très contrastée des champs pluviométriques annuels se retrouve sur l’observatoire quelle que soit l’année étudiée (Figure 30). Si le sud de l’observatoire est généralement plus arrosé que le nord, les maxima pluviométriques changent d’emplacement chaque année, présents aussi bien les années sèches que les années humides, et sans lien avec la position géographique des stations. La topographie de l’observatoire est effectivement peu marquée, avec des altitudes variant de 200 à 270 m et composée typiquement du haut vers le bas de plateaux plats, de ravines sableuses en pente douce (1-3%), et de lits de rivière fossile en fond de vallée (D’Herbès et Valentin, 1997 ; Peugeot et al., 2003).

Chaque année, le rapport entre les cumuls annuels maximum et minimum enregistrés sur l’observatoire est voisin de 2, alors que l’hypothèse du gradient pluviométrique de grande échelle (1 mm par km) laissait présager un rapport maximal de 1.2. Choisir les observations d’une seule station pluviographique pour représenter une région de 16 000 km² est donc problématique, même à l’échelle annuelle (Balme et al., 2004a), comme l’illustrent les sections 5.2 et 5.3.

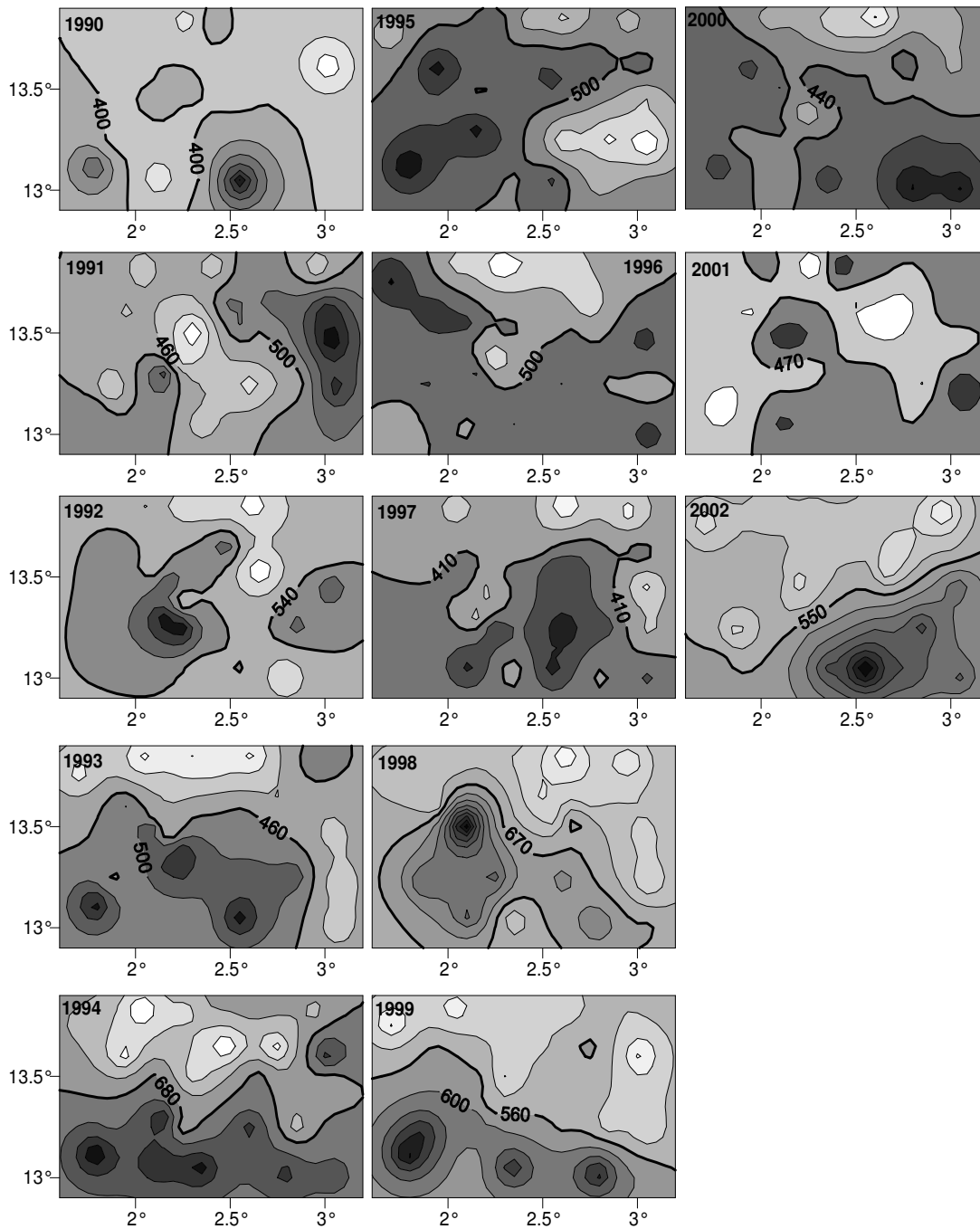


Figure 30 – Isohyètes annuelles sur la zone AMMA-CATCH Niger (30 stations, isohyètes espacées de 40 mm) de 1990 à 2002.

5.2. Incidence sur l'estimation d'un indice pluviométrique

A l'instar de l'indice pluviométrique sahélien, on peut représenter les cumuls annuels enregistrés à la station de Niamey de 1950 à 2002 sous la forme d'un indice (Figure 31). En se basant sur l'indice pluviométrique sahélien global (Figure 7) pour déterminer si une année est sèche ou humide à Niamey, on fait une erreur de diagnostic 14 années sur 53, soit dans 26% des cas. Une année peut être sèche à l'échelle du Sahel et humide « localement » et vice versa.

De même, en comparant les indices pluviométriques calculés sur le Sahel entier (20°W-20°E, 10°N-20°N) à ceux calculés sur la zone AMMA-CATCH Niger (Figure 23), on s'aperçoit de la subjectivité des classifications années « humides » et années « sèches ». Si l'année 1998 apparaît comme une année légèrement déficitaire à l'échelle du Sahel (460 mm), elle s'avère très pluvieuse dans la région de Niamey (670 mm), avec à la station de Niamey IRI, un cumul exceptionnel de 1050 mm. L'année 2002, à l'échelle du Sahel, est la plus sèche parmi les 15 dernières années (370 mm), par contre à l'échelle de la zone EPSAT, elle pourrait presque être classée « humide » (pluie = 550 mm, indice 0.43). Ces disparités marquent la sensibilité des indices pluviométriques aux échelles de calcul.

La classification « année sèche » et « année humide » faite à l'échelle du Sahel n'est donc pas pertinente localement, à l'échelle d'une station ou d'un village, ce qui pose la question du dimensionnement d'un réseau d'observations pertinent, étudié en section 5.3.

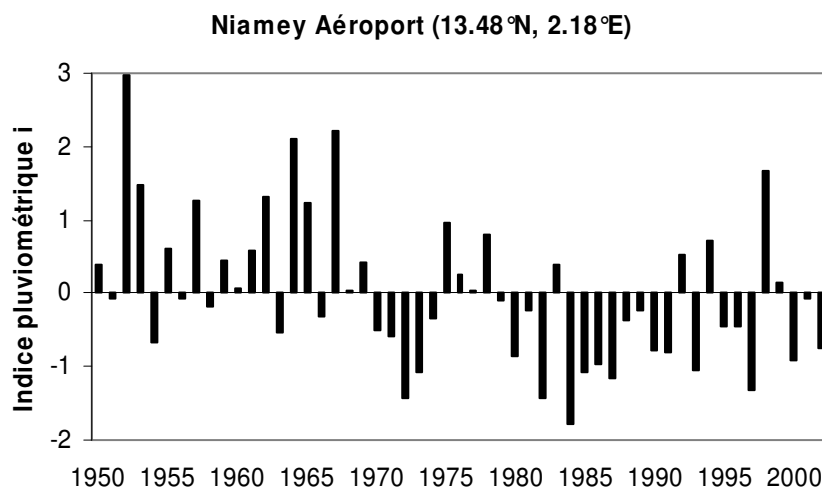


Figure 31 – Indice pluviométrique de la station de Niamey Aéroport (13.48°N, 2.18°E), $I = (P_i - \bar{P})/\sigma$, représenté de 1950 à 2002, avec $\bar{P} = 550$ mm, $\sigma = 145$ mm.

5.3. Implications pour le dimensionnement d'un réseau de mesures

La perception des structures des champs de pluie est très influencée par la densité du réseau d'observations, surtout en Afrique de l'Ouest, marquée par de forts gradients pluviométriques. Lebel et Amani (1999) ont proposé un modèle géostatistique pour déterminer l'erreur commise en zone sahélienne sur l'estimation de la pluie moyenne à différents pas de temps (événement pluvieux, mois, année) en fonction de la densité du réseau de mesures. Lebel et Amani (1999) ont validé leur modèle sur un échantillon de 76 événements pluvieux AMMA-CATCH Niger en utilisant des réseaux réguliers de densité décroissante (10, 4, 1 stations) couvrant 10 000 km². Dans un article récent, Balme et al. (2004a) proposent d'étendre cette validation à un plus grand nombre d'événements (548 vs. 76

événements pluvieux) et à toutes les configurations de réseaux de 12, 8, 4 et 1 station(s) possibles à partir du réseau initial de 21 stations. Par exemple, pour le réseau de 8 stations, 12 600 combinaisons possibles sont obtenues (pour éviter d’avoir des réseaux absurdes, le domaine est découpé en 4 carrés, dans chacun desquels sont piochées $n/4$ stations, $\{n= 4, 8, 12\}$). Alors que pour le reste du travail présenté ici on travaille sur la zone de 16 000 km², cette étude particulière de validation ne concerne qu’un carré central de 10 000 km², par souci de comparaison avec Lebel et Amani (1999).

Les résultats présentés par Balme et al. (2004a) dans le Tableau 11 et ceux du modèle de Lebel et Amani (1999) sont d’un ordre de grandeur cohérent, avec toutefois des différences qui sont à prendre en compte (par exemple le modèle estime l’erreur pour un réseau de 4 stations au mois de Juin à 13%, la validation donne 17% ; en août les chiffres sont respectivement de 9,3% et 10%).

D’après le Tableau 11, si l’on accepte une erreur de 10% vis-à-vis de la pluie de référence, on peut se contenter d’un réseau de quatre stations pour l’estimation de la pluie annuelle. Par contre, à une échelle de temps plus fine, l’erreur commise devient rapidement inacceptable. Cet exercice nous donne un ordre de grandeur de l’erreur commise en choisissant une seule station pour représenter une région de 10 000 km² (de 16% à l’échelle annuelle à 41% à l’échelle mensuelle). Des résultats similaires ont été obtenus par Taupin (2003), travaillant sur une période plus réduite. Ce qui est intéressant à souligner ici est que l’erreur d’estimation de la pluie annuelle (16%) est voisine de l’écart nous permettant de distinguer les années sèches et les années humides à l’échelle de la zone AMMA-CATCH Niger (17% environ en prenant comme critère un écart minimal de 1 en terme d’indice, une année étant caractérisée comme humide si l’indice est supérieur à 0.5, comme sèche si l’indice est inférieur à -0.5). L’erreur d’estimation de la pluie annuelle n’est pas non plus très éloignée de la différence entre les moyennes pluviométriques des périodes 1950-1969 et 1970-1989 (-25%). Ces ordres de grandeur comparables expliquent pourquoi il n’est pas rare qu’une année « humide » sur le Sahel soit « sèche » localement et vice versa. Cela résulte en fait de deux facteurs : i) un facteur intrinsèque lié à la forte variabilité spatiale de la pluie dans la région et ii) un artefact lié à la faible densité des réseaux de mesure.

	Référence	21 stations	12 stations	8 stations	4 stations	1 station
Saison	510 mm	1%	3%	4%	6%	16%
Août	180 mm	2%	5%	7%	10%	25%
Juin	80 mm	3%	7%	11%	17%	41%

Tableau 11 – Erreurs d’estimation de la pluie moyenne aux pas de temps annuel et mensuel, sur un domaine de 10 000 km², suivant la densité du réseau. La pluie de référence est obtenue par krigeage avec le réseau de 30 stations. Les erreurs sont des moyennes calculées sur la permutation de tous les réseaux possibles de n stations, réparties en groupements de $n/4$ stations au sein des quatre sous-carrés de 2500 km² (d’après Balme et al., 2004).

5.4. Impact sur les distributions statistiques des lames d'eau spatialisées

Pour la modélisation hydrologique et l'étude des bilans hydriques, les lames d'eau spatialisées sont plus utiles que les cumuls ponctuels. Ainsi, les lames d'eau des 548 événements AMMA-CATCH Niger sont estimées par krigeage sur des points de grille, en utilisant la fonction de structure de Lebel et Amani (1999), puis moyennées sur différentes surfaces variant de 1 x 1 à 100 x 100 km². L'évolution des distributions statistiques des lames d'eau événementielles avec l'augmentation de la taille du domaine d'intégration spatiale a été étudiée en détail par D'Amato (1998). Les éléments présentés ci-dessous sont une actualisation de ses résultats réalisée par Vischel (2004, communication personnelle), retranscrits ici afin que le chapitre 5 expose une vue d'ensemble de l'impact de la variabilité spatiale des pluies.

La valeur moyenne des lames d'eau reste constante (10.6 mm) quelle que soit la taille de la surface considérée. Par contre, la dispersion des valeurs observées diminue avec l'augmentation de la surface considérée (220 mm² pour 1 x 1 km², -10% pour 5 x 5 km², -30% pour 25 x 25 km², -50% pour 100 x 100 km²).

Alors que les distributions des cumuls ponctuels ont été modélisées par une loi exponentielle, D'Amato (1998) choisit une loi Gamma pour étudier les distributions des lames d'eau spatialisées, qui semble plus adaptée pour modéliser les distributions expérimentales aux fréquences d'événements rares ; elle montre néanmoins que le choix d'un modèle plutôt qu'un autre (loi Gamma ou exponentielle) n'est pas déterminant, tant que l'on se cantonne à des périodes de retour inférieures à cent ans. La Figure 32 illustre les lois Gamma ajustées sur les séries spatiales des surfaces de 1 x 1 à 100 x 100 km². On peut en déduire les lames d'eau spatialisées de période de retour décennale, par exemple, indiquées dans le Tableau 12.

L'étude des distributions statistiques des lames d'eau estimées sur différentes tailles de domaines est réalisée dans le but de déterminer les valeurs des coefficients d'abattement caractéristiques de la région sahélienne. Un coefficient d'abattement est un coefficient utilisé dans les études hydrologiques pour estimer la pluie moyenne sur une surface de même probabilité que la pluie ponctuelle en un point arbitraire de cette surface. Le cumul événementiel ponctuel de période de retour 10 ans ayant été évalué à 92 mm, les coefficients d'abattement correspondants sont indiqués dans le Tableau 12. La gamme de surfaces considérées couvre l'échelle d'un grand nombre d'applications, allant de l'hydrologie urbaine pour les petites surfaces à la météorologie et à la climatologie pour les grandes surfaces, en passant par l'agronomie et l'hydrologie pour les surfaces intermédiaires (D'Amato, 1998).

	1 x 1	5 x 5	10 x 10	25 x 25	50 x 50	100 x 100
Lames d'eau spatialisées (en mm)	86	82	78	71	64	59
Coefficients d'abattement	0.93	0.89	0.85	0.77	0.70	0.64

Tableau 12 – Valeurs des lames d'eau spatialisées de périodes de retour 10 ans et coefficients d'abattement correspondants pour différents domaines d'intégration.

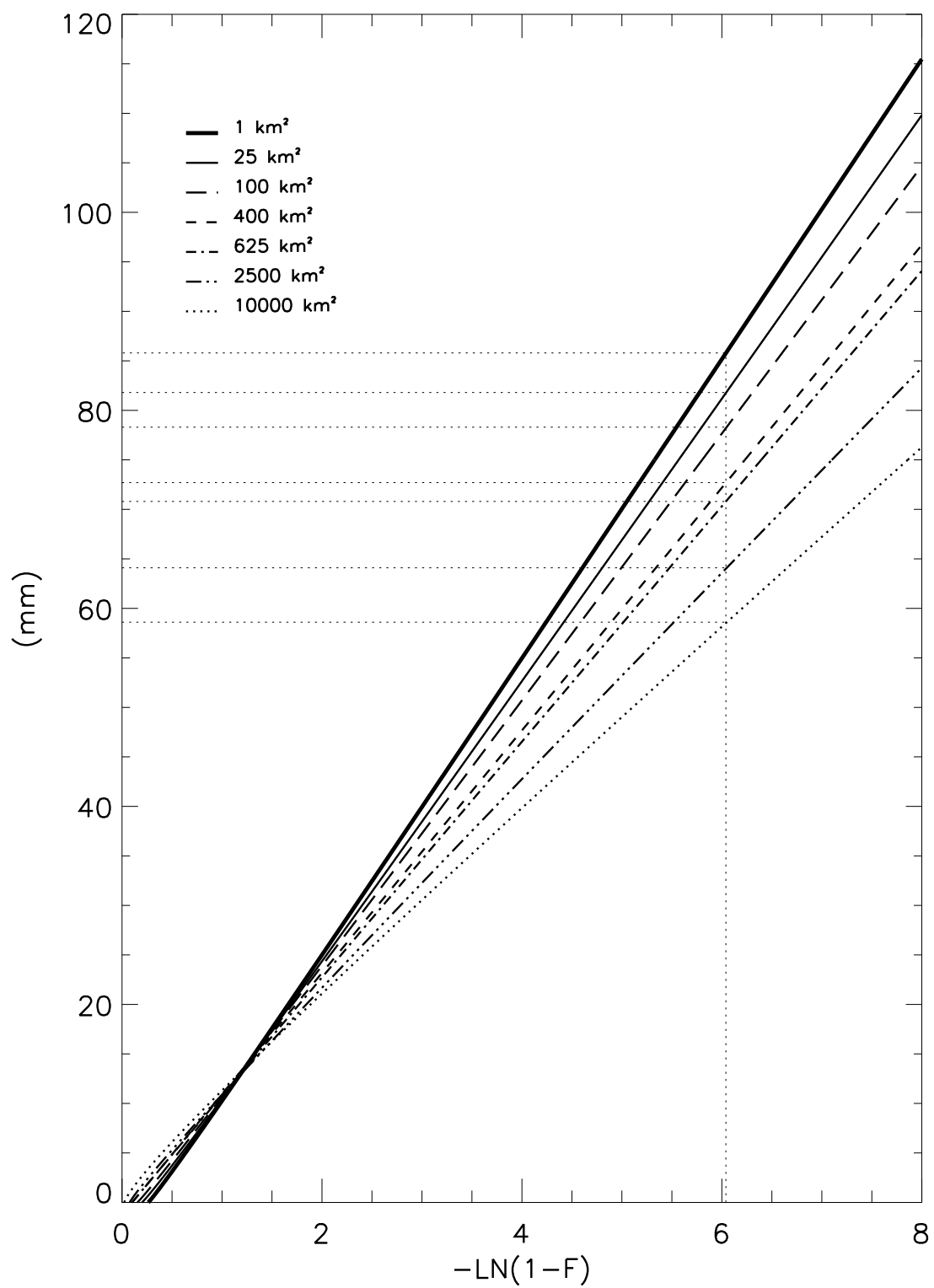


Figure 32 – Ajustement de la loi Gamma sur les séries spatiales des surfaces de 1 x 1 à 100 x 100 km² (seuil de 0.5 mm) (Vischel, 2004, communication personnelle).

6. Les intensités de pluie

6.1. Quelles données faut-il utiliser ?

Les cumuls pluviométriques aux faibles pas de temps constituent une composante importante du régime pluviométrique. Ils conditionnent certains mécanismes fondamentaux tels que l'érosion ou la partition entre infiltration et ruissellement. La pluie étant un processus discret constitué de gouttes, il est impossible d'en mesurer l'intensité proprement dite. Toute mesure pluviométrique met en œuvre une intégration, spatiale et temporelle, que ce soit par disdromètre, pluviographe (à augets ou à pesée), radar ou satellite. Par approximation de langage, on va donc parler d'intensité pluviométrique pour faire référence à la plus petite échelle spatio-temporelle résolue de manière fiable par un capteur donné.

Dans le cas des capteurs du réseau AMMA-CATCH, constitués de pluviographes à augets placés sous des cônes de réceptions de 400 cm^2 , l'échantillonnage élémentaire correspond au volume des augets, c'est-à-dire 20 cm^3 , ou 0.5 mm de hauteur équivalente. Comme souligné par Lebel et al. (1997), l'échantillonnage ainsi réalisé n'est pas constant dans le temps, la durée entre deux basculements d'augets dépendant de l'intensité. Pour une pluie de 100 mm/h, le pas d'échantillonnage est de 18 secondes ; il monte à une minute pour une pluie de 30 mm/h et à 5 minutes pour une pluie de 6 mm/h. Quel que soit le choix effectué pour constituer une série à pas de temps fin – et fixe – une partie du signal sera suréchantillonnée et une partie sous-échantillonnée. En choisissant un pas de temps de 5 minutes, on opère un choix prudent où toutes les intensités supérieures à 6 mm/h sont suréchantillonnées. Le sous-échantillonnage n'intervient que pour des intensités inférieures à 6 mm/h, qui ne représentent que 20% du cumul annuel et sont peu sensibles du point de vue de l'érosion ou du ruissellement. Le véritable inconvénient d'un tel choix est de perdre les pics d'intensité qui peuvent se produire à l'intérieur du pas de temps de 5 minutes. C'est pourquoi les premières analyses concernent la série brute des Δt élémentaires.

6.2. Analyse des séries Δt élémentaires

Les intensités de pluie étudiées dans cette section sont dérivées directement des séries de durées entre deux basculements d'augets Δt . La distribution moyenne des intensités enregistrées en une station de 1990 à 2002 est illustrée pour Banizoumbou sur la Figure 33. L'intensité de pluie médiane, représentant 50% du cumul moyen annuel, est égale à 33 mm/h environ, et 30% du cumul moyen annuel tombe avec une intensité supérieure à 56 mm/h.

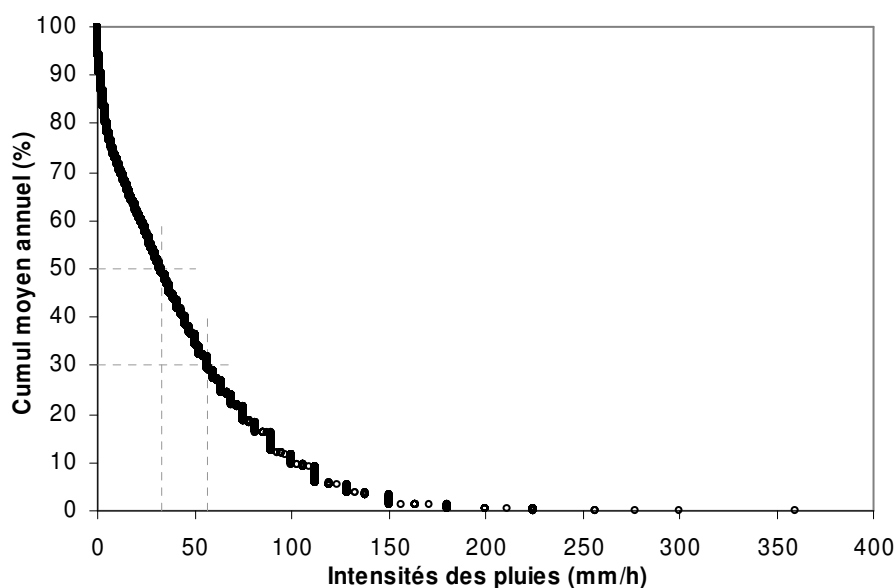


Figure 33 – Distribution moyenne des intensités de pluies « brutes » enregistrées à la station de Banizoumbou de 1990 à 2002 en fonction de leur contribution au cumul moyen annuel.

L'analyse des distributions des intensités « brutes » enregistrées en chacune des stations AMMA-CATCH Niger fait apparaître des caractéristiques invariantes d'une station à l'autre. Comme indiqué dans le Tableau 13, qui synthétise les quantiles de distribution moyennés sur l'observatoire, 50% du cumul moyen annuel tombe avec une intensité supérieure à 35 mm/h (avec un écart-type de 1.8 mm/h sur l'observatoire) et 30% avec une intensité supérieure à 62 mm/h (avec un écart-type de 3.1 mm/h). Les écarts-types indiqués sont relativement faibles et montrent que les quantiles sont très similaires entre les 30 stations. Ces statistiques avaient déjà été évaluées par Lebel et al. (1997) sur la période 1990-1993 et restent inchangées, même sur une période plus longue.

Ce type de résultats est important dans une perspective de modélisation hydrologique. Connaître l'intensité des précipitations est également important pour la gestion des sols. Des taux d'énergie cinétique élevés comme ceux enregistrés dans la région de Niamey favorisent la désintégration des sols et la formation d'une croûte, réduisant par là les taux d'infiltration et augmentant les risques de ruissellement et d'érosion (Hoogmoed et Klaij, 1990).

Cumul	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
I (mm/h)	104 (6.4)	78 (3.8)	62 (3.1)	48 (2.3)	35 (1.8)	24 (1.4)	13 (1.1)	5 (0.4)	2 (0.2)

Tableau 13 – Quantiles de distribution des intensités de pluies moyennés sur les 30 stations AMMA-CATCH Niger, de 1990 à 2002 (les écarts-types sont indiqués entre parenthèses) en fonction de leur contribution au cumul moyen annuel.

Une autre statistique peut être déduite des séries de durées entre deux basculements Δt ; il s'agit de la durée effective de la pluie. On suppose qu'il n'y a pas d'interruption de la pluie entre deux basculements consécutifs. D'après Lebel et al. (1997), cette hypothèse est raisonnable pour des durées de basculements inférieures à 5 minutes, qui représentent 80% du cumul moyen annuel. La durée effective de la pluie est représentée sur la Figure 34 pour la station de Banizoumbou : 70% du cumul annuel tombe en moins de 7 heures, 50% du cumul en moins de 4 heures.

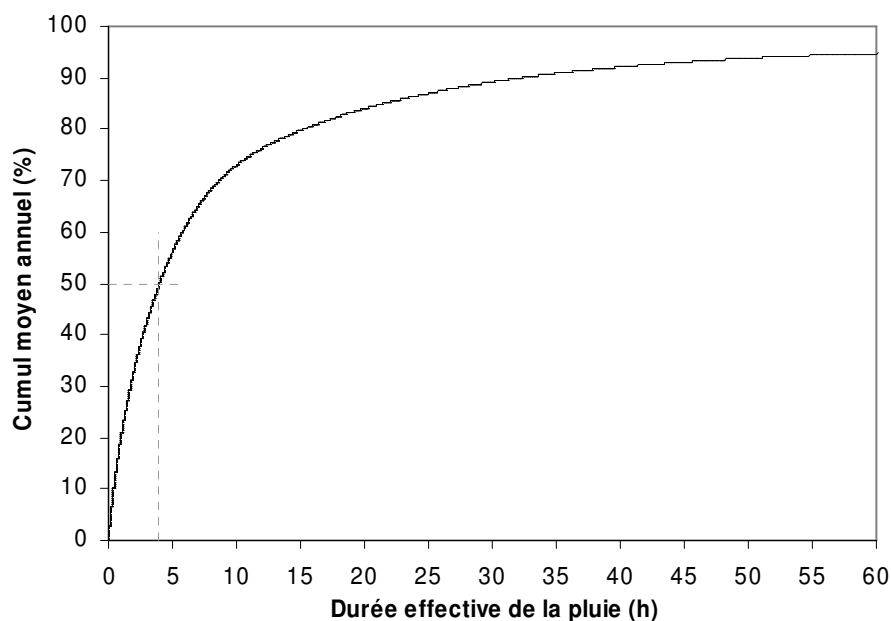


Figure 34 – Durée moyenne effective de la pluie à Banizoumbou sur la période 1990-2002.

Ces statistiques sont aussi valables pour l'ensemble des stations AMMA-CATCH Niger, comme l'illustre le Tableau 14. Ceci souligne la forte intermittence temporelle des pluies au Sahel. Non seulement l'essentiel de la saison des pluies est confiné à environ quatre mois de l'année, mais au sein de cette période, la durée effective des pluies est très faible.

La forme générale des hyétogrammes dans la région de Niamey se caractérise effectivement par de fortes intensités en début de pluie, suivies par des intensités faibles, générant une traîne plus ou moins prolongée (D'Amato, 1998).

Cumul	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Durée (h)	0.4 (0.04)	1.0 (0.10)	1.7 (0.17)	2.7 (0.26)	3.9 (0.39)	5.7 (0.58)	8.6 (0.90)	15.1 (1.65)	31.7 (3.29)

Tableau 14 – Durées effectives de la pluie moyennées sur les 30 stations AMMA-CATCH Niger de 1990 à 2002 (les écarts-types sont indiqués entre parenthèses).

6.3. Analyse des séries rééchantillonnées à $\Delta t = 5$ minutes

La distribution moyenne des intensités de pluie enregistrées de 1990 à 2002 et rééchantillonnées au pas de temps de 5 minutes est représentée pour la station de Banizoumbou sur la Figure 35. La comparaison de cette figure avec la Figure 33, qui représente la distribution des intensités « brutes » enregistrées à Banizoumbou sur la même période, illustre bien l'influence du rééchantillonnage. Les pics d'intensités sont effectivement perdus, la plus forte intensité enregistrée dans l'échantillon de séries rééchantillonnées vaut 175 mm/h en 5 minutes, alors que dans l'échantillon de séries brutes, des intensités supérieures à 180 mm/h ont été enregistrées sur une cinquantaine de pas de temps. Néanmoins, les quantiles de distribution des intensités restent comparables. A Banizoumbou, 50% du cumul tombe à une intensité supérieure à 29 mm/h et 30% à une intensité supérieure à 50 mm/h, si l'on se réfère aux intensités rééchantillonnées.

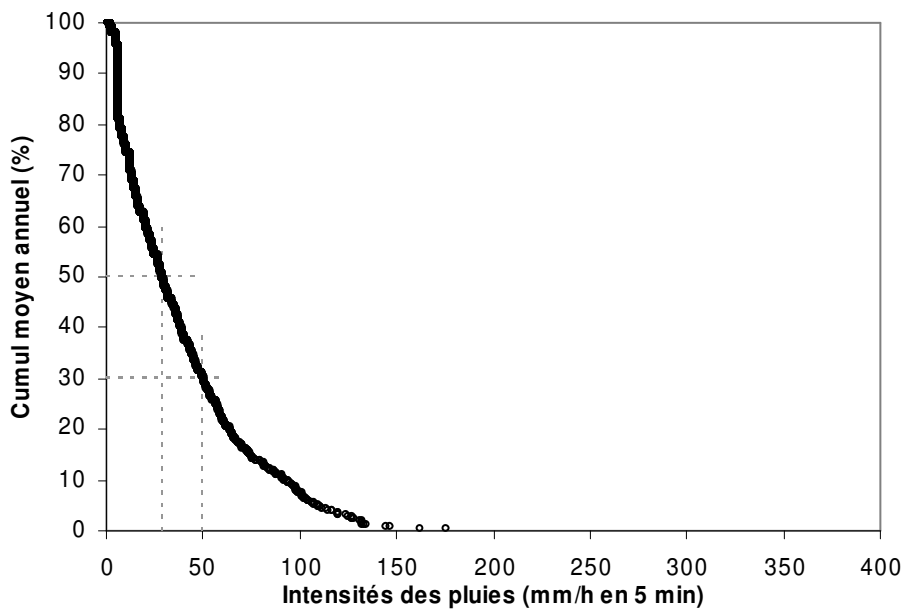


Figure 35 – Distribution moyenne des intensités de pluies rééchantillonnées à 5 minutes enregistrées à la station de Banizoumbou de 1990 à 2002 en fonction de leur contribution au cumul moyen annuel.

6.4. Variabilité spatiale et temporelle

Dans cette section, le caractère sec ou humide d'une année ou d'une station est analysé à une échelle plus fine que celle des systèmes convectifs étudiés précédemment, celle des cellules convectives, dont le passage se caractérise au sol par de fortes intensités de pluie et qui intéresse particulièrement les hydrologues et les spécialistes de l'érosion. Les résultats présentés ici sont issus de Balme et al. (2004a).

Le jeu de données AMMA-CATCH Niger permet de comparer les signaux pluviométriques sec et humide suivant deux modes différents, d'une part la série 1990-2002 inclut des années « sèches » et « humides » (au sens de la chronique AMMA-CATCH Niger 1990-2002), et d'autre part, pour une année donnée, nous pouvons séparer les stations « humides », celles qui enregistrent les cumuls saisonniers les plus forts pour cette année, des stations « sèches », réciproquement celles qui recueillent les cumuls pluvieux les plus faibles. En faisant cette distinction années sèches vs. années humides ou stations sèches vs. stations humides, nous cherchons à relier le caractère sec ou humide d'une année/station à l'organisation de la convection dans la région.

Stations sèches et stations humides

L'échantillon « stations humides » est constitué par les trois stations les plus humides de chaque année (soit $3 \times 13 = 39$ stations). On procède de la même manière avec les stations sèches. En procédant à ces regroupements, on remarque que d'une année à l'autre ce ne sont pas les mêmes stations qui sont « humides » ou « sèches ». Il se peut qu'une même station enregistre le cumul le plus sec de la zone EPSAT pour une année donnée et le cumul le plus humide pour une autre.

La différenciation entre stations sèches et stations humides à l'échelle des intensités moyennées sur 5 minutes est illustrée par la Figure 36, qui représente la corrélation entre le cumul pluviométrique annuel enregistré à la station et deux statistiques d'intensité : i) la moyenne annuelle de toutes les intensités des pluies enregistrées à la station (MoyI) et, ii) la moyenne des 60 plus fortes intensités (MoyI60). Ce choix est justifié par le fait qu'en terme de contribution pluviométrique, les 60 plus fortes intensités enregistrées en 5 minutes (soit 60×5 minutes = 5 heures) apportent chaque année la moitié du cumul saisonnier. Si la moyenne des intensités ne permet pas de distinguer les stations sèches des stations humides, la moyenne des 60 plus fortes intensités permet relativement bien de les séparer (pente de 0.07 pour les stations sèches, $R^2 = 0.57$, pente de 0.03 pour les stations humides, $R^2 = 0.43$). Une station humide une année donnée se caractérise par l'enregistrement de fortes intensités, marque du passage des cellules convectives. En termes d'applications, cette information est importante pour l'hydrologie. Dans le cadre de la désagrégation des pluies, par exemple, il s'agit de ne pas manquer la simulation de ces fortes intensités.

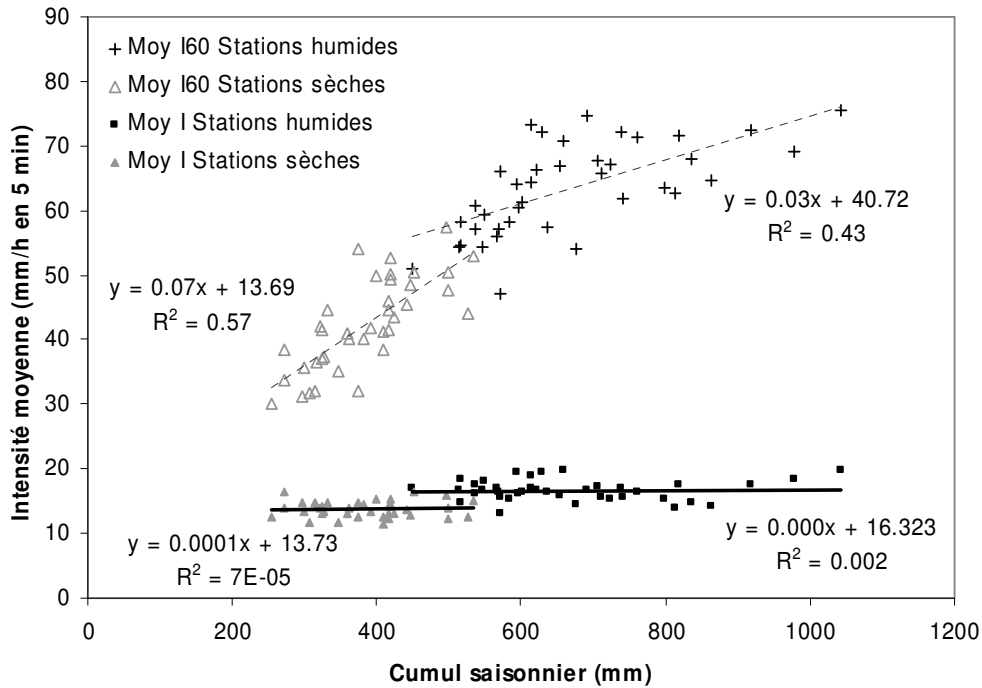


Figure 36 – Cumul saisonnier, moyenne annuelle des intensités, moyenne annuelle des 60 plus fortes intensités, pour deux groupes de stations, « humides » et « sèches ».

