

**Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris
& École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts**

**Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie
Parcours Hydrologie-Hydrogéologie**

**Mise en évidence de la persistance pluviométrique à faible échelle
des évènements pluvieux sur le degré carré de Niamey**

IBRAHIM Boubacar

Directeur(s) de recherche : Thierry LEBEL, Luc DESCROIX, Théo VISCHEL

Septembre 2008



**Laboratoire d'étude des Transferts
en Hydrologie et Environnement
Grenoble**



Remerciements

J'aimerais à la fin de ma formation de Master 2 Hydrologie-Hydrogéologie adresser mes vifs et sincères remerciements à tous ceux qui m'ont apporté leur aide. Mes remerciements vont à l'endroit de :

- Monsieur Luc DESCROIX qui sans bien me connaître a eu confiance en moi. Il m'a soutenu aussi bien matériellement que moralement depuis notre première rencontre en janvier 2005 ;
- Monsieur Thierry LEBEL pour avoir accepté de m'accueillir au sein de son laboratoire et pour le suivi de mes travaux ;
- Monsieur Pierre RIBSTEIN et Monsieur Hocine BENDJOURDI qui ont accepté de ma candidature au Master et renouveler à quatre fois mon admission au Master afin de me permettre de faire des demandes de bourse ;
- A l'ambassade de France au Niger qui a accepté de m'octroyer la bourse de coopération
- Monsieur Théo VISCHEL pour sa disponibilité et sa rigueur dans l'appréciation de mon travail ;
- A toute l'équipe IBIS du laboratoire, dont les membres ont à maintes reprises accepté de participer à nos différentes présentations et d'apporter leur contribution à l'amélioration de la qualité de nos travaux.

Ma reconnaissance va aussi à l'endroit de tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à rendre agréable mon séjour au sein du laboratoire, mes collègues stagiaires et au sein de la promotion, mes camarades de classe.

Résumé

La zone sahélienne de l'Afrique de l'ouest paraît comme une des zones où les premiers effets du changement climatique ont commencé à se manifester à travers une série de sécheresses. Elle se traduit depuis la fin des années 1960 par une baisse de la pluviométrie et du débit des cours d'eau, mais aussi par une modification du fonctionnement hydrologique de certains bassins versants. Cette situation a eu des conséquences dramatiques sur les ressources en eau et la production agricole de la région. Pour comprendre et essayer de réduire les effets néfastes de cette sécheresse, plusieurs études sont entreprises pour mieux appréhender les mécanismes climatiques.

Ainsi, plusieurs programmes internationaux ont été lancés incluant l'équipe de recherche de l'IRD de Niamey depuis 1990, et donc cet institut a été un élément primordial. Les premières ayant concerné la connaissance des effets des conditions de surface sur les systèmes précipitants furent menées au cours de la campagne HAPEX-Sahel. Il a été identifié une certaine persistance de la pluviométrie au cours de la saison 1992 sur le degré carré de Niamey. Cette persistance de la pluviométrie est due semble-t-il à la rétroaction de l'événement pluvieux antécédent sur le suivant à travers l'évaporation qui induit des anomalies atmosphériques au sein de la couche limite.

L'objectif de cette étude est de vérifier cette hypothèse de persistance pluviométrique sur un champ d'étude plus large à partir des données pluviométriques de 1990 à 2007.

Bien que les cas de persistance identifiés au cours des précédentes études soient retrouvés, la présente étude révèle quelques nuances. En effet sur le cas de persistance entre deux stations voisines données (une excédentaire et une déficitaire), sur les 248 cas analysés seuls 55 soit 22% présentent des phases de persistance. L'étude de la persistance entre événements pluvieux susceptibles de persistance, montre que sur les 76 cas identifiés seuls 14 soit 18% sont persistants et cette persistance ne concerne en général pas l'ensemble de la zone d'étude. La troisième approche d'identification de la persistance est la détermination de la corrélation directe entre événements pluvieux consécutifs. Ainsi, sur les 250 cas analysés c'est seulement sur une douzaine de cas (soit 5%) qu'on a obtenu un coefficient de corrélation supérieur à 0,6. Ce faible taux d'événements pluvieux persistants montre une certaine limite des hypothèses de la persistance. Ainsi un fort gradient annuel entre deux stations n'est pas synonyme d'une situation de persistance.

Somme toute, une analyse basée uniquement sur les données pluviométriques sans tenir compte des conditions météorologiques peut permettre de montrer la persistance pluviométrique au sein des saisons mais elle ne permet pas de la rejeter. Par contre, il n'est identifié aucune persistance inter saisonnière, la répartition spatiale du cumul pluvieux annuel au cours d'une saison est indépendant de celui de la saison d'avant.

Table de matière

Remerciements	0
Résumé	2
Table de matière	3
Introduction	4
I. Problématique	4
II. Synthèse bibliographique	5
III. Présentation de la zone d'étude	6
III.1 Situation géographique.....	6
III.2 Situation climatique.....	7
IV. Données pluviométriques et méthodes de travail	8
IV.1 Données pluviométriques.....	8
IV.2 Méthodologie de traitement des données.....	10
IV.2.1 Approche de l'étude	10
IV.2.2 Formulations	10
V. Caractérisation du gradient de pluie.....	11
V.1 Corrélation entre le gradient pluviométrique dans une zone et la hauteur de pluie	12
V.2 Variabilité spatiale de la pluviométrie.....	12
V.2.1 A l'échelle de l'événement pluvieux	12
V.2.1 A l'échelle interannuelle.....	13
VI. Etude générale de la persistance	15
VI.1 Corrélation spatio-temporelle entre gradients d'événements consécutifs.....	15
VI. 2 Analyse graphique du gradient pluviométrique	16
VI. 3 Date la mise en place du gradient saisonnier	18
VI. 4 Analyse aux alentours des stations excédentaires.....	20
VI. 5 Analyse des couples ayant le plus fort gradient annuel	27
VI. 6 Poids des événements pluvieux.....	29
VI. 7 Conclusion partielle	31
VII. Analyse de la persistance à partir des événements pluvieux	32
VII. 1 Etude sur la base des critères de l'étude précédente	32
VII. 1.1 Critères d'analyse	32
VII. 1.2 Quelques événements avec persistance	33
VII. 1.3 Quelques événements sans persistance.....	38
VII. 1.5 conclusion partielle	42
VII. 2 Analyse sur la base de la corrélation entre événements consécutifs.....	42
VIII. Analyse la pluviométrie annuelle	47
VIII. 1 Orientation du gradient annuel	47
VIII.2 Persistance du gradient annuel	47
Conclusion.....	50
Recommandations	50
Références bibliographiques	51
Liste des figures.....	53
Liste des tableaux	54
Annexe.....	55

Introduction

La série de sécheresses ayant touché le Sahel (Afrique de l'Ouest) depuis la fin des années 1960, a produit un signal fort auprès de la communauté scientifique sur la recherche d'une compréhension des mécanismes climatiques de la région.