La distinction entre stations humides et sèches est également nette du point de vue des distributions empiriques. Sur la Figure 37, sont représentées les distributions des deux échantillons « stations humides » et « stations sèches ». L'échantillon humide (sec) est formé des 60 plus fortes intensités des 39 stations les plus humides (sèches) utilisées précédemment (soit $60 \times 39 = 2340$ valeurs). Les deux distributions empiriques sont très distinctes. Les échantillons « sec » et « humide » semblent provenir de populations différentes, les médianes valent respectivement 36 mm/h et 57 mm/h en 5 minutes. Lors du passage d'un événement pluvieux, certaines stations sont plus touchées que les autres, dans un périmètre réduit. Les cellules convectives présentes au sein des systèmes convectifs sont responsables de cette variabilité, encore visible à l'échelle annuelle.

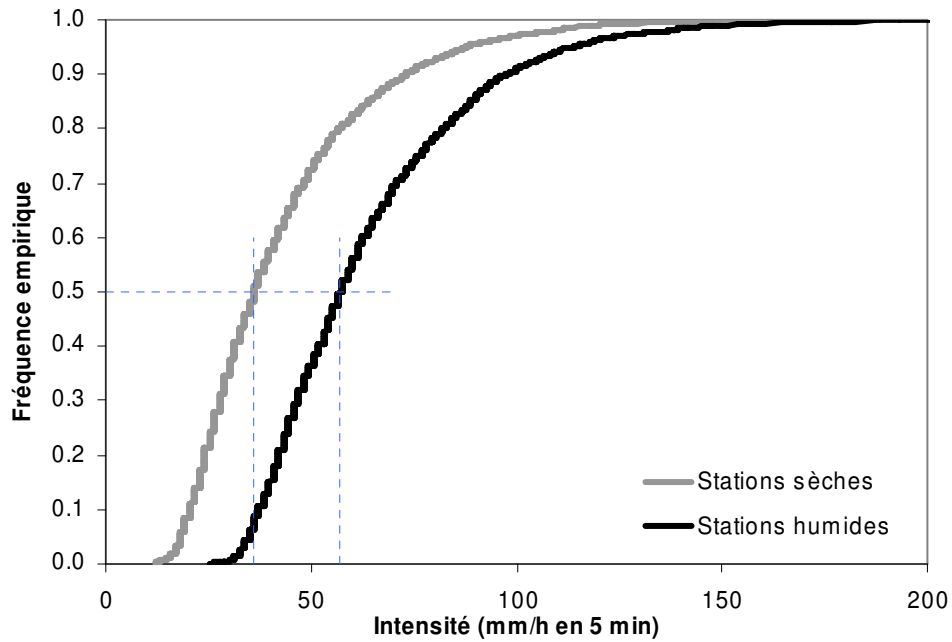


Figure 37 – Distributions observées des 60 plus fortes intensités des 3 stations les plus sèches de chaque année de la période 1990-2002 ($N = 60 \times 3 \times 13 = 2340$) et des 3 stations les plus humides de chaque année ($N = 2340$).

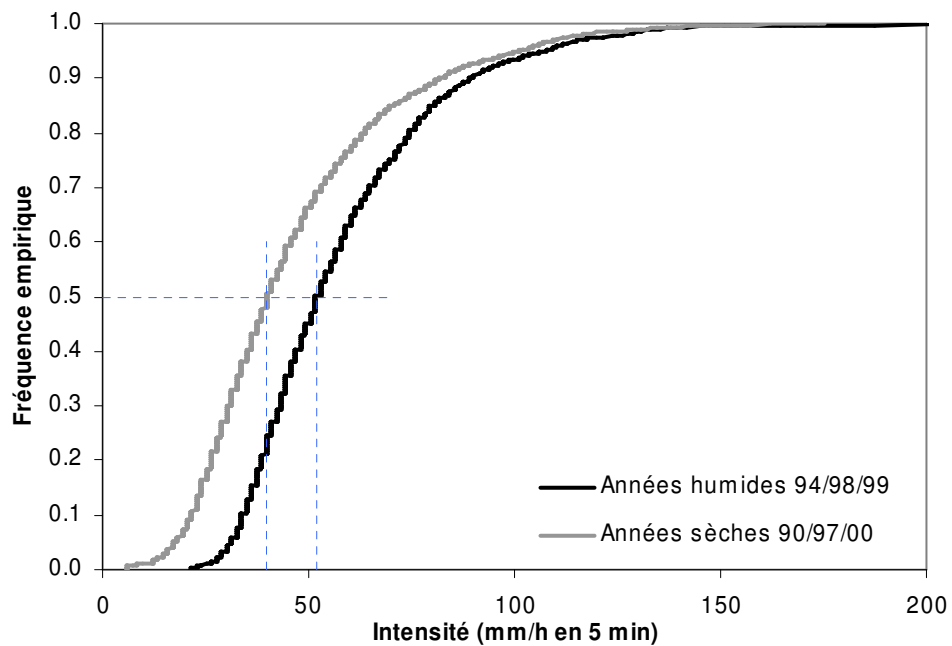


Figure 38 – Distributions observées des 60 plus fortes intensités de 11 stations pour 3 années humides (1994, 1998, 1999) et 3 années sèches (1990, 1997, 2000) ($N = 60 \times 11 \times 3 = 1980$)

Années sèches et années humides

La distinction entre les distributions « années sèches » et « années humides » (Figure 38) est légèrement moins marquée que celle entre les distributions « stations sèches » et « stations humides ». L'échantillon « années humides » est composé des 60 plus fortes intensités de 11 stations pour trois années relativement humides sur la zone AMMA-CATCH Niger (1994, 1998 et 1999), soit 1980 valeurs. Les années sèches choisies sont 1990, 1997 et 2000. Les médianes des deux distributions sont bien différenciées, 40 mm/h en 5 minutes pour les années sèches, 52 mm/h en 5 minutes pour les années humides. Les années humides sont caractérisées par des intensités plus fortes. Néanmoins, les deux distributions ne sont pas très éloignées en ce qui concerne les intensités maximales enregistrées.

En conclusion sur cette question des intensités, on peut observer que lors d'une année sèche, certaines stations peuvent enregistrer des pics d'intensité pluvieuse aussi importants que lors d'une année humide. La distribution des intensités reflète avant tout l'intensité de la convection, qui ne semble pas amoindrie en années sèches, ces dernières étant surtout caractérisées par une baisse de l'occurrence des gros systèmes convectifs organisés.

7. Synthèse de l'analyse du régime pluviométrique sahélien

On s'est attaché dans la partie II à actualiser les connaissances sur le régime pluviométrique sahélien, animé par deux interrogations : d'une part, savoir si l'épisode de sécheresse à partir de 1970 avait entraîné une modification pérenne du régime pluviométrique, et d'autre part, si les travaux récents sur la mise en place de la mousson ouest-africaine et l'investigation à de fines échelles spatio-temporelles permettaient une description plus fine du régime pluviométrique. Concernant la première question, l'analyse combinée d'une série d'observations longue mais unique avec une série plus courte de données haute résolution a permis de rapprocher variabilité décennale et variabilité interannuelle, en terme de structure de saison des pluies, et de mettre en évidence une modification du régime pluviométrique en période ou année sèche. Quant à la seconde interrogation, les données haute résolution ont effectivement apporté un nouvel éclairage à la représentation du régime pluviométrique, en offrant la possibilité de décrire le régime à l'échelle de l'événement pluvieux et à celle des intensités de pluie.

7.1. Modification du régime pluviométrique à partir de 1970

La chronique des pluies journalières enregistrées à la station de Niamey Aéroport de 1950 à nos jours est suffisamment longue pour que l'on puisse déceler une modification du régime pluviométrique entre la période humide 1950-1969, la période sèche 1970-1989 et la période récente 1990-2002.

La période 1970-1989 est marquée par un déficit pluviométrique particulièrement prononcé en période de « mousson établie » et de retrait de la mousson : -27% de pluie au mois d'août, -47% en septembre par rapport à la période 1950-1969. Le retrait de la mousson est plus précoce, même si la longueur de la saison des pluies reste inchangée. Les pluies diminuent brusquement à la fin du mois de juillet, alors que cette diminution n'avait lieu qu'au début du mois de septembre pour 1950-1969.

En ce qui concerne l'installation de la mousson pour la période 1970-1989, l'évolution saisonnière des pluies journalières se fait par une succession de paliers et d'augmentations brusques, comme pour les deux autres périodes étudiées. Le « saut de mousson », correspondant au brusque déplacement latitudinal de la ZCIT de 5°N à 10°N (Sultan et Janicot, 2003), est bien repérable sur les trois cycles saisonniers. Si pour la période 1970-1989, il a lieu à la date moyenne définie par Sultan et Janicot (2003) (24 juin, avec un écart-type de 8 jours), il paraît plus tardif pour les périodes 1950-1969 et 1990-2002 (7 juillet). Ce décalage peut apparaître comme une différence caractéristique entre périodes sèches et périodes humides. Cette appréciation doit néanmoins être considérée avec réserve, puisque l'échelle à laquelle nous avons travaillé est différente de l'échelle régionale examinée par Sultan et Janicot (2003).

Le déficit pluviométrique de la période 1970-1989 est lié à une réduction du nombre d'événements pluvieux (passage de 0.62 événement par jour en août pour 1950-1969 à 0.42 pour 1970-1989, de 0.41 à 0.29 en septembre, pour la station de Niamey), comme Le Barbé et Lebel (1997) l'avaient déjà établi avec le modèle de la loi des fuites. La possibilité de définir des événements pluvieux à partir des données au sol de l'observatoire AMMA-CATCH Niger offre un nouvel angle de validation de ces résultats, en montrant que le cumul saisonnier coïncide avec le nombre d'événements AMMA-CATCH Niger.

En ce qui concerne la période récente 1990-2002, celle-ci enregistre un déficit pluviométrique légèrement amoindri vis-à-vis de la période sèche précédente : -25% pour le mois d'août, -36% pour le mois de septembre par rapport à la période 1950-1969. En terme de modélisation, les paramètres de la loi des fuites ajustés à la station de Niamey se trouvent dans la lignée de la période sèche (0.43 événement par jour en août et 0.25 en septembre). Néanmoins, le manque de représentativité d'une seule station ne permet pas de conclure directement que la sécheresse se poursuit sur cette dernière décennie.

Du point de vue des fluctuations interannuelles de la période récente, les composites secs et humides créés à partir des observations des 30 stations AMMA-CATCH Niger de 1990 à 2002 appuient les conclusions précédentes. Le déficit pluviométrique des années sèches vis-à-vis des années humides est marqué à partir de mi-juillet : -43% en août et -49% en septembre par rapport aux années humides. Ce déficit est expliqué par la réduction du nombre d'événements pluvieux, comme l'illustrent les paramètres du modèle de la loi des fuites (0.31 événement par jour en août pour les années sèches, 0.58 pour les années humides) et la coïncidence du nombre d'événements AMMA-CATCH Niger avec le cumul annuel.

La variabilité décennale (analysée particulièrement par Le Barbé et Lebel, 1997) et la variabilité interannuelle (analysée ici avec le modèle de la loi des fuites et les caractéristiques des événements AMMA-CATCH Niger) sont similaires en terme de structure de la saison des pluies : dans les deux cas, la sécheresse se traduit surtout pas une baisse d'occurrence des systèmes convectifs en cœur de saison des pluies et non pas par un raccourcissement de celle-ci. Plus généralement, il semble clair que les conditions pluviométriques moyennes sur l'année se sont améliorées au cours de la période récente. Par contre la variabilité interannuelle est redevenue importante (semblable à ce qui était observé avant le cycle 20 années humides suivi de 20 années sèches) et le cycle saisonnier est durablement modifié avec un déficit particulièrement fort du nombre d'événements pluvieux en août se traduisant par une baisse de la pluie moyenne sur ce mois de 25 à 30% pour l'ensemble de la période 1970-2002 (Balme et al., 2004a).

7.2. Apports des données à haute résolution

7.2.1. Aspects temporels

L'observatoire AMMA-CATCH Niger fournit des séries pluviographiques fiables, opportunité plutôt rare en Afrique de l'Ouest. Ces données permettent d'accéder à l'événement pluvieux (par différents moyens) et aux intensités des pluies, éléments-clés pour caractériser plus finement le régime pluviométrique. La description d'un régime pluviométrique peut effectivement se faire par l'intermédiaire de ces deux paramètres : la fréquence d'occurrence moyenne des événements pluvieux et leur intensité moyenne. Détecter si l'un de ces paramètres, ou les deux, varie – et dans quel sens – pendant les années sèches peut fournir des indices sur les causes atmosphériques des épisodes de sécheresse au Sahel (Mathon et al., 2002).

Les travaux sur l'observatoire AMMA-CATCH Niger ont permis de définir les événements AMMA-CATCH Niger et de cerner leurs caractéristiques principales (D'Amato, 1998 ; Lebel et al., 1997). L'actualisation des caractéristiques moyennes des événements sur un échantillon plus fourni montre une grande stabilité entre la période 1990-1995 étudiée par D'Amato (1998) et la période 1990-2002 étudiée ici, comprenant une proportion nettement plus forte d'années humides. La hauteur moyenne conditionnelle à zéro par événement vaut 14.1 mm (D'Amato, 1998 : 14.4 mm). La probabilité de ne pas recevoir de pluie à une station au passage d'un événement est égale 0.28 (D'Amato, 1998 : 0.26). L'événement pluvieux AMMA-CATCH Niger offre donc une représentation de la pluie spatialisée assez stable et pertinente pour les applications hydrologiques. Plusieurs études se sont basées sur la connaissance de ces événements pour développer de nouveaux outils, dans le domaine de la désagrégation des pluies (Guillot et Lebel, 1999 ; Onibon et al., 2004) ou de la structure spatiale des champs de pluie sahéliens (Ali et al., 2003). Mathon et al. (2002) ont montré que les événements AMMA-CATCH Niger et les systèmes convectifs pluvigènes, caractérisés à partir de l'information satellite seule, constituaient des populations proches. Examiner le même objet pluvieux depuis un réseau sol ou un satellite ouvre la voie à des études multidisciplinaires. La réduction du nombre d'événements au mois d'août est-elle liée à un affaiblissement de la mousson ouest-africaine ? Sous quelle forme se traduit-elle : moins de naissances de systèmes convectifs ?

L'unicité de l'expérience AMMA-CATCH Niger rend néanmoins délicate la généralisation brutale de ces résultats à tout le Sahel. Il est nécessaire de trouver des passerelles entre des données journalières et des données événementielles. Les travaux présentés ici sur la loi des fuites n'en sont qu'une ébauche, car si le passage des données journalières aux données événementielles est très satisfaisant, on reste cantonné à des définitions ponctuelles : les événements modélisés sont proches des événements définis à la station (avec des hauteurs de pluie respectives de 11.2 mm et 11.6 mm, des

fréquences d'occurrence de 0.33 et 0.32 événement par jour), et non des événements AMMA-CATCH Niger définis spatialement (avec une hauteur moyenne conditionnelle à zéro de 14.4 mm et une fréquence moyenne d'occurrence de 0.22 événement par jour). La difficulté avec les séries ponctuelles est d'identifier un événement pluvieux correspondant au passage d'un système convectif ; on atteint vraisemblablement plutôt une averse tombée en une station, au lieu d'un événement organisé. Le modèle de la loi des fuites reste néanmoins un outil intéressant, comme on l'a vu dans la section concernant la variabilité décennale et interannuelle, et l'observatoire AMMA-CATCH nous a permis de le valider. Les paramètres de la loi des fuites confrontés aux caractéristiques des événements observés (définis à la station) sont pertinents, d'un point de vue temporel (fort cycle saisonnier du paramètre λ – nombre d'événements – et stationnarité du paramètre s – hauteur par événement –) comme d'un point de vue spatial (gradient nord/sud en juillet et août du paramètre λ moyenné sur 13 ans, stationnarité du paramètre s). Les travaux sur les événements AMMA-CATCH Niger et les événements modélisés convergent sur ces points : le cycle saisonnier des pluies est principalement régi par le cycle du nombre d'événements, de même que l'organisation zonale des précipitations à l'échelle décennale (au moins) est due à un gradient nord-sud du taux d'occurrence des événements.

Les observations AMMA-CATCH Niger offrent également la possibilité de travailler à l'échelle des intensités. L'analyse de celles-ci souligne la forte intermittence temporelle des pluies au Sahel : la moitié du cumul annuel tombe en moins de 4 heures dans la région de Niamey. Ce type de statistiques est important pour la climatologie elle-même, mais également pour les études d'échantillonnage dans le cadre des missions satellitaires. Savoir que la moitié du cumul annuel tombe avec une intensité supérieure à 35 mm/h est utile pour le choix des appareils de mesures et pour toute démarche de modélisation hydrologique, notamment pour des études concernant l'érosion et la partition entre le ruissellement et l'infiltration.

7.2.2. Aspects spatiaux

Il n'existe pas de réseau comparable à l'observatoire AMMA-CATCH Niger dans la région. Les expériences menées précédemment ont été réalisées avec des pluviomètres et sur des durées très limitées. On peut citer notamment deux réseaux d'observations denses utilisés dans le cadre de travaux sur l'estimation des pluies à partir de données satellitaires : le « degré carré » de Ouagadougou, avec 103 pluviomètres et 8 pluviographes installés pendant l'été 1986 (Hubert et al., 1987) et l'expérience TAMSAT (Tropical Applications of Meteorology using SATellite and other data), avec 36 pluviomètres disposés sur une zone de 100 km² au Niger pour les saisons 1985 et 1986 (Flitcroft et al., 1989). La densité spatiale de l'observatoire AMMA-CATCH Niger permet de caractériser finement la variabilité spatiale des pluies aux échelles temporelles des études climatologiques courantes (décade, saison, décennie) et en outre d'accéder à des échelles spatio-temporelles beaucoup plus fines dont la

caractérisation constitue le fondement de toute description des régimes pluviométriques utile pour l'hydrologue et l'agronome.

A l'échelle décennale, le cumul des événements commence à être suffisant sur l'observatoire pour que se dessine le gradient latitudinal des précipitations, caractéristique de l'Afrique de l'Ouest ; même si la trace de deux averses exceptionnelles pour la station de Niamey en 1998 reste encore visible. Par contre, à l'échelle annuelle, les hétérogénéités locales dominant par rapport au gradient latitudinal et de forts gradients pluviométriques sont relevés chaque année entre des stations proches d'une dizaine de kilomètres, d'où la faible représentativité d'une seule station. On retiendra que le choix d'une seule station pluviographique pour représenter une zone de 10 000 km² entraîne une erreur d'estimation moyenne de 16% sur la pluie annuelle, ce qui est d'un ordre de grandeur comparable à la différence entre les moyennes pluviométriques des périodes 1950-1969 et 1970-1989 sur cette région (-25%) (Balme et al., 2004a). Il n'est pas rare qu'une année « humide » sur le Sahel soit « sèche » localement et vice versa.

La variabilité spatiale des pluies – encore manifeste à l'échelle annuelle – est due aux cellules convectives des systèmes pluviogènes qui frappent « aléatoirement » une station plutôt qu'une autre et dont le passage est marqué par de fortes intensités de pluies enregistrées au sol. L'analyse de la distribution des intensités, d'un intérêt évident pour les hydrologues et les spécialistes de l'érosion, montre que la variabilité entre les distributions des pluies enregistrées aux différentes stations de la zone AMMA-CATCH Niger est très prononcée au sein d'une même année, que celle-ci soit sèche ou humide. Les distributions moyennes présentent plus d'écart entre un composite « stations sèches » et un composite « stations humides » qu'entre un composite « années sèches » et un composite « années humides ». Concrètement cela signifie que, même en année sèche, une station relativement humide pour l'année en question – mais dont le total peut n'avoir rien d'exceptionnel en valeur absolue – enregistrera des intensités très fortes, sources de ruissellement intense et d'érosion.

7.3. Enseignements plus généraux à tirer des données AMMA-CATCH Niger

Au cours de cette seconde partie, on a souvent mis en évidence l'intérêt des données AMMA-CATCH Niger pour la caractérisation de la variabilité des champs de pluie sahéliens ; toutefois nos travaux se sont limités à décrire cette variabilité comme une caractéristique intrinsèque du régime pluviométrique. A partir de ces mêmes données, Ali (2004) tire des enseignements plus généraux sur la caractérisation de la variabilité des champs de pluie, qui sont mentionnés ici et concernent : i) les propriétés de la structure spatiale des champs de pluie sahéliens et ii) leurs conséquences en termes d'applications dans le cadre de l'estimation des pluies.

L'organisation spatiale des champs de pluie sahéliens est commandée par deux processus dominants (Ali, 2004) : la variabilité interne et la variabilité externe des systèmes convectifs. La variabilité interne est due à la structure des systèmes en éléments imbriqués d'échelles différentes : cellules convectives, front convectif, partie stratiforme. La variabilité externe est reliée au gradient climatologique régional orienté nord-sud. La fréquence d'occurrence des systèmes diminue du sud vers le nord et de fait, implique des structures d'échelles dominées par une dérive nord-sud. Par ailleurs, les systèmes convectifs se développent dans une circulation d'est, ce qui engendre une anisotropie marquée des champs de pluie événementiels : les distances de corrélation sont plus importantes selon l'axe est-ouest que selon l'axe nord-sud. La structure spatiale des champs de pluie sahéliens peut donc être représentée par un variogramme composé de deux structures emboîtées, avec une première portée de 30 km et une seconde de 300 km (Guillot et Lebel, 1999). A partir de ces éléments, Ali et al. (2003) ont développé un modèle d'invariance d'échelle, capable de décrire la variabilité totale des champs de pluie pour un pas de temps quelconque et servant d'outil pour lier la variabilité climatique et la variabilité spatiale des pluies aux échelles hydrologiques. Le modèle est basé sur les variabilités interne et externe des événements pluvieux, invariants climatologiques, et sur le nombre d'événements comme seul paramètre d'échelle. Le modèle a été validé avec succès à la fois à l'échelle de l'observatoire AMMA-CATCH Niger et à l'échelle régionale, avec les données du Centre Régional AGRHYMET.

La connaissance des propriétés des champs de pluie sahéliens cités ci-dessus (structures emboîtées et anisotropes, invariance d'échelle, dérive spatiale) a permis également à Ali et al. (2004a) d'améliorer la fonction d'erreur de Lebel et Amani (1999), afin de mieux évaluer les réseaux de données au sol et les produits satellitaires. L'analyse de Ali et al. (2004b) montre que les réseaux des pays du CILSS sont certes capables de fournir des valeurs de référence à moins de 10% d'erreur à l'échelle des modèles de circulation générale (typiquement $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ au pas de temps mensuel), mais qu'ils sont inaptes aux échelles hydrologiques. S'il s'agit de garantir une erreur d'estimation inférieure à 10% à l'échelle de la décade pour une résolution spatiale de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 98% de la zone CILSS est déficitaire. En ce qui concerne les produits satellitaires, Ali et al. (2004b) indiquent qu'ils sous-estiment la fréquence des valeurs extrêmes (intermittence et valeurs fortes) et surestiment la fréquence des valeurs centrales. Une bonne spatialisation faite uniquement à partir des sous-réseaux CILSS est meilleure que tous les produits satellitaires évalués (Ali, 2004).

Partie III

**Impact de la variabilité
pluviométrique sur la culture
du mil**

Dans les deux parties précédentes, nous avons revisité les acquis concernant le régime pluviométrique sahélien, en montrant l'importance de travailler à des échelles fines, notamment dans le cadre d'applications hydrologiques et agronomiques. Cette dernière partie est consacrée à l'étude de l'impact de la variabilité pluviométrique sur l'agronomie, et plus précisément sur la culture du mil. L'originalité de cette partie est de croiser climatologie, hydrologie et agronomie. Les facteurs climatiques qui semblent affecter la culture du mil sont étudiés d'abord uniquement à partir de données pluviographiques dans le chapitre 1, puis reliés à des considérations plus agronomiques via la modélisation dans le chapitre 2. Par exemple, en ce qui concerne le démarrage de la saison des pluies « utiles », événement clé pour les cultivateurs sahéliens, une concordance significative est décelée entre la date de celui-ci déterminée localement sur l'observatoire, la date de la mise en place de la mousson à l'échelle régionale (Sultan et Janicot, 2003) et la date de semis optimale pour un rendement potentiel maximal simulé sur l'observatoire.

L'orientation agronomique de cette dernière partie a été choisie pour diverses raisons. Mieux comprendre l'impact de la variabilité pluviométrique en agronomie est fondamental : 97% de l'agriculture est pluviale au Sahel (FAO, 1995), et par conséquent soumise à la forte variabilité des pluies. La réponse du rendement à celle-ci n'est pas linéaire, les échecs de récolte sont plus généralement dus à la variabilité de la distribution des pluies au cours de la saison qu'à un réel déficit du cumul annuel, comme on le verra par la suite, d'où l'intérêt d'avoir recours à un modèle de cultures. Ensuite, la forte densité spatiale des données pluviographiques du réseau AMMA-CATCH Niger permet de s'interroger sur le lien entre la variabilité spatiale des pluies et la variabilité des rendements des cultures pluviales en Afrique de l'Ouest. Or comme le signale Affholder (1994), identifier et hiérarchiser les causes de cette variabilité est essentiel, à la fois pour se donner les moyens d'estimer la production agricole dans un contexte où les techniques de sondages à travers de vastes territoires se révèlent inefficaces, et pour déterminer les approches permettant de stabiliser la production au niveau le plus élevé possible. Enfin, il faut mentionner aussi dans ce choix fait d'étudier l'impact agronomique l'attrait de l'interdisciplinarité.

L'étude présentée ici se veut une contribution à l'explication de l'impact de la variabilité pluviométrique sur la culture de la principale céréale pluviale du Sahel, le mil, base essentielle de l'autosuffisance alimentaire (Eldin, 1994). Le terme "mil" regroupe un ensemble de graminées alimentaires annuelles qui ont pour caractéristique commune la petitesse de leurs graines. La Figure 39 représente le plus cultivé de toutes les espèces de mil, le mil pénicillaire (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.). Le mil est cultivé sur de petites parcelles fragmentées, souvent en association (généralement avec une légumineuse et parfois avec le sorgho ou le maïs). La plupart des paysans qui dépendent de cette culture sont pauvres et souvent confrontés à des déficits alimentaires (FAO et ICRISAT, 1997). Les rendements sont bas, généralement inférieurs à 500 kg/ha (de Rouw, 2004), la production du mil étant

soumise à de nombreuses contraintes - sols peu fertiles, pluviométrie faible et irrégulière, températures élevées, infestation de mauvaises herbes et dégâts causés par les oiseaux (FAO et ICRISAT, 1997).

Le Sahel connaît actuellement un problème croissant d'insécurité alimentaire. Cette crise résulte de la croissance rapide de la population combinée à une stagnation des rendements en céréales pendant les dernières décennies (Rockström, 1997). Si la production de mil au Niger a augmenté de 1979 à 1994 (1.31 à 1.86 millions de tonnes), ceci est dû à l'augmentation des superficies cultivées, passée de 3.01 à 4.87 millions d'hectares et non à une amélioration du rendement, qui a baissé de 0.44 à 0.38 t/ha au Niger (FAO et ICRISAT, 1997). L'expansion de l'aire de culture du mil et l'exploitation de terres encore plus marginales ont entraîné une diminution – voire une disparition – de la période de jachère et, conséquemment de la fertilité des sols, ainsi que le recours plus fréquent à l'application de fumier pour contrer la baisse de fertilité des sols. Néanmoins les quantités de fumier utilisées sont limitées par le manque d'animaux, dû à la disparition de la jachère qui servait de pâture (de Rouw, 2004). Les paysans n'utilisent qu'un minimum d'intrants tels que les engrais chimiques, les pesticides ou la main-d'oeuvre salariée, à cause de l'incertitude causée par l'irrégularité des précipitations et la demande limitée sur les marchés commerciaux (FAO et ICRISAT, 1997).

Paradoxalement, alors que la production de mil ne progresse pas, la quantité de travaux de recherche sur le sujet augmente (on pourra se rapporter à de Rouw, 2004, pour plus de références) : les expérimentations en milieu paysan (Rockström et de Rouw, 1997) ont succédé aux expériences menées en conditions de station et les études de simulations ont permis de mieux comprendre les décisions des paysans et de proposer des innovations. Ces dernières ont été rarement suivies pour l'instant, en partie à cause des différences de priorités entre chercheurs et paysans sahéliens : les premiers tentent d'augmenter les rendements en année « moyenne » alors que les seconds cherchent à obtenir au moins un rendement minimum les années mauvaises (de Rouw, 2004). Les échanges entre les services techniques et les paysans se feront donc surtout autour des pratiques qui permettent à la fois d'augmenter le rendement et de réduire les risques.



Figure 39 – Mil pénicillaire (FAO et ICRISAT, 1997)

1. Facteurs climatiques importants pour la culture de mil

La variabilité spatio-temporelle des pluies sahéliennes figure parmi les facteurs les plus limitants en agriculture (Graef et Haigis, 2001). L'effet négatif de pluies erratiques sur les rendements agricoles a été montré aussi bien à l'échelle du pays (Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage du Niger, 1997), qu'à l'échelle expérimentale (Bationo et al., 1993), comme le mentionnent Graef et Haigis (2001).

La faible teneur des sols en éléments nutritifs (phosphore et azote) est aussi un obstacle au développement agricole dans la zone semi-aride de l'Afrique de l'Ouest. L'application de fertilisants reste modeste, étant donné que l'engrais organique est limité et que le coût élevé des engrais chimiques empêche les paysans de s'approvisionner en quantité suffisante pour équilibrer les déficits en nutriments. De plus, ce type de pratiques agricoles intensives n'est pas toujours compatible avec la variabilité pluviométrique dominant dans les régions semi-arides. Affholder (1997) montre que l'apport de matière organique provoque une augmentation du flux d'évapotranspiration, qui se fait, à pluviosité égale, au détriment de la recharge du sol et que ce processus d'intensification introduit, par son effet sur le régime hydrique du sol, un facteur de risque supplémentaire d'apparition d'un stress hydrique au moment de phases sensibles, au cas où les pluies viendraient à s'interrompre. Au Sahel particulièrement, il est indispensable de prendre en compte le risque climatique avant de définir des stratégies de développement agricole.

1.1. Démarrage de la saison des pluies

Dans les zones tropicales semi-arides, la date de démarrage de la saison des pluies est un facteur crucial pour décider quand semer (Dodd et Jolliffe, 2001). La durée du cycle de croissance du mil (pour les variétés à cycle constant) variant de 70 à 120 jours, ceci laisse une faible liberté de manœuvre si on considère que la saison des pluies dure environ 4 mois. Semer aux premiers orages de la saison peut déboucher sur un échec si ces averses initiales sont suivies de phases sèches prolongées, asséchant la couverture du sol et empêchant la germination ou l'émergence des plantes (Ati et al., 2002). Ces situations de faux départ occasionnent des semis multiples, dans des pays où le capital semencier est déjà faible (Diop, 1996). Si le semis précoce réussit, d'autres risques menacent le succès de la récolte en fin de saison, comme l'altération par les moisissures, les insectes et les oiseaux (Sultan, 2002). A l'inverse, l'apparition des premières grandes pluies entraîne une libération importante d'azote, élément essentiel de la photosynthèse. En ne semant pas à ce moment là, on court donc le risque de laisser s'installer des plantes concurrentes du mil, qui profiteront pleinement du pic d'azote. De plus, un semis trop tardif peut amener en fin de cycle des réserves en eau insuffisantes pour le remplissage des grains (Sultan, 2002). Finalement, Eldin (1994) conseille de ne pas semer avant le 11 mai ou après le 11 juillet au Niger parce que les risques de faux départs ou d'échec terminal sont trop importants. Par ailleurs, les pratiques paysannes prennent en compte d'autres

contraintes, telle que l'optimisation du temps de travail nécessaire à chacune des étapes agricoles réalisées manuellement (préparation du champ, fumure, semis, démarrage, sarclage) et la lutte contre l'enherbement (Milleville, 1998).

Une prédiction fiable de la date de démarrage de la saison des pluies permettrait d'aider grandement la préparation des champs, la mobilisation des graines, de la main d'œuvre et de l'équipement et aussi de réduire les risques de semer trop tôt ou trop tard (Omosho et al., 2000). Plusieurs méthodes de prédiction du démarrage de la saison des pluies ont été proposées, basées soit sur des données pluviométriques, soit sur les vents en altitude, soit récemment sur les conditions de surface (Omosho et al., 2000). La méthode d'Omosho (1990), s'appuyant sur les vents en altitude, est utilisée en mode opérationnel par l'ACMAD (Centre Africain des Applications de la Météorologie pour le Développement). Ce type de méthodes requiert des données de sondages en altitude, qui sont relativement rares en Afrique de l'Ouest. L'inconvénient de ces méthodes est de fournir une date moyenne de démarrage de la saison des pluies sur une zone, or Balme et al. (2004b) soulignent la variabilité du démarrage de la saison des pluies au Sahel aux échelles hydrologique et agronomique sur l'observatoire AMMA-CATCH Niger. Des efforts sont néanmoins faits pour utiliser des données plus accessibles pour les prévisions (Omosho et al., 2000 ; Dodd et Jolliffe, 2001).

Cette section s'appuie sur l'article de Balme et al (2004b, à paraître dans Sécheresse) qui suit, consacré à la variabilité du démarrage de la saison des pluies sur l'observatoire AMMA-CATCH Niger. Il ne s'agit pas dans cet article de prévoir la date de démarrage de la saison, mais de la définir a posteriori à partir des chroniques de pluies des stations AMMA-CATCH Niger. L'intérêt est d'exploiter à nouveau la densité spatiale du réseau d'observation pour documenter la variabilité du démarrage de la saison.

La difficulté réside dans le choix de la définition de la date de démarrage de la saison des pluies. Balme et al. (2004b) proposent trois critères de détermination du démarrage de la saison des pluies et développent plus particulièrement l'intérêt du critère agroclimatique de Sivakumar (1988). Ati et al. (2002) comparent cinq méthodes de définition différentes appliquées au nord du Nigeria : une traditionnelle, deux basées sur les cumuls pluviométriques cumulés (dont celle de Sivakumar (1988) utilisée dans l'article), et deux utilisant une relation entre la pluie et l'évapotranspiration. Pour la période 1961-1991, ils notent que le démarrage suivant Sivakumar (1988) est trop tardif (avec une date moyenne basée sur 8 stations situées vers 12°N autour du 16 juillet) et proposent une méthode hybride, combinant une des méthodes utilisant la pluie et l'évapotranspiration avec le critère de séquences sèches de Sivakumar (1988). La date moyenne de démarrage des pluies sur le Nigeria (autour de 12°N) déterminée avec cette méthode est le 22 juin et coïncide avec le démarrage agronomique moyen déterminé sur l'observatoire AMMA-CATCH Niger (Balme et al., 2004b). Sultan (2002) différencie la notion de démarrage de la saison des pluies (dont la date moyenne sur la période 1968-1990 est établie au 14 mai) – correspondant à l'arrivée du front intertropical sur les

latitudes sahéliennes, à laquelle est associée une forte convection locale et qui marque donc les premières pluies sur le Sahel – et celle de mise en place de la mousson (date moyenne 24 juin) – qui caractérise l’installation de la mousson et le cœur de la saison humide en Afrique soudano-sahélienne. Ces deux dates moyennes correspondent respectivement dans l’article présenté au démarrage hydrologique avec un seuil de précipitation de 5 mm et au démarrage agronomique.