De 1990 à aujourd'hui, plusieurs programmes de recherche ont été initiés dont les travaux sont orientés vers une meilleure connaissance des principaux facteurs influençant le régime climatique de l'échelle globale (mondiale) à l'échelle de quelques km² en passant par l'échelle régionale.

La présente étude consiste à caractériser la succession des événements pluvieux sur le degré carré de Niamey à travers l'identification d'un certain effet de la persistance de la pluviométrie. Elle fait suite à deux études effectuées au cours du programme Hapex-Niger (Hydrological and Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel) sur l'étude de la rétroaction des conditions de surface sur l'atmosphère en 1992. La première étude (Taylor et al. 1997) portait sur l'interaction entre la surface terrestre et la variabilité pluviométrique à méso échelle publiée en septembre 1997 et la seconde étude (Taylor et al. 1998) sur la mise en évidence de la persistance des caractéristiques de la pluviométrie à l'échelle convective, publiée en juin 1998.

Cette étude vise à infirmer ou à confirmer quelques résultats obtenus au cours des précédentes études en explorant un champ plus large de données pluviométriques, elle va se porter sur l'analyse des données pluviométriques de 1990 à 2007.

I. Problématique

Les conséquences dramatiques de la série de sécheresses se produisant au Sahel, ont attiré l'attention des organismes nationaux et internationaux sur la recherche d'une meilleure connaissance du climat de la région. En effet, dans cette zone, l'agriculture, principale activité de la population, reste très dépendante de la pluviométrie. Toute perturbation de la saison des pluies (mauvaise répartition temporelle et/ou spatiale) est synonyme d'une mauvaise récolte, d'un déficit alimentaire ou d'un tarissement rapide des ressources en eau.

Le programme HAPEX-SAHEL initié en 1990 visait à améliorer la compréhension du rôle du Sahel dans la circulation atmosphérique en général, et en particulier les effets des fortes fluctuations inter annuelles des conditions de surface du sol de la région et ainsi d'avoir des idées plus précises sur la manière dont la circulation générale est reliée aux sécheresses persistantes qui ont touché la région (page web1).

Plusieurs études effectuées au cours de ce programme ont permis de décrire les principaux facteurs contrôlant les mécanismes climatiques de l'échelle régionale à l'échelle de quelques km². Somme toute, certains mécanismes restent encore à élucider.

Ce programme fut exécuté en même temps que le programme EPSAT-Niger (Estimation des Précipitations par SATellite - expérience Niger) qui est une expérience destinée à améliorer la connaissance des systèmes précipitants de l'Afrique (page web2).

Ces programmes ont eu comme suite, le programme AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) qui a débuté ses travaux depuis 1998.

Plusieurs études effectuées sur l'analyse des interactions sol-atmosphère ont montré que dans les régions continentales, la pluviométrie peut être fortement influencée par les caractéristiques de la surface du sol (Charney, 1975 ; Taylor et al. 2003 ; Xue et al. 2006).

Taylor et al. (1997), ont noté que dans une zone semi-aride comme le Sahel ouest africain, l'humidité du sol joue un rôle important dans la répartition de l'énergie à la surface du sol en chaleur sensible et chaleur latente. Ainsi dans ces zones, l'humidité du sol disponible contrôle le taux d'évaporation et d'évapotranspiration. A travers cet échange sol-atmosphère, le

précédent évènement pluvieux ayant arrosé une zone, engendre une modification locale des conditions atmosphériques de la couche limite.

A méso échelle, un gradient de l'humidité du sol se traduira par une variabilité spatiale dans la couche limite, produisant ainsi une zone favorable à la convection (Anthes 1984; Lanicci et al. 1987). L'humidité du sol due au passage d'un évènement pluvieux ou la quantité d'eau accumulée dans le sol suite au passage de plusieurs évènements pluvieux exercera donc une certaine influence sur l'évènement pluvieux suivant.

Au cours de cette étude, on va essayer de mettre en évidence cet effet mémoire que les évènements pluvieux semblent présenter à travers l'analyse des données pluviométriques de dix huit années d'observations sur le degré carré de Niamey. On investiguera aussi pour voir s'il n'existe pas d'autres comportements (caractéristiques) saisonniers résultant de la succession des évènements pluvieux ou du cumul des évènements pluvieux.

Hypothèse : il y a un facteur saisonnier, qui n'est donc pas lié à la topographie ou directement à la présence de végétation, donc à quelque chose probablement lié à l'humidité du sol, dans la localisation des précipitations.

Là où on observe des gradients importants, est-ce dû :

- à des différences de nombre d'évènements précipitants ?
- à des différences de quantité d'eau tombée par évènement ?

II. Synthèse bibliographique

La notion de persistance pluviométrique a été pendant des décennies attribuée aux zones arborées. Plusieurs chercheurs avaient soutenu l'idée que les arbres attirent la pluie.

Le vaste panorama historique tracé par Andréassian (2002) commence à l'Antiquité, où Platon, 360 ans JC, fait dans son œuvre le *Critias* une juxtaposition entre l'existence de la forêt et l'abondance du débit des rivières.

Plus loin Andréassian (2002) évoque l'historique écrit par Joseph Krittage en 1948 dans lequel l'auteur indique que l'idée de l'influence de la forêt sur la pluviosité remonte à Christophe Colomb qui aurait attribué la différence de la pluviométrie entre les Açores et les « Indes Orientales » au couvert forestier. Pour ce dernier, les Açores auraient été dans le passé couvertes de forêts, et c'est leur destruction qui est la cause de la baisse des pluies.

Dans le même ordre d'idée, Descroix (1994), constate que dans les Alpes du Sud, la pluviométrie des mois d'été (juin à août compris) a diminué de 0,5 à 8% suivant les postes entre 1881 et 1990. Cette tendance ne s'observe pas dans les postes des massifs ayant connu les plus forts reboisements (Ventoux-Lure, Préalpes de Digne).

Cette question de l'effet de la végétation continue encore à alimenter les débats même si ces derniers temps on parle plus d'effet des conditions de surface sur la pluviométrie ou plus généralement d'interaction sol-atmosphère (Altin 2005). Cette problématique intègre la rétroaction de l'humidité du sol sur les évènements pluvieux à travers l'évaporation directe du sol et l'évapotranspiration des plantes.

En effet depuis le lancement des recherches plus poussées sur la connaissance des mécanismes climatiques de méso échelle à l'échelle globale sur l'Afrique de l'Ouest, on parle d'un effet direct de l'humidité du sol dû au passage d'un évènement pluvieux sur l'évènement suivant.

Robert et al (1990) avait préalablement indiqué que sous une atmosphère humide, les nuages se développent premièrement au dessus des zones avec un faible rapport de Bowen (rapport chaleur sensible/chaleur latente), typiquement au dessus des forêts et des zones arrosées précédemment. Cependant, ils notent que, pendant des jours secs, la convection a lieu au dessus des zones ayant un rapport de Bowen élevé, c'est-à-dire des zones dont la surface du sol est sèche.

Un peu avant les études sur l'Afrique de l'Ouest, Chen et Avissar (1994), à partir d'une analyse basée sur une simulation des conditions climatiques à partir d'un modèle de climat RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) de différentes situations d'humidité du sol, avait montré que la formation des nuages est accélérée à partir de l'humidité du sol (en présence du vent ou non). Mais l'effet de l'humidité du sol sur les précipitations dépend au moins de deux facteurs, l'intensité du vent à méso échelle et la quantité de vapeur d'eau disponible dans l'atmosphère.

La première étude orientée dans ce sens sur le degré carré de Niamey est celle menée par Taylor et al. (1997) sur l'interaction entre la surface du sol et la variabilité pluviométrique à méso échelle pendant la campagne HAPEX-Sahel (Hydrologic and Atmospheric Pilot Experiment in the *Sahel*) en 1992. Cette étude a montré à travers un ensemble de mesures d'humidité du sol et de l'air, de la température, de la vitesse du vent et de flux de chaleur, une influence de l'événement antécédent sur la couche limite. Une zone de fort antécédent pluviométrique connaîtra une forte évaporation et plus de flux de chaleur latente qu'une zone de faible pluviométrie, plus surchauffée et donc plus propice au déclenchement d'une cellule convective. Les anomalies atmosphériques au sein de la couche limite sont donc étroitement liées à l'événement pluvieux antécédent.

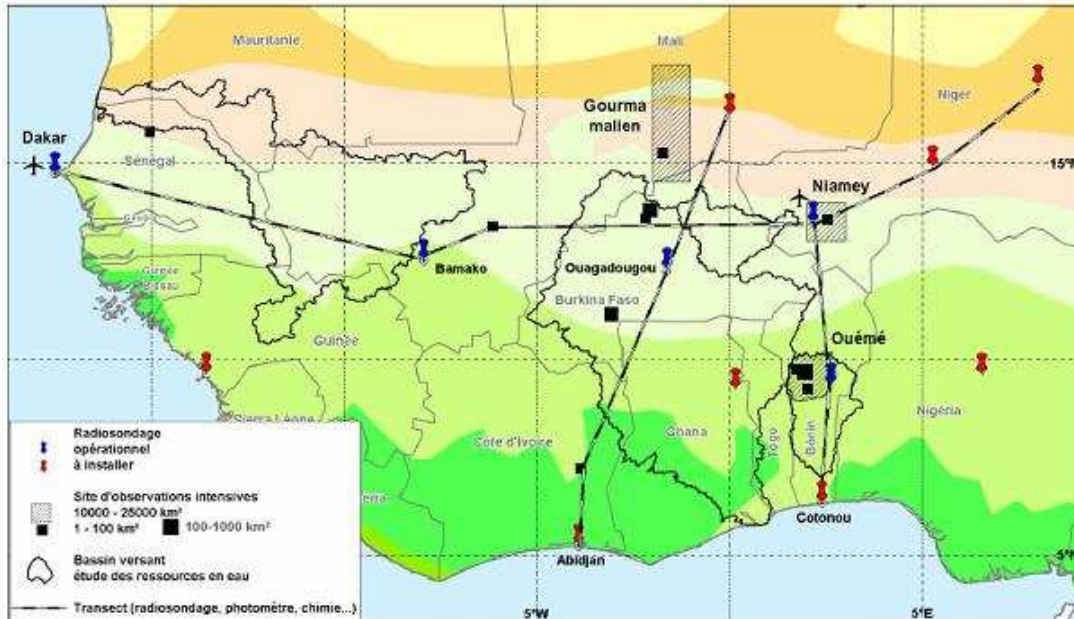
L'étude a présenté un cas de persistance en 1992, entre la station de Djakindjé au sud déficitaire et la station de Diokoti excédentaire au nord au cours des sept dernières semaines de la saison.

La deuxième étude de Taylor et al. (1998), beaucoup plus centrée sur la persistance pluviométrique, portait sur la mise en évidence de la persistance à l'échelle convective (5 à 30 km) des événements pluvieux. Sur la base des mesures météorologiques effectuées au sol, à l'aide de ballon radiosonde et au cours des vols d'avion, ils ont pu définir les conditions propices de manifestation de la persistance pluviométrique. Ces conditions nécessitent surtout une phase d'évaporation entre les deux événements d'au moins six heures pour engendrer des anomalies au sein de la couche limite. Pour des phases d'évaporation de plus de deux jours, ils stipulent plutôt un effet du cumul pluvieux sur une dizaine de jours antérieurs.