Les critères utilisés dans l’article, basés uniquement sur des seuils de précipitation, sont discutables ; néanmoins leur similitude avec les résultats de Sultan (2002) à l’échelle régionale valide leur intérêt. Il faut considérer ces critères comme des indices échelonnés dans le temps de l’installation de la saison des pluies : premières pluies locales générant du ruissellement (critère hydrologique), événements plus organisés (critère climatique) et finalement mousson établie (critère agronomique). Leur utilité est de permettre la comparaison des démarrages observés en chacune des 30 stations AMMA-CATCH Niger. La concordance entre la date moyenne du démarrage agronomique observé sur l’observatoire, la date de démarrage des pluies déterminée par d’autres auteurs à des latitudes équivalentes (ex. Ati et al., 2002) et la date de mise en place de la mousson définie par Sultan (2002) révèle un signal fort enregistré à l’échelle locale comme régionale.

Démarrage de la saison des pluies à Niamey Aéroport de 1950 à 2002

Afin de mettre en perspective sur une période plus longue les travaux de Balme et al. (2004b), on détermine la date de démarrage agronomique de la saison des pluies (définie suivant le même critère que celui de l’article) à la station de Niamey Aéroport, de 1950 à 2002 (Figure 40). La date moyenne de démarrage de la saison des pluies sur cette période est le 17 juin (écart-type de 19 jours), elle est similaire à la date moyenne de démarrage à Niamey sur la période 1990-2002. On indique parallèlement sur la Figure 40 les dates de mise en place de la mousson de 1968 à 1990 déterminées par Sultan (2002). La variabilité interannuelle de la date du démarrage agronomique est relativement forte, plus marquée en tous cas que celle de la mise en place de la mousson.

Si la différence de comportement entre les démarrages agronomiques des saisons des pluies de la période humide (1950-1969), de la période sèche (1970-1989) et de la période récente (1990-2002) est légère, celle entre les fins des saisons est plus marquée. La Figure 41 montre un rétrécissement de la saison agronomique pendant la période 1970-1989, avec un démarrage légèrement plus tardif (20 juin vs. 16 juin) et une fin significativement plus précoce (9 octobre vs. 18 octobre). La saison agronomique moyenne de la période récente s’inscrit entre les deux, avec un démarrage le 16 juin, similaire à celui de la période humide et une fin le 9 octobre, identique à la période sèche. Ceci confirme les travaux qui montrent un décalage durable de la fin de la saison des pluies.

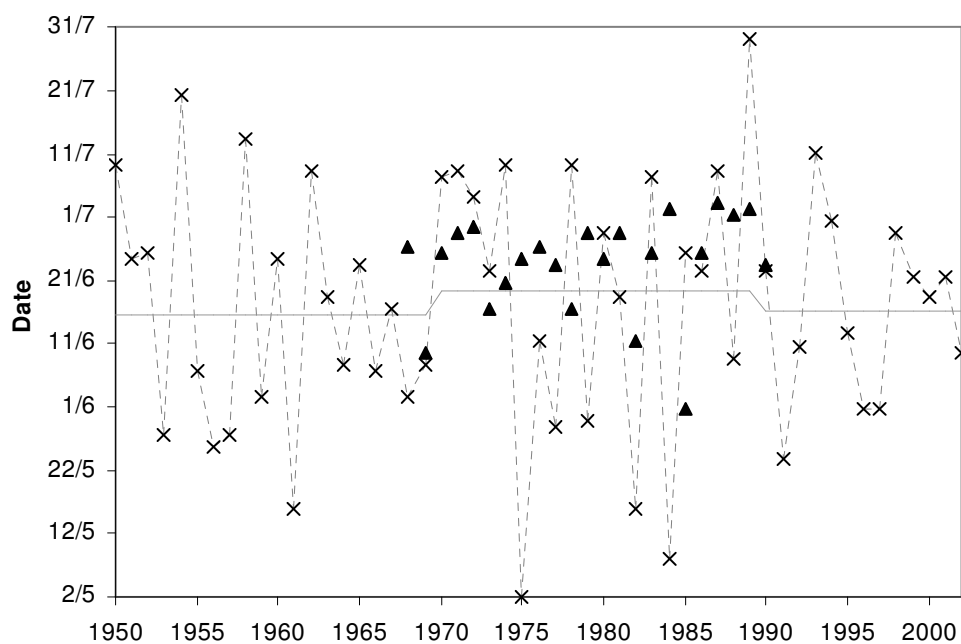


Figure 40 – Dates de démarrage agronomique (d’après Balme et al., 2004b) de la saison des pluies à Niamey Aéroport de 1950 à 2002 (croix) et dates du « saut » de la ZCIT déterminées de 1968 à 1990 d’après les résultats de Sultan (2002) (triangle).

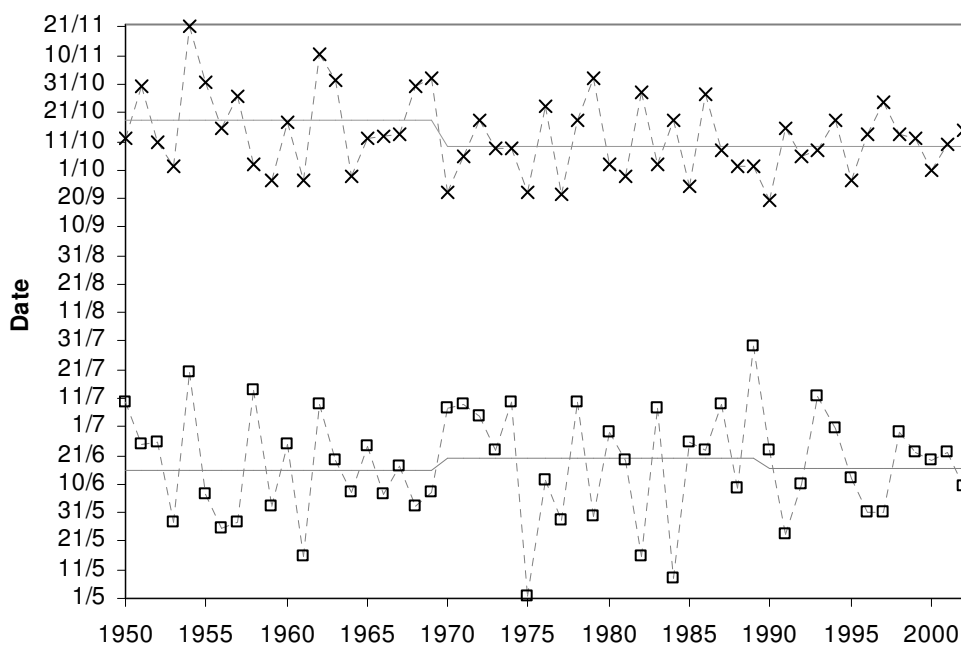


Figure 41 – Dates de démarrage et de fin de la saison des pluies agronomique à Niamey Aéroport (1950-2002). Les traits continus gris indiquent les moyennes calculées sur les périodes 1950-1969, 1970-1989 et 1990-2002.

**Démarrage de la saison des pluies au Sahel :
Variabilité aux échelles hydrologique et agronomique,
analysée à partir des données AMMA-CATCH Niger**

(The onset of the rainy season in the Sahel:
Variability at hydrological and agronomical scales,
analysed from the AMMA-CATCH Niger data)

Maud Balme, Sylvie Galle, Thierry Lebel

Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement – IRD, Grenoble, France

Mots-clés : définition du démarrage de la saison des pluies, variabilité, « saut » de mousson, mil

Discipline : hydrologie, agronomie

Résumé

Le démarrage de la saison des pluies au Sahel, qui est d'une importance critique pour la culture du mil, est étudié à partir d'un réseau dense de 30 pluviographes installés depuis 12 ans, couvrant une zone de 16 000 km² dans la région de Niamey (Niger, 13.5°N).

Trois critères sont utilisés pour définir le démarrage de la saison des pluies, l'un est spatial (« climatique »), les deux autres sont ponctuels (« hydrologique » et « agronomique »). Le démarrage climatique est lié à l'observation du premier système convectif de méso-échelle organisé. Le critère hydrologique prend en compte la première pluie générant du ruissellement. Le critère agronomique s'assure que le démarrage n'est pas suivi d'épisodes secs de plus de 7 jours.

Le démarrage dit « agronomique » est le plus tardif et coïncide avec la date du « saut » de mousson, ayant lieu la 3^{ème} décennie de juin. La saison des pluies « hydrologique » peut débuter plusieurs semaines avant cette date, néanmoins 90% du cumul annuel tombe au cours de la saison agronomique, c'est-à-dire entre la troisième décennie de juin incluse et fin septembre. Le démarrage « climatique » se trouve entre les deux.

Ces dates moyennes cachent une grande variabilité spatiale. Sur la zone étudiée, le démarrage agronomique ou hydrologique peut varier de plus de 3 semaines pour une année donnée selon la station considérée. Sur les 12 ans d'observations, les dates moyennes de démarrage sont aussi très variables, alors que les dates de fin sont plus resserrées.

On montre également qu'il n'y a pas de corrélation significative entre le cumul saisonnier et la longueur de la saison des pluies.

L'intérêt de ces résultats pour les cultures de mil est discuté en conclusion.

Summary

The onset of the rainy season in the Sahel is studied on a densely instrumented area (1990-2001), allowing for an analysis of the spatial variability as well as the interannual variability. The area is located in the region of Niamey (Niger) and covers about 16 000 km².

Three criteria are used to define the onset, one is spatial (“climatological”), and the two others are local (“hydrological” and “agronomical”). The climatological date is linked to the observation of the first organised mesoscale convective system. The hydrological criterion takes into account the first rainfall generating run off, even if it is a local event. The agronomical criterion requires that no dry spell of more than 7 days follows the onset.

The onset dates obtained from the three criteria for 12 consecutive years are compared. In average, the “hydrological” onset occurs six weeks before the “agronomical” onset. The occurrence of the first organised convective system is in between. The agronomical onset occurs in average at a date close to the date of the monsoon jump (third decade of June). This is consistent with the fact that meteorological conditions at the monsoon onset lead to shorter dry spells.

However, these average results hide a great spatial variability over our study area. For a given year, about one month may separate the earliest onset at a given station of the latest, for both local criteria. Similarly, there is an important interannual variability of the onset, whereas the end of the rainy season is much less variable.

A correlation analysis between the date of the onset, the length of the season and the total seasonal rainfall shows that the total rainfall is poorly correlated to either the date of the onset or the length of the season. Consequently, seasonal forecast techniques, based solely on the date of the onset, have little predictability potential.

The implication of these results for millet crops are discussed as a conclusion.

Au Sahel, la sécurité alimentaire d’une majorité de la population dépend de la culture de céréales vivrières comme le mil ou le sorgho (FAO et ICRISAT, 1997). L’accroissement démographique des 50 dernières années a entraîné une augmentation de la proportion des surfaces cultivées (champs, jachères, pâtures), menaçant l’espace exploitable de saturation. Cette proportion est passée de 30 % en 1950 à 80 % en 1992 dans la région de Niamey (Loireau, 1998) et de 28 % en 1961 à 46 % en 1996 sur toute la bande sahéenne (Taylor et al., 2002) (estimation du modèle SALU, Sahelian land use model). Une des priorités des institutions de recherche en Afrique de l’Ouest est d’assurer un certain degré de stabilité des rendements des récoltes aux agriculteurs (Sivakumar, 1988). Cette situation s’inscrit dans un environnement et un climat difficiles – sols peu fertiles, précipitations faibles et irrégulières, soumises à une grande variabilité spatio-temporelle. Dans l’optique de mieux gérer la ressource pluviométrique, il s’avère nécessaire de comprendre les différents mécanismes de la mousson ouest-africaine, et notamment le démarrage de la saison des pluies, événement clé pour les agriculteurs pour choisir une date de semis.

Bien que le climat sahélien soit caractérisé par une saison des pluies unique et bien marquée, il n'existe pas de critère universellement accepté pour en définir le démarrage et la fin. Les définitions utilisées dépendent de l'observateur. Pour le météorologue par exemple, le démarrage de la saison des pluies est associé à la mise en place de la convection organisée, qui se traduit par l'apparition d'événements pluvieux présentant une certaine extension spatiale. L'hydrologue, quant à lui, s'intéresse aux premières pluies susceptibles de générer du ruissellement, même si ce n'est que localement, tandis que l'agronome impose que la première pluie significative ne soit pas suivie d'épisodes secs trop longs, fatals pour les cultures. La comparaison de ces trois points de vue – qui vaut aussi bien pour le démarrage que pour la fin de la saison des pluies – fait apparaître une opposition entre des critères localisés (dans le temps ou dans l'espace) et des critères mettant l'accent sur la durée ou l'extension spatiale. Pour pouvoir comparer ces différentes approches, il est donc important de disposer de données de bonne qualité, denses spatialement pour étudier les variations locales de la date de démarrage et de bonne résolution temporelle pour bien appréhender la notion d'événement pluvieux associé aux systèmes convectifs.

Il existe sur le Sahel un jeu de données unique qui satisfait à ces critères ; il s'agit de l'observatoire AMMA-CATCH Niger, constitué de 30 stations pluviographiques réparties sur une zone de 16000 km² et ayant fonctionné 12 années, procurant ainsi un échantillon pertinent pour étudier la variabilité aux échelles fines, dans l'espace et dans le temps, du démarrage et de la fin de la saison des pluies, ainsi que leur corrélation avec le cumul pluviométrique annuel.

Observatoire AMMA-CATCH Niger

Dans le but de mieux comprendre les systèmes précipitants sahéliens à des échelles d'espace et de temps réduites, un observatoire couvrant une zone comprise entre 1°40 et 3°00 Est en longitude et 13°00 et 14°00 Nord en latitude (Figure 42) a été équipé depuis 1990 d'un réseau de 30 pluviographes (Lebel et al., 1995). La pluviométrie annuelle moyenne de 1990 à 2001 sur la zone d'étude est de 510 mm (Figure 43), mais les minima et maxima annuels indiqués illustrent une grande variabilité spatiale des cumuls saisonniers, entre des stations parfois proches d'une vingtaine de kilomètres. Les données acquises sur l'observatoire ont ainsi permis, par la finesse de leurs pas de temps et d'espace (une station tous les 25 km enregistrant les pluies au pas de temps de 5 minutes), de mieux caractériser la variabilité spatio-temporelle des pluies sahéliennes. Lors d'une première étude de synthèse, D'Amato (1998) a comparé plusieurs critères permettant de définir objectivement des événements pluvieux sur la zone d'étude considérée. L'événement pluvieux est caractérisé par un seuil minimal de quantité d'eau tombée de 1 mm, une durée minimale de non pluie de 30 minutes permettant de considérer l'événement antérieur comme indépendant du suivant, et une proportion minimale de stations du réseau touchées de 30%. Des études récentes (Mathon et al., 2002) basées sur une archive de 9 ans de données Météosat ont montré que les événements pluvieux ainsi définis à partir de l'observatoire AMMA-CATCH Niger constituaient une population proche de celle des systèmes convectifs

organisés, caractéristiques du régime pluviométrique sahélien, et produisaient 90% de la pluie totale sur la région. L'apparition de ces événements pluvieux marque le démarrage « climatique » de la saison des pluies, en ce sens que la convection organisée est caractéristique de la région.

Deux représentations de la pluie sont donc utilisées parallèlement : un point de vue ponctuel s'appuyant sur les mesures enregistrées en une station quelconque du réseau considérée isolément, et une vision spatiale reposant sur la notion d'événement pluvieux sur la zone.

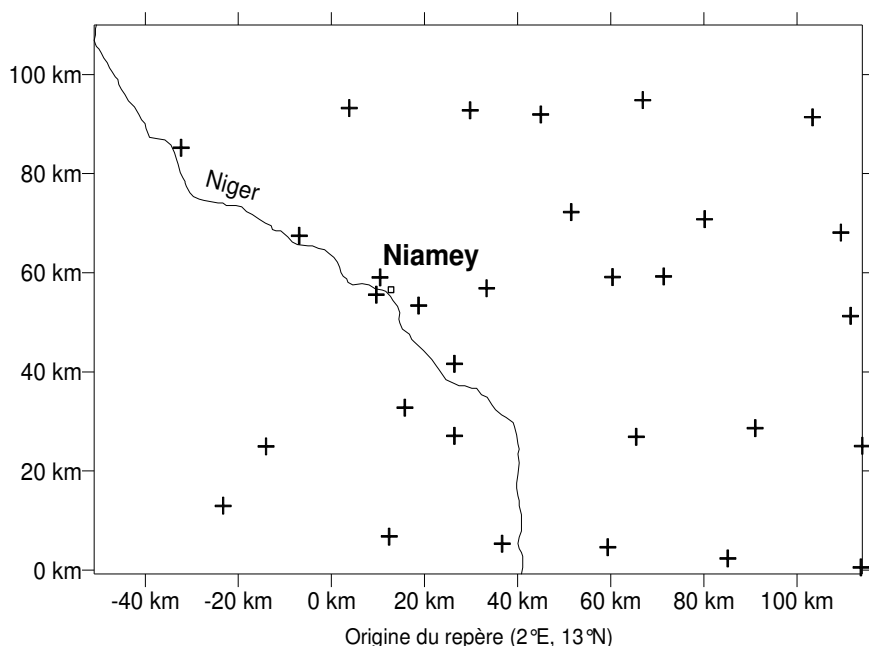


Figure 42 – Observatoire AMMA-CATCH Niger (réseau de 30 pluviographes installé depuis 1990).

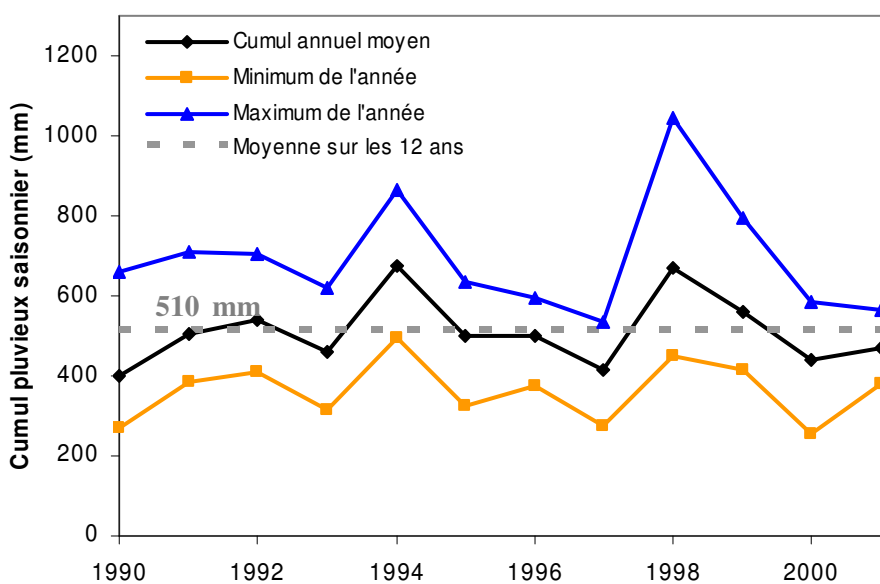


Figure 43 – Cumuls pluviométriques annuels moyens sur 30 stations et extrêmes saisonniers enregistrés de 1990 à 2001.

Définition du démarrage et de la fin de la saison des pluies

On trouve plusieurs critères de définition du démarrage de la saison des pluies basés sur des données pluviométriques ou des variables édaphiques dans la littérature. Ces critères de type « agronomique » définissent le démarrage soit à partir d'un seuil de pluie tombée en quelques jours consécutifs (Sivakumar, 1988 ; Stern et al., 1981), soit à partir d'un seuil d'évapotranspiration potentielle, soit à partir d'une combinaison des deux types de variables. Les deux critères basés sur un seuil de pluie tombée sont très similaires, on utilisera ici le critère de Sivakumar (1988) comme critère « agronomique ».

Dans cet article, on confronte deux critères ponctuels (critère « hydrologique » et critère « agronomique ») et un troisième critère spatial (critère « climatique »), chacun faisant appel à une représentation différente de la pluie :

- le critère « climatique » prend comme dates de démarrage et de fin de la saison des pluies les dates du premier et dernier événement pluvieux AMMA-CATCH Niger, indiquant l'apparition puis la disparition d'une convection organisée.
- le critère « hydrologique » fait commencer la saison en chaque station à la première pluie enregistrée supérieure ou égale à un seuil (0.5 mm, 2.5 mm ou 5 mm), et l'arrête à la dernière pluie supérieure ou égale au seuil. La gamme de seuils explorés correspond au minimum enregistré par les pluviographes (0.5 mm) et à un seuil de 5 mm susceptible de générer un écoulement dans cette région (Peugeot, 1995).
- le critère « agronomique » (Sivakumar, 1988) donne pour chaque station comme date de démarrage de la saison après le 1^{er} mai, au moins 20 mm de pluie sur 3 jours, sans épisode sec excédant 7 jours dans les 30 jours qui suivent (pour éviter les faux départs), et comme date de fin de saison après le 1^{er} septembre, 20 jours consécutifs sans pluie.

Les critères hydrologique et agronomique sont définis pour chaque station séparément alors que le critère climatique s'applique globalement à toute la zone d'étude. Pour une année donnée, on a donc plusieurs dates de démarrage agronomique et hydrologique possibles sur la zone d'étude mais une seule date climatique.

Résultats

Comparaison des dates déterminées par les différents critères

Les premiers résultats – moyenne sur 12 ans et 30 stations (Tableau 15) – montrent que les dates de démarrage de la saison des pluies s'étalent sur 2 mois (du 30 avril au 21 juin) suivant les critères utilisés alors que les dates de fin de la saison sont moins dispersées (du 27 septembre au 4 octobre), ce qui est remarquablement resserré, eu égard aux critères utilisés. Concernant le critère hydrologique, l'augmentation du seuil (passage de 0.5 mm à 2.5 mm, ou de 2.5 mm à 5 mm) décale la date moyenne de démarrage d'une semaine (30 avril, 7 mai, 15 mai). Le critère climatique, qui marque le début d'événements pluvieux importants par leur amplitude et leur extension spatiale, fait débiter la saison

en moyenne le 3 mai. Un commentaire s'impose sur la similitude des dates hydrologiques et climatiques. La date hydrologique est calculée ici sur la base d'une moyenne des dates individuelles calculées en chaque station. Ceci revient indirectement, et par une arithmétique un peu différente, à définir comme le critère climatique un démarrage moyen sur l'ensemble de la zone d'étude. On verra plus loin que le critère hydrologique se démarque nettement du critère climatique lorsque l'on considère les dates de démarrage, très dispersées, calculées sur chaque station isolément. Quant au critère agronomique, il est le plus tardif et repousse les premières pluies utiles à la date moyenne du 21 juin, qui coïncide avec le « saut » de mousson. Des travaux récents (Sultan et Janicot, 2000 ; Le Barbé et al., 2002) ont remis en cause la vision classique d'une pénétration progressive de la mousson sur le continent, en montrant que la migration latitudinale de la Zone de Convergence Intertropicale vers le Nord – qui marque l'installation de la mousson sur certaines zones du Sahel – se fait brusquement fin juin, d'une position quasi-stationnaire à 5°N en mai-juin à une autre position d'équilibre à 10°N en juillet-août, d'où le terme « saut » de mousson. Le lien entre ce « saut » et le démarrage agronomique décrit par des données au sol s'explique par le fait qu'en phase de mousson établie, les conditions météorologiques (humidité de l'air, organisation de la convection) induisent une réduction de la longueur des épisodes secs.

Les dates de démarrage de la saison des pluies, suivant le critère choisi, sont liées à différents phénomènes, qui s'échelonnent dans le temps - premières pluies locales générant du ruissellement (critère hydrologique), événements plus organisés (critère climatique) et finalement mousson établie (critère agronomique). Ces dates moyennes donnent une idée globale de l'installation de la saison des pluies, mais cachent en réalité une grande variabilité spatiale et temporelle.

	Critère climatique	Critère hydrologique			Critère agronomique
		Seuil 0.5 mm	Seuil 2.5 mm	Seuil 5 mm	
date moyenne de démarrage	3 mai	30 avril	7 mai	15 mai	21 juin
écart-type interannuel sur 12 ans en jours () = sans 1991	14 (15)	10 (10)	10 (10)	9 (9)	11 (6)
date moyenne fin	1 ^{er} octobre	4 octobre	29 septembre	27 septembre	4 octobre
écart-type (en jours)	10	7	7	7	7
longueur moyenne de la saison (jours)	151 jours	157 jours	145 jours	135 jours	105 jours
écart-type (en jours)	14	15	14	13	13

Tableau 15 – Dates moyennes de démarrage et de fin de la saison des pluies (sur 12 ans et 30 stations), longueur moyenne de la saison.

Variabilité interannuelle

Dans cette partie on ne considère que les dates moyennes calculées chaque année en faisant la moyenne des 30 stations. On ignore donc dans un premier temps la variabilité spatiale et on a déjà fait la remarque que, dans ces conditions, le critère hydrologique était très semblable au critère climatique. L'objectif ici est de caractériser la variabilité interannuelle en s'appuyant sur l'analyse des écarts-types calculés sur les séries de valeurs annuelles. Dans le Tableau 15, on a fait apparaître deux valeurs pour ces écarts-types : une est calculée sur les douze années et l'autre sur onze années, en ne prenant pas en compte l'année 1991. Cette année a été particulièrement précoce et seuls 9 pluviographes étaient installés avant le 15 mai. Les écarts-types des dates hydrologiques et climatiques sont peu affectés par cette modification d'échantillonnage avec des valeurs respectives de 10 et 14 jours. Par contre l'écart-type interannuel des dates de démarrage agronomique passe de 11 jours en incluant l'année 1991 à 6 jours en l'excluant. La petite taille de l'échantillon explique cette grande instabilité et permet difficilement de tirer des conclusions définitives sur la plus ou moins grande variabilité des dates de démarrage selon le critère utilisé. Il semble néanmoins que la date de démarrage agronomique soit plus stable d'une année à l'autre que les dates de démarrage hydrologique et climatique. En ce qui concerne les écarts-types des dates de fin de saison des pluies, on note qu'ils sont plus faibles que ceux des dates de démarrage confirmant que la fin de la saison des pluies est mieux définie que son démarrage et moins variable d'une année à l'autre.

Dans ce qui va suivre, on s'intéresse plus particulièrement aux critères agronomique et climatique, jugés plus pertinents en terme d'applications - le critère agronomique a un intérêt évident du point de vue de l'agriculture alors que le critère climatique renvoie à une vision météorologique du phénomène. La représentation des dates de démarrage et de fin de saison des pluies obtenues avec les 2 critères pour les années 1990 à 2001 (Figure 44) partage la saison des pluies en 2 périodes. La première, enveloppée par les 2 critères de démarrage, est appelée « pré-saison » et indique le temps durant lequel les pluies sont irrégulières. Elle couvre la période allant de début avril à la deuxième décennie de juin incluse. La deuxième période, ou « mousson établie », s'étend entre le démarrage agronomique de la troisième décennie de juin et fin septembre qui marque la fin de la saison des pluies pour les deux critères.

Alors que la fin de la saison des pluies est chaque année très semblable pour les deux critères, l'écart sur les dates de démarrage est souvent important et très variable suivant les années : 29 jours en 1993, 78 jours en 1992. Ceci indique que la longueur de la pré-saison peut varier de un à trois mois, tandis que la longueur de la saison agronomique, qui correspond à la « mousson établie » est bien moins variable, son démarrage et sa fin étant relativement stables.

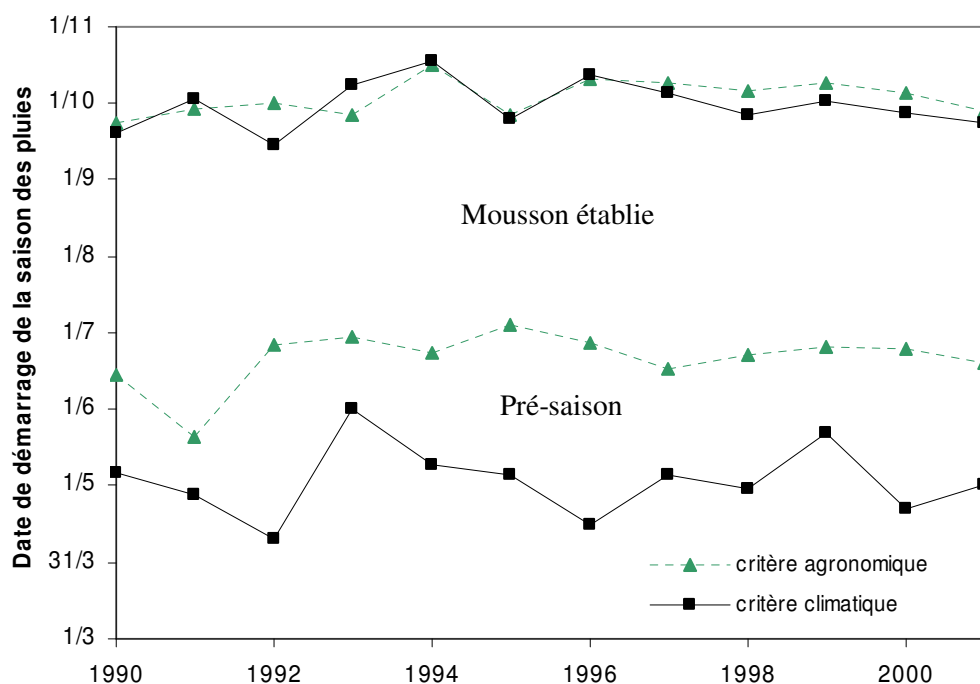


Figure 44 – Dates de démarrage et de fin de la saison des pluies suivant 2 critères (agronomique et climatique).

La saison des pluies agronomique est donc en moyenne de 105 jours alors que la saison des pluies climatique dure 151 jours, chiffres à comparer au cycle de croissance des mils (90 à 120 jours pour les variétés à cycle constant). De plus, malgré sa durée nettement plus courte, la saison des pluies agronomique représente 90% du cumul pluviométrique saisonnier total (Figure 45). En apparence on pourrait donc concevoir une stratégie simple de semis lors du « saut » de mousson, minimisant ainsi les risques de sécheresse en cours de cycle et assurant une durée de pluie suffisante (la fin des pluies en fin de cycle étant préférable, une saison des pluies de 105 jours est encore bien adaptée à une variété de 120 jours). Des simulations faites avec le modèle agronomique SARRA-H (Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques) sur la station de Niamey (1968-1990) montrent que la prise en compte de la date de la mise en place de la mousson comme date de semis améliore significativement les rendements (Sultan, 2002). Néanmoins, les pratiques paysannes prennent en compte d'autres contraintes, telle que l'optimisation du temps de travail nécessaire à chacune des étapes agricoles réalisées manuellement (préparation du champ, fumure, semis, démariage, sarclage) et la lutte contre l'enherbement (Milleville, 1998). L'apparition des premières grandes pluies favorise effectivement la pousse de mauvaises herbes ainsi qu'une libération importante d'azote, élément essentiel de la photosynthèse. En ne semant pas à ce moment là, on court donc le risque de laisser s'installer des plantes concurrentes du mil, qui profiteront pleinement du pic d'azote.

Les calendriers de semis ne peuvent donc s'appuyer exclusivement sur des considérations climatiques et des études plus poussées à l'aide de modèles de culture sont nécessaires pour bien exploiter les

résultats de l'analyse climatologique. Cependant, une première conclusion d'ordre diagnostique s'impose ici. Alors que sur notre période d'étude la longueur de la saison climatique varie entre 130 jours (1993) et 180 jours (1996), l'essentiel de cette variation est lié à celle de la longueur de la pré-saison. Dans la mesure où cette pré-saison ne représente que 10% du cumul pluviométrique total, on conçoit aisément que ses variations de longueur ne constituent qu'un facteur explicatif secondaire du cumul saisonnier. Or c'est la longueur de la pré-saison qui conditionne la longueur totale de la saison des pluies. La corrélation entre durée de la saison des pluies et cumul pluviométrique saisonnier ne peut donc être très forte. C'est un point sur lequel nous reviendrons plus loin.

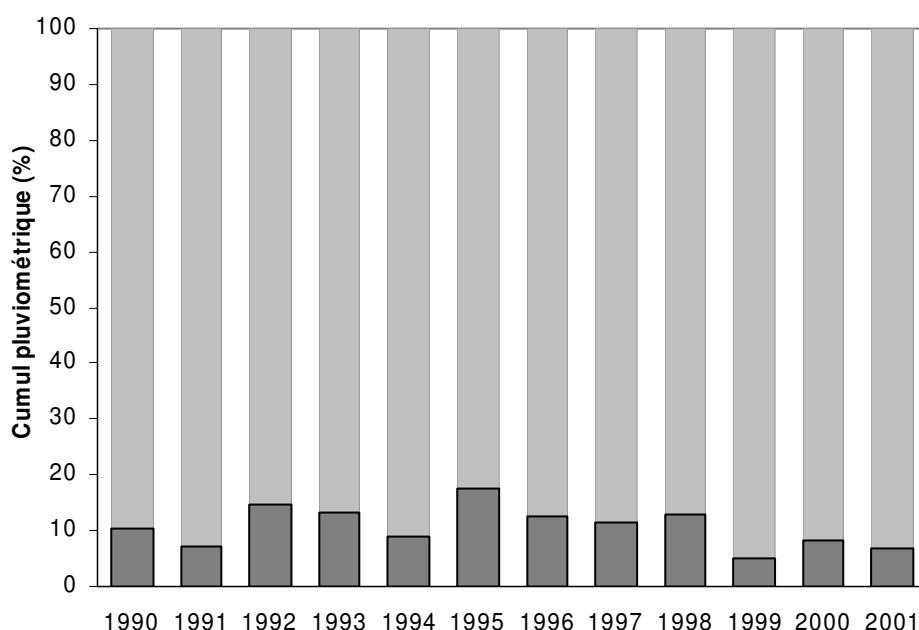


Figure 45 – Apports des deux périodes (pré-saison en gris foncé et mousson établie en gris clair) en % du cumul pluviométrique annuel.

Variabilité spatiale

Alors que dans la section précédente on s'est intéressé exclusivement à la variabilité interannuelle des dates moyennes de démarrage calculées sur l'ensemble de la zone d'étude, on va analyser ici comment cette date varie dans l'espace pour une année donnée. Bien entendu cette analyse ne concerne que les deux critères calculés localement, à savoir le critère agronomique et le critère hydrologique. Le réseau AMMA-CATCH Niger fournit des informations pluviographiques pour des stations distantes les unes des autres d'une trentaine de kilomètres seulement. On peut donc tracer des cartes de date de démarrage, illustrées sur la Figure 46, qui montrent à la fois la grande variabilité dans l'espace de ces dates de démarrage et une organisation totalement différente d'une année à l'autre, mal corrélée à la latitude et indépendante des conditions de végétation ou de relief.

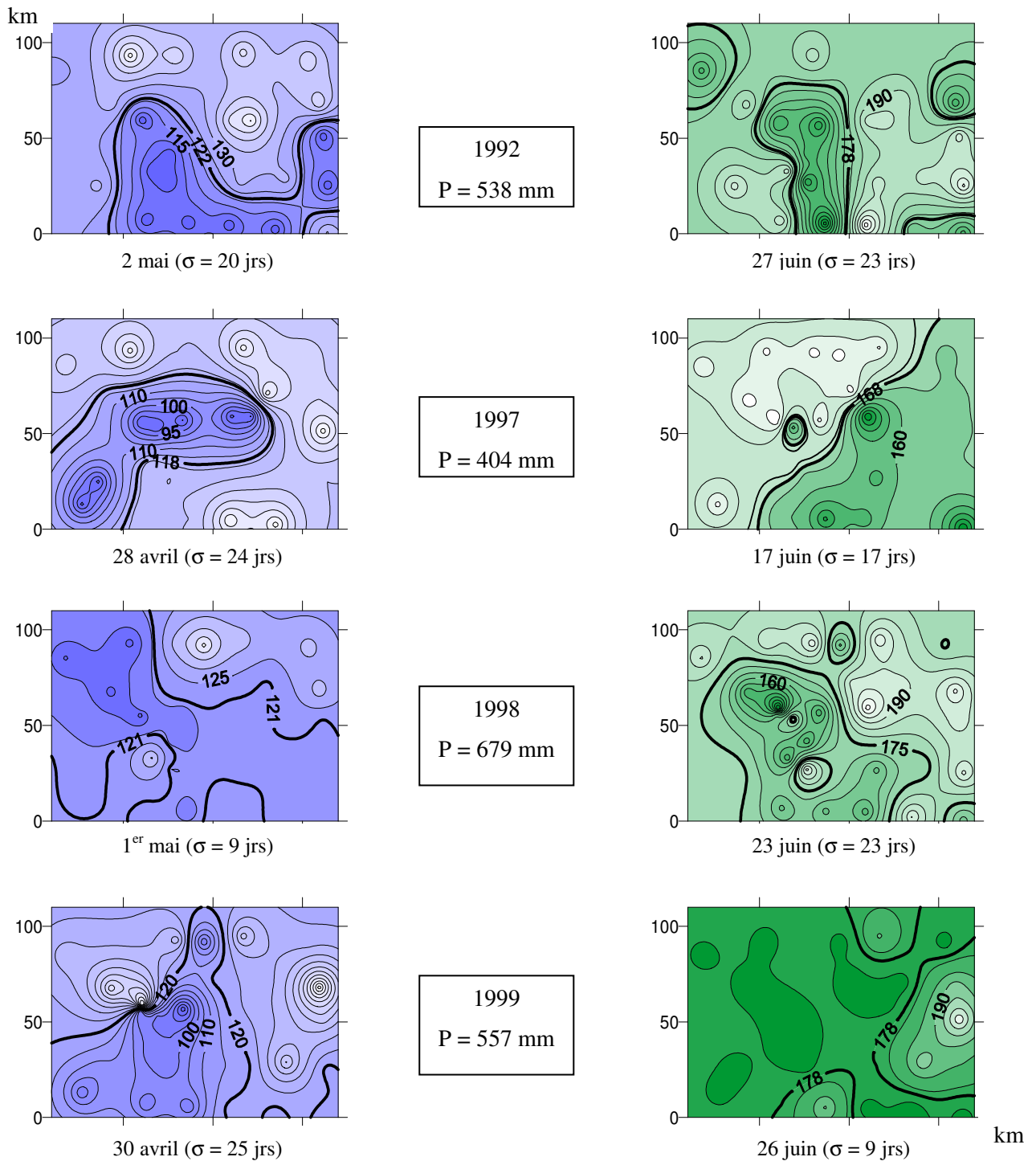


Figure 46 – Dates de démarrage de la saison des pluies sur l’observatoire AMMA-CATCH Niger pour 4 années (1992, 1997, 1998, 1999), à gauche suivant le critère hydrologique (seuil 2.5 mm), à droite suivant le critère agronomique. Plus les teintes sont claires, plus la date de démarrage est tardive. Les isolignes sont écartées de 5 jours. L’isoligne en gras « rajoutée » indique la date moyenne de démarrage de l’année considérée (numéro du jour de l’année). Sont indiqués aussi l’écart-type spatial (σ) des dates pour chaque année et le cumul pluviométrique annuel (P).

La variabilité spatiale du démarrage s'observe sur les 8 figures, indépendamment du caractère sec ou humide de l'année. Ceci est d'autant plus remarquable que l'on a choisi pour cette figure deux années humides (1998 et 1999) aux comportements très différents, une année sèche (1997), et enfin une année « moyenne » marquée par des gradients pluviométriques particulièrement forts (1992).

On constate également que l'installation de la saison agronomique diffère beaucoup de celle de la saison hydrologique. Par exemple, en 1998, la saison agronomique s'installe de manière très dispersée (écart-type de 23 jours) alors que la saison hydrologique démarre de façon plus homogène sur toute la zone étudiée (écart-type de 9 jours). On constate l'inverse en 1999. Par contre, l'organisation du démarrage de la saison 1992 est assez similaire pour les 2 critères. En général, la manière dont s'installe la saison des pluies hydrologique ne conditionne pas celle de la saison agronomique.

Intérêt agronomique des résultats

On peut s'interroger sur l'utilité des critères de détermination du démarrage de la saison des pluies dans le cadre de la prévision saisonnière. Peuvent-ils servir d'alerte précoce pour une saison déficitaire ? Peuvent-ils orienter les agriculteurs vers un choix de cultures visant à minimiser les risques ?

Répondre à la première question se ramène à étudier la corrélation entre la date de démarrage de la saison des pluies et le cumul annuel. Sur la Figure 47, on représente les coefficients de corrélation (R^2) reliant la date de démarrage agronomique moyenne annuelle (moyenne des 30 dates de démarrage agronomique pour chaque année) à 3 cumulés différents, soit le cumul total saisonnier, le cumul enregistré lors de la pré-saison et le cumul agronomique (enregistré pendant la saison agronomique ou période de mousson établie). On sépare ainsi les influences en terme d'apports pluviométriques de la pré-saison d'une part et de la période de mousson établie d'autre part. Les coefficients de corrélation sont quasiment nuls ($R^2=0.04$ pour le cumul total, $R^2=0.01$ pour le cumul « agronomique », $R^2=0.23$ pour le cumul de pré-saison) et mettent en évidence l'absence de liens significatifs entre la date de démarrage de la saison et la pluviométrie annuelle, excluant ainsi une démarche de prévision saisonnière qui serait exclusivement basée sur la connaissance de la date de démarrage de la saison.

Les coefficients de corrélation précédents sont calculés à partir de dates moyennes de démarrage. De même que pour l'analyse de la variabilité spatiale, on peut réaliser une étude plus systématique et plus fine en calculant la corrélation pour chacune des stations prises isolément (soit 12 valeurs pour chaque calcul). Ce calcul concerne les deux critères ponctuels (agronomique et hydrologique). Les coefficients de corrélation entre la date de démarrage et le cumul restent quasiment nuls.

En ce qui concerne l'utilisation de ces résultats pour la prévision saisonnière, il s'avère donc que le cumul annuel à venir ne peut être déduit uniquement de la date de démarrage de la saison des pluies. Par contre, on relève une forte corrélation entre la date de démarrage de la saison des pluies et la longueur de la saison, quel que soit le critère, ce qui est logique dans la mesure où la date de fin de saison est assez stable - plus la saison démarre tard, plus elle est courte ($R^2 = 0.78, 0.81, 0.59$

respectivement pour les critères agronomique, hydrologique et climatique). Ce résultat avait déjà été énoncé à partir de séries de données pluviométriques plus longues (Sivakumar, 1988 ; Diop, 1996) et permet d'élaborer des tactiques agricoles : si la saison démarre tard, il vaut mieux choisir des cultures ou des variétés à maturation plus rapide (mil à cycle constant de 90 jours ou moins, mil photopériodique).

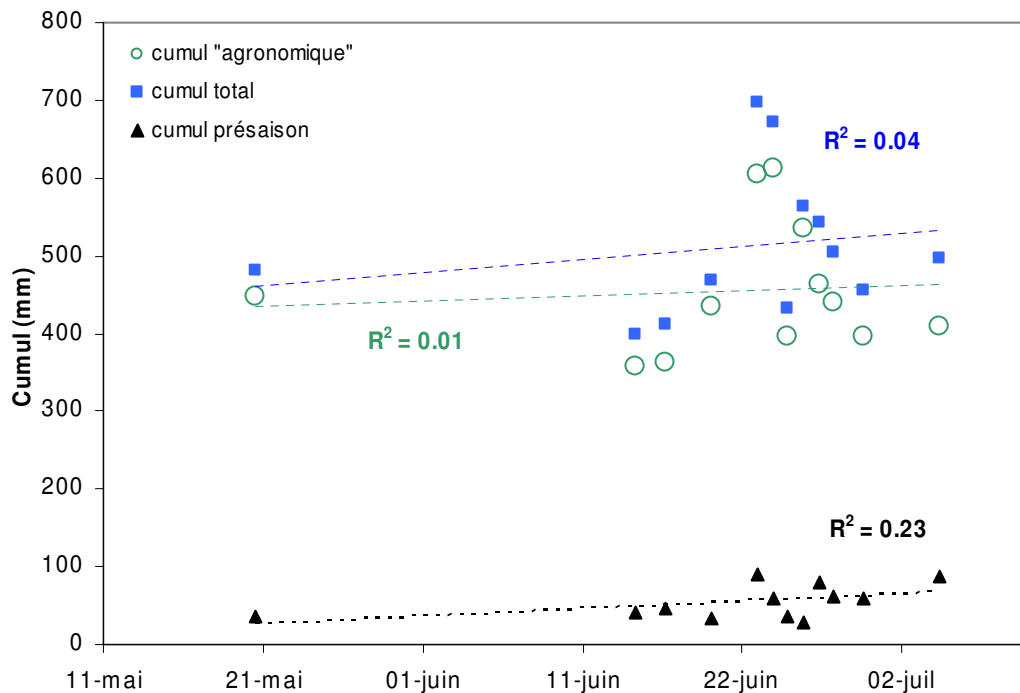


Figure 47 – Date de démarrage agronomique moyenne annuelle (moyenne spatiale sur la zone AMMA-CATCH Niger) et 3 cumuls pluviométriques moyens enregistrés sur 3 périodes différentes - saison entière, pré-saison, mousson établie (en mm).

Conclusion

Les dates de démarrage de la saison des pluies calculées ponctuellement (critères hydrologique et agronomique) sont très dispersées dans l'espace et dans le temps sur l'observatoire AMMA-CATCH Niger. Suivant le critère choisi, la saison des pluies varie ainsi de 105 jours (critère agronomique) à 157 jours (critère hydrologique) sur la période 1990-2001. Cependant, en moyennant chaque année les dates de démarrage agronomique sur la zone d'étude, on s'aperçoit qu'on peut définir le début d'une période assez stable où la mousson est bien établie et qui représente, en terme d'apports pluviométriques, 90 % du cumul saisonnier. Cette période débute la 3^{ème} décade de juin – date coïncidant avec le « saut » de mousson – et s'achève fin septembre. On montre aussi que la connaissance de la date de démarrage de la saison des pluies ne renseigne en rien sur le cumul pluviométrique à venir, en revanche, elle permet de prévoir la longueur de la saison des pluies, la fin de celle-ci étant moins variable.

En terme d'applications agronomiques, la possibilité de prévoir la longueur de la saison des pluies peut aider les agriculteurs dans le choix des variétés à semer pour minimiser les risques, par exemple en choisissant un mil à cycle plus court si la saison a démarré tardivement. Concernant le lien entre démarrage agronomique et « saut » de mousson, on pourrait imaginer une stratégie simple de semis lors du « saut » de mousson. Deux contraintes majeures apparaissent alors, la nécessité d'une prévision précoce du « saut » de mousson et « l'adaptation locale » de cette prévision, puisqu'on a établi qu'à une échelle fine la saison des pluies agronomique s'installe dans l'espace de manière chaotique, indépendamment de la position géographique, de la végétation et du caractère sec ou humide de l'année et qu'elle n'est pas conditionnée par l'installation de la saison hydrologique la précédant. On prévoit d'analyser plus en détail la conséquence d'un semis à la date moyenne du « saut » de mousson sur le rendement à l'aide du modèle agronomique SARRA-H (Baron et al., 1999), tout en ayant conscience que de multiples critères conditionnent celui-ci (pratiques paysannes, cycle d'azote). Avec ce même modèle, on pourra examiner l'influence de la distribution des pluies au cours de la saison, qui semble être cruciale pour le rendement, davantage que le seul cumul saisonnier. Cette étude a été réalisée à partir des données AMMA-CATCH Niger, seules disponibles pour étudier la variabilité aux échelles fines. Des travaux antérieurs, menés tant à partir des données des réseaux pluviométriques nationaux (Le Barbé et al., 2002) que de données satellitaires (Mathon et al., 2002), ont montré que la région de Niamey était bien représentative de la climatologie du Sahel central. On peut donc légitimement penser que les grandes tendances mises à jour sur cet observatoire sont valides pour le reste de la région.

Références

- Baron C, Reyniers F, Clopes A, Forest F. Applications du logiciel SARRA à l'étude de risques climatiques. *Agriculture et Développement* 1999 ; 24 : 89-97.
- D'Amato N. *Etude climatologique et statistique des événements pluvieux en zone sahélienne, analysée à partir des données pluviographiques de l'expérience EPSAT-Niger*. Thèse de doctorat. Université de Montpellier II, 1998 ; 189 p. + ann.
- Diop M. A propos de la durée de la saison des pluies au Sénégal. *Sécheresse* 1996 ; 7, 1 : 7-15.
- FAO, ICRISAT. *L'économie mondiale du sorgho et du mil : faits, tendances et perspectives*. FAO, Rome, ICRISAT, Patancheru, 1997 ; 68 p.
- Le Barbé L, Lebel T, Tapsoba D. Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990. *J Climate* 2002 ; 15, 2 : 187-202.
- Lebel T, Taupin JD, Gréard M. Rainfall monitoring: The EPSAT-Niger setup and its use for HAPEX-Sahel. In : Lebel T, eds. *Hydrologie et Météorologie de Méso-échelle dans HAPEX-SAHEL : dispositif de mesures au sol et premiers résultats*. Paris : ORSTOM Editions, 1995 : 31-68.

- Loireau M. *Espaces, ressources, usages : spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien*. Thèse de doctorat. Université de Montpellier III, 1998 ; 393 p.
- Mathon V, Laurent H, Lebel T. Mesoscale convective system rainfall in the Sahel. *J Applied Meteor* 2002 ; 41, 11 : 1081-1092.
- Milleville P. Conduite des cultures pluviales et organisation du travail en Afrique soudano-sahélienne : des déterminants climatiques aux rapports sociaux de production. In : A. Biarnès, eds. *La conduite du champ cultivé : points de vue d'agronomes*. ORSTOM Editions, 1998 : 165-180.
- Peugeot C. *Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahélien*. Thèse de doctorat. Université de Grenoble, 1995 ; 305 p. + ann.
- Sivakumar MVK. Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology* 1988 ; 42, 4 : 295-305.
- Stern RD, Dennett MD, Garbutt DJ. The start of the rains in West Africa. *Int J of Climatology* 1981 ; 1: 59-68.
- Sultan B, Janicot S. Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability. *Geophysical Research Letters* 2000 ; 27, 20 : 3353-3356.
- Sultan B. Etude de la mise en place de la mousson en Afrique de l'Ouest et de la variabilité intra-saisonnière de la convection. Applications à la sensibilité des rendements agricoles. Thèse de doctorat. Université Paris VII, 2002 ; 283 p.
- Taylor CM, Lambin EF, Stephenne N, Harding RJ, Essery RLH. The influence of land use change on climate in the Sahel. *J of Climate* 2002 ; 15 : 3615-3629.

1.2. Phases sèches au cours de la saison des pluies

L'appréciation du risque de sécheresse est indispensable pour protéger – voire améliorer – l'agriculture pluviale. On fait la distinction entre les années sèches (« droughts », manque absolu d'eau dû à un faible cumul annuel, entraînant un échec des cultures), et les phases sèches (« dry spells », courtes périodes de stress hydrique durant la croissance des plantes pouvant induire une forte réduction du rendement suivant le stade de développement des plantes) (Barron et al., 2003). Les échecs de récolte étant plus généralement dus à la variabilité de la distribution des pluies au cours de la saison qu'à un réel déficit du cumul annuel, il s'agit ici de documenter les phases sèches observées sur l'observatoire AMMA-CATCH Niger de 1990 à 2002.

Définition d'une phase sèche (dry spell)

Bien que l'impact des phases sèches sur le rendement des cultures ait été bien établi, leur définition reste difficile et nécessite d'être formulée en termes d'impacts hydrologique, agricole et socio-économique. Ainsi, Barron et al. (2003) définissent une phase sèche « agricole » à partir d'un bilan hydrique simple, comme une période de jours secs consécutifs aboutissant au stress hydrique des cultures. Barron et al. (2003) s'intéressent aux phases sèches « agricoles » durant entre 5 et 15 jours. Définir une phase sèche en se basant uniquement sur la pluie n'est pas le plus approprié, puisque l'impact sur les cultures dépend des conditions agroécologiques (teneur en eau antécédente du sol) et de l'état de développement des cultures, néanmoins cette technique est fréquemment utilisée dans l'analyse du risque de sécheresse, quand les données agroclimatiques correspondantes sont indisponibles. D'un point de vue méthodologique, la difficulté consiste alors à choisir un seuil de pluie pertinent pour la définition d'une phase sèche. Différents seuils sont utilisés dans la littérature, suivant la nature des observations et le but de l'étude. Couramment, le seuil appliqué est le minimum mesuré par le pluviographe, par exemple 0.1 mm en Espagne pour Lana et Burgueño (1998), mais il peut dépendre de l'environnement climatique considéré. Etudiant les risques d'incendies de forêts au Canada, Harrington et Flannigan (1993) considèrent un jour enregistrant moins d'1.5 mm de pluie comme sec, avançant que les premiers 1.5 mm sont interceptés par les arbres. En milieu méditerranéen, Douguedroit (1987) prend un seuil de 1 mm, puisqu'en dessous de cette quantité la pluie n'est pas absorbée par les sols en raison d'une forte évapotranspiration ; pour les mêmes raisons, Cook et Heerdegen (2001) optent pour un seuil de 5 mm en Australie. Au Niger, Sivakumar (1992) étudie une gamme de seuils de 1 à 25 mm. Dans notre cas, le choix d'un seuil est directement lié à l'évapotranspiration. Si lorsque la saison des pluies est bien établie, on peut évaluer l'évapotranspiration potentielle moyenne à 3 mm/jour, à comparer à une pluie moyenne de 7 mm/jour (Gash, 1997), il va de soi que cette valeur cache une grande variabilité. La réaction de la végétation et des cultures va dépendre de la chronique des pluies antérieures et de l'alternance entre les phases sèches et les événements pluvieux. Cette analyse dynamique pourra être réalisée avec le modèle

SARRA-H dans la section suivante. Pour l'instant, on se contente de caractériser les phases sèches enregistrées sur l'observatoire AMMA-CATCH Niger en se basant sur les mesures de pluie. Une phase sèche en une station k est définie par une séquence de jours consécutifs qui séparent deux averses enregistrées à la station k , supérieures ou égales à un seuil s . Les seuils étudiés sont 1 mm, 5 mm, 10 mm et 20 mm, choisis pour les raisons suivantes (Baron, 2004, communication personnelle) : une pluie de 5 mm tombant au milieu d'une phase sèche a peu d'impact sur le stress hydrique des cultures, l'humectation du sol qu'elle entraîne disparaît en quelques heures vu l'évapotranspiration potentielle enregistrée dans la région ; une pluie de 10 mm peut permettre aux cultures de se rétablir un peu ; une pluie de 20 mm est supposée efficace pour que les cultures recouvrent d'un stress hydrique. Au-delà de ce seuil, il commence à y avoir beaucoup de pertes par ruissellement.

Modélisation statistique des phases sèches

En ce qui concerne la modélisation statistique des séries de phases sèches, plusieurs méthodes ont été adoptées pour déterminer le risque de sécheresse : des chaînes de Markov (Lana et Burgueño, 1998 ; Martín-Vide et Gómez, 1999) à différentes distributions probabilistes (exponentielle, binomiale négative tronquée – on pourra se rapporter à Vicente-Serrano et Beguería-Portugués, 2003, pour les références correspondantes). Ces distributions sont ajustées empiriquement sur les séries de phases sèches, permettant l'estimation des périodes de retour de celles-ci. Cependant, Harrington et Flannigan (1993) remarquent que ces modèles ont tendance à sous-estimer la probabilité des longues phases sèches, et Vicente-Serrano et Beguería-Portugués (2003) proposent de recourir à un type de distributions plus spécifique pour analyser les séries de phases sèches extrêmes, comme la distribution de Gumbel ou celle de Pareto généralisé.

Dans notre étude, l'utilisation du modèle de la loi des fuites (cf. section 3.4, partie II) implique par définition que les durées entre deux événements pluvieux suivent une loi exponentielle de paramètre d'échelle $1/\lambda$. Dans un premier temps, l'ajustement d'une loi exponentielle est réalisé directement sur les séries des durées des phases sèches ; d'abord en réunissant toutes les durées de phases sèches enregistrées sur l'observatoire pour avoir une idée du comportement moyen de celles-ci, puis en analysant les séries ponctuelles pour examiner leur variabilité spatiale. Dans un deuxième temps, on compare les paramètres utilisés pour l'ajustement avec les paramètres de la loi des fuites $1/\lambda$.

Durées et fréquences des phases sèches analysées sur l'observatoire AMMA-CATCH Niger

Les durées des phases sèches sont examinées par décade, de juin à septembre, pour chacun des seuils (1, 5, 10 et 20 mm), de 1990 à 2002. Les échantillons sont constitués en regroupant les phases sèches des 30 stations AMMA-CATCH Niger mélangées. Suivant la décade étudiée, la taille des échantillons varie : de 140 à 480 valeurs pour le seuil de 20 mm, de 250 à 800 valeurs pour le seuil de 10 mm, de 450 à 1040 valeurs pour le seuil de 5 mm. L'échantillon « seuil 10 mm » de la première décade de juin

contient les durées de toutes les phases sèches définies avec un seuil de 10 mm en chacune des 30 stations du réseau ayant débuté entre le 1^{er} et le 10 juin inclus. Une loi exponentielle est ajustée à chacun des 12 échantillons décennaires de chaque seuil et deux niveaux de probabilité sont privilégiés (50%, 90%). Le choix de ces niveaux reflète le degré de certitude dont l'utilisateur a besoin pour déterminer la durée des phases sèches. L'évolution des durées des phases sèches au cours de la saison des pluies est représentée Figure 48, avec une probabilité de 50%, et Figure 49, avec une probabilité de 90%. Les valeurs de la Figure 49 (Figure 48) montrent que 90% (50%) des phases sèches débutant une décennie donnée se termineront avant le nombre de jours indiqué. Par exemple, après une averse supérieure ou égale à 10 mm ayant lieu la première décennie de juillet, il faudra attendre au maximum 17.8 jours dans 90% des cas, et 5.3 jours dans 50% des cas, pour enregistrer une nouvelle pluie supérieure ou égale à 10 mm.

L'évolution des durées des phases sèches représentée Figure 48 et Figure 49 suit le cycle saisonnier des pluies, avec de fortes valeurs en début et fin de saison (12.5 jours maximum à attendre dans 50 % des cas avant la prochaine pluie de 20 mm pour la deuxième décennie de juin et la première décennie de septembre, 41.6 jours maximum à attendre dans 90% des cas) encadrant un palier de valeurs plus faibles, de la deuxième décennie de juillet à la deuxième décennie d'août, particulièrement marqué pour les seuils 10 et 20 mm (entre 6 et 7 jours maximum à attendre dans 50% des cas avant la prochaine pluie de 20 mm pour cette période, entre 20 et 22 jours maximum dans 90% des cas, soit une année sur dix). On peut supposer qu'à cette période, la mousson est bien établie, et que les conditions atmosphériques sont propices à l'organisation de la convection. En termes d'implications agronomiques, ce résultat peut être pris en compte pour choisir le type de variétés à semer ainsi que la date de semis. Sur les deux figures, l'évolution des durées des phases sèches est représentée sur une période de 120 jours et on s'aperçoit que 8 décennies sur 12 sont marquées par un fort risque de phase sèche, au début et à la fin de la saison des pluies, on peut donc envisager de réduire les longueurs des cycles des variétés. Sivakumar (1992) conseille d'utiliser des variétés de cycle de 80 ou 90 jours à Niamey. En ce qui concerne la date de semis, on peut essayer de la choisir de telle sorte que les phases phénologiques les plus sensibles (floraison et remplissage des grains) soient calées sur la période la moins risquée. En semant au démarrage de la saison « agronomique » défini par Balme et al. (2004) sur l'observatoire AMMA-CATCH Niger, soit en moyenne sur 1990-2001, le 21 juin (écart-type de 11 jours), la période correspondant à la diminution de la durée des phases sèches s'étend de 20 jours à 50 jours après le semis, concordant respectivement avec l'initiation paniculaire et la floraison pour un mil de 90 jours (Sivakumar, 1992), ce qui paraît un choix relativement cohérent. Cependant, la portée de ces résultats est limitée puisque les valeurs globales indiquées cachent une certaine variabilité suivant l'année et la station considérées. Balme et al. (2004) ont montré que si le démarrage de la saison des pluies « agronomique » moyenné sur l'observatoire était relativement stable d'une année sur l'autre, il dissimulait une grande variabilité spatiale. Nous allons voir si l'évolution des durées au cours de la saison des pluies varie beaucoup d'une station à l'autre.

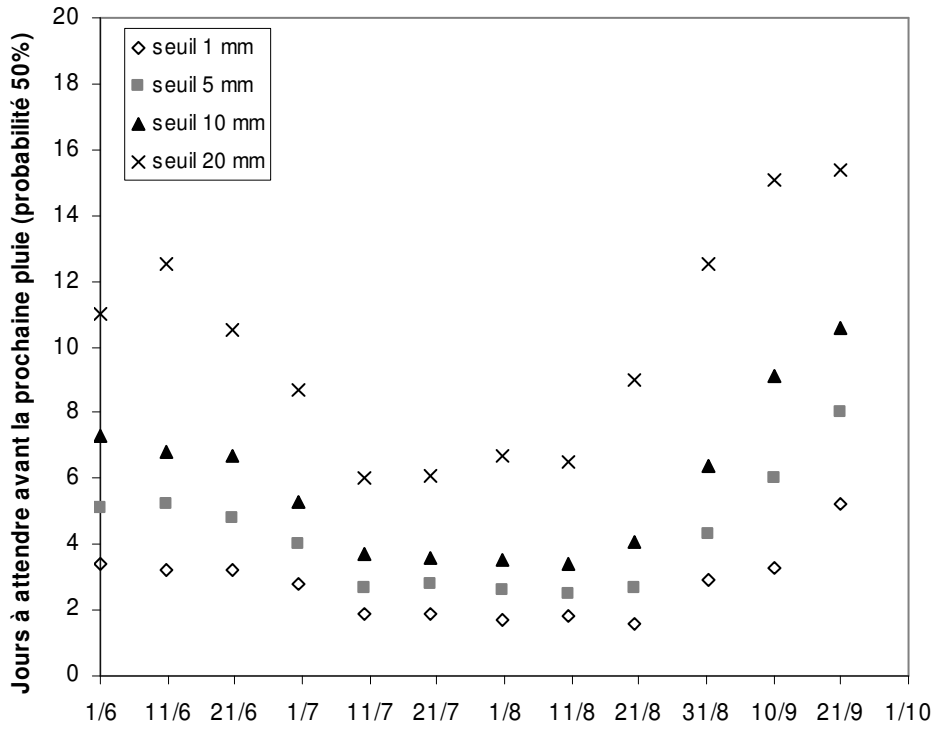


Figure 48 – Nombre maximal de jours à attendre après une pluie (dans 50% des cas), avant d’enregistrer une nouvelle pluie supérieure ou égale à un seuil s.

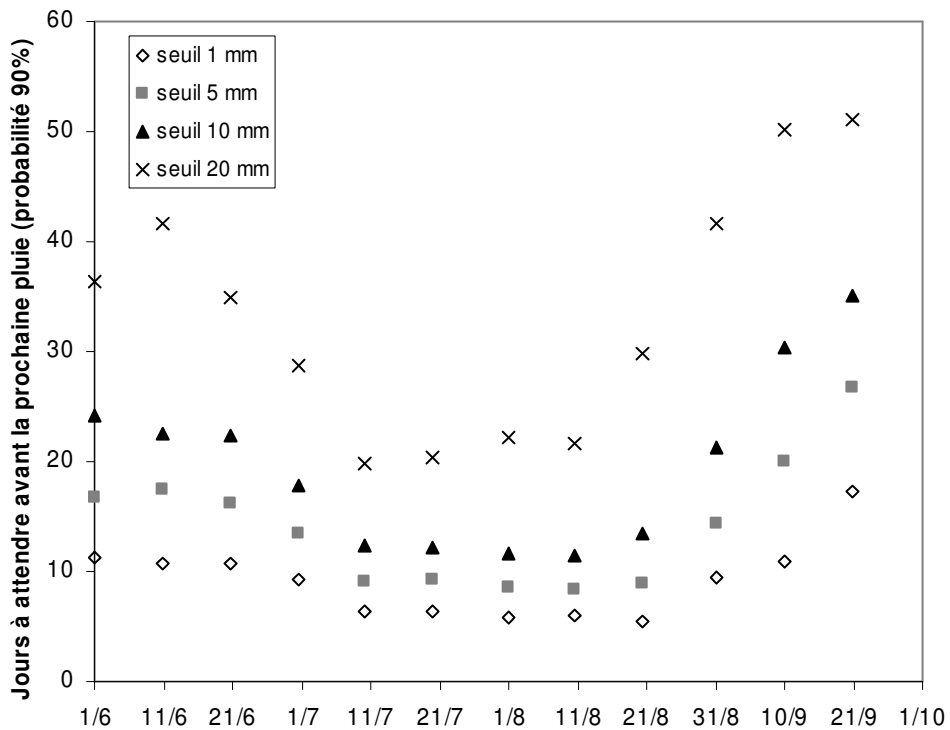


Figure 49 – Nombre maximal de jours à attendre après une pluie (dans 90% des cas), avant d’enregistrer une nouvelle pluie supérieure ou égale à un seuil s.

Variabilité spatiale des phases sèches – Durées et fréquences des phases sèches analysées à la station

L'ajustement exponentiel des durées des phases sèches se fait ici station par station, toujours par décade. La taille des échantillons étant extrêmement réduite, de 4 à 34 valeurs suivant la décade étudiée, on restera prudent dans l'interprétation des résultats. L'évolution des durées des phases sèches au cours de la saison des pluies est représentée pour le seuil de 10 mm et une probabilité de 90% sur la Figure 50. On décèle une organisation zonale pour les trois premières décades de juin, marquant l'installation de la mousson. Une fois la mousson bien établie, la variabilité semble moins marquée, le risque de sécheresse paraît être globalement le même sur tout l'observatoire. Au mois de septembre, avec le retrait de la mousson, la variabilité spatiale des phases sèches devient plus importante. La fiabilité des estimateurs présentés est néanmoins trop faible pour tirer des conclusions vraiment significatives.

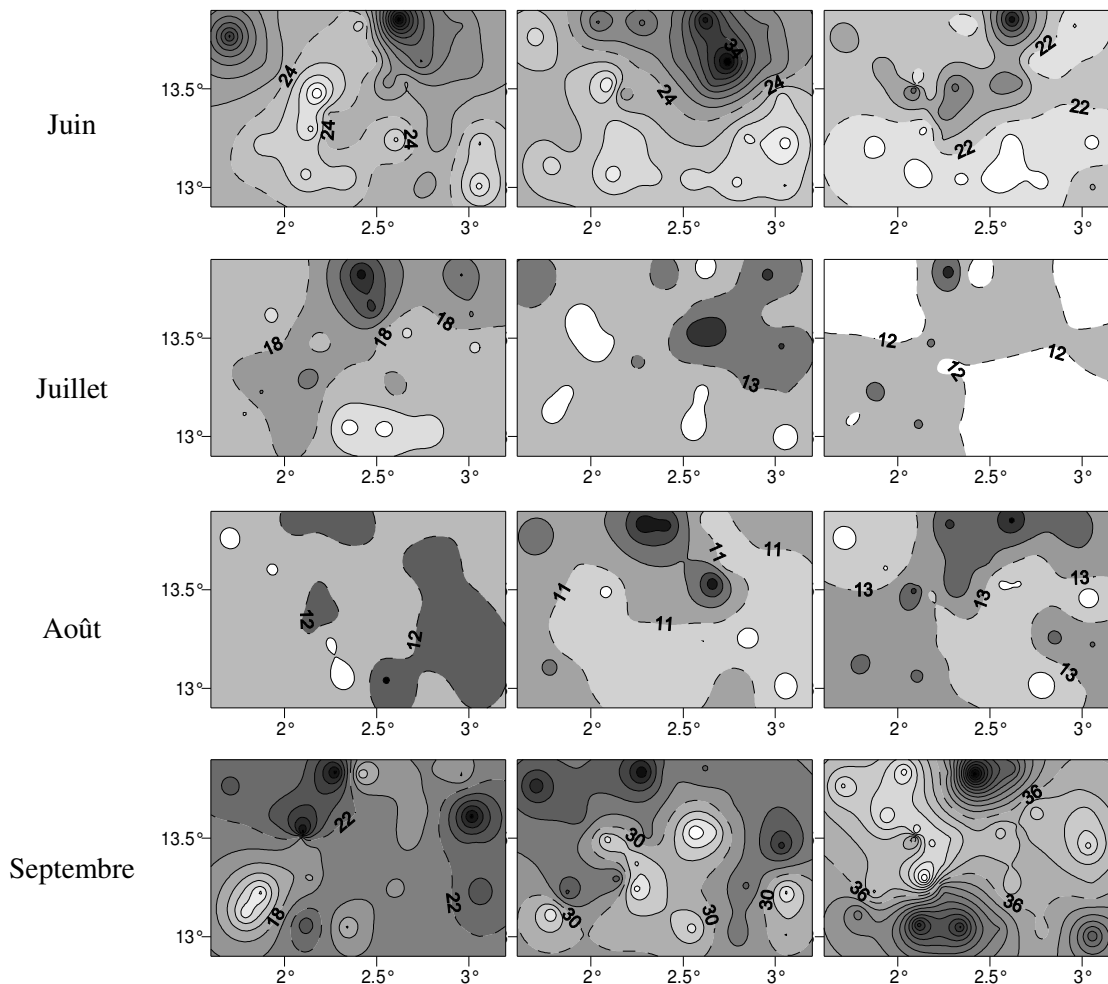


Figure 50 – Nombre maximal de jours à attendre après une pluie dans 90% des cas, avant d'enregistrer une nouvelle pluie supérieure ou égale à 10 mm (contours espacés de 2 jours, date moyenne sur l'observatoire indiquée en pointillés), indiqué par décade (de haut en bas, juin à septembre, de gauche à droite, 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} décade du mois).

La Figure 50 peut également être considérée comme une cartographie des phases sèches de période de retour 10 ans (définies au seuil de 10 mm). Une année sur dix, au mois d'août (deuxième ou troisième décennie), il faudra attendre en moyenne sur l'observatoire au moins 12 jours avant la prochaine averse de 10 mm, ce qui est loin d'être négligeable pour les cultures. Ce type de cartes peut être produite pour d'autres périodes de retour : 20 et 50 ans et s'avèrerait utile dans la gestion des risques agroclimatiques dans la région de Niamey, même si la période d'observations est encore trop courte pour en déduire des durées de phases sèches vraiment fiables.

Retour sur le modèle de la loi des fuites

La comparaison des durées moyennes des phases sèches observées et modélisées par la loi des fuites avec les paramètres $1/\lambda$ nous permet de valider (ou d'invalidier) le modèle sous un angle nouveau. Les paramètres λ sont recalculés à partir des pluies journalières tronquées aux mêmes seuils que ceux utilisés pour la définition des phases sèches. Les résultats présentés ici concernent le seuil de pluie de 10 mm.