III. Présentation de la zone d'étude

III.1 Situation géographique

La zone d'étude (figure 1) s'étend sur environ 16 000 km², elle va de la longitude 1,6° à 3,2° Est et de la latitude 13° à 14° Nord sur la partie ouest du territoire nigérien dont elle englobe la capitale Niamey. Cette zone est en fait le degré carré de Niamey, étendu vers l'Ouest.



(Source : <http://www.cnrm.meteo.fr/expert/contributions/resumeslongs/Lebel.pdf>)

Figure 1 : zone d'étude

III.2 Situation climatique

La zone d'étude est située au cœur du Sahel. C'est une zone dominée par deux saisons, la saison sèche d'octobre à mai et la saison pluvieuse de juin à septembre (figures 2 et 3). La dynamique climatique de la zone est régie par le déplacement de la zone de convergence intertropicale entre la latitude 5°N (janvier) et 17°N (août). C'est une zone de rencontre de deux masses d'air, une masse d'air chaud et sec venant du Sahara et une masse d'air humide et frais venant de l'océan (golfe de Guinée). La première masse d'air est propulsée par l'anticyclone saharien (ou des Açores) et la seconde par l'anticyclone de Saint Hélène au sud (figure 2).

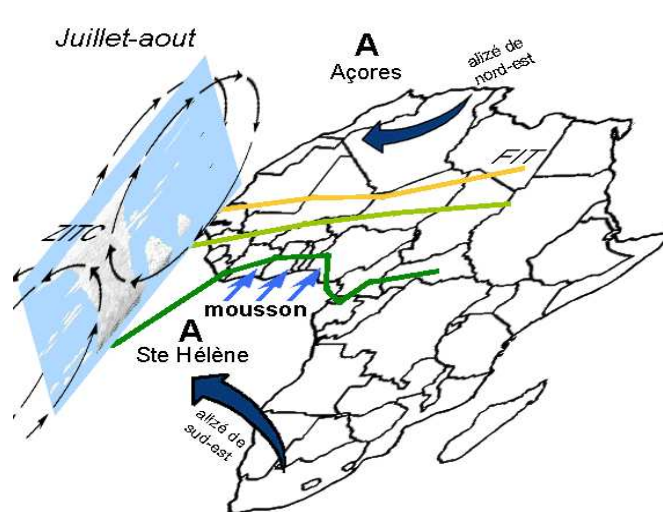


Figure 2 : Mécanisme climatique de la mousson (Source : Massuel 2005)

La pluviométrie moyenne annuelle est de 500 mm et le maximum de cette pluie est enregistré au mois d'août (figure 3).

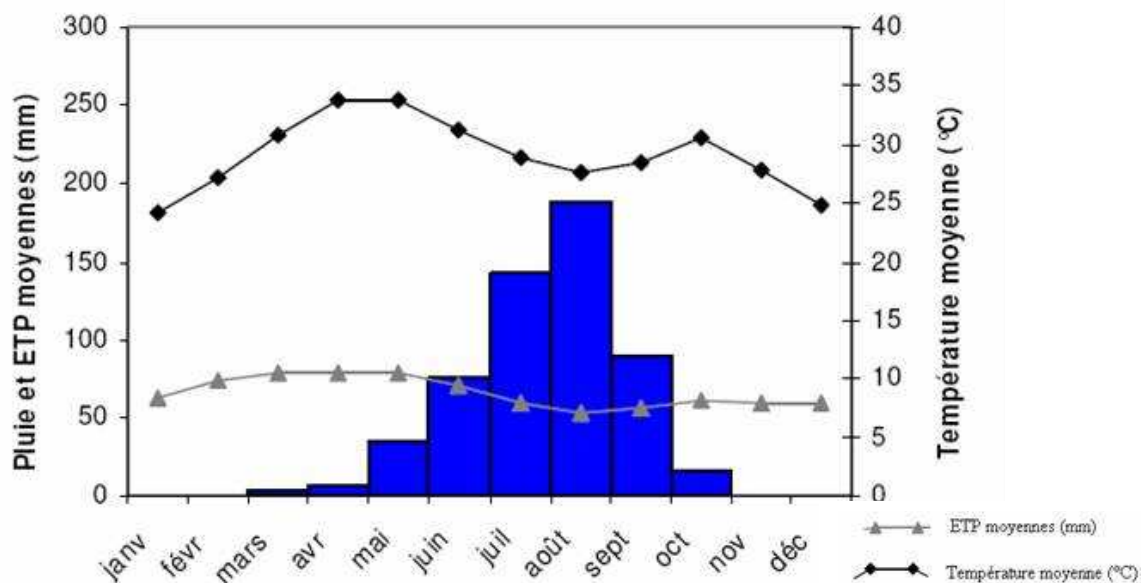


Figure 3 : Variation saisonnière moyennée par mois de la température, de l'ETP, et de la pluie à la station de Niamey aéroport (source : Balme, 2004)

IV. Données pluviométriques et méthodes de travail

IV.1 Données pluviométriques

L'étude est réalisée à partir des données pluviométriques journalières et horaires relevées au niveau du réseau de pluviographes suivi par l'équipe d'hydrologie de l'IRD de Niamey.

Ces données vont de 1990 à 2007 (données ORE Niamey de la base AMMA). Elles ont été vérifiées et validées par cette même équipe.

Le nombre de stations suivies varie d'une année à l'autre mais un réseau représentatif constant de trente stations est maintenu (tableau 1). Elles sont localisées sur les figures 4 et 5 pour 1992 et 2004 respectivement.