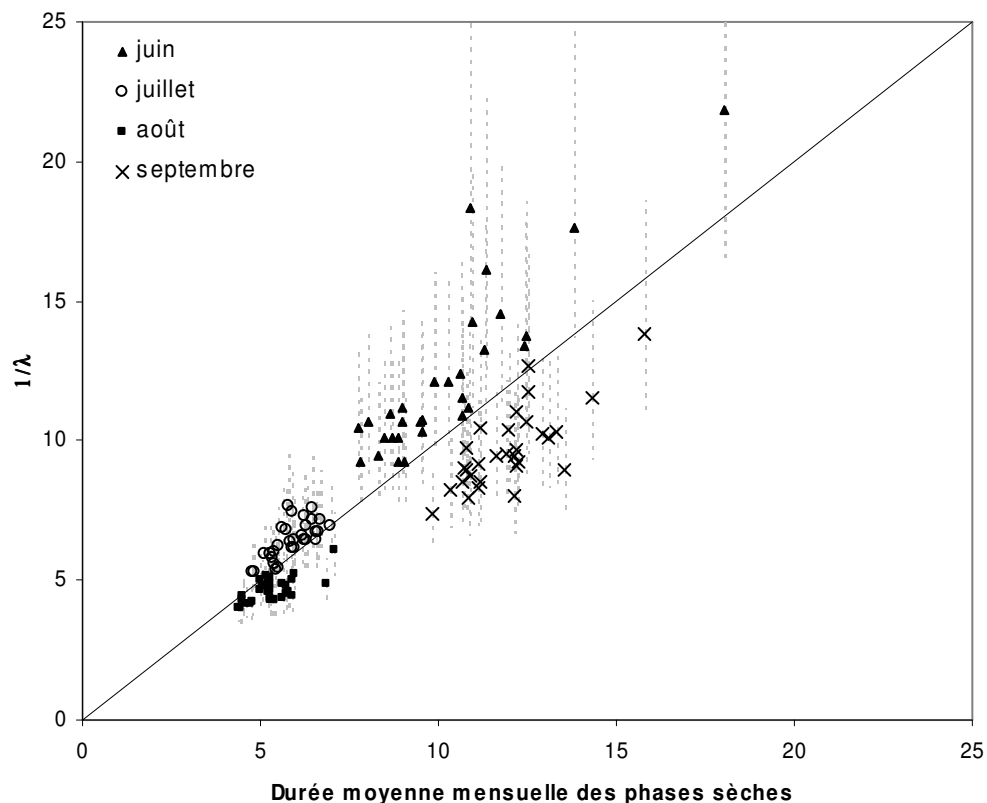


Figure 51 – Durées moyennes mensuelles des phases sèches observées et modélisées par la loi des fuites (paramètre $1/\lambda$ encadré par un intervalle de confiance à 90%) aux 30 stations AMMA-CATCH Niger, exprimées en jours, pour les mois de juin à septembre, sur la période 1990-2002.

On confronte, mois par mois, les moyennes des échantillons de durées de phases sèches observées et les paramètres $1/\lambda$ déterminés en chacune des 30 stations AMMA-CATCH Niger (Figure 51). Au vu des intervalles de confiance à 90% des paramètres $1/\lambda$, la similitude entre les durées des phases sèches observées et modélisées par la loi des fuites est assez satisfaisante sur toute la saison des pluies ($R^2 = 0.71$ en réunissant tous les couples de valeurs de juin à septembre de la Figure 51). Le modèle de la loi des fuites a toutefois tendance à surestimer les durées des phases sèches des mois de juin et juillet, donc à sous-estimer le nombre d'événements pluvieux ; et inversement pour les mois d'août et septembre. Les durées des phases sèches sont très étalées sur l'observatoire aux mois de juin et de septembre, beaucoup plus resserrées pour les mois de juillet et d'août, comme le montrait la Figure 50. Les résultats issus de la loi des fuites sont plus proches des observations pour les mois de juillet et août. L'échantillon des événements pluvieux avait été réduit à cette période-là pour un meilleur ajustement à une loi exponentielle (section 3.3 de la partie II) ; de la même manière, l'ajustement à une loi exponentielle des durées des phases sèches est meilleur sur cette même période.

Années sèches et années humides : une distinction perceptible sur l'occurrence des phases sèches ?

En terme de durée et de fréquence

Les mêmes graphiques que ceux des Figure 48 et Figure 49 sont réalisés en séparant les années sèches des années humides (Figure 52 avec une probabilité de 50% et Figure 53 avec une probabilité de 90%). Les composites utilisés sont les mêmes que précédemment, à savoir deux versions du composite sec : sec 1 avec les années 1990, 1993, 1997, 2000, 2001 et sec 2 avec 1990, 1993, 1997, 2000 et deux versions du composite humide : humide 1 avec les années 1994, 1998, 2000, 2002 et humide 2, avec 1994, 1998, 1999. Pour les deux versions de chaque type de composite, l'évolution des durées des phases sèches est assez similaire.

Les composites secs et humides ont le même comportement en termes de durées de phases sèches en début de saison des pluies. A partir de la première décade d'août, leurs comportements diffèrent, avec une augmentation des durées des phases sèches pour les composites secs sur tout le mois d'août. Il faudra attendre environ 5 jours dans 50% des cas (une année sur deux) et environ 18 jours dans 90% des cas (une année sur dix) avant la prochaine pluie de 10 mm pour les composites secs, alors que pour la même période, dans le cas des composites humides, ces chiffres seront réduits à 3 jours (50%) et 9 jours (90%). L'écart entre les composites secs et humides continue au mois de septembre (4 jours pour le niveau de probabilité 50%, 15 jours pour 90%).

Les deux composites secs utilisés ici sont marqués par des phases sèches plus longues au cœur et à la fin de la saison des pluies. Ce résultat est cohérent avec les conclusions du chapitre sur les fluctuations interannuelles et décennales du régime pluviométrique (chapitre 4 de la partie II), qui reliaient le déficit pluviométrique d'une année ou d'une période sèche enregistré au cœur et à la fin de la saison à une réduction d'événements pluvieux. Cette analyse illustre d'une autre manière que les années sèches

sont surtout caractérisées par une altération de la deuxième moitié de la saison des pluies et offre la possibilité de chiffrer le risque de phases sèches, même si les durées indiquées sont à considérer avec prudence, vu le nombre restreint d'années étudiées.

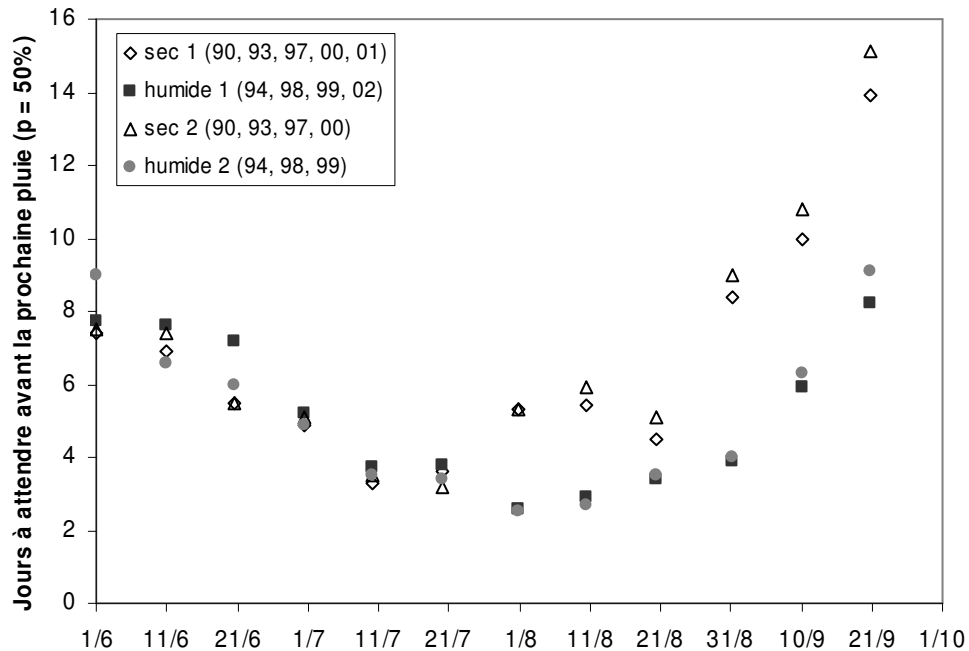


Figure 52 – Nombre maximal de jours à attendre après une pluie (dans 50% des cas), avant d'enregistrer une nouvelle pluie supérieure ou égale à 10 mm, pour deux types de composites secs et humides.

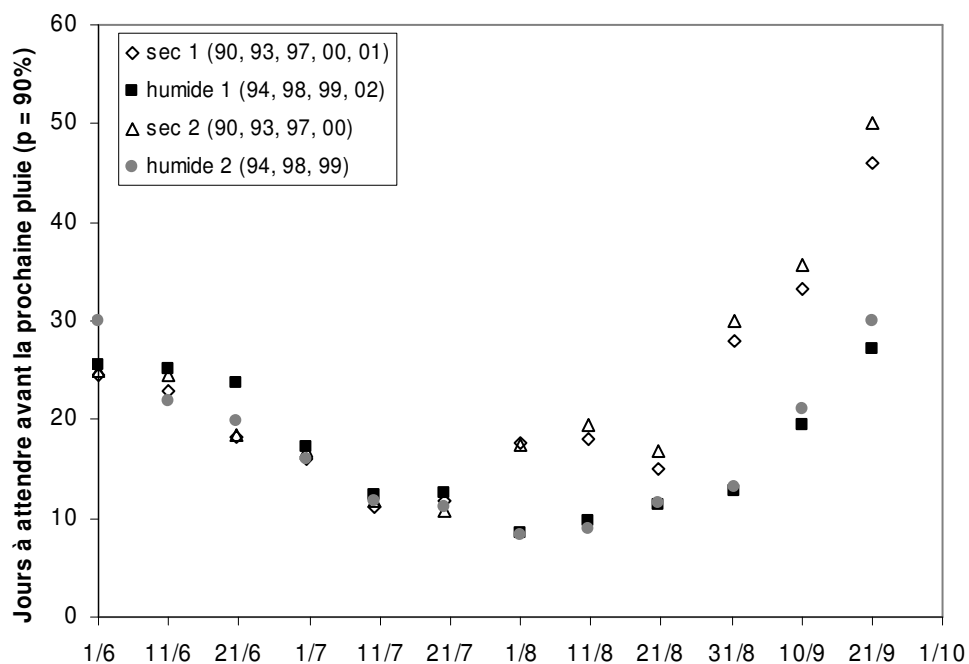


Figure 53 – Nombre maximal de jours à attendre après une pluie (dans 90% des cas), avant d'enregistrer une nouvelle pluie supérieure ou égale à 10 mm, pour deux types de composites secs et humides.

En terme de nombre

La Figure 54 indique la proportion de chaque classe de phases sèches observées (inférieures à 5 jours, comprises entre 5 et 10 jours, entre 10 et 15 jours, supérieures à 15 jours) pour chacune des années de 1990 à 2002. Le cumul pluvieux annuel est relié à la proportion de courtes phases sèches ($R = 0.55$) : plus une année est pluvieuse, plus on observe d'événements pluvieux et par conséquent de courtes phases sèches entre eux. La relation entre proportion de phases sèches comprises entre 5 et 10 jours et le cumul pluvieux annuel n'est pas significative. Par contre, il existe un lien manifeste entre la proportion de phases sèches supérieures à 10 jours et le cumul pluvieux annuel, avec un coefficient de corrélation $R = -0.80$. Si une année humide peut enregistrer autant de longues phases sèches qu'une année sèche (le coefficient de corrélation entre le nombre de phases sèches supérieures à 15 jours et le cumul pluvieux moyen vaut $R^2 = 0.09$), il semble qu'en proportion, une année humide soit caractérisée par moins de phases sèches supérieures à 10 jours.

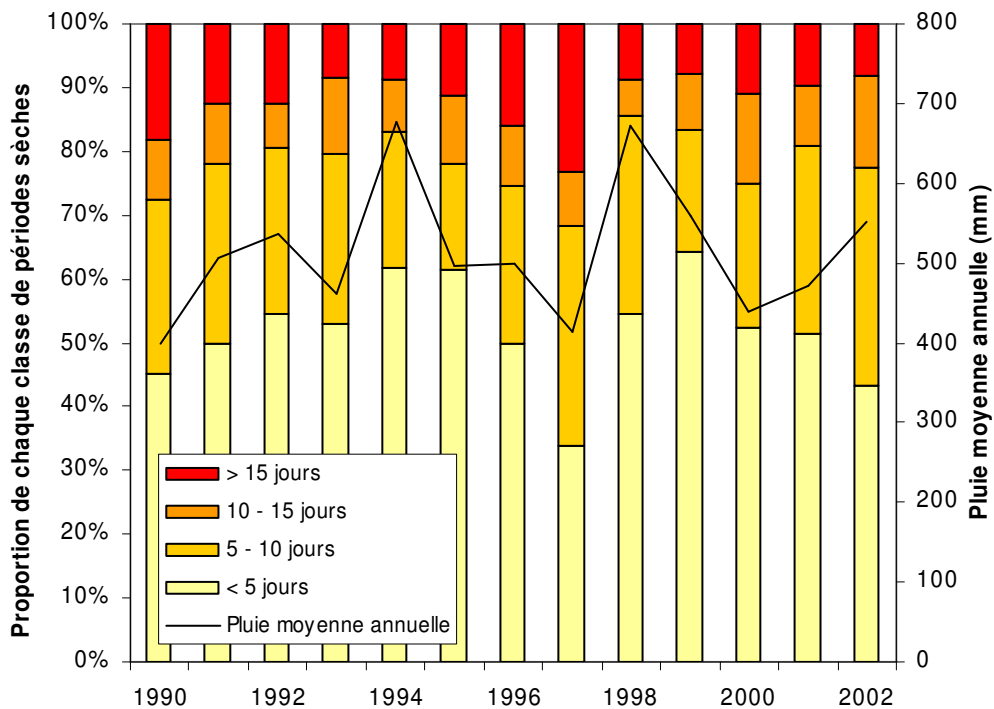


Figure 54 – Proportion de chaque classe de phases sèches (< 5 ; 5-10 ; 10-20 ; > 20 jours) pour le seuil 10 mm et pluie moyenne annuelle (mm) de 1990 à 2002.

Conclusion

Documenter les phases sèches survenant au cours de la saison des pluies offre une vision complémentaire – et non redondante – à l’analyse des événements pluvieux. D’abord, la définition des phases sèches (intervalles de temps entre deux averses de 5, 10 ou 20 mm enregistrées à la station) implique que seuls les événements pluvieux importants, « utiles » au sens agronomique, sont considérés. Ensuite, le choix est fait ici de présenter les résultats d’un point de vue opérationnel, en indiquant le nombre maximal de jours à attendre avant la prochaine pluie en fonction du cumul attendu et de la probabilité recherchée par l’utilisateur, ou en cartographiant le risque de phases sèches pour différentes périodes de retour. Enfin, l’analyse de la modélisation statistique des phases sèches offre une validation du modèle de la loi des fuites sous un nouvel angle. Le modèle de la loi des fuites permet de bien décrire les phases sèches observées en juillet et août, à condition de déterminer les paramètres s et λ pour les seuils de pluie utilisés.

L’analyse des phases sèches présentée dans cette section peut être résumée comme suit :

- Le cycle saisonnier des phases sèches sur l’ensemble de l’observatoire nous renseigne sur le comportement moyen de celles-ci, qui peut s’avérer utile pour choisir les variétés de cultures les mieux adaptées en termes de longueurs de cycle et une date de semis permettant d’éviter l’occurrence de phases sèches à un stade phénologique sensible. Par exemple, on peut retenir qu’une année sur deux, il faut attendre au moins 7 jours durant la première décade de juin avant d’enregistrer une pluie de 10 mm (et au moins 3 jours durant la deuxième décade d’août) ; ce délai est sensiblement le même pour une année humide et une année sèche pour la première décade de juin, par contre, pour la deuxième décade d’août, il passe à 2-3 jours pour une année plutôt humide (suivant le composite choisi) et à 5 jours pour une année plutôt sèche. Les années sèches sont caractérisées par une altération de la deuxième moitié de la saison des pluies.
- Le cycle saisonnier des phases sèches est également représenté pour une période de retour de dix ans, au cas où l’on s’intéresse davantage au risque d’occurrence de phases sèches « extrêmes » sur l’ensemble de l’observatoire. Une année sur dix, il faut attendre au moins 24 jours durant la première décade de juin avant d’enregistrer une pluie de 10 mm (et au moins 11 jours au cours de la deuxième décade d’août) ; ce temps ne change pas en année humide ou sèche pour la première décade de juin, par contre, il passe à 9-10 jours pour une année plutôt humide et à 18-20 jours pour une année plutôt sèche.
- En ce qui concerne la variabilité spatiale des durées des phases sèches, on décèle une organisation zonale pour le mois de juin, signe de l’installation de la mousson. En période de mousson établie, le risque de sécheresse paraît être globalement le même sur tout l’observatoire. On peut supposer que les phases sèches survenant à cette période s’étendent à toute la région de l’observatoire. Au vu de la fiabilité incertaine des estimateurs, on ne peut toutefois tirer de conclusion vraiment significative.

- Concernant les différences entre années sèches et humides, on note que les années sèches enregistrent une plus forte proportion de phases sèches plus longues (supérieures à dix jours).

Il faut néanmoins rester prudent dans l'exploitation de ces résultats, puisque les phases sèches ont été définies ici uniquement à partir de données pluviographiques. Barron et al. (2003) expliquent que le fait de ne pas prendre en compte la capacité de rétention en eau des sols dans la définition des phases sèches peut entraîner une sous-estimation de l'impact de celles-ci sur les cultures. L'utilisation d'un modèle agronomique dans le chapitre suivant permet de mieux comprendre l'impact des phases sèches sur les cultures.

2. Simulation du rendement avec le modèle agronomique SARRA-H

Les phases sèches sont plus ou moins préjudiciables suivant le stade de développement atteint par les cultures et en fonction de l'historique des pluies antérieures. Il est donc indispensable pour analyser l'impact de la variabilité pluviométrique sur la culture du mil de quantifier les flux hydriques entre le sol, la plante et l'atmosphère, au cours de la saison en tenant compte du développement de la plante. Seul un modèle de cultures peut permettre d'intégrer ces différents facteurs. Le modèle agronomique SARRA-H va donc être utilisé ici pour simuler les rendements potentiels atteignables en chacune des 30 stations AMMA-CATCH Niger et ainsi examiner l'impact de 13 saisons des pluies différentes (de 1990 à 2002) sur la région de Niamey. L'intérêt de l'analyse présentée ici vis-à-vis des travaux antérieurs, notamment ceux de Sultan (2002) qui l'ont inspirée, est de documenter l'impact de la variabilité pluviométrique d'un point de vue spatial, grâce à la forte densité du réseau AMMA-CATCH Niger et de confirmer ou infirmer si les résultats trouvés par ce dernier sur la station de Niamey s'étendent aux 30 stations qui l'entourent.

La question de la variabilité pluviométrique s'est évidemment aussi posée dans la communauté des agronomes. Cortier (1994) remarque que l'outil utilisé pour modéliser les cultures met en œuvre des variables régionalisées dont la variabilité spatiale est encore mal maîtrisée. Notamment, la faible densité des sites pluviométriques utilisés pour le suivi régional (250 sites suivis au pas de temps décadaire pour l'ensemble des zones agricoles des pays du CILSS) empêche toute caractérisation précise des champs de rendements espérés. Le jeu de données AMMA-CATCH Niger nous donne ici l'occasion de documenter l'impact de la variabilité pluviométrique sur le rendement.

2.1. Le modèle agronomique SARRA-H

Le modèle SARRA-H (Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques) est un modèle de cultures développé au CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), par l'unité de recherche Ecotrop (équipe d'écophysiologie appliquée principalement aux cultures tropicales et subtropicales).

Le modèle SARRA-H est utilisé à l'échelle de la parcelle pour faire des diagnostics agronomiques et optimiser les itinéraires techniques agricoles (calendriers culturels, densité du peuplement, choix de variétés, irrigation). A l'échelle régionale, il permet de réaliser des zonages de potentialités agricoles et des études de risques climatiques. Dans les pays du CILSS, la version DHC (Diagnostic Hydrique des Cultures), créée en partenariat avec l'AGRHYMET, est employée comme aide à la décision pour la prévision agricole. Le modèle permet d'évaluer le niveau de la production bien avant la récolte (Cortier, 1994 ; Samba, 1998 ; Samba et al., 2001). Cette adaptation en système d'alerte précoce facilite ainsi la gestion des échanges commerciaux de denrées alimentaires en cas de prévision d'une saison agricole déficitaire.

Le modèle SARRA-H employé est une version plus aboutie de SARRA, un bilan hydrique simple utilisé pour estimer l'impact d'un scénario climatique sur une culture annuelle. SARRA suppose que la performance d'une culture est une fonction simple des freins hydriques cumulés au cours d'un cycle végétal. Si la modélisation du bilan hydrique reste sensiblement la même pour SARRA-H, cette nouvelle version combine le principe classique du frein hydrique avec une croissance potentielle, fonction du rayonnement et de son interception par le couvert (Baron et al., 2002).

Le modèle SARRA est basé sur l'hypothèse que la fluctuation régionale du rendement en zone sahélo-soudanienne peut être expliquée par l'appréciation d'un indicateur de satisfaction des besoins en eau de la culture (Forest et Clopes, 1994). Le bilan hydrique du modèle SARRA utilise deux réservoirs, l'un à la surface (les 20 premiers cm) et l'autre d'une épaisseur variable en fonction du front racinaire. La descente du front racinaire est pilotée par le stade de développement de la culture et limitée par la progression du front d'humectation (Baron et al., 1999). Pour un type de sol, le modèle évalue la consommation en eau de la plante liée au processus d'évapotranspiration. L'évapotranspiration maximale (ETM) de la plante, qui exprime la quantité maximale qu'elle peut consommer, est obtenue en multipliant l'évapotranspiration potentielle (ETP) par un coefficient dynamique de culture (K_c). L'évapotranspiration réelle de la culture (ETR) est calculée selon la formule d'Eagelman (1971), en fonction de l'humidité du sol et de l'ETM. Le rapport ETR/ETM exprime l'indice de satisfaction en eau pour la plante : plus ce rapport est faible, plus la culture subit un stress hydrique important. L'indicateur IRESP est le produit des indices de satisfaction des besoins en eau de la culture au cours du cycle et au moment des phases les plus sensibles (Forest et Clopes, 1994). Le calcul du rendement potentiel sous contrainte hydrique utilise le coefficient IRESP et deux autres coefficients empiriques déduits d'enquêtes en milieu paysan sur le mil.

La nouvelle version SARRA-H intègre une double approche, efficacité de l'eau et efficacité de la radiation pour simuler la dynamique de la biomasse en s'appuyant sur des concepts et processus plus physiologiques (Baron et al., 2002). Les variations de l'ETM au sein du modèle sont dépendantes de la demande climatique exprimée par les données journalières d'ETP, ainsi que de facteurs phénologiques liés au cycle de développement de la culture. Le cycle de végétation est structuré en quatre phases phénologiques :

- la phase végétative, allant de la germination à l'initiation paniculaire,
- la phase reproductive qui comprend le début de la floraison,
- la phase de fin de floraison et de début de maturation avec le remplissage des grains,
- la dernière phase de maturation avec la dessiccation des grains.

Les domaines d'application de ce modèle couvrent donc les situations limitées par l'eau et/ou par le rayonnement (Baron et al., 2002). Dans le cadre de nos travaux, l'intérêt majeur du modèle SARRA-H

est de prendre en compte les phases sensibles dans le calcul du rendement. L'élaboration du rendement est simulée en fonction de deux phases-clés, qui sont les phases les plus sensibles au stress hydrique : la phase reproductive où est dimensionné le nombre de fleurs (et par conséquent le nombre de grains) et la phase de remplissage des grains déduite de la relation source-puits (Baron, 2004, communication personnelle). En cas de stress pendant l'une ou l'autre de ces périodes, l'impact sur le rendement est discernable par des grains moins nombreux (phase reproductive) ou moins remplis (phase de remplissage).

2.2. Simulations de trente parcelles de mil

Chacune des 30 stations AMMA-CATCH est considérée comme une parcelle de mil cultivée par le modèle SARRA-H. En entrée de celui-ci, un ensemble de données météorologiques, édaphiques et agronomiques sont nécessaires. En ce qui concerne la météorologie, une seule station climatique est à notre disposition : celle de Niamey Aéroport. On fait l'hypothèse que les données météorologiques de Niamey décrivent convenablement l'atmosphère dans la région de Niamey. Par contre, pour décrire la pluie, les 30 stations du réseau sont utilisées. Les données météorologiques et pluviométriques sont fournies au pas de temps journalier. Les sols sont similaires pour toutes les parcelles, définis de type sableux et étalés sur deux couches. La variété de mil semée a une durée de cycle végétatif de 90 jours, coïncidant ainsi avec la longueur de la saison des pluies au Niger. Ce type de variété est utilisé dans cette zone par les paysans et semble adapté aux conditions climatiques (Morel, 1992). On se limite à l'étude d'une variété de mil à cycle constant, mais il faut mentionner que les variétés à caractère photopériodique sont également très utilisées au Sahel (Traoré et al., 2000). Ces dernières ont un cycle végétatif variable, ajusté à la durée probable de la saison : lorsque le semis est retardé, la durée du cycle diminue, de façon à ce que la floraison reste groupée à la fin de la saison des pluies.

Un fossé entre le rendement simulé et le rendement réel

La recherche agronomique, à l'aide de zonages agroclimatiques, a mis en évidence un décalage systématique entre le rendement agronomiquement possible (Reyniers et Forest, 1990) et celui effectivement atteint par des agriculteurs, faisant face à de multiples contraintes : financières, disponibilités en main d'œuvre et intrants (Forest et Clopes, 1994). Il existe ainsi un fossé entre les rendements obtenus en milieu paysan et les rendements obtenus dans les champs d'expérimentation. Le même fossé se retrouve dans notre étude entre les rendements simulés avec SARRA-H (appelés rendements potentiels) et les rendements réels, avec un rapport de l'ordre de 10. Le rendement sera généralement exprimé en pourcentage du rendement potentiel maximal, sachant que sa valeur en kg/ha n'est pas significative. Cette surestimation du rendement simulé est à l'étude actuellement et des travaux de recherche, associés à des enquêtes en milieu paysan, sont en cours pour comprendre et corriger ces différences (Baron, 2004, communication personnelle).

L'analyse réalisée avec le modèle agronomique SARRA-H s'articule autour de deux volets :

- le premier (section 2.3) est une étude idéalisée concernant les rendements potentiels maximaux, obtenus en chacune des 30 stations en semant à une date optimale ;
- le second (sections 2.4 et 2.5) s'intéresse à la notion de risques et examine la sensibilité du rendement simulé à la date de semis.

Dans les deux cas, on considère uniquement l'impact de la contrainte hydrique sur les cultures, sans prendre en compte les autres contraintes du milieu.

2.3. Semis à une date optimale sur chaque parcelle

2.3.1. Impact de la variabilité interannuelle de la pluie sur le rendement

Une série de simulations a été réalisée avec le modèle agronomique SARRA-H en faisant varier la date de semis du 1^{er} juin au 31 juillet, par incrément de un jour. Ceci nous permet de trouver le rendement potentiel maximal atteignable chaque année en chacune des 30 stations et la date de semis, dite optimale, qui lui est associée. Cette expérience simulée équivaut à semer tous les jours pendant deux mois, ce qui évidemment ne peut être une stratégie à proposer. Ce protocole d'analyses permet de déterminer les dates de semis où l'impact des phases sèches est minimisé. On s'affranchit ainsi de la variabilité intrasaisonnière de la pluie.

On obtient, pour chaque année i et chaque station k , la date de semis optimale et le rendement potentiel maximal correspondant R_{ik} . En comparant les rendements potentiels maximaux moyennés chaque année i sur les 30 stations, \bar{R}_i (cf. équation 13), à la pluie annuelle moyennée sur les mêmes stations, \bar{P}_i , on s'aperçoit que le rendement potentiel maximal moyen co-fluctue avec la pluie moyenne annuelle, comme le montre la Figure 55 (coefficient de corrélation $R^2 = 0.68$).

On peut comparer la variabilité des pluies et celle des rendements par l'intermédiaire des coefficients de variation : $CV_{\bar{R}_i}$, défini ci-dessous pour plus de clarté, et $CV_{\bar{P}_i}$ (idem en remplaçant R par P).

$$\bar{R}_i = \frac{1}{30} \sum_{k=1}^{30} R_{ik} \quad (\text{Équation 13})$$

$$\sigma_{\bar{R}_i} = \sqrt{\frac{1}{30} \left(\sum_{k=1}^{30} (R_{ik} - \bar{R}_i)^2 \right)} \quad (\text{Équation 14})$$

$$CV_{\bar{R}_i} = \frac{\bar{R}_i}{\sigma_{\bar{R}_i}} \quad (\text{Équation 15})$$

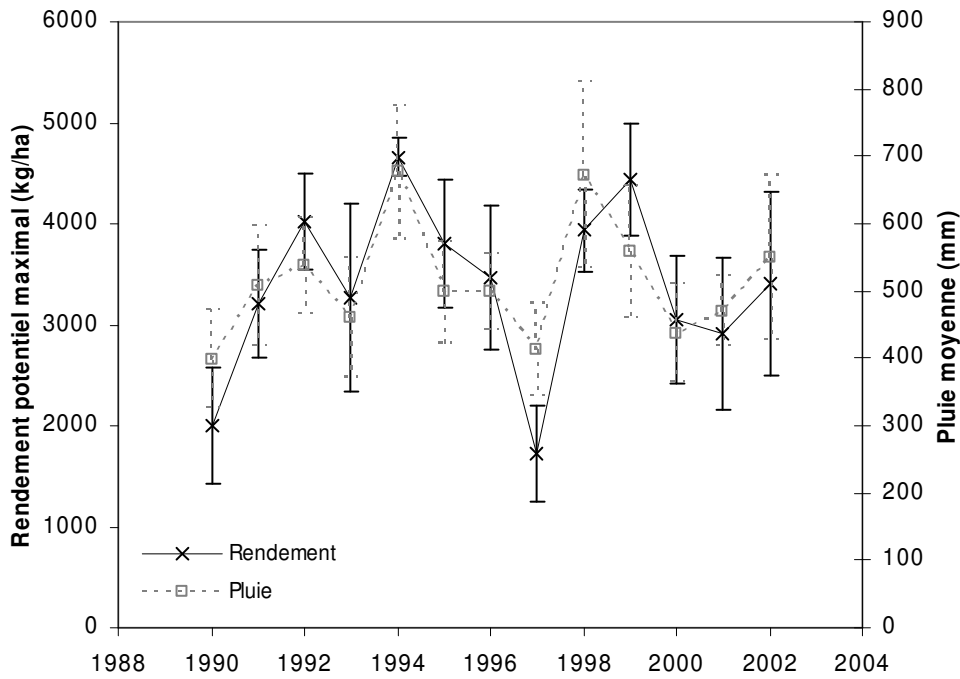


Figure 55 – Rendement simulé maximal annuel et cumul pluviométrique annuel, moyennés sur 30 stations (les barres d'erreur représentent les écart-types des échantillons annuels).

La Figure 56 examine le lien entre d'une part, la pluie moyenne annuelle \bar{P}_i et, d'autre part, les coefficients de variation $CV_{\bar{R}_i}$ et $CV_{\bar{P}_i}$. Si la variabilité spatiale des pluies ne dépend pas du caractère humide ou sec de l'année ($R(\bar{P}_i, CV_{\bar{P}_i}) = 0.15$), la réponse en terme de rendement amplifie les fluctuations les années sèches ($R(\bar{P}_i, CV_{\bar{R}_i}) = -0.83$). Cette réponse amplifiée de la variabilité du rendement vis-à-vis de la pluie – phénomène que l'on retrouve entre les déficits pluviométrique et hydrologique au Sahel – souligne l'intérêt de la modélisation agronomique.

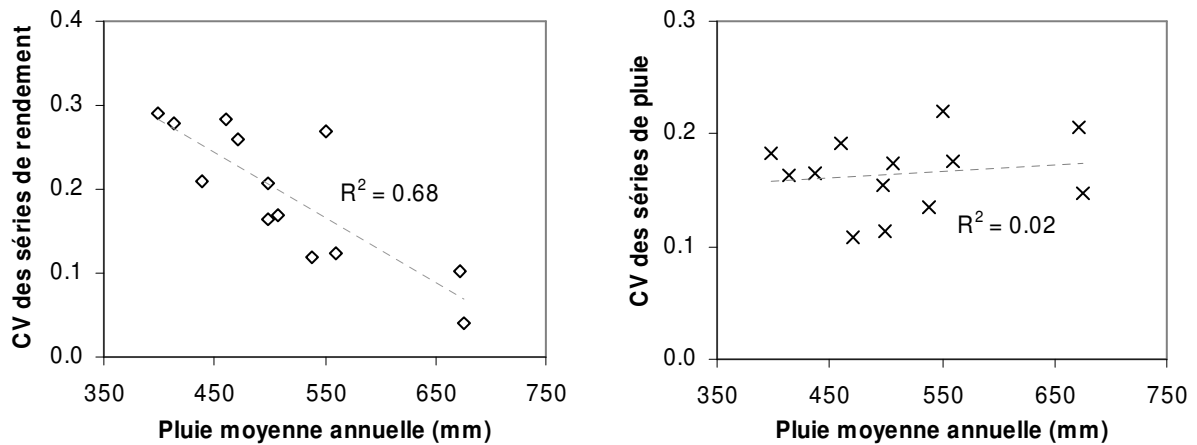


Figure 56 – Pluie moyenne annuelle (mm) et coefficients de variation des séries de rendement et de pluie.

La Figure 57 représente la relation entre la pluie annuelle enregistrée et le rendement potentiel maximal en chacune des 30 stations et pour chaque année. On rappelle ici qu'une seule station climatique est à notre disposition. Si on cherche à estimer le rendement potentiel maximal en une station à partir du cumul pluvieux annuel enregistré à la même station, la Figure 57 nous incite à opter pour un modèle à seuil. De 200 à 600 mm de pluie, le cumul pluviométrique annuel explique 63% de la variance du rendement potentiel maximal. Une forte variabilité subsiste : un cumul pluvieux de 500 mm peut conduire à des rendements de 1900 à 4800 kg/ha, variant dans un rapport de 1 à 2.5. Ceci montre l'impact de la distribution des pluies au sein de la saison. Même dans le cas où la demande en eau de la plante paraît satisfaite vis-à-vis du cumul pluvieux annuel, il peut toujours advenir des phases sèches à un stade critique pour le développement. La probabilité de voir apparaître ce cas est réduite dans ce premier volet d'étude idéalisée concernant le rendement potentiel maximal, puisque le choix de la meilleure date de semis diminue le risque de phases sèches préjudiciables. Les écarts de rendement potentiel pour un cumul pluvieux donné illustrent néanmoins l'occurrence de phases sèches plus ou moins préjudiciables au cours de la saison des pluies. La paire de points entourés (Tanaberi 1990, Sandideye 1991) illustre le cas de deux stations ayant enregistré plus de 650 mm de pluie et dont le rendement vaut environ 3000 kg/ha, alors que pour ce cumul, on s'attend à des rendements compris entre 4000 et 5000 kg/ha. La station de Tanaberi a en fait enregistré deux averses assez exceptionnelles de 70 mm (15/07) et 80 mm (01/09), qui ont dû provoquer beaucoup de ruissellement. Si l'on retire ces valeurs du cumul saisonnier, ce dernier vaut 500 mm et le rendement obtenu est bien dans la gamme attendue. La distribution des pluies à Tanaberi est très hétérogène pour l'année 1990, avec une alternance de mois secs et pluvieux : 50 mm en juin, 320 mm en juillet, 90 mm en août, 175 mm en septembre, qui ne permet pas d'éviter les phases sèches préjudiciables, même dans le cadre de cette étude idéalisée, avec une recherche systématique de la meilleure date de semis. Le cas de Sandideye en 1991 est similaire, avec deux averses un peu moins significatives de 60 mm.