Tableau 1 : Nombre de stations analysées par année

Année	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Nombre de stations	93	99	106	106	50	42	37	36	36
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
	34	34	34	33	33	32	33	53	51

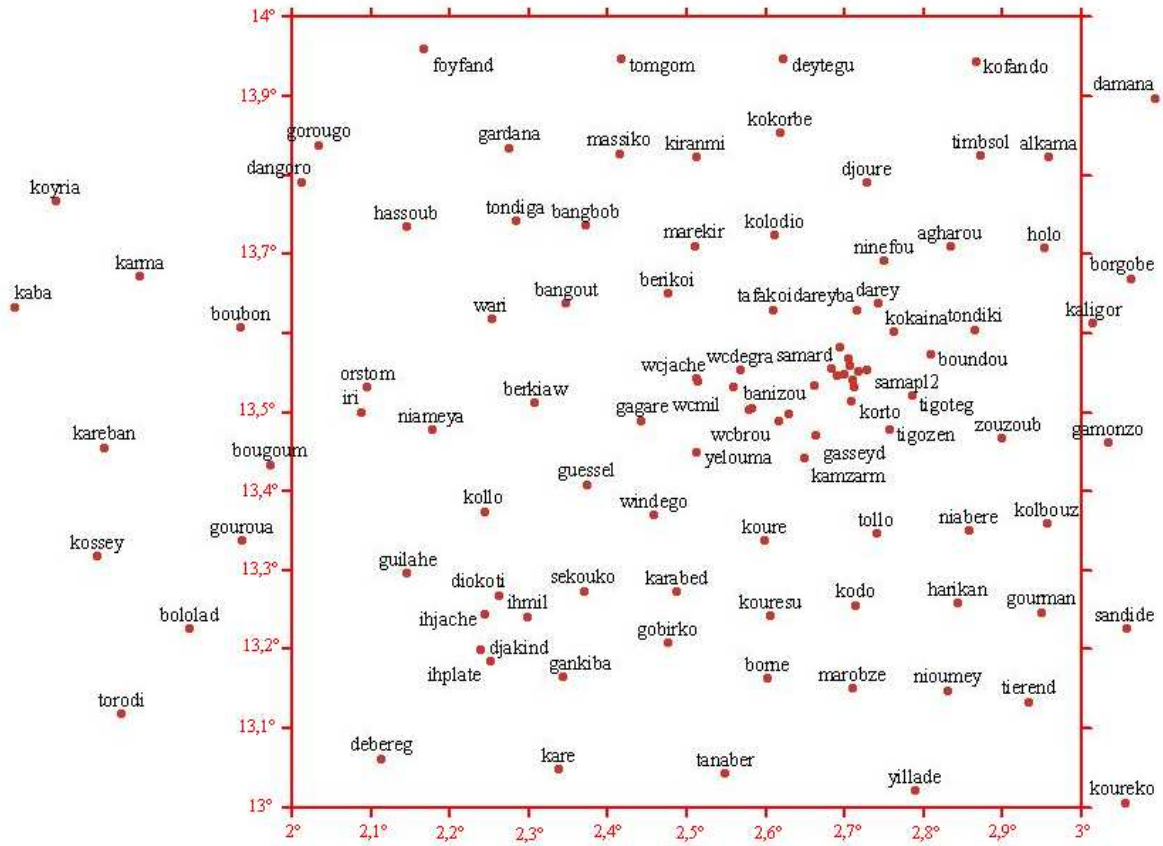


Figure 4 : Réseau de 1992

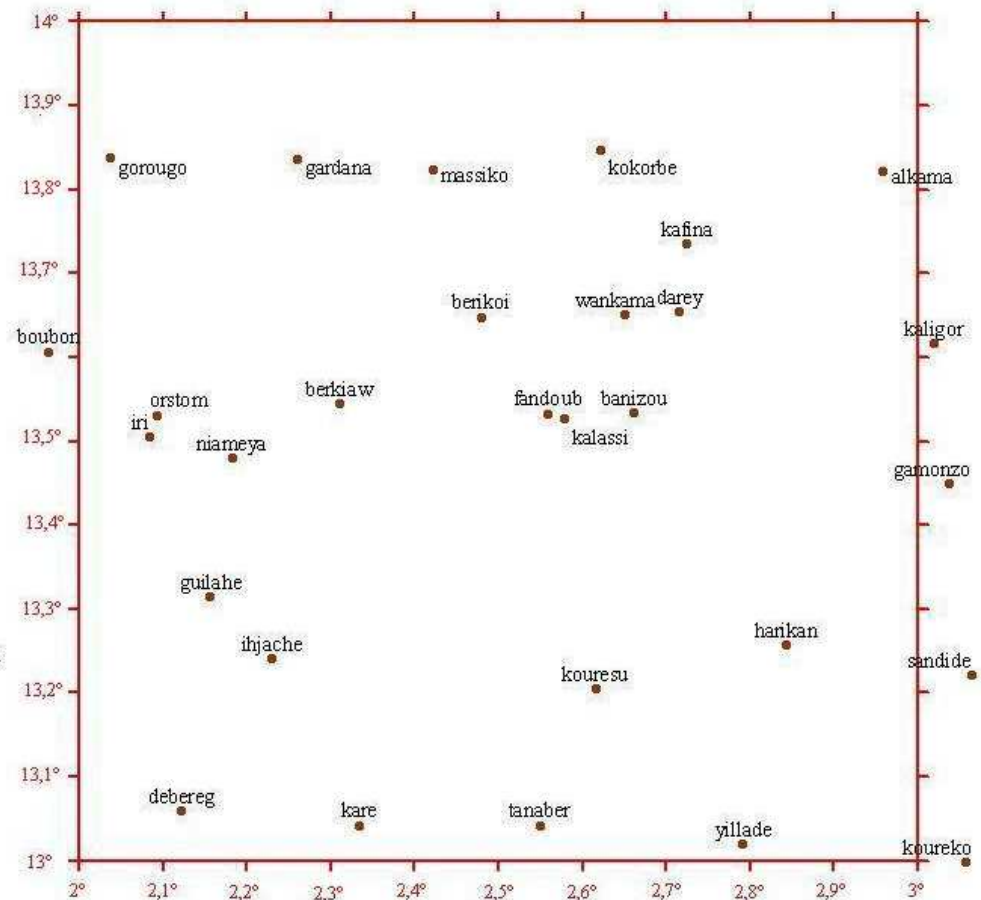


Figure 5 : Réseau de 2004

IV.2 Méthodologie de traitement des données

IV.2.1 Approche de l'étude

L'approche du travail consiste dans un premier temps à une étude générale de la persistance. On identifiera pour chacune des saisons une période pendant laquelle on peut espérer trouver un comportement persistant de la pluviométrie. Le début probable de cette période de persistance sera la date à partir de laquelle on aura une bonne corrélation spatiale entre le cumul pluvieux intermédiaire (cumul des pluies par station jusqu'à la date) et le cumul pluvieux annuel. On identifiera les stations demeurées excédentaires jusqu'en fin de la saison et quelques stations déficitaires. Ce marquage, station excédentaire et station déficitaire au sein de la saison, apparaît comme une phase de mise en place du gradient saisonnier (répartition spatiale des zones excédentaires et déficitaires).

En effet, l'hypothèse est que la pluie étant persistante, on aura donc plus de pluie là où il a le plus plu la fois antérieure et ainsi de suite jusqu'en fin de la saison. Le critère d'une bonne corrélation spatiale (r^2 supérieur à 0,36) entre le cumul de pluie intermédiaire et le cumul pluvieux annuel sera utilisé pour l'identification de cette période de mise en place du gradient saisonnier.

L'analyse de la persistance se basera sur la relation qui existe entre les stations demeurées excédentaires et les stations déficitaires qui leur sont voisines (7 à 25 km).

On vérifiera si le gradient saisonnier n'est pas dû à l'effet ou à l'importance d'un ou de quelques événements pluvieux à travers l'analyse de la corrélation spatiale et du poids des événements sur le cumul pluvieux annuel.

La deuxième partie sera l'étude des cas, où on reprendra les travaux de recherche de la persistance avec les hypothèses de la précédente étude sur la persistance de certaines caractéristiques de la pluviométrie. Aussi, une recherche des événements pluvieux persistants sera faite à partir de l'analyse de la corrélation spatiale entre les stations sur les événements consécutifs.

Le traitement des données, basé sur une série de calculs de différents paramètres ou grandeurs, est effectué à partir d'un ensemble de programmes élaborés lors de cette étude sous IDL (Interactive Data Language).

Les calculs sont constitués de :

- calcul de gradient de pluie entre deux stations par événement et sur toute la saison
- calcul du cumul de gradient
- calcul du cumul pluvieux
- calcul du coefficient de corrélation spatiale entre les gradients d'événements pluvieux consécutifs
- Calcul de l'indice pluviométrique spatial

Le gradient de pluie est calculé entre deux stations distantes de 7 à 25 km, ces distances sont prises en rapport avec les dimensions des cellules convectives qui vont de 5 à 30 km. L'idée est qu'à ces distances, chacune des stations est dans une zone où la dynamique atmosphérique (activité de convection) est différente de celle autour de l'autre station en rapport avec l'humidité du sol due au précédent événement pluvieux ou au cumul pluvieux antérieur.

IV.2.2 Formulations

Le traitement des données est fait suivant les formulations ci-dessus :

- Gradient de pluie à l'événement du jour i ou événement i entre la station A et la station B

$$grad(A,B)i = \frac{P_A^i - P_B^i}{D_{AB}} \text{ Avec } P_A^i \text{ la hauteur de pluie du jour } i \text{ à la station A, } P_B^i \text{ la}$$

hauteur de pluie du jour i à la station B et D_{AB} la distance entre A et B

On a deux types de gradients, le gradient positif et le gradient négatif, une répétition du signe de ce gradient traduit que l'une des deux stations est toujours plus arrosée que l'autre ;

- Cumul de gradient ou gradient sur le cumul pluvieux du début de la saison ($i=0$) jusqu'au jour i

$$gradCUM(A,B)i = \sum_{k=0}^i \frac{P_A^k - P_B^k}{D_{AB}} = \frac{CP_A^i - CP_B^i}{D_{AB}} \text{ avec } CP_A^i \text{ le cumul des hauteurs}$$

de pluie jusqu'au jour i à la station A, CP_B^i le cumul des hauteurs de pluie jusqu'au jour i à la station B et D_{AB} la distance entre A et B ;

- Le coefficient de corrélation sur le cumul : coefficient de corrélation entre les cumuls pluvieux de toutes les stations considérées au jour i et les cumuls annuels de toutes ces stations ;

- L'indice pluviométrie à la station s est $I_s = \frac{(P_{si} - \bar{P})}{\bar{P}}$ où P_{si} pluie à la station s et \bar{P}

\bar{P} est la pluie moyenne sur l'ensemble des stations considérées ;

- Le taux de gradient par événement est $i_i = \frac{grad(A,B)i}{grad(A,B)} \times 100$ où $grad(A,B)i$ est le gradient entre la station A et B au jour ou événement i et $grad(A,B)$ est le gradient annuel entre A et B ;
- Le poids de l'événement i ou la pluie du jour i est $Pd_i = \frac{P_i}{MP} \times 100$ où P_i est la hauteur de pluie moyenne sur la zone au jour i et MP est la pluie moyenne annuelle sur la zone ;
- Le taux de persistance pour les événements (persistance événementielle), c'est le pourcentage de couples ayant gardé le même type de gradient d'un événement i à un événement $i+1$;
- Direction du gradient, le gradient entre deux stations prend la direction de la plus longue distance en latitude ou en longitude entre les deux stations et le sens considéré est celui de la station la plus arrosée vers la station la moins arrosée.

V. Caractérisation du gradient de pluie

Le gradient de pluie caractérise l'évolution spatiale de la pluie en ce sens qu'il traduit sa variation le long d'une direction de déplacement. La région sahélienne est connue pour son gradient pluviométrique moyen Sud-Nord de 1 mm/km (diminution du cumul pluviométrique annuel de 1 mm par kilomètre lorsqu'on va du sud vers le nord) (D'Amato, 1998).

A l'échelle du degré carré, la variabilité spatiale du gradient pluviométrique varie d'un événement pluvieux à un autre et cette variabilité spatiale ne présente pas une configuration fixe d'une année à une autre.