A partir de 600 mm, avoir davantage de pluie ne fait pas augmenter le rendement, qui stagne à environ 5000 kg/ha. La demande en eau de la plante étant satisfaite, d'autres facteurs climatiques rentrent en compte pour expliquer le rendement, comme le rayonnement solaire. Vers le seuil de 700-800 mm de pluie, on observe même une diminution du rendement simulé, à cause d'un déficit en rayonnement, dû à une forte couverture nuageuse. Ce phénomène est connu par les agronomes (Baron, 2004, communication personnelle) mais n'a pas été encore calibré et validé avec ce modèle. Ce dernier reproduit bien cette diminution. Néanmoins, le fait d'avoir une seule station climatique nous empêche de montrer que la diminution du rendement est due à un déficit de rayonnement. La comparaison entre le rayonnement global enregistré à Niamey et le rendement simulé sur 13 années n'est pas significative.

Il faut aussi mentionner qu'une forte pluie annuelle peut être associée à une ou deux pluies exceptionnelles, qui ruissellent beaucoup ; l'apparition d'une séquence sèche nocive est alors tout à fait possible. Ce cas, déjà rencontré pour les stations de Tanaberi et Sandideye, se retrouve pour les

stations autour de Niamey en 1998 : les cumuls pluvieux extraordinaires enregistrés (autour de 1000 mm) ne permettent pas d'atteindre en fin de saison le rendement seuil maximal d'environ 5000 kg/ha.

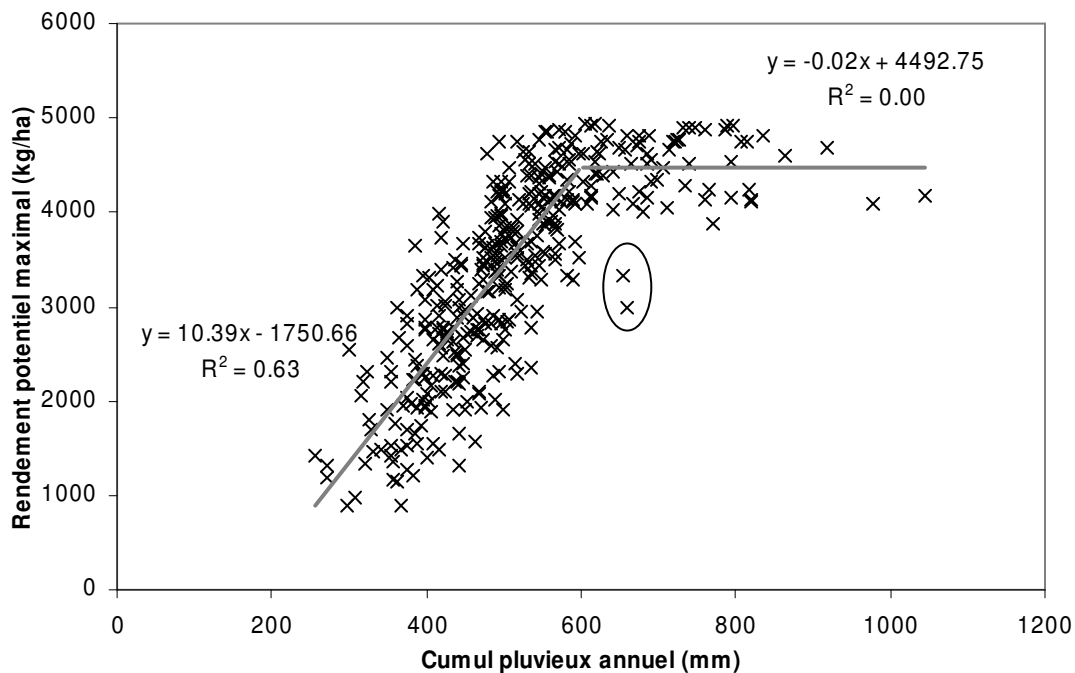


Figure 57 – Rendement simulé (pour la date optimale de semis) et pluie annuelle enregistrée à la station (N=30 stations x 13 années, soit 390 points).

2.3.2. Impact de la variabilité spatiale de la pluie sur le rendement

Intégrées sur toute la période d'observations de 1990 à 2002, les cartes de rendements simulés maximaux laissent apparaître un gradient nord-sud, comme les champs de pluie à cette échelle (Figure 58). Par contre, à l'échelle interannuelle, les fluctuations des rendements maximaux simulés ne présentent pas d'organisation latitudinale et s'établissent en lien avec les champs de pluie annuels, comme l'illustrent les cartes représentées sur la Figure 58. Les traits principaux des cartes de rendements maximaux simulés sont pratiquement identiques à ceux des cartes de champs de pluie annuels (Figure 30). Ceci n'est pas surprenant puisque dans ce volet d'étude idéalisée, on optimise la répartition du cumul annuel de manière à préserver les phases phénologiques les plus sensibles des cultures. On note néanmoins quelques dissemblances déjà évoquées : la bulle pluvieuse enregistrée aux alentours de Niamey en 1998, due à deux averses exceptionnelles, n'est pas reliée à de forts rendements.

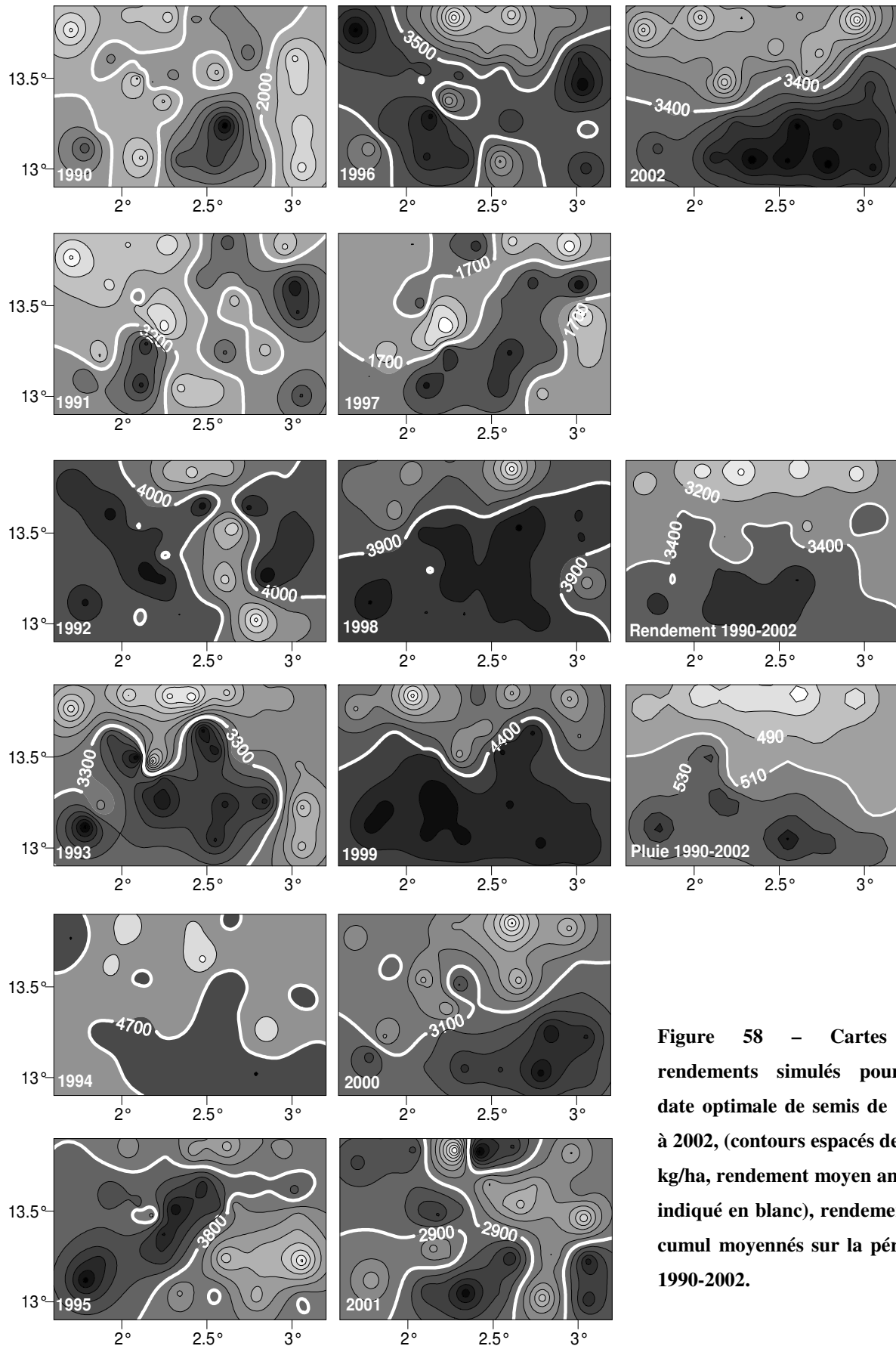


Figure 58 – Cartes de rendements simulés pour la date optimale de semis de 1990 à 2002, (contours espacés de 200 kg/ha, rendement moyen annuel indiqué en blanc), rendement et cumul moyennés sur la période 1990-2002.

Incidence sur l'estimation d'un rendement moyen à l'échelle de l'observatoire

La variabilité des rendements pose la question de la qualité de l'estimation d'un rendement moyen à l'échelle d'une zone de la taille de l'observatoire AMMA-CATCH Niger. Comme pour l'estimation de la pluie moyenne à différents pas de temps, prendre une seule station de référence pour estimer le rendement moyen peut s'avérer inadapté. En prenant la station de Niamey comme référence unique, on commet une erreur moyenne sur la période 1990-2002 de 18% (13% pour l'estimation de la pluie annuelle en choisissant la station de Niamey, 16% en choisissant une station quelconque). Une erreur de cet ordre de grandeur est non négligeable : vis-à-vis de la série des trente rendements simulés pour une année *i*, la meilleure récolte de l'année est en moyenne 33% au-dessus du rendement moyen de l'année *i*, la plus mauvaise récolte 40% en dessous. Une erreur de presque 20% peut donc facilement entraîner un faux diagnostic. Par ailleurs, cette valeur moyenne cache une forte variabilité, si on calcule l'erreur entre le rendement simulé à Niamey pour une année *i* et les 29 autres rendements simulés pour la même année. Les erreurs commises chaque année de 1990 à 2002, indiquées dans le Tableau 16, varient de 4% (1994) à 84% (1993).

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
RMSE	27%	30%	14%	84%	4%	19%	20%	65%	11%	13%	25%	27%	69%

Tableau 16 – Erreurs d'estimation commises sur le rendement exprimées en % en prenant la station de Niamey comme unique référence sur l'observatoire AMMA-CATCH Niger (RMSE = Root Mean-Square Error ou erreur quadratique moyenne).

Dans le cadre d'un suivi à l'échelle de l'observatoire, s'il s'agit de déterminer si la récolte de l'année a été plutôt déficitaire ou plutôt excédentaire pour déclencher ou non un processus d'aide alimentaire, la prise en compte de la station de Niamey comme seule station de référence entraîne une erreur de diagnostic 3 années sur 13 (1993, 2001, 2002), comme le montre la Figure 59. La récolte de 2001, par exemple, est jugée moyenne, voire légèrement excédentaire à Niamey, alors qu'elle est fortement déficitaire sur l'ensemble de la zone (vice versa pour 2002). Par contre, s'il s'agit de gérer une situation de crise alimentaire, une station de référence unique ne suffit pas pour évaluer les déficits locaux. Au vu de la Figure 59, on voit bien qu'en dehors des années 1990 et 1997, déficitaires sur toutes les stations, les stations répondent différemment chaque année. Avec un réseau d'observations plus important, comme l'observatoire AMMA-CATCH Niger, on pourrait prévoir un système de redistribution des ressources alimentaires, des zones plutôt excédentaires vers les zones déficitaires.

Microvariabilité à l'échelle de la parcelle

Par ailleurs, la variabilité spatiale des rendements à l'échelle de l'observatoire s'accompagne d'une microvariabilité à l'échelle de la parcelle agricole, qui n'est pas traitée ici et dépend non seulement de la disponibilité en eau du sol mais aussi de la microtopographie des parcelles, de la formation de

croûtes, de la distribution du ruissellement et des nutriments. Wallace et al. (1994), cités par Rockström et al (1999) signalent une gamme de rendements en grain allant de 0 à 2885 kg/ha dans un champ de 1 hectare au Niger. Rockström et al (1999), quant à eux, repèrent que les rendements décroissent du bas vers le haut d'un champ légèrement pentu (1 à 3%). Rockström et de Rouw (1997) soulignent que la variabilité de la croissance des cultures à l'échelle de la parcelle due à la toposéquence doit être vue comme une partie stratégique pour orienter les efforts des agriculteurs, plutôt qu'un obstacle à l'augmentation des rendements.

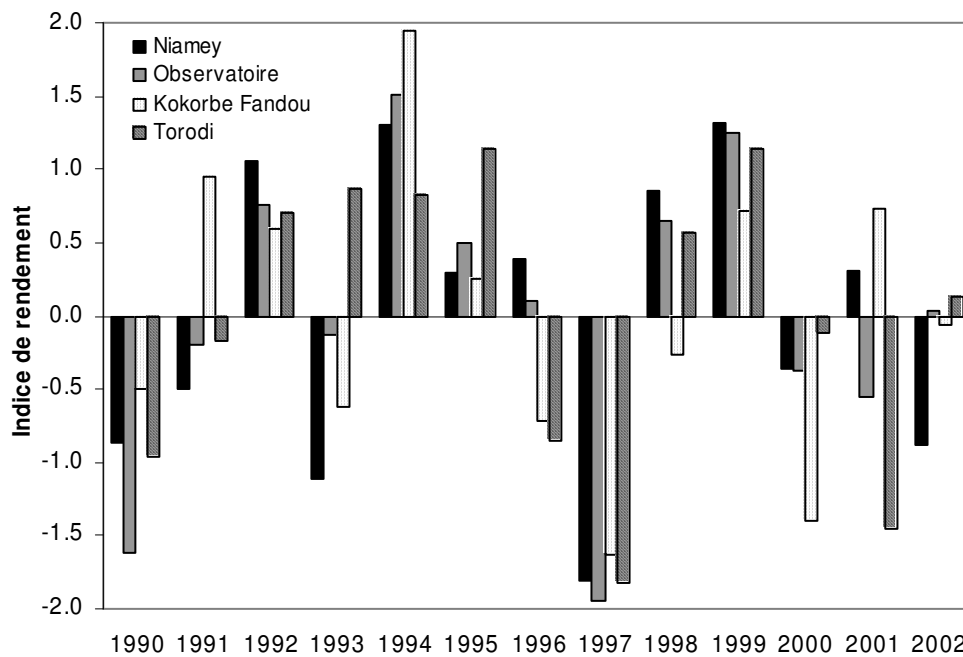


Figure 59 – Indice de rendement calculé comme un indice pluviométrique ($J = (R_{ik} - \bar{R}_k) / \sigma_{\bar{R}_k}$, avec R_{ik} le rendement simulé à la station k pour l'année i , \bar{R}_k le rendement simulé moyen sur la période 1990-2002 à la station k , $\sigma_{\bar{R}_k}$ l'écart-type de la série de rendements simulés à la station k), représenté pour trois stations : Niamey, Kokorbe Fandou, Torodi et pour l'ensemble de l'observatoire (30 stations AMMA-CATCH Niger).

2.3.3. Dates moyennes de semis optimale et de mise en place de la mousson

Les dates de semis optimales, permettant d'obtenir chaque année un rendement maximal, sont moyennées sur l'ensemble des 30 stations AMMA-CATCH Niger et représentées Figure 60. Les dates de semis optimales moyennes annuelles sont proches de la date moyenne du 26 juin de 1990 à 1997, puis paraissent plus variables de 1998 à 2002. On peut noter une légère tendance pour les années sèches à être caractérisées par des dates de semis optimales précoces (1990, 1997, 2000) et pour les années humides des dates de semis tardives (1998, 1999, 2002). Ces dernières ont un cycle saisonnier

très typé, comme on le verra plus loin, avec un retrait très tardif de la mousson. Le coefficient de corrélation entre la pluie moyenne annuelle et la date de semis optimale moyenne vaut $R^2 = 0.46$ ($R^2 = 0.63$ sans 1994, qui semble être une exception, dans le sens qu'elle est une année humide et que son cycle saisonnier est différent des années 1998, 1999 et 2002), mais notre échantillon de 13 valeurs est trop restreint pour être vraiment significatif.

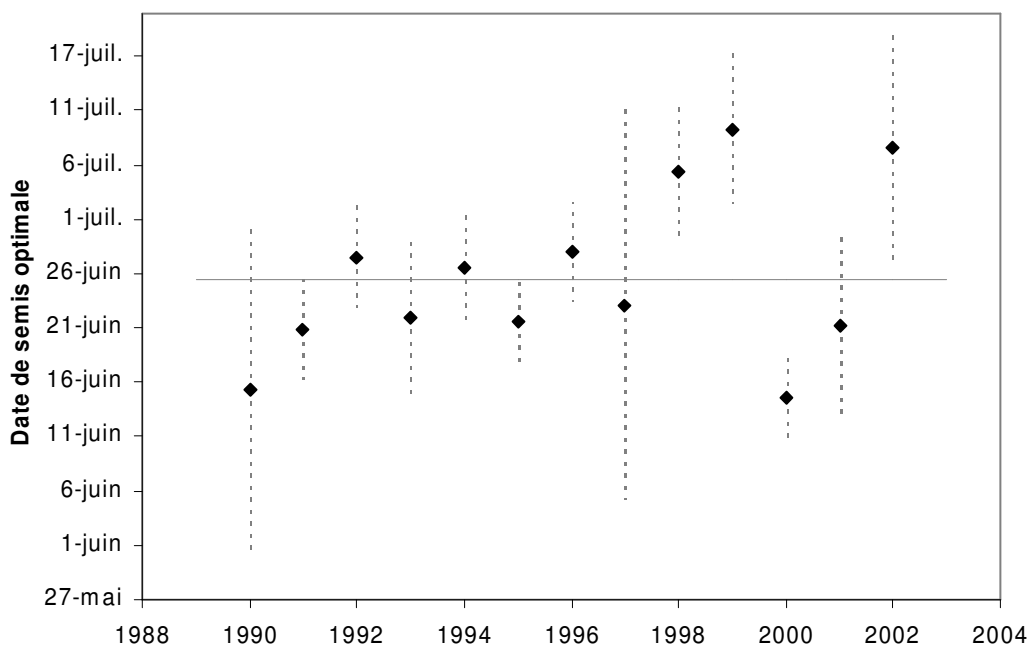


Figure 60 – Dates de semis optimales moyennées chaque année sur les 30 stations AMMA-CATCH Niger (encadrées par les écarts-types des échantillons annuels).

La date de semis optimale moyenne sur l'ensemble de la période 1990-2002 est le 26 juin, avec un écart-type de 12 jours. Cette date moyenne et cette variabilité sont proches d'une part de la date de mise en place de la mousson à l'échelle régionale (24 juin, avec un écart-type d'environ 8 jours, pour la période 1968-1990) et d'autre part de la date idéale de semis établie à Niamey pour la période 1968-1990 (22 juin, avec un écart-type de 11 jours), toutes deux déterminées par Sultan (2002). Le lien que Sultan (2002) avait établi entre le signal régional de la mise en place de la mousson et la date de semis idéale à l'échelle de la parcelle agricole reste valable sur une période différente (1990-2002 et 1968-1990) et étendu à toute la région de Niamey (30 stations comparées à l'unique station de Niamey). Il est également intéressant de constater que ces dates sont proches de la date moyenne du démarrage « agronomique » de la saison des pluies déterminé par Balme et al. (2004b). Ces derniers utilisent une méthode basée sur un seuil de pluie tombée et intégrant la notion de faux départs avec le critère de séquences sèches de Sivakumar (1988). Utilisée sur les 30 stations AMMA-CATCH Niger, elle fournit la date moyenne du 22 juin, avec un écart-type de 12 jours, sur la période 1990-2002. Sultan (2002) mentionne également qu'au Nigeria, Ati et al. (2002) donnent une date moyenne du début de la

saison des pluies au 22 juin. Cette concordance de dates souligne l'intérêt des travaux de Sultan (2002) concernant l'amélioration des rendements quand la date de mise en place de la mousson à l'échelle régionale est prise en compte dans le choix de la date de semis à l'échelle locale. Ceci pose par contre la question du risque de semer à une date fixe chaque année. Balme et al. (2004b) rappellent dans leur conclusion qu'il est nécessaire d'adapter localement la prévision précoce de la mise en place de la mousson puisqu'à une échelle fine la saison des pluies s'installe dans l'espace de manière chaotique. Néanmoins, les dates de semis optimales paraissent moins variables dans l'espace. Les écarts-types indiquées Figure 60 pour chaque année montrent que les dates de semis optimales sont peu dispersées entre les 30 stations pour 10 années sur 13. Les années 1997 (écart-type = 18 jours), 1990 (15) et 2002 (11) révèlent une plus forte variabilité spatiale. Les cultures doivent jouer un rôle d'amortisseur vis-à-vis de la variabilité de l'installation des pluies. Cette faible variabilité autour de la date de semis fixée peut s'expliquer en partie par la faible sensibilité au stress hydrique de la plante au cours du premier stade phénologique de développement marqué par l'installation du peuplement (Ndjendole, 2001, cité par Sultan, 2002). Sultan (2002) propose cependant d'adapter la date de semis de façon à éviter un stress hydrique pendant les phases les plus sensibles du cycle phénologique de la plante, sous réserve qu'on puisse disposer d'une prévision de l'occurrence d'une phase sèche intrasaisonnière deux mois à l'avance. On peut également analyser la faible variabilité autour de la date de semis moyenne sous un angle climatique. Bien que forte, la variabilité spatiale du démarrage de la saison des pluies analysée par Balme et al. (2004b) a un peu moins d'influence que le signal saisonnier : le saut de mousson représente un forçage très contraignant.

2.4. Sensibilité du rendement simulé à la date de semis

Le volet de simulations précédent montrait une vision idéalisée de la culture du mil, avec l'obtention chaque année du rendement potentiel maximal obtenu en semant à une date optimale connue a posteriori. Or, comme le souligne de Rouw (2004), la priorité des paysans n'est pas d'obtenir un plus fort rendement une année donnée, mais de réduire les risques afin d'être garantis d'un rendement minimal chaque année. On s'attache ici à i) élargir la notion de date optimale à celle de période de semis optimale, plus utile pour les paysans dans l'optimisation des travaux agricoles, ii) documenter la sensibilité du rendement simulé à la date de semis et iii) mieux cerner l'impact de la variabilité du démarrage des pluies sur le choix de la date de semis, vis-à-vis de celui du cycle saisonnier.

Période de semis optimale

On s'intéresse d'abord à la période de semis qui garantit d'obtenir au moins 70% du rendement maximal. La Figure 61 montre les bornes de cette période pour chacune des années de 1990 à 2002. En moyenne, cette période dure un mois (à comparer à une période de 3 semaines pour Sultan, 2002),

du 10 juin au 11 juillet, ce qui laisse du temps aux paysans pour gérer l'organisation des travaux agricoles manuels.

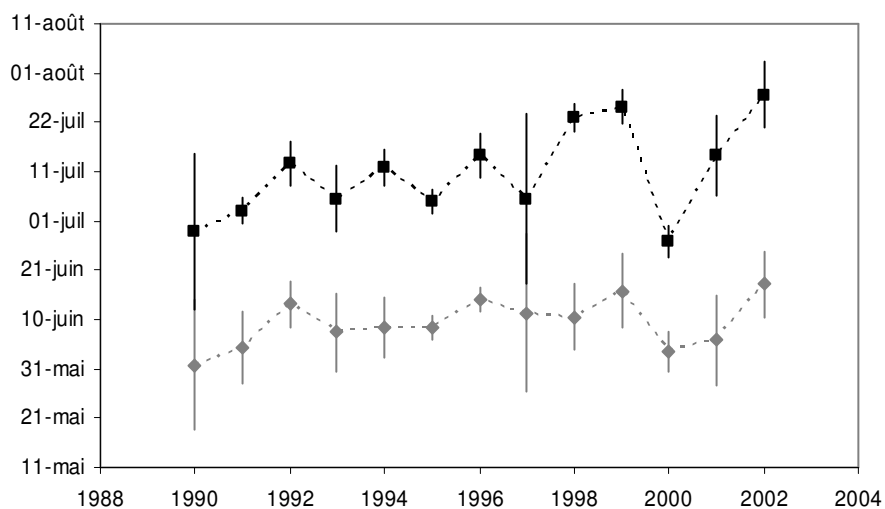


Figure 61 – Période de semis garantissant 70% du rendement maximal, avec l'écart-type calculé sur la série des 30 stations.

Rendements simulés en fonction de la date de semis de 1990 à 2002

L'étude qui suit s'inscrit directement dans la continuité des travaux de Sultan (2002). Celui-ci a étudié la variabilité interannuelle du rendement potentiel simulé en fonction de la date de semis à la station de Niamey Aéroport pour 19 années entre 1968 et 1990. On propose ici de spatialiser ces résultats, en utilisant les 30 stations de l'observatoire, sur la période 1990-2002.

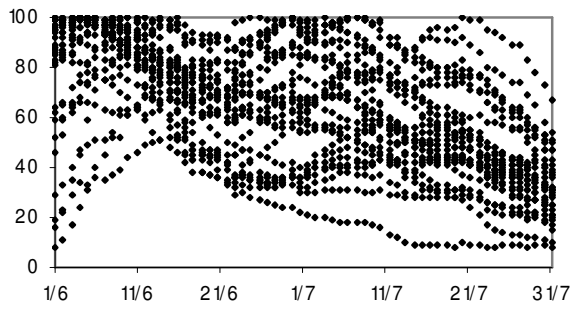
La Figure 62 représente l'évolution des rendements potentiels simulés (en pourcentage des rendements potentiels maximaux) en fonction de la date de semis choisie chaque année, ceci pour les 30 stations AMMA-CATCH Niger, de 1990 à 2002. Deux types de distribution se distinguent : une distribution unimodale des rendements, dont les maxima sont centrés sur la date de mise en place de la mousson, à une dizaine de jours près, et une distribution bimodale, avec un creux assez prononcé entre les deux maxima. Sultan (2002) choisit de répartir les 19 années de rendements simulés à Niamey en quatre classes, en se basant sur les résultats d'une classification automatique. Quand cela est possible, on rapprochera les années étudiées de 1990 à 2002 de ces classes, sachant que l'information spatialisée dont on dispose ajoute un élément supplémentaire à prendre en compte dans la classification des années, à savoir une similitude ou une différence de comportement entre les stations de l'observatoire.

Dix années sur treize, l'évolution des rendements simulés en fonction de la date de semis suit une distribution unimodale. Le rendement simulé augmente régulièrement en fonction de la date de semis,

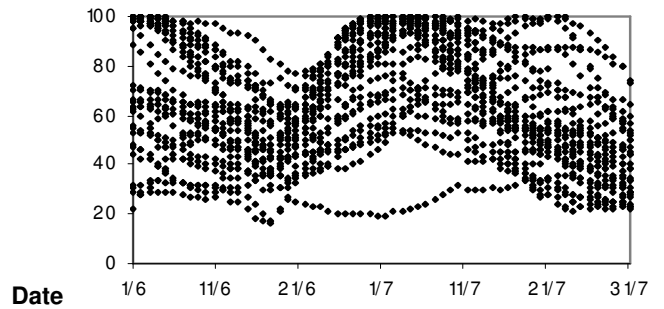
pour être maximum en semant au moment de la mise en place de la mousson (6 années sur 10), significativement plus tard (3 années sur 10) ou plus tôt (1 année sur 10) :

- Pour 6 années consécutives de 1991 à 1996, le rendement maximum simulé correspond à une date de semis proche à la fois de la date de mise en place de la mousson (24 juin, avec un écart-type de 8 jours) déterminée par Sultan (2002) et de la date moyenne optimale déterminée sur l'observatoire (26 juin). Cette catégorie d'années peut être rapprochée de la classe 4 établie par Sultan (2002). Parmi ces six années, l'année 1993 se distingue par un fuseau de distributions plus lâche que les autres années, avec des maxima plus étalés dans le temps. En ce qui concerne le cycle saisonnier moyen des pluies de ces années, représenté Figure 63, la longueur de la saison est bien adaptée à la longueur du cycle végétatif du mil de 90 jours et le cycle ne présente pas d'anomalie sèche particulière.
- Les années 1998, 1999 et 2002 présentent un rendement maximal en semant 12 à 16 jours après la date de mise en place de la mousson. Elles sont toutes trois considérées comme des années humides sur l'observatoire. Le cycle saisonnier des pluies (Figure 63) révèle un déphasage par rapport au cycle saisonnier étudié précédemment, avec un saut de mousson tardif et une fin de saison des pluies abondante et tardive. Il faut semer une quinzaine de jours après la mise en place de la mousson pour que la fin du cycle des cultures coïncide avec la fin de la saison des pluies, pour éviter que les cultures soient altérées par les moisissures. Cette catégorie d'années peut être rapprochée de la classe 1 établie par Sultan (2002). L'année 2002 est très particulière, avec une obtention de rendements supérieurs ou égaux à 70% des rendements maximaux à des dates de semis très tardives et assez improbables, d'où l'interruption brutale des distributions. Par ailleurs, ces trois années humides ont tendance à présenter des rendements maximaux étalés en palier assez large, laissant une plage de semis beaucoup plus longue pour obtenir de bons rendements, due à leur cycle saisonnier très typé. La Figure 61 indiquait effectivement une période de semis de 40 jours pour obtenir 70% et plus du rendement maximal pour les années 1998, 1999 et 2002.
- L'année 2000 se distingue des précédentes par un rendement maximal obtenu en semant 10 jours avant la mousson. Le cycle saisonnier (Figure 63) est évidemment moins lisse que les précédents, néanmoins la phase sèche enregistrée début août paraît significative et pourrait expliquer la nécessité de semer avant la mise en place de la mousson, afin d'éviter que la phase sèche ne se produise à un stade sensible du cycle de développement des cultures.

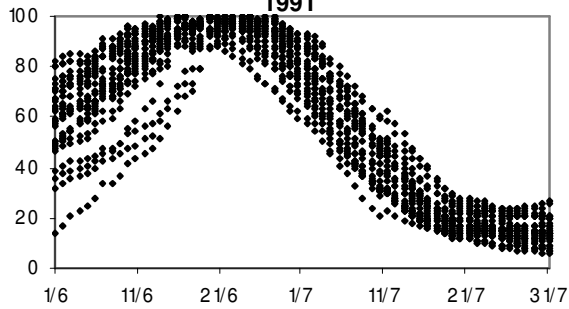
% Rendement maximal 1990



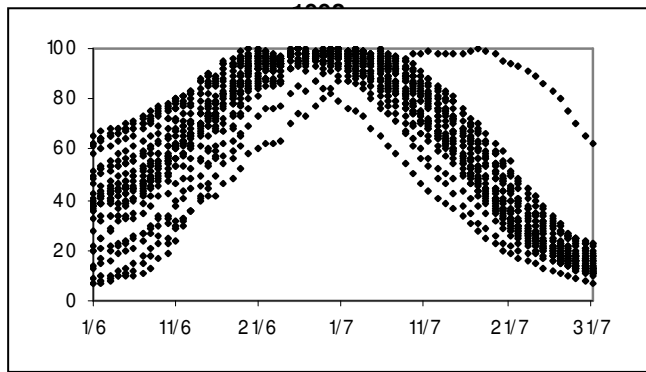
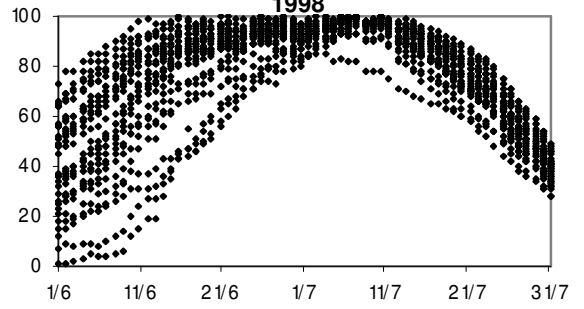
1997



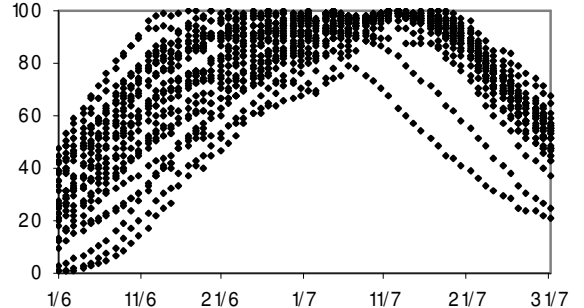
1991



1998

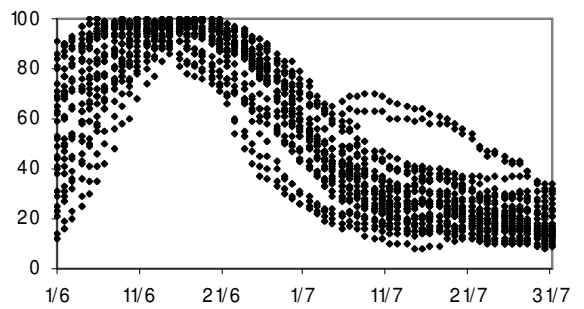
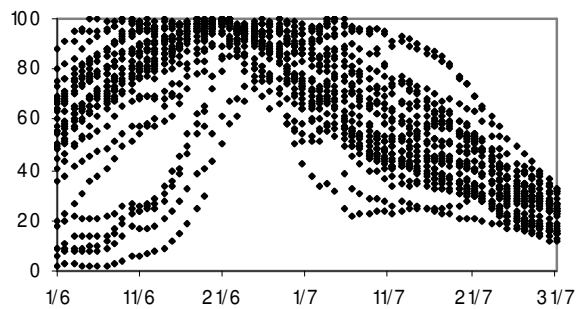


1999



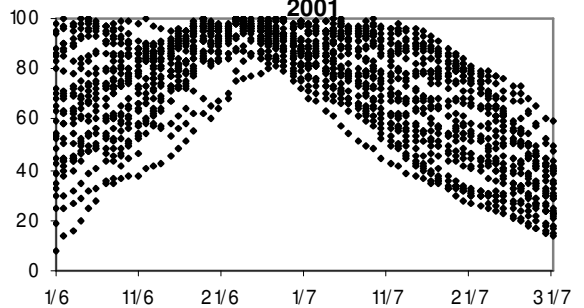
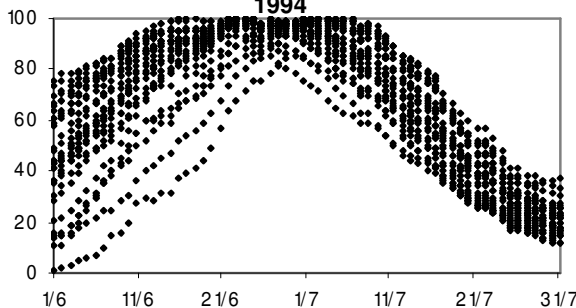
1995

2000



1994

2001



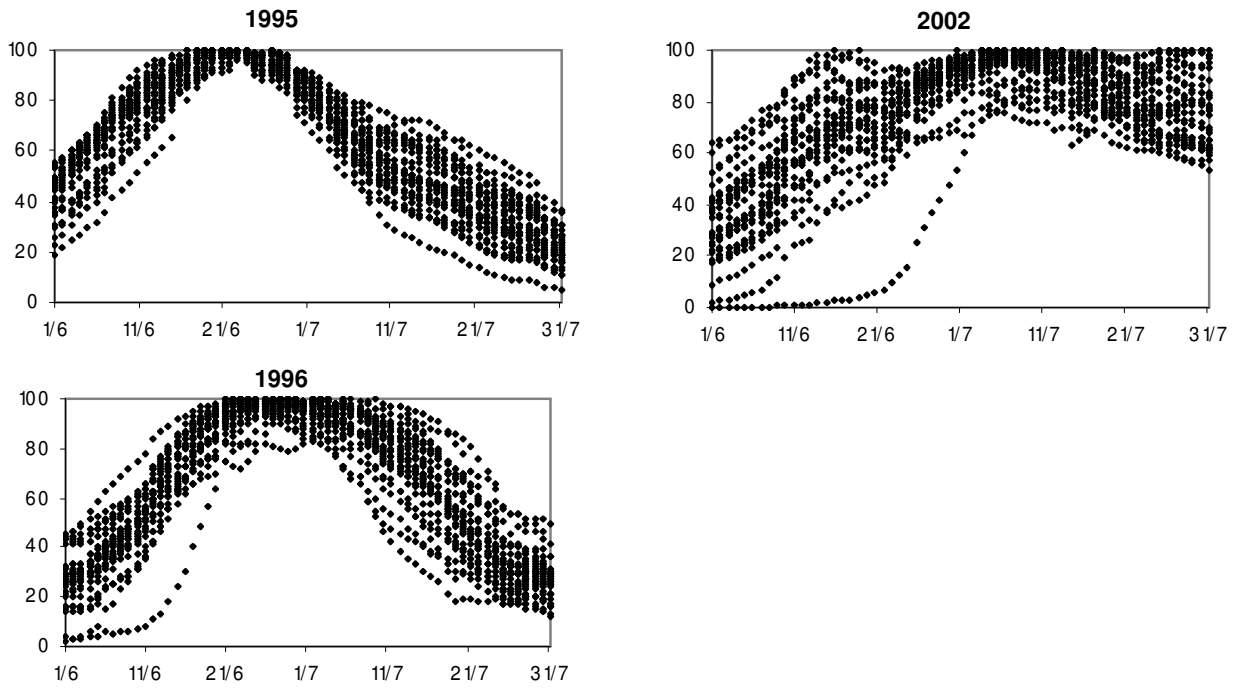


Figure 62 – Séries de rendements simulés (exprimés en pourcentage de rendements potentiels maximaux) en fonction de la date de semis pour la période 1990-2002 (de haut en bas, à gauche : de 1990 à 1996, à droite : de 1997 à 2002), pour les 30 stations AMMA-CATCH Niger.

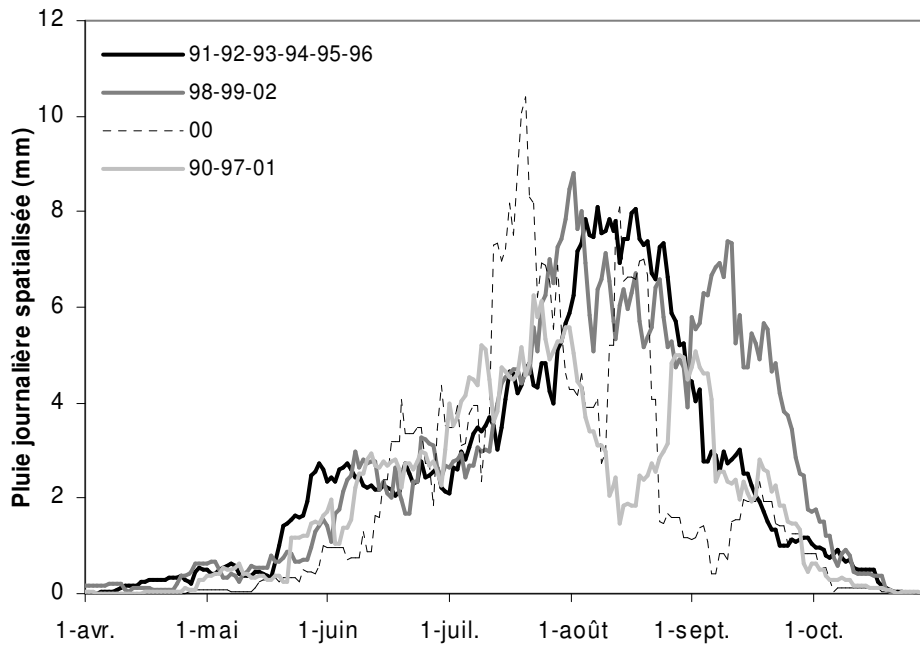


Figure 63 – Cycles saisonniers composites des pluies moyennées sur l'observatoire (lissés par des moyennes mobiles de 11 jours).

Les années 1990, 1997 (et 2001, moins nettement) présentent une allure bimodale pour les séries de rendements simulés en fonction de la date de semis. Ce sont des années sèches, dont les dates optimales de semis étaient très variables. Cette variabilité est bien visible sur ces distributions bimodales, due certainement à l'occurrence de phases sèches à des stades phénologiques sensibles. Effectivement, le cycle saisonnier moyen de ces trois années (Figure 63) révèle une phase sèche significative en milieu du mois d'août. Semer à la date moyenne de mise en place de la mousson donne des résultats catastrophiques pour une majorité de stations en 1990 et 1997, à imputer à la coïncidence de la phase sèche avec la floraison et le début de la maturation des cultures. Ces années peuvent être associées à la classe 2 de Sultan (2002). Ce dernier a étudié en détail l'année 1990 à Niamey, les résultats présentés ici ajoutent une dimension spatiale. Les séries de rendement simulées en 1990 et 1997 sont très dispersées. La section 2.5 est consacrée à l'analyse de l'impact des phases sèches sur le rendement simulé, dans le but d'expliquer les réponses différentes d'une station à l'autre.

Variabilité du démarrage de la saison des pluies vs. forçage du cycle saisonnier

On s'applique ici à mieux cerner l'impact de la variabilité spatiale du démarrage des pluies sur la constitution d'un rendement moyen à l'échelle d'une zone de la taille de l'observatoire AMMA-CATCH Niger. Dans la section 2.3.3, on a vu que le saut de mousson représentait un forçage contraignant vis-à-vis du choix de la date de semis optimale, alors que la variabilité spatiale du démarrage de la saison des pluies avait un peu moins d'influence. Il s'agit ici de quantifier l'impact de la variabilité spatiale du démarrage de la saison des pluies, par rapport à celui du cycle saisonnier ou de la variabilité interannuelle. Pour cela, on compare quatre situations de semis différentes. Pour chacune, le rendement moyen obtenu est exprimé en pourcentage, sachant que le rendement optimal de l'année (indice 100) est obtenu en semant pour chaque station à « sa » date optimale.

- i) Chaque année, on sème pour toutes les stations à la date optimale moyenne de l'année (15 juin en 1990, 21 juin en 1991, etc.). Le rendement moyen obtenu sur la période 1990-2002, déterminé à partir de 390 valeurs (30 rendements x 13 années), vaut 91%.
- ii) Chaque année, on sème pour toutes les stations à la date moyenne de mise en place de mousson déterminée à l'échelle régionale (24 juin). Le rendement moyen obtenu vaut 86%.
- iii) Chaque année, on sème pour chaque station à « sa » date de démarrage agronomique déterminée par Balme et al. (2004b). Le rendement moyen obtenu vaut 74%.
- iv) Chaque année, on sème à chaque station à « sa » date de démarrage hydrologique (seuils de 2.5 ou 5 mm) déterminée par Balme et al. (2004b). Les rendements obtenus valent 59% (premières pluies supérieures ou égales à 5 mm), 51% (2.5 mm). On précise que dans ce cas, les rendements moyens sont basés sur 155 et 100 valeurs au lieu de 390, plus de la moitié des dates de démarrage hydrologique étant trop précoces et par conséquent n'ayant pas été simulées avec le modèle.

Les meilleurs rendements sont obtenus en semant à une date globale sur tout l'observatoire : date optimale moyenne de l'année (91%), qu'on ne connaît pas a priori et qui inclut la variabilité interannuelle du cycle saisonnier à venir, ou date moyenne de mise en place de la mousson (86%), signe à l'échelle régionale que la mousson est bien établie. Quand on prend en compte la variabilité spatiale du démarrage « agronomique » de la saison des pluies, avec un semis adapté à chaque station, le rendement est, bien qu'inférieur aux deux situations précédentes, relativement satisfaisant (74%). La date de démarrage agronomique définie par Sivakumar (1988) a l'avantage, à l'inverse de la date optimale, d'être « prévisible » : on peut prendre le risque de semer aux premiers 20 mm de pluie tombés sur trois jours consécutifs, et ressemer si une période sèche survient dans le mois qui suit. Cette démarche est d'ailleurs vraisemblablement assez proche de la méthode traditionnelle de choix de date de semis. Les dates de démarrage « hydrologique », souvent trop précoces, entraînent quant à elles des rendements assez médiocres.

Les rendements mentionnés ci-dessus ont été moyennés sur 13 années et 30 stations. La Figure 64 illustre leur variabilité interannuelle et spatiale. A l'échelle interannuelle, semer aux dates de démarrage agronomique fournit de meilleurs rendements vis-à-vis du choix de la date de mise en place de la mousson pour 1990, 1997, 1999 et des rendements équivalents pour 1998, 2000. Par contre, à l'échelle spatiale, le choix d'un semis au démarrage agronomique entraîne une gamme plus large de rendements, et de fait, un risque plus élevé d'échecs.

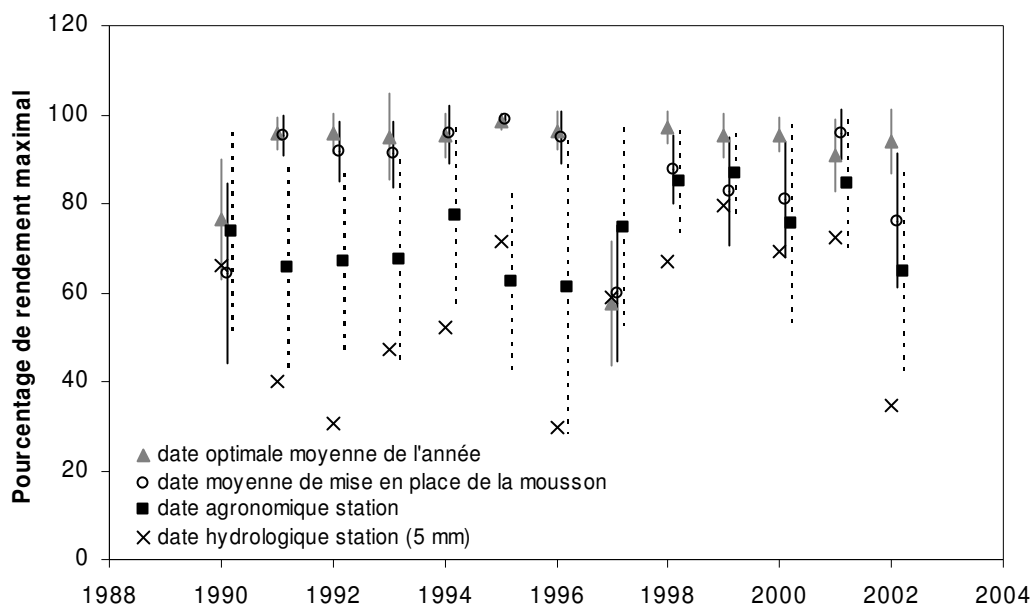


Figure 64 – Variabilité interannuelle du rendement simulé moyenné sur les 30 stations (exprimé en pourcentage de rendement maximal et encadré par les écarts-types d'échantillons annuels) en fonction de la date de semis choisie.

2.5. Impact des phases sèches sur le rendement simulé : le cas de 1997

Des études menées sur le terrain à l'échelle du champ de mil ont permis de documenter les conséquences des phases sèches sur la croissance des cultures en fonction de leur date d'occurrence. Rockström et de Rouw (1997) décrivent l'impact de trois phases sèches survenant à des stades de développement différents pour 1994, 1995, 1996 au Niger. En 1994, une phase sèche précoce a entraîné une perte significative de pieds de mil et un faible nombre de panicules. Mais par la suite, la disponibilité en eau a été excellente et a permis un bon remplissage des grains, bien que relativement peu nombreux. En 1995, la distribution de la pluie a été bonne pendant l'initiation des panicules et la floraison, ce qui a amené un nombre supérieur de pieds, de panicules et de grains par rapport aux autres années. La phase sèche de 1995 est apparue lors du remplissage des grains, provoquant une faible masse par grain. En 1996, la phase sèche a frappé au milieu de la saison, affectant sérieusement la floraison, d'où une faible formation de grains et une forte proportion de pieds stériles. La performance de chaque composant du rendement (nombre de pieds, nombre de panicules, nombre de grains, masse des grains) est déterminée par la disponibilité en eau au cours de la phase où il est formé. Néanmoins, une mauvaise performance d'un des composants du rendement due à une phase sèche peut être compensée par les autres composants en période de pluie plus favorable.

L'étude citée ci-dessus a été menée à l'échelle d'une seule parcelle de mil. L'intérêt des simulations effectuées sur l'observatoire AMMA-CATCH est d'ajouter une dimension spatiale à l'analyse de l'impact des phases sèches sur le rendement simulé. A l'échelle du degré carré, la date de semis optimale est assez homogène pour les cultures si l'année est moyennement pluvieuse. Par contre, si l'année est sèche, les réponses contrastées des stations en terme de rendements semblent montrer qu'il existe différents types de phases sèches au cours de la saison des pluies : des phases sèches localisées à une ou quelques stations et des phases sèches « régionales » touchant tout l'observatoire, peut-être même une zone plus large. Ces dernières sont visibles sur le cycle saisonnier des pluies spatialisées et provoquent un décalage de la date de semis optimale vis-à-vis de la date de mise en place de la mousson (cf. section 2.4). Cette section s'appuie sur l'étude du cas de l'année 1997, qui a enregistré des phases sèches « localisées » et « régionales » particulièrement marquées.

L'exemple de 1997

Les cartes de la Figure 65 représentent les rendements simulés obtenus pour l'année 1997 en semant à cinq dates différentes, espacées d'une décade du 1^{er} juin au 11 juillet.

En semant le 21 juin, l'impact de la phase sèche survenant mi-août (déjà relevée dans la section précédente), soit 55 jours après le semis, est bien visible sur tout l'observatoire. Les rendements simulés sont réduits en moyenne à 53% des rendements potentiels maximaux (avec un écart-type de 13%).

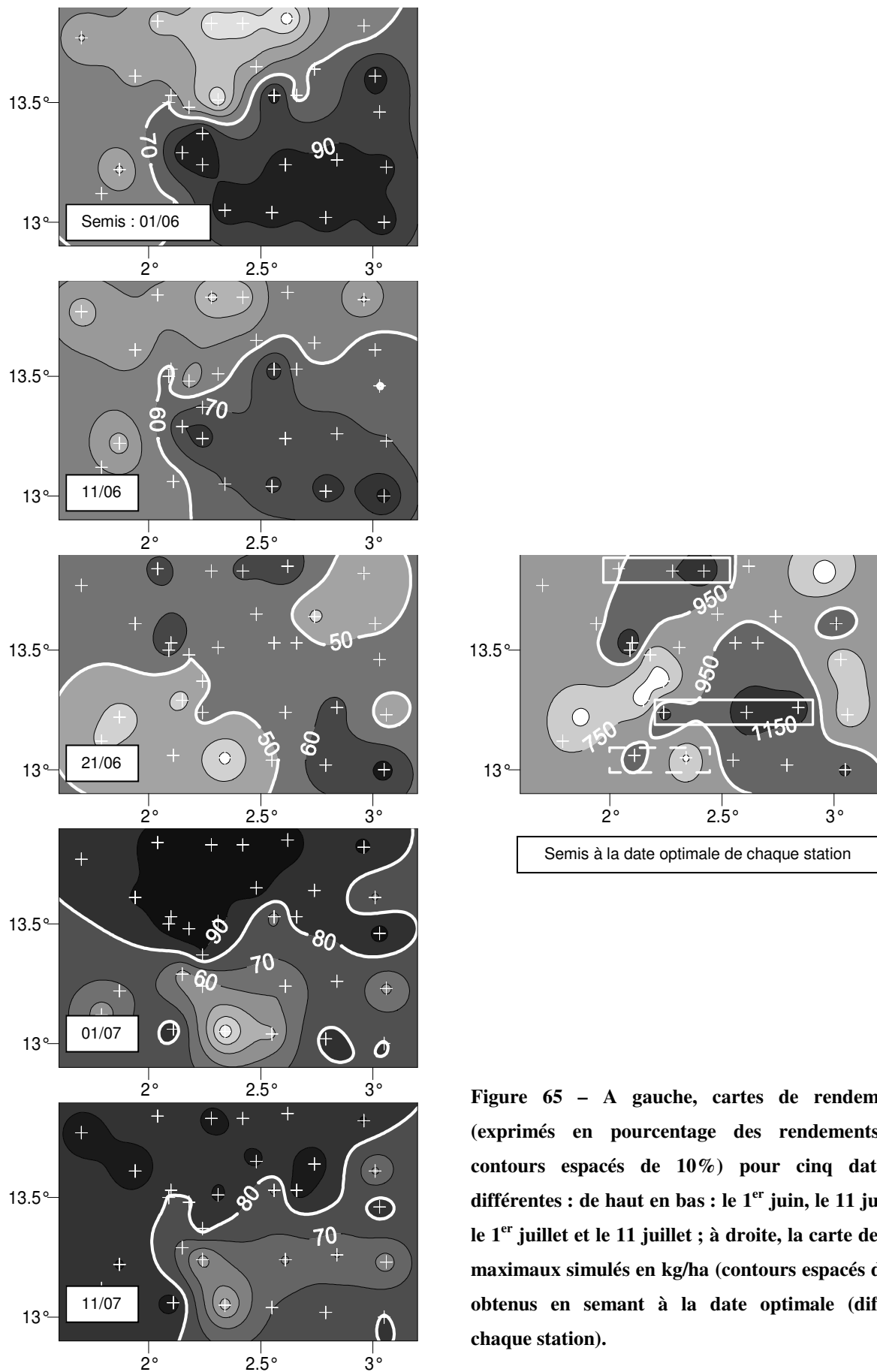


Figure 65 – A gauche, cartes de rendements simulés (exprimés en pourcentage des rendements maximaux, contours espacés de 10%) pour cinq dates de semis différentes : de haut en bas : le 1^{er} juin, le 11 juin, le 21 juin, le 1^{er} juillet et le 11 juillet ; à droite, la carte des rendements maximaux simulés en kg/ha (contours espacés de 200 kg/ha), obtenus en semant à la date optimale (différente pour chaque station).

En dehors de cette phase sèche ayant touché tout l'observatoire mi-août, d'autres phases sèches préjudiciables ont été enregistrées sur une partie de l'observatoire, d'où cette organisation des rendements simulés suivant une diagonale sud-ouest/nord-est. On s'intéresse en particulier à deux transects situés à 13.2°N et 13.8°N englobant chacun trois stations (représentés à droite sur la Figure 65 par deux rectangles blancs), qui ont des rendements potentiels maximaux du même ordre de grandeur (2000 kg/ha). La Figure 66 illustre la pluie moyenne journalière (avec une moyenne glissante de 11 jours) enregistrée par chaque groupe de stations. Le mois de juin est peu arrosé, voire sec sur la dernière décade, à 13.8°N, ce qui entraîne des rendements assez médiocres si on sème début juin (30 à 44% du rendement maximal pour le 1^{er} juin). A l'inverse, la fin du mois d'août et le début du mois de septembre sont assez pluvieux et permettent de compenser la phase sèche de mi-août. Les stations à 13.2°N sont en opposition de phase, avec un mois de juin correct qui permet d'obtenir de bons rendements en semant au début de ce mois, et un mois de septembre peu arrosé qui entraîne des rendements moins forts en semant vers le 11 juillet.

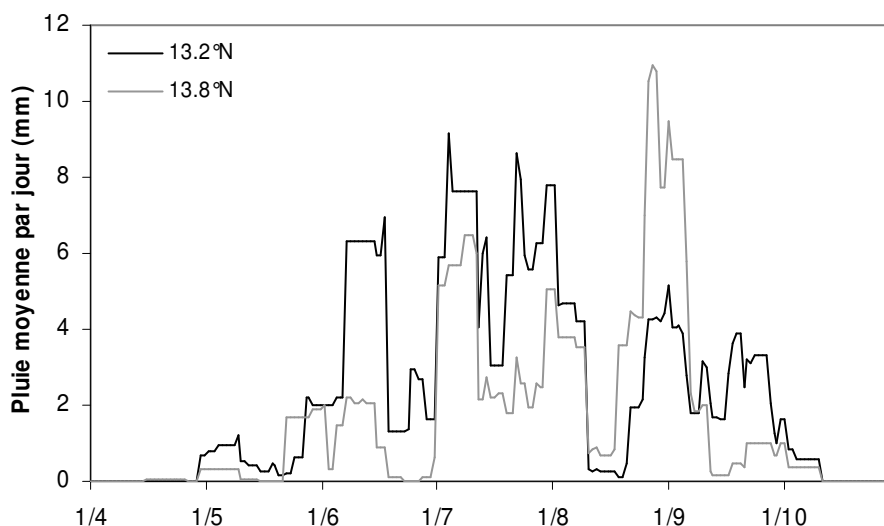


Figure 66 – Pluies journalières moyennées sur 11 jours et trois stations pour deux transects situés à 13.2°N et 13.8°N.

A une échelle inférieure, on peut également trouver une station isolée subissant une phase sèche préjudiciable. Cet exemple est illustré par deux stations voisines situées à 13.05°N (encadrées par un rectangle blanc en pointillés sur la Figure 65 à droite). La Figure 67 illustre la simulation des rendements obtenus en ces deux stations en semant le 11 juillet. Le rapport entre l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration maximale (ETR/ETM) est un bon indicateur de la satisfaction des besoins en eau de la culture : plus celui-ci est proche de un, plus ses besoins en eau sont satisfaits. Après la phase sèche enregistrée mi-août, le mois de septembre reste sec à Kare. Les cultures reçoivent 60% de leurs besoins en eau durant la phase reproductive (2^{ème} palier) et 35% durant la phase de

remplissage de grains (3^{ème} palier). Ces stress hydriques entraînent un rendement en grains médiocre (632 kg/ha, soit 32% du rendement potentiel maximal). Il fallait semer le plus tôt possible (le 1^{er} juin) pour obtenir un meilleur rendement (1969 kg/ha). A l'inverse, la station voisine de Debere Gati enregistre suffisamment de pluie pour compenser la période sèche de mi-août. Les besoins en eau sont satisfaits à 71% et 80% pendant les phases 2 et 3. En semant aux alentours du 11 juillet, on obtient le rendement potentiel maximal (2392 kg/ha).

Cette imbrication de phases sèches d'extensions spatiales variées (région, portion d'observatoire, station isolée) observées pour l'année 1997 rend difficile la prévision saisonnière d'une date de semis optimale sur l'observatoire. Il semble qu'on soit confronté à la même complexité pour les années 1990, 1993 et 2001, qui sont toutes des années relativement sèches. Il serait intéressant de rechercher les causes atmosphériques des phases sèches suivant leur extension spatiale. Si les mécanismes engendrant ces phases sont prédictibles, on pourrait affiner la prévision de la date de semis optimale en année sèche.

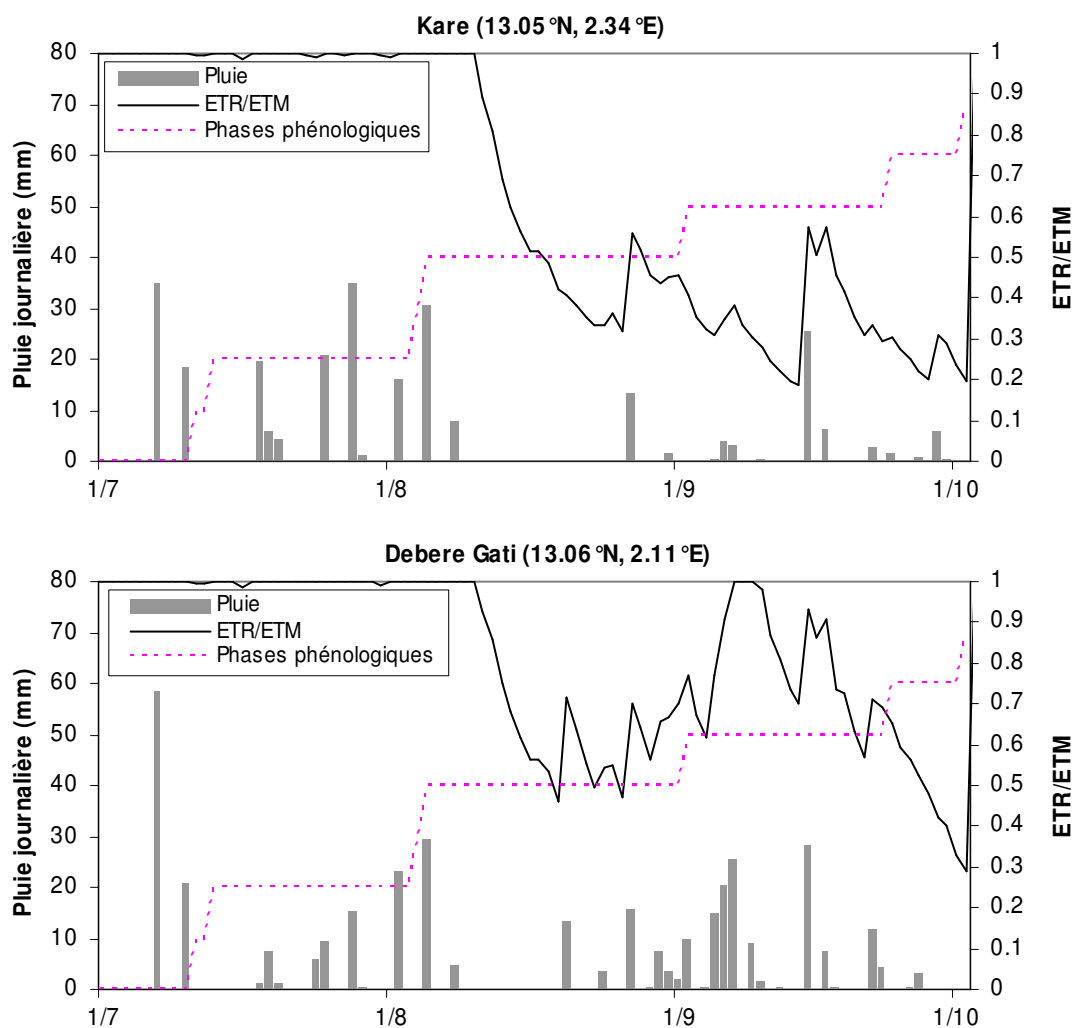


Figure 67 – Pluies journalières, indices de stress hydrique (ETR/ETM) et phases phénologiques pour deux simulations de rendement avec un semis le 11 juillet 1997.

3. Synthèse de l'impact de la variabilité pluviométrique sur la culture du mil et perspectives

Les données AMMA-CATCH Niger ont permis d'appréhender les facteurs majeurs relatifs à la pluie qui semblent affecter la culture du mil, à savoir le démarrage de la saison des pluies et l'occurrence de phases sèches au cours de la saison. L'utilisation de données pluviographiques denses conduit à des résultats intéressants d'un point de vue agronomique, comme la description du démarrage de la saison des pluies sur l'observatoire. Néanmoins, pour mieux comprendre les interactions entre la plante, le sol et l'atmosphère, il est indispensable de quantifier les flux échangés et de simuler le développement de la plante. L'application du modèle de cultures SARRA-H aux trente stations AMMA-CATCH Niger, considérées comme autant de parcelles de mil cultivées, permet de simuler les rendements potentiels atteignables en fonction de la date de semis choisie et d'examiner treize saisons des pluies différentes sur la région de Niamey, de 1990 à 2002, dans l'optique de documenter l'impact de la variabilité pluviométrique sur le rendement en mil.

3.1. Analyse climatique avec les données pluviographiques

Les observations pluviographiques AMMA-CATCH Niger sont utilisées pour déterminer le démarrage de la saison des pluies suivant le critère « agronomique » de Sivakumar (1988). Le démarrage de la saison des pluies ainsi défini est très variable chaque année d'une station à l'autre. En revanche, une fois moyennée sur l'observatoire, la date de démarrage agronomique moyenne est assez stable d'une année à l'autre et se produit en moyenne le 22 juin sur la période 1990-2002, avec un écart-type interannuel de 12 jours (6 jours sans prendre en compte l'année 1991, qui comporte beaucoup de lacunes en début de saison). Cette date marque le début d'une période de mousson bien établie, recueillant 90% du cumul saisonnier et durant 105 jours. La date moyenne du 22 juin est à rapprocher de la date moyenne de mise en place de la mousson, établie à l'échelle régionale par Sultan et Janicot (2003) au 24 juin pour la période 1968-1990. On pourrait donc imaginer une stratégie simple de semis du mil lors de la mise en place de la mousson, à condition d'adapter la prévision de celle-ci localement, puisqu'il a été établi que la saison des pluies agronomique s'installait de manière chaotique sur l'observatoire (Balme et al., 2004b).

Les résultats de l'analyse des phases sèches réalisée à partir des observations AMMA-CATCH Niger sont assez limités en terme d'intérêt agronomique. Le cycle saisonnier moyen des phases sèches présenté nous renseigne toutefois sur la date de semis permettant d'éviter l'occurrence de phases sèches à un stade phénologique sensible en fonction de la longueur du cycle de la variété semée. Par exemple, on peut retenir qu'une année sur deux, il faut attendre au moins 7 jours durant la première décade de juin avant d'enregistrer une pluie de 10 mm (et au moins 3 jours durant la deuxième décade d'août) ; ce délai est sensiblement le même pour une année humide et une année sèche pour la

première décade de juin, par contre, pour la deuxième décade d'août, il passe à 2-3 jours pour une année plutôt humide (suivant le composite choisi) et à 5 jours pour une année plutôt sèche. Les années sèches sont caractérisées par une altération de la deuxième moitié de la saison des pluies. L'échantillon des observations étant un peu restreint en nombre d'années, l'étude des phases sèches de période de retour de dix ans paraît raisonnable. Une année sur dix, il faut attendre au moins 24 jours durant la première décade de juin avant d'enregistrer une pluie de 10 mm (et au moins 11 jours au cours de la deuxième décade d'août) ; ce temps ne change pas en année humide ou sèche pour la première décade de juin, par contre, il passe à 9-10 jours pour une année plutôt humide et à 18-20 jours pour une année plutôt sèche. Par ailleurs, l'analyse des phases sèches nous permet de revenir sur le modèle de la loi des fuites et d'illustrer son utilité d'une autre manière.

3.2. Analyse des rendements simulés avec le modèle de cultures

Les séries de simulation effectuées avec le modèle de cultures SARRA-H permettent de rechercher systématiquement la date de semis optimale pour un rendement potentiel maximal en mil en chaque station. La date de semis optimale moyennée sur l'observatoire pour la période de 1990 à 2002 est le 26 juin. Ces travaux sont une spatialisation dans la région de Niamey des résultats de Sultan (2002), qui a montré que la prise en compte de la date de mise en place de la mousson dans le choix d'une date de semis améliorerait significativement les rendements de la station de Niamey, sur la période 1968-1990. La similitude des dates moyennes du démarrage agronomique (Balme et al., 2004b), du semis optimal sur l'observatoire et de la mise en place de la mousson à l'échelle régionale étend la validation des résultats de Sultan (2002) à tout l'observatoire AMMA-CATCH Niger et confirme l'intérêt de tenir compte de la date de mise en place de la mousson dans le choix d'une date de semis du mil.

L'organisation des travaux agricoles nécessite toutefois d'élargir la notion de date de semis optimale à celle de période de semis optimale. Pour atteindre au moins 70% du rendement potentiel maximal en mil, il faut semer du 10 juin au 11 juillet en moyenne, d'après les simulations effectuées sur les stations AMMA-CATCH Niger, ce qui laisse un mois aux paysans pour gérer les contraintes de main d'œuvre. Si le démarrage agronomique défini à partir des observations était très variable dans l'espace, l'organisation spatiale des dates de semis optimales paraît moins fluctuante, excepté pour les années 1990 et 1997. Sous un angle agronomique, cette faible variabilité autour de la date de semis optimale peut s'expliquer en partie par la faible sensibilité des cultures au stress hydrique au cours du premier stade phénologique de leur développement (Ndjendole, 2001). Les cultures semblent jouer un rôle d'amortisseur vis-à-vis de la variabilité du démarrage de la saison des pluies. Sous un angle climatique, cette faible variabilité montre que la variabilité du démarrage des pluies, bien que forte, a un peu moins d'influence que le signal saisonnier : le saut de mousson représente un forçage très contraignant. Au regard du rendement maximal obtenu en semant à chaque station à « sa » date

optimale (indice 100%), les meilleurs rendements suivants sont obtenus en semant à une date globale sur l'ensemble de l'observatoire : date optimale moyenne de l'année (91%), que l'on ignore a priori et qui inclut la variabilité interannuelle du cycle saisonnier à venir, ou date moyenne de mise en place de la mousson fixée au 24 juin (86%), signe à l'échelle régionale que la mousson est bien établie. La prise en compte de la variabilité du démarrage « agronomique » de la saison des pluies dans le choix d'une date de semis n'améliore pas les rendements simulés, le rendement moyen obtenu avec un semis adapté à chaque station vaut 74%. L'évolution des rendements potentiels simulés en fonction de la date de semis choisie chaque année est ensuite étudiée systématiquement pour les trente stations AMMA-CATCH Niger de 1990 à 2002, en semant du 1^{er} juin au 31 juillet. Les résultats peuvent être résumés comme suit :

- i) Dix années sur treize, l'évolution des rendements suit une distribution unimodale. Le rendement simulé augmente régulièrement en fonction de la date de semis, pour être maximum en semant au moment de la mise en place de la mousson (6 années sur 10), significativement plus tard (3 années sur 10) ou plus tôt (1 année sur 10). Le décalage vis-à-vis de la date de mise en place de la mousson s'explique généralement par l'occurrence de phases sèches généralisées à tout l'observatoire et visibles sur le cycle saisonnier des pluies spatialisées. Il faut alors semer avant ou après la date de mise en place de la mousson, suivant la date de la phase sèche, pour éviter que celle-ci ne coïncide avec les stades phénologiques les plus sensibles au stress hydrique que sont les phases de formation et de remplissage des grains.
- ii) Trois années sur treize, l'évolution des rendements suit une distribution bimodale. Les années correspondantes sont sèches et enregistrent une phase sèche significative au milieu du mois d'août. Semer à la date moyenne de mise en place de la mousson conduit à des rendements catastrophiques pour une majorité de stations. Il faut semer bien avant ou bien après. L'analyse détaillée de l'année 1997 montre qu'à la phase sèche généralisée mi-août s'ajoutent d'autres phases sèches plus ou moins localisées.

Dans le cas idéalisé d'un semis à une date optimale, le cumul pluviométrique saisonnier, de 200 à 600 mm de pluie, explique 63% de la variance du rendement potentiel maximal en mil. Ceci conduit à une forte similitude entre les cartes de champs de pluie annuels et celles de rendements. Une forte variabilité subsiste néanmoins : un cumul pluvieux de 500 mm peut conduire à des rendements simulés du simple au double. Ces écarts significatifs illustrent l'influence majeure de la variabilité de la distribution des pluies au cours de la saison, plus préjudiciable pour les cultures qu'un déficit réel de cumul saisonnier. Au-delà du seuil de 600 mm, recevoir davantage de pluie ne fait pas augmenter le rendement. Les besoins en eau de la plante étant satisfaits, d'autres facteurs climatiques sont à prendre en compte pour expliquer les fluctuations du rendement. Par ailleurs, un fort cumul pluviométrique annuel peut provenir d'une ou deux averses exceptionnelles – l'année 1998 en est un exemple – mais ces dernières, qui ruissellent beaucoup, n'épargnent pas les cultures de phases sèches préjudiciables.

En ce qui concerne l'estimation du rendement moyen sur une zone de la taille de l'observatoire AMMA-CATCH Niger, prendre une seule station de référence peut s'avérer inadapté, comme pour l'estimation de la pluie moyenne à différents pas de temps. En prenant la station de Niamey comme référence unique, on commet une erreur moyenne d'estimation de 18% sur la période 1990-2002 ; or cet ordre de grandeur permet de différencier une récolte déficitaire ou excédentaire d'une année moyenne. De fait, en se basant uniquement sur la station de Niamey pour estimer le rendement moyen à l'échelle de l'observatoire, on fait une erreur de diagnostic : année déficitaire estimée excédentaire (ou vice versa) 3 années sur 13. Et même dans le cas d'un diagnostic correct (année plutôt déficitaire ou plutôt excédentaire) une seule station de référence ne permet pas de rendre compte de la variabilité des réponses pour rééquilibrer les ressources alimentaires.