V.1 Corrélation entre le gradient pluviométrique dans une zone et la hauteur de pluie

Sur la figure 6 on reporte pour chaque événement de l'année 1990 le gradient pluviométrique moyen dans une zone de 25 km autour de la station de Niamey aéroport en fonction de la pluie moyenne des événements sur cette zone. L'écart type des événements est également reporté en fonction de la hauteur de pluie événementielle.

On constate que pour cette zone, il existe une bonne corrélation positive entre l'écart type de l'événement et la hauteur de pluie moyenne sur la zone. Cette corrélation se retrouve également entre le gradient moyen événementiel et la hauteur de pluie moyenne de l'événement. Cette figure illustre qu'un événement est d'autant plus spatialement variable qu'il est intense.

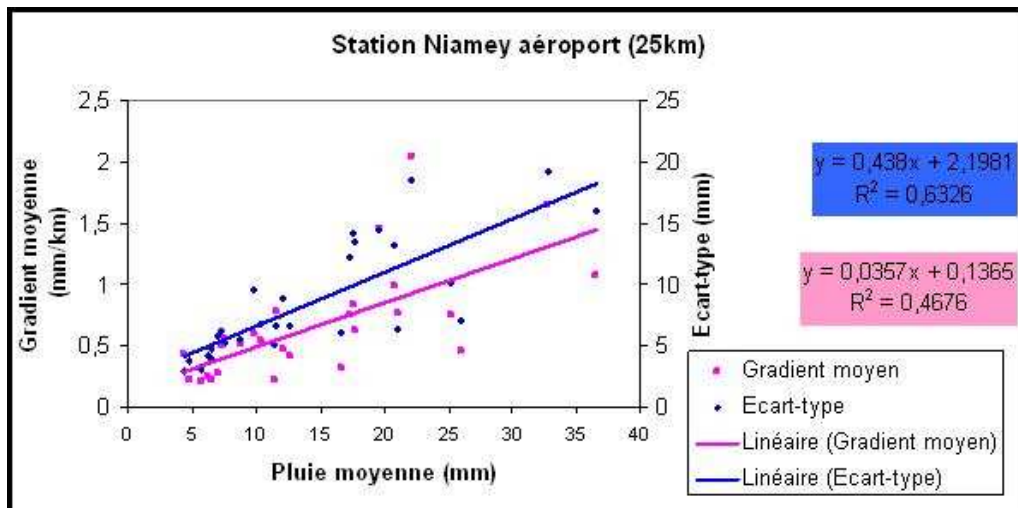


Figure 6 : Corrélation gradient pluviométrique et hauteur de pluie

V.2 Variabilité spatiale de la pluviométrie

V.2.1 A l'échelle de l'événement pluvieux

La figure 7 ci-dessous, représente la répartition spatiale de la pluviométrie sur le degré carré au cours de deux gros événements, en 1998 et en 2007. On ne constate aucune forme d'orientation latitudinale ou longitudinale du gradient pluviométrique, la pluie est répartie de façon aléatoire sur la zone. On voit des zones plus au Sud moins arrosées que des zones situées au Nord. La disparité spatiale de la pluviométrie est souvent très forte, un écart type de 40 mm pour l'événement du 06/09/1998 est représenté ci-dessus.

Gros événement de la saison 1998 (06/09/1998) max 155 mm et moyenne 53 mm

Gros événement de la saison 2007 (04/08/2007) max 117mm et moyenne 59 mm

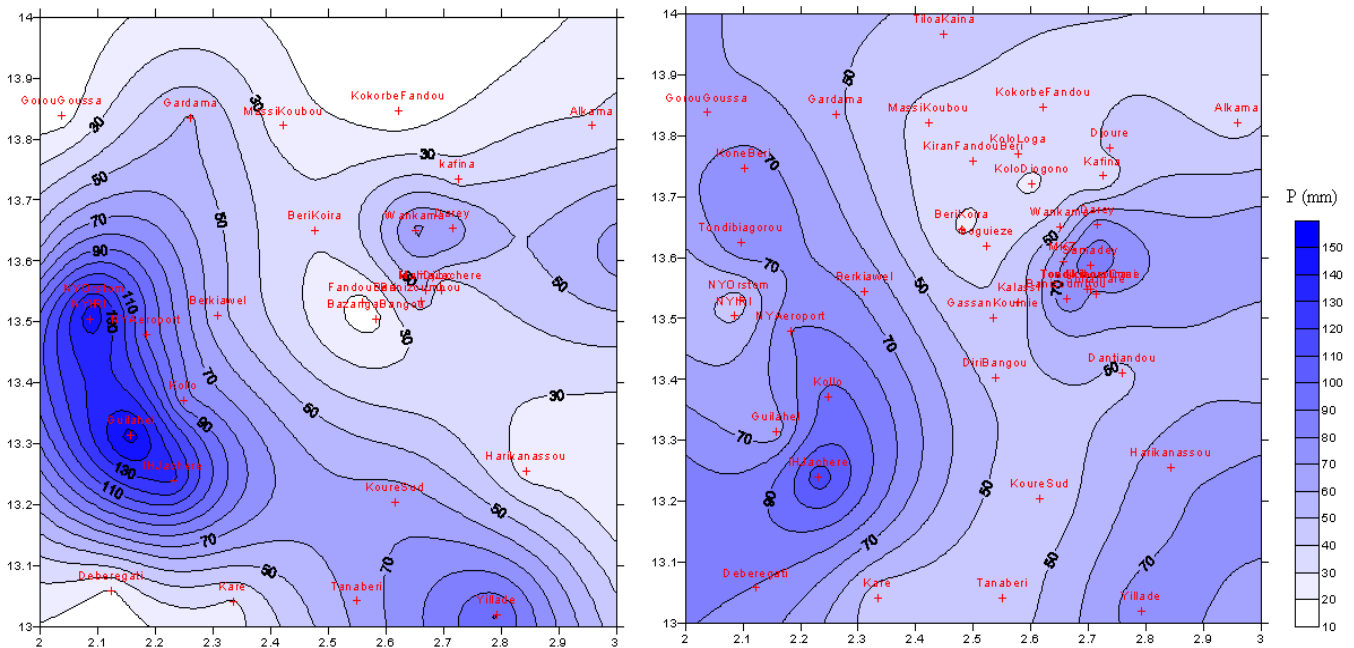


Figure 7 : Deux gros événements de la saison 1998 et 2007

V.2.1 A l'échelle interannuelle

On a noté au cours de l'analyse précédente que le gradient de pluie ne présente aucune direction préférentielle. Comme certaines études l'ont déjà montré, on ne remarque pas de gradient pluviométrique nord sud au cours d'une saison (annexe) ou d'un événement pluvieux sur le degré carré (Maud, 2004).