3.3. Perspectives de l'analyse agronomique

Observations de rendements réels

Les conclusions présentées ici sont fondées sur les simulations d'un modèle de cultures. On doit rester prudent dans l'interprétation des résultats, notamment pour les raisons suivantes :

- i) Le modèle SARRA-H considère uniquement l'impact de la contrainte hydrique sur les cultures, sans se préoccuper des autres contraintes du milieu pour simuler le rendement potentiel. Sultan (2002) présume que la prise en compte de ce dernier peut induire une erreur systématique dans l'interprétation des résultats. En effet, si la culture est soumise à un stress moins important, sa croissance est plus forte et sa gestion en eau moins bonne, ce qui conduit à une très forte sensibilité à l'occurrence de phases sèches au cours de la saison des pluies. En milieu paysan où la plante est plus robuste à cause de contraintes plus fortes, cette sensibilité peut être moindre.
- ii) De plus, le modèle SARRA-H ne simule pas la mortalité du semis. Les valeurs très faibles de rendement simulé doivent donc être considérées comme un échec du semis, avec une culture qui ne parvient jamais à maturité (Sultan, 2002).
- iii) Par ailleurs, les entrées du modèle (densité de semis, variété de mil, caractéristiques des sols) ont été choisies au vu des caractéristiques indiquées dans la littérature ou de l'expérience des agronomes du CIRAD (ex. Baron, communication personnelle, 2004). En terme de variété de mil, nous nous sommes limités à l'étude d'un mil de cycle de 90 jours ; or Traoré et al. (2000) mentionnent que les paysans préfèrent les écotypes à caractère photopériodique.
- iv) Enfin, l'utilisation d'une unique station météorologique pour tout l'observatoire AMMA-CATCH induit peut-être un biais sur les simulations, qui sont toutes forcées par les mêmes valeurs d'évapotranspiration potentielle.

Les résultats présentés ici manquent indéniablement d'observations sur le terrain pour être validés. Le fossé existant entre les rendements réels obtenus en milieu paysan et ceux obtenus dans les champs

d'expérimentation, relevé par Forest et Clopes (1994), orienterait plutôt les observations vers des enquêtes de terrain que des expérimentations en milieu paysan, afin de prendre en compte les multiples contraintes auxquelles sont confrontés les paysans : financières, disponibilités en main d'œuvre et intrants. On pourrait ainsi confronter les rendements réels et les dates de semis choisies par les paysans avec les rendements potentiels simulés et les périodes de semis optimales.

Recherche des mécanismes engendrant les phases sèches

L'analyse de l'impact de la variabilité pluviométrique sur le rendement en mil a mis en évidence le poids de l'occurrence des phases sèches à l'échelle intrasaisonnière. Même si la sensibilité du modèle SARRA-H à ces dernières est particulièrement forte, d'autres travaux ont décrit l'influence majeure sur les rendements de la variabilité de la distribution des pluies au cours de la saison (Rockström et de Rouw, 1997). Il semble important désormais de se pencher sur les mécanismes atmosphériques qui gouvernent les phases sèches. L'étude de l'année 1997 (section 2.5 de la partie III) a montré une imbrication des phases sèches, de l'échelle de la station à celle de l'observatoire, voire au-delà. Il serait intéressant à partir des dates des phases sèches observées sur l'observatoire AMMA-CATCH Niger de documenter leur signature atmosphérique et d'étudier si elle est différente suivant leur extension spatiale.

Synthèse générale et perspectives

La seule utilisation de données pluviographiques obtenues sur une dizaine d'années à partir d'un réseau dense d'appareils a permis de mieux comprendre les grands traits du régime pluviométrique sahélien aux échelles hydrologiques et agronomiques. Le grand défi des années à venir est celui de la prédictibilité des pluies au Sahel, la prévision saisonnière étant nécessaire pour anticiper des situations de crise agricole ou de ressources en eau. Pour cela, des observations sur l'ensemble des variables jouant un rôle dans la mise en place et le maintien de la mousson d'Afrique de l'Ouest sont indispensables. C'est un des objectifs du programme AMMA. Dans cette conclusion, nous allons passer en revue les quelques résultats importants de ce travail de thèse et discuter de leurs implications dans le contexte du projet AMMA.

Apports de l'observatoire de recherche AMMA-CATCH Niger

L'apport de données pluviographiques de haute résolution est mis en évidence à la fois pour la caractérisation du régime pluviométrique sahélien et pour la modélisation des rendements des cultures de mil. Sur le plan temporel, les séries pluviographiques fournies par l'observatoire permettent d'atteindre l'échelle de l'événement pluvieux, qui d'une part, offre une représentation de la pluie désormais bien cernée et pertinente pour les applications hydrologiques et agronomiques, et d'autre part, peut être identifiée par imagerie satellitaire. De la même manière, l'accès aux intensités de pluies se révèle importante pour les études concernant l'érosion, la partition entre le ruissellement et l'infiltration et les études d'échantillonnage dans le cadre des missions satellitaires. Sur le plan spatial, la densité du réseau d'observations AMMA-CATCH Niger, unique dans la région, permet de caractériser finement la variabilité spatiale des pluies. Ce type d'analyse permet de tirer des

enseignements généraux concernant le dimensionnement d'un réseau d'observations pertinent ; ainsi, l'erreur commise pour estimer la pluie moyenne mensuelle sur une zone de la taille de l'observatoire à partir d'une unique station varie entre 25% et 41% suivant le mois considéré. Ceci implique que sur un degré carré, on fasse une erreur de diagnostic dans 26% des cas en cherchant à classer une année sèche ou humide à partir du cumul annuel enregistré en une seule station. Or, au sud de 15°N, le réseau de suivi utilisé par le centre AGRHYMET pour les programmes d'alerte précoce a une densité d'une station par degré carré environ, alors que le réseau synoptique dispose d'une station pour trois degrés carrés.

L'analyse de la variabilité spatiale des pluies est également indispensable pour mieux comprendre, et a posteriori mieux modéliser, l'impact de celle-ci sur les ressources en eau et l'agriculture. La prise en compte de cette variabilité par le biais des mesures aux trente stations AMMA-CATCH Niger a ainsi permis de quantifier l'impact de la distribution spatiale des pluies sur le rendement moyen à l'échelle de l'observatoire. On commet une erreur de presque 20% en estimant le rendement moyen sur l'observatoire à partir de la seule mesure pluviométrique à la station de Niamey. Quant au choix d'une date de semis du mil, l'influence du cycle saisonnier semble plus forte que la variabilité du démarrage de la saison des pluies et l'on obtient de meilleurs rendements en semant à une date globale sur l'observatoire quand la mousson est bien établie. On obtient ainsi un rendement moyen de 91% sur l'observatoire pour la période 1990-2002 en choisissant de semer à la date moyenne optimale de l'année (sachant que le rendement optimal, indice 100%, est obtenu en semant chaque année pour chaque station à « sa » date optimale), un rendement de 86% en semant à la date moyenne de mise en place de la mousson (24 juin chaque année), et un rendement de 74% en semant à la date de démarrage « agronomique » de chaque station.

Les travaux présentés dans ce mémoire soulignent l'intérêt de poursuivre le suivi d'observatoires de recherche tels que AMMA-CATCH Niger, plus denses que les réseaux nationaux. Ali et al. (2004b) montrent effectivement que 98% du réseau CILSS est inadapté, en termes de densité, pour des applications hydrologiques et agronomiques. Dans le cadre du programme de recherche AMMA, toute une stratégie d'observations est prévue, allant du suivi général des pluies à long terme à des périodes d'observations intensives focalisées sur différentes phases de la mousson africaine : installation, maximum et retrait. Il semble indispensable, dans l'optique d'une meilleure compréhension de la variabilité de la mousson africaine sur l'agriculture, de mettre en œuvre parallèlement des enquêtes de terrain visant à relever les dates de semis choisies par les agriculteurs et les rendements réels obtenus. Les résultats présentés ici sont fondés uniquement sur les simulations réalisées avec le modèle SARRA-H, dont la forte sensibilité aux phases sèches peut introduire un biais dans l'interprétation des résultats. Il est donc essentiel de confronter ces résultats avec des observations de rendements réels. On pourrait imaginer d'enquêter dans les villages les plus proches des stations AMMA-CATCH Niger pour pouvoir documenter la variabilité spatiale des rendements réels.

L'imbrication des échelles de la variabilité des pluies

L'analyse combinée de la série des pluies journalières enregistrées à Niamey Aéroport de 1950 à 2002 et des observations pluviographiques AMMA-CATCH Niger a permis d'étudier la variabilité des pluies, depuis les échelles climatologiques courantes (décennie, saison, décade) jusqu'à des échelles spatio-temporelles beaucoup plus fines. On montre ainsi qu'en terme de structure de la saison des pluies, la variabilité décennale (analysée particulièrement par Le Barbé et Lebel, 1997) et la variabilité interannuelle (analysée ici avec le modèle de la loi des fuites et les caractéristiques des événements AMMA-CATCH Niger) présentent des points communs : dans les deux cas, la sécheresse se traduit par une baisse de l'occurrence des systèmes convectifs en période de mousson bien établie (passage de 0.62 événement par jour en août pour 1950-1969 à 0.42 pour 1970-1989, de 0.58 événement par jour pour les années humides de 1990-2002 à 0.31 pour les années sèches de 1990-2002) et par un retrait précoce de la mousson. En revanche, lorsque l'on s'intéresse aux intensités, la distinction entre les années sèches et les années humides est moins flagrante que la différenciation entre les stations sèches et les stations humides pour une même année. Concrètement, cela signifie que, même en année sèche, une station humide pour l'année en question – mais dont le cumul saisonnier n'aura rien d'exceptionnel en valeur absolue – enregistrera des intensités très fortes, sources de ruissellement intense et d'érosion.

L'analyse de l'impact agronomique de la variabilité des pluies doit prendre en considération toute cette gamme d'échelles. En ce qui concerne la variabilité spatiale, le lien entre le cumul saisonnier et le rendement simulé (63% de la variance expliquée) conduit à une forte similitude entre les cartes de champs de pluie annuels et celles de rendements. Malgré ces traits communs dans l'organisation spatiale, les écarts significatifs des rendements potentiels pour un cumul pluvieux donné illustrent l'influence majeure de la variabilité de la distribution des pluies au cours de la saison, plus préjudiciable pour les cultures qu'un déficit réel de cumul saisonnier. L'occurrence de phases sèches pendant les phases de floraison et de remplissage des grains de mil a un impact très préjudiciable sur les rendements.

Généralisation des travaux de recherche AMMA-CATCH Niger à tout le Sahel

Si la variabilité des pluies se décline sur une large gamme, allant du décennal à l'intrasaisonnier, les événements pluvieux AMMA-CATCH Niger présentent des caractéristiques assez stables. Plusieurs travaux se sont basés sur la connaissance de ces événements pluvieux pour développer de nouveaux outils, dans le domaine de la désagrégation des pluies (Guillot et Lebel, 1999 ; Onibon et al., 2004), de la structure spatiale des champs de pluie sahéliens (Ali et al., 2003) ou la performance d'estimation des pluies au Sahel par des réseaux d'observations et/ou par satellite (Ali et al., 2004a et 2004b). La difficulté est de trouver des passerelles entre des données de pluies généralement disponibles au pas de temps journalier et les caractéristiques des événements pluvieux. Les désagrégateurs de pluie sont des outils essentiels pour passer de l'échelle des modèles à circulation générale ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ou au mieux

1° x 1°) aux échelles hydrologiques ou agronomiques, pour des études d'impact de la variabilité climatique. Or pour utiliser le désagrégateur cité précédemment sur une autre zone qu'AMMA-CATCH Niger, il faut déterminer les caractéristiques des événements pluvieux, ce qu'on ne sait pas faire directement à partir de données journalières. L'utilisation de modèles, tels que la loi des fuites, permet de remédier en partie à cette limitation, mais en restant cantonné à une vision ponctuelle. La difficulté d'identifier un événement pluvieux à partir de séries ponctuelles doit être contournée en ayant recours, de manière complémentaire aux mesures sols, à l'imagerie satellitaire (Mathon et al., 2002).

AMMA – une voie ouverte à de nouvelles études multidisciplinaires

Le programme de recherche AMMA a pour ambition d'étudier la mousson ouest-africaine dans un contexte multidisciplinaire. Les travaux présentés ici et les questions qu'ils soulèvent illustrent bien l'intérêt de l'interdisciplinarité. On espère avoir réussi à montrer la complémentarité des analyses « climatique » et « agronomique ». Par exemple, la variabilité du démarrage de la saison des pluies, explorée en détail à partir des données pluviographiques, a finalement peu d'influence sur le choix d'une date de semis, alors que le forçage du cycle saisonnier (notamment la mise en place de la mousson et l'occurrence de phases sèches au cours de la saison) est très contraignant. Seul un modèle de cultures permet d'intégrer les interactions entre le sol, l'atmosphère et la culture.

Les perspectives de ces travaux sont également à l'intersection de plusieurs disciplines.

Sur le plan climatique, la modification pérenne du régime pluviométrique en année ou période sèche, marquée par une baisse du nombre d'événements au mois d'août et un retrait précoce de la mousson, soulève des questions d'ordre météorologique. Les phases d'observations intensives AMMA, ciblées sur le retrait de la mousson, permettront d'alimenter les analyses et de mieux comprendre les mécanismes spécifiques aux années sèches.

Sur le plan agronomique, l'analyse de l'impact de la variabilité pluviométrique sur le rendement en mil a mis en évidence le poids de l'occurrence des phases sèches à l'échelle intrasaisonnière. Il semble important désormais de se pencher sur les mécanismes atmosphériques qui gouvernent les phases sèches. L'étude de l'année 1997 a montré une imbrication des phases sèches, de l'échelle de la station à celle de l'observatoire, voire au-delà. Il serait intéressant à partir des dates des phases sèches observées sur l'observatoire AMMA-CATCH Niger de documenter leur signature atmosphérique et d'étudier si elle est différente suivant leur extension spatiale.

Références bibliographiques

Affholder, F. (1994). Influence de la fertilisation et du contrôle de l'enherbement sur la réponse des rendements du mil pluvial à un indice hydrique synthétique. *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale*, Reyniers, F. N. et L. Netoyo, Editions John Libbey Eurotext, Paris, 191-203.

Affholder, F. (1997). Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Research*, **52**, 79-93.

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 de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

Ali, A., A. Amani, T. Lebel et A. Diedhiou (2004a). Estimation of rainfall in the Sahel. Part 1: Error function. *Journal of Applied Meteorology*, soumis.

Ali, A., A. Amani, T. Lebel et A. Diedhiou (2004b). Estimation of rainfall in the Sahel. Part 2: CILSS rain gauges evaluation and objective intercomparison of satellite products. *Journal of Applied Meteorology*, soumis.

Ali, A., T. Lebel et A. Amani (2003). Invariance in the spatial structure of Sahelian rain fields at climatological studies. *Journal of Hydrometeorology*, **4**, 6, 996-1011.

AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) (2002). *Le livre blanc. La mousson ouest-africaine et ses composantes*.

Ati, O. F., C. J. Stigter et E. O. Oladipo (2002). A comparison of methods to determine the onset of the growing season in northern Nigeria. *International Journal of Climatology*, **22**, 6, 731-742.

Babusiaux, C. (1969). *Etude statistique de la loi des fuites*. Thèse de doctorat, Faculté des sciences de Paris.

Balme, M., S. Galle et T. Lebel (2004b). Démarrage de la saison des pluies au Sahel: variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger. *Sécheresse*, accepté.

- Balme, M., T. Lebel et A. Amani** (2004a). Années sèches et années humides au Sahel: quo vadis? *Hydrological Sciences Journal*, soumis.
- Baron, C., M. Dingkuhn, V. Bonnal et J. C. Combres** (2002). *Atelier de formation en modélisation des cultures: SARRA-H*. CIRAD, Montpellier.
- Baron, C., F. Reyniers, A. Clopes et F. Forest** (1999). Applications du logiciel SARRA à l'étude de risques climatiques. *Agriculture et développement*, **24**, 89-97.
- Barron, J., J. Rockström, F. Gichuki et N. Hatibu** (2003). Dry spell analysis and maize yields for two semi-arid locations in east Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, **117**, 23-37.
- Bationo, A., C. B. Christianson et M. C. Klajj** (1993). The effect of crop residue and fertilizer use of pearl millet yields in Niger. *Fertilizer Research*, **34**, 251-258.
- Brunet-Moret, Y., P. Chaperon, J. P. Lamagat et M. Molinier** (1986). *Monographie hydrologique du fleuve Niger. Tome II, cuvette lacustre et Niger moyen*. Editions de l'ORSTOM, Paris, France, 506 pp.
- Cadot, D. et C. Puech** (1982). *Etude des pluies journalières de fréquence rare au Niger*. Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH), Ouagadougou, Burkina Faso.
- Cappelaere, B., B. E. Vieux, C. Peugeot, A. Maia et L. Séguis** (2003). Hydrologic process simulation of a semi-arid, endoreic catchment in Sahelian West Niger. 2. Model calibration and uncertainty characterization. *Journal of Hydrology*, **279**, 244-261.
- Charney, J. G.** (1975). Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **101**, 428, 193-202.
- Cook, G. D. et R. G. Heerdegen** (2001). Spatial variation in the duration of the rainy season in monsoonal Australia. *International Journal of Climatology*, **21**, 1723-1732.
- Cortier, B.** (1994). Le diagnostic hydrique des cultures et la prévision précoce des rendements en mil en zone sahélienne. *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale*, Reyniers, F. N. et L. Netoyo, Editions John Libbey Eurotext, Paris, 349-362.
- D'Amato, N.** (1998). *Etude climatologique et statistique des événements pluvieux en zone sahélienne, analysée à partir des données pluviographiques de l'expérience Epsat-Niger*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 189 pp.
- de Rouw, A.** (2004). Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel. *Agricultural Systems*, **81**, 73-93.
- Desconnets, J. C., J. D. Taupin, T. Lebel et C. Leduc** (1997). Hydrology of the HAPEX-Sahel Central Super-Site: surface water drainage and aquifer recharge through the pool systems. *Journal of Hydrology*, **188-189**, 155-178.
- D'Herbès, J. M. et C. Valentin** (1997). Land surface conditions of the Niamey region: ecological and hydrological implications. *Journal of Hydrology*, **188-189**, 18-42.
- Diop, M.** (1996). A propos de la durée de la saison des pluies au Sénégal. *Sécheresse*, **7**, 1, 7-15.
- Dodd, D. E. S. et I. T. Jolliffe** (2001). Early detection of the start of the wet season in semiarid

- tropical climates of Western Africa. *International Journal of Climatology*, **21**, 1251-1262.
- Douguedroit, A.** (1987). The variations of dry spells in Marseilles from 1865 to 1984. *Journal of Climatology*, **7**, 541-551.
- Eagleman, J. R.** (1971). An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *Agric. Meteorol.*, **8**, 385-397.
- Eldin, M.** (1994). Analyse des risques de déficit hydrique au cours des différentes phases phénologiques du mil précoce au Niger. Conséquences agronomiques. *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale*, Reyniers, F. N. et L. Netoyo, Editions John Libbey Eurotext, Paris, 17-30.
- Eltahir, E. A. B. et C. Gong** (1996). Dynamics of wet and dry years in West Africa. *Journal of Climate*, **9**, 1030-1042.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)** (1995). *World agriculture: towards 2010. An FAO study*. Alexandratos, N., FAO, Rome, 488 pp.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) et ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics)** (1997). *L'économie mondiale du sorgho et du mil: faits, tendances et perspectives*. 68 pp.
- Flitcroft, I. D., J. R. Milford et G. Dugdale** (1989). Relating point to area average rainfall in semiarid West Africa and the implications for rainfall estimates derived from satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, **28**, 4, 252-266.
- Foley, J. A., M. T. Coe, M. Scheffer et G. Wang** (2003). Regime shifts in the Sahara and Sahel: interactions between ecological and climatic systems in Northern Africa. *Ecosystems*, **6**, 524-539.
- Folland, C. K., T. N. Palmer et D. E. Parker** (1986). Sahel rainfall and worldwide sea temperature 1901-1985. *Nature*, **320**, 602-607.
- Forest, F. et A. Clopes** (1994). Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré. *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale*, Reyniers, F. N. et L. Netoyo, Editions John Libbey Eurotext, Paris, 3-15.
- Gash, J. H. C., P. Kabat, B. A. Monteny, M. Amadou, P. Bessemoulin, H. Billing, E. M. Blyth, H. A. R. deBruin, J. A. Elbers, T. Friborg, G. Harrison, C. J. Holwill, C. R. Lloyd, J.-P. Lhomme, J. B. Moncrieff, D. Puech, H. Soegaard, J. D. Taupin, A. Tuzet et A. Verhoef** (1997). The variability of evaporation during the HAPEX-Sahel Intensive Observation Period. *Journal of Hydrology*, **188-189**, 385-399.
- GEPIS (Groupe d'experts des plaines d'inondation sahéliennes)** (2000). *Vers une gestion durable des plaines d'inondation sahéliennes*. UICN, Gland, Cambridge, 214 pp.
- Graef, F. et J. Haigis** (2001). Spatial and temporal rainfall variability in the Sahel and its effects on farmers' management strategies. *Journal of Arid Environments*, **48**, 221-231.
- Graetz, R. D.** (1991). Desertification: a tale of two feedbacks. *Ecosystem experiments*, Mooney, H. A.

et others, Wiley, New York, 59-87.

Guillot, G. (1998). *Modélisation statistique des champs de pluie sahéliens. Application à leur désagrégation spatiale et temporelle*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier de Grenoble, 135 pp.

Guillot, G. et T. Lebel (1999). Disaggregation of Sahelian mesoscale convective system rain fields: Further developments and validation. *Journal of Geophysical Research*, **104**, D24, 31533-31551.

Harrington, J. et M. Flannigan (1993). A model for the frequency of long periods of drought at forested stations in Canada. *Journal of Applied Meteorology*, **32**, 1708-1716.

Hastenrath, S. (1990). Decadal scale changes of the circulation in the tropical Atlantic sector associated with Sahel drought. *International Journal of Climatology*, **20**, 459-472.

Hastenrath, S. (1991). *Climate Dynamics of the Tropics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 488 pp.

Hoogmoed, W. B. et M. C. Klaij (1990). Soil management for crop production in the Sahel. I: Soil and climate parameters. *Soil and Tillage Research*, **16**, 85-103.

Hubert, P., W. Thiao, D. Cadet, J. P. Carbonnel et M. Desbois (1987). Comparaison des données satellitaires infrarouge et des mesures au sol concernant l'épisode pluvieux du 12 au 13 juin 1986 dans la région de Ouagadougou (Burkina Faso). *Veille Climatique Satellitaire*, **20**, 31-36.

Janicot, S. (1992a). Spatio-temporal variability of West African rainfall. Part I: Regionalizations and typings. *Journal of Climate*, **5**, 489-497.

Janicot, S. (1992b). Spatio-temporal variability of West African rainfall. Part II: Associated surface and air masses characteristics. *Journal of Climate*, **5**, 499-511.

Janicot, S. et B. Fontaine (1993). L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'Ouest. *La Météorologie, série 8*, **1**, 28-53.

Lamb, P. J. (1982). Persistence of Subsaharan drought. *Nature*, **299**, 46-48.

Lamb, P. J. et R. A. Peppler (1992). Further case studies of tropical Atlantic surface atmospheric and oceanic patterns associated with sub-Saharan drought. *Journal of Climate*, **5**, 476-488.

Lana, X. et A. Burgueño (1998). Daily dry-wet behaviour in Catalonia (NE Spain) from the viewpoint of Markov chains. *International Journal of Climatology*, **18**, 793-815.

Landsea, C. W. et W. M. Gray (1992). The strong association between Western Sahelian monsoon rainfall and intense Atlantic hurricanes. *Journal of Climate*, **5**, 435-453.

Le Barbé, L. et T. Lebel (1997). Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990. *Journal of Hydrology*, **188-189**, 43-73.

Le Barbé, L., T. Lebel et D. Tapsoba (2002). Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990. *Journal of Climate*, **15**, 2, 187-202.

Lebel, T. et A. Amani (1999). Rainfall estimation In the Sahel: What is the ground truth? *Journal of Applied Meteorology*, **38**, 555-568.

Lebel, T., A. Diedhiou et H. Laurent (2003). Seasonal cycle and interannual variability of the

Sahelian rainfall at hydrological scales. *Journal of Geophysical Research*, **108**, D8, 8389, 1401-1411.

Lebel, T. et L. Le Barbé (1997). Rainfall monitoring during HAPEX-SAHEL: 2. Point and areal estimation at the event and seasonal scales. *Journal of Hydrology*, **188-189**, 97-122.

Lebel, T., H. Sauvageot, M. Hoepffner, M. Desbois, B. Guillot et P. Hubert (1992). Rainfall estimation in the Sahel: the EPSAT-Niger experiment. *Hydrological Sciences Journal*, **37**, 3, 201-215.

Lebel, T., J. D. Taupin et N. D'Amato (1997). Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel. 1. General rainfall conditions and climatology. *Journal of Hydrology*, **188-189**, 74-96.

Lebel, T., J. D. Taupin et M. Gréard (1995). Rainfall monitoring : The EPSAT-Niger setup and its use for HAPEX-Sahel. *Hydrologie et Météorologie de Mésos-échelle dans HAPEX-Sahel : dispositifs de mesures au sol et premiers résultats*, Lebel, T., Editions ORSTOM, Paris, 31-68.

Leisinger, K. M. et K. Schmitt (1996). *Survivre au Sahel: un défi pour l'écologie et la politique de développement*. ISNAR, The Hague, 245 pp.

L'Hôte, Y., G. Mahé et B. Somé (2003). The 1990s rainfall in the Sahel: the third driest decade since the beginning of the century. *Hydrological Sciences Journal*, **48**, 3, 493-496.

L'Hôte, Y., G. Mahé, B. Somé et J. P. Triboulet (2002). Analysis of a Sahelian index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrological Sciences Journal*, **47**, 4, 563-572.

Loireau, M. (1998). *Espaces, ressources, usages: spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien*. Université Paul Valéry de Montpellier, 393 pp.

Louvet, S., B. Fontaine et P. Roucou (2003). Active phases and pauses during the installation of the West African monsoon through 5-day CMAP rainfall data (1979-2001). *Geophysical Research Letters*, **30**, 24,

Martin-Vide, J. et L. Gomez (1999). Regionalization of peninsular Spain based on the length of dry spells. *International Journal of Climatology*, **19**, 537-555.

Mathon, V., H. Laurent et T. Lebel (2002). Mesoscale convective system rainfall in the Sahel. *Journal of Applied Meteorology*, **41**, 11, 1081-1092.

Milleville, P. (1998). Conduite des cultures pluviales et organisation du travail en Afrique soudano-sahélienne. Des déterminants climatiques aux rapports sociaux de production. *La conduite du champ cultivé: points de vue d'agronomes.*, Biarnès, A., Editions Orstom, Paris, 165-180.

Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage du Niger (1997). *Annuaire des statistiques de l'Agriculture et de l'Élevage 1995*. Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage, Niamey, Niger.

Morel, R. (1992). *Atlas agroclimatique des pays de la zone du CILSS, tm. 1 de Notice et commentaire*. Agrhymet, Niamey, Niger.

Ndjendole, S. (2001). *Contraintes pluviométriques sur les cultures annuelles en Centrafrique: l'exemple de la culture cotonnière*. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 227 pp.

Nicholson, S. E. (1981). Rainfall and atmospheric circulation during drought periods and wetter years in West Africa. *Monthly Weather Review*, **109**, 2191-2208.

- Nicholson, S. E.** (1994). Desertification. *Encyclopedia of climate and weather*, Schneider, S. H., Oxford University Press, New York, 239-242.
- Nicholson, S. E. et I. M. Palao** (1993). A re-evaluation of rainfall variability in the Sahel. Part I. Characteristics of rainfall fluctuations. *International Journal of Climatology*, **13**, 371-389.
- Nicholson, S. E., C. J. Tucker et M. B. Ba** (1998). Desertification, drought and surface vegetation: an example from the West African Sahel. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **79**, 5, 815-829.
- Omotosho, J. B.** (1990). Onset of thunderstorms and precipitation over Northern Nigeria. *International Journal of Climatology*, **10**, 849-860.
- Omotosho, J. B., A. A. Balogun et K. Ogunjobi** (2000). Predicting monthly and seasonal rainfall, onset and cessation of the rainy season in West Africa using only surface data. *International Journal of Climatology*, **20**, 865-880.
- Onibon, H., T. Lebel, A. Afouda et G. Guillot** (2004). Gibbs sampling for conditional spatial disaggregation of rain fields. *Water Resources Research*, accepté.
- Onibon, H. G.** (2001). *Simulation conditionnée des champs de pluie événementiels au Sahel: application de l'algorithme de Gibbs*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 150 pp.
- Ozer, P., M. Erpicim, G. Demarée et M. Vandiepenbeeck** (2003). The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrological Sciences Journal*, **48**, 3, 489-492.
- Pettitt, A. N.** (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of Applied Statistics*, **28**, 2, 126-135.
- Peugeot, C.** (1995). *Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant sahélien (Niger), expérimentation in situ et modélisation*. Université Joseph Fourier de Grenoble, 305 pp.
- Peugeot, C., B. Cappelaere, B. E. Vieux, L. Séguis et A. Maia** (2003). Hydrologic process simulation of a semi-arid, endoreic catchment in Sahelian West Niger. 1. Model-aided data analysis and screening. *Journal of Hydrology*, **279**, 224-243.
- Philippon, N. et B. Fontaine** (1999). A new statistical predictability scheme for July-September Sahel rainfall (1968-1994). *Comptes Rendus Acad. Sci.*, **329**, 1-6.
- Philippon, N. et B. Fontaine** (2002). The relationship between the Sahelian and previous second Guinean rainy seasons: a monsoon regulation by soil wetness? *Annales Geophysicae*, **20**, 4, 575-582.
- Retailé, D.** (1997). *Le monde du géographe*. Presses de la FNSP, Paris.
- Reyniers, F. N. et F. Forest** (1990). La pluie n'est pas le seul remède de la sécheresse en Afrique. Les flux hydriques dans le système sol-plante-atmosphère. *Sécheresse*, **1**, 36-43.
- Ribstein, P.** (1983). Loi des fuites. *Cahiers de l'Orstom, série Hydrologie*, **XX**, **2**, 117-145.
- Rockström, J.** (1997). *On-farm agrohydrological analysis of the Sahelian yield crisis: Rainfall partitioning, soil nutrients and water use efficiency of pearl millet*. Thèse de doctorat, Université de

Stockholm, 62 pp.

Rockström, J., J. Barron, J. Brouwer, S. Galle et A. de Rouw (1999). On-farm spatial and temporal variability of soil and water in pearl millet cultivation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **63**, 1308-1319.

Rockström, J. et A. de Rouw (1997). Water, nutrients and slope position in on-farm pearl millet cultivation in the Sahel. *Plant and Soil*, **195**, 311-327.

Samba, A. (1998). Les logiciels DHC de diagnostic hydrique des cultures. Prédiction des rendements du mil en zones soudano-sahélienne de l'Afrique de l'Ouest. *Sécheresse*, **9**, 4, 281-288.

Samba, A., B. Sarr, C. Baron, E. Gozé, F. Maraux, B. Clerget et M. Dingkuhn (2001). La prédiction agricole à l'échelle du Sahel. *Modélisation des agro-écosystèmes et aide à la décision*, Malézieux, E., G. Trébuil et M. Jaeger, Editions CIRAD, INRA, Montpellier, 243-262.

Sircoulon, J. (1976). Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses 1913 et 1940. *Cahiers de l'Orstom, série Hydrologie*, **XIII**, 2, 75-174.

Sivakumar, B., S. Sorooshian, H. V. Gupta et X. Gao (2001). A chaotic approach to rainfall disaggregation. *Water Resources Research*, **37**, 1, 61-72.

Sivakumar, M. V. K. (1988). Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, **42-4**, 295-305.

Sivakumar, M. V. K. (1992). Empirical analysis of dry spells for agricultural applications in West Africa. *Journal of Climate*, **5**, 532-539.

Stern, R. D., M. D. Dennett et D. J. Garbutt (1981). The start of the rains in West Africa. *International Journal of Climatology*, **1**, 59-68.

Sultan, B. (2002). *Etude de la mise en place de la mousson en Afrique de l'Ouest et de la variabilité intra-saisonnière de la convection. Applications à la sensibilité des rendements agricoles*. Thèse de doctorat, Université Paris VII, 283 pp.

Sultan, B. et S. Janicot (2000). Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability. *Geophysical Research Letters*, **27**, 20, 3353-3356.

Sultan, B. et S. Janicot (2003). The West African monsoon dynamics. Part II: The "preonset" and "onset" of the summer monsoon. *Journal of Climate*, **16**, 3407-3427.

Tapsoba, D. (1997). *Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques ouest-africains et de leur récent changement*. Université de Paris XI, 148 pp.

Tapsoba, D., B. Bobee, L. Le Barbé et E. Elguero (2002). Quelques caractéristiques événementielles des régimes pluviométriques ponctuels ouest-africains au cours de deux périodes climatologiques contrastées (1951-1970 et 1971-1990). *Sécheresse*, **13**, 2, 95-104.

Taupin, J. D. (2003). Accuracy of the precipitation estimate in the Sahel depending on the rain-gauge network density. *C. R. Geoscience*, **335**, 215-225.

- Taupin, J. D., T. Lebel, F. Cazenave, F. Chiron, R. Gathelier, M. Gréard, R. Gualde, J. Kong, T. Valero** (1992). EPSAT-Niger : campagne 1991. ORSTOM, Montpellier, DMN, Niamey, 86 pp.
- Taylor, C. M., E. F. Lambin, N. Stephenne, R. J. Harding et R. L. H. Essery** (2002). The influence of land use change on climate in the Sahel. *Journal of Climate*, **15**, 3615-3629.
- Taylor, C. M. et T. Lebel** (1998). Observational evidence of persistent convective-scale rainfall patterns. *Monthly Weather Review*, **126**, 1597-1607.
- Traoré, S., F.-N. Reyniers, M. Vaksman, B. Koné, A. Sidibé, A. Yoroté, K. Yattara et M. Kouressy** (2000). Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorghos du Mali. *Sécheresse*, **11**, 4, 227-237.
- Vicente-Serrano, S. M. et S. Beguería-Portugués** (2003). Estimating extreme dry-spell risk in the middle Ebro valley (northeastern Spain): A comparative analysis of partial duration series with a general Pareto distribution and annual maxima series with a Gumbel distribution. *International Journal of Climatology*, **23**, 1103-1118.
- Wallace, J. S., J. Brouwer, S. J. Allen, D. Banthorpe, E. M. Blyth, K. Blyth, J. Bromley, A. C. Buerkert, M. Cantwell, F. D. Copley, A. D. Culf, A. J. Dolman, G. Dugdale, J. H. C. Gash, S. R. Gaze, R. J. Harding, R. G. Harrison, C. J. Holwill, P. G. Jarvis, P. E. Levy, C. R. Lloyd, Y. S. Malhi, J. M. Massheder, J. B. Moncrieff, D. Pearson, J. J. Settle, I. J. Sewell, M. V. K. Sivakumar, J. D. Sudlow, C. M. Taylor et A. K. Wilson** (1994). *HAPEX-Sahel southern supersite report: an overview of the site and the experimental programme during the intensive observation period in 1992*. Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Wang, G. et E. A. B. Eltahir** (2000). Role of vegetation dynamics in enhancing the low-frequency variability of the Sahel rainfall. *Water Resources Research*, **36**, 4, 1013-1021.
- Zeng, N., J. D. Neelin, K. M. Lau et C. J. Tucker** (1999). Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science*, **286**, 1537-1540.