La figure 8 présente les isohyètes moyennes sur le degré carré du cumul pluvieux annuel moyen continu de 1992 à 2002. A l'échelle de la saison 1992, les isohyètes sont orientées dans tous les sens, elles ont même une forme circulaire. Mais plus la moyenne est étendue sur d'autres années, et plus les isohyètes tendent à être continues et presque parallèles. Le parallélisme des isohyètes commence à apparaître à partir de 1998 au dessus de 13,6°. Le gradient nord-sud apparaît clairement sur la carte 1992-2002 représentant la moyenne sur les onze ans.

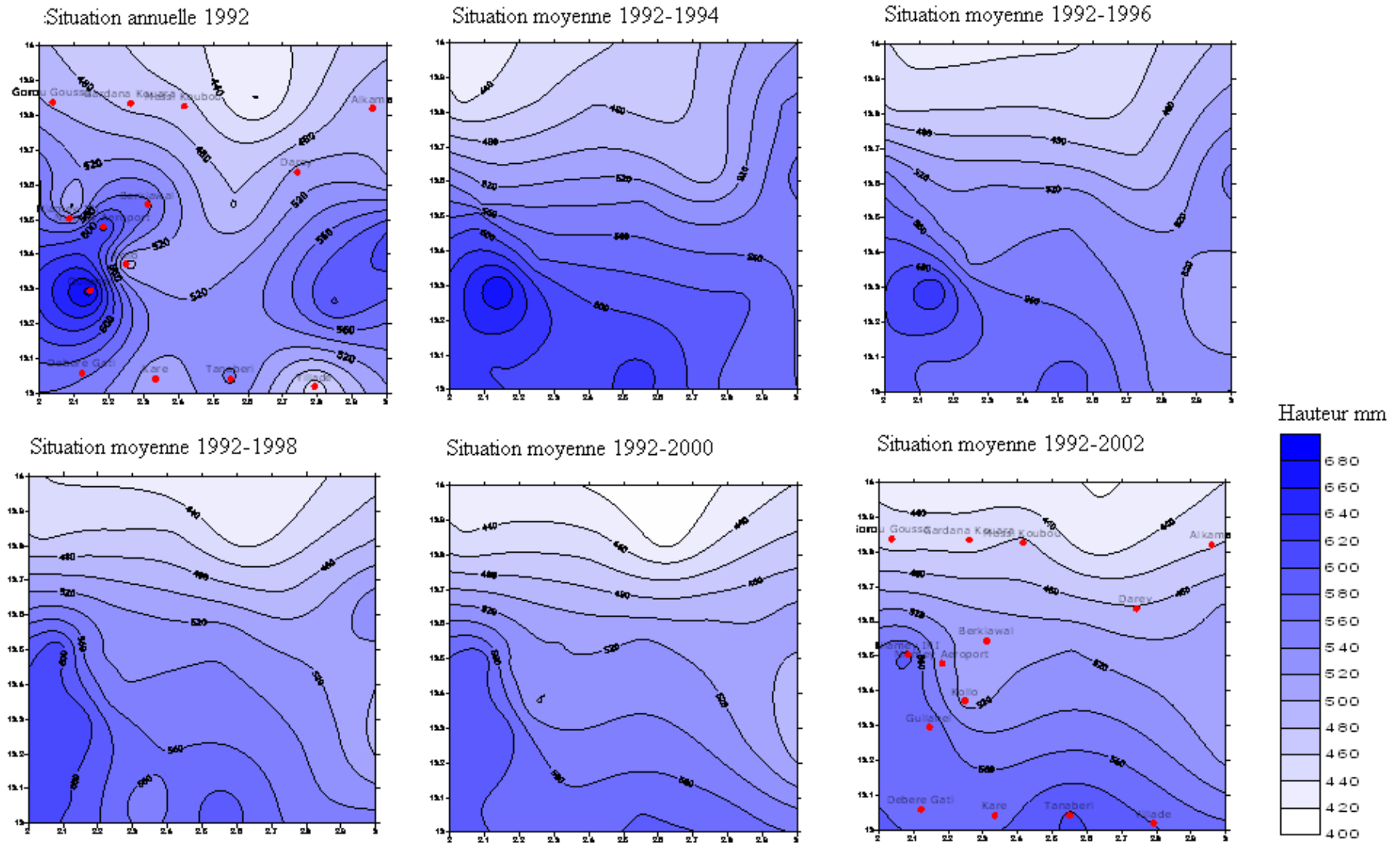


Figure 8 : Evolution moyenne de l'orientation des isohyètes annuelles en fonction de la taille de la série des données

VI. Etude générale de la persistance

La persistance d'un phénomène est définie comme étant une répétition à la proportionnelle du phénomène sur une certaine durée. Dans le cas de cette étude sur la pluviométrie, il est défini comme étant une situation dans laquelle une station plus arrosée au cours d'un événement pluvieux aura plus de chance d'être (plus) arrosée au cours de l'évènement suivant et ainsi de suite. La persistance du gradient pluviométrique ou répétition du gradient du même signe (RGMS) sera caractérisée à travers deux analyses:

- Corrélation spatio-temporelle entre les valeurs du gradient pluviométrique
- Répétitions de signe du gradient au cours des événements suivants

Cette première partie du travail sera basée sur le traitement des données de la pluviométrie journalière.

VI.1 Corrélation spatio-temporelle entre gradients d'événements consécutifs

L'étude de la corrélation spatiale du gradient pluviométrique des événements consécutifs a été menée sur deux différents échantillons, toutes les stations du réseau et les 30 principales stations.

Sur l'ensemble des données, on a en moyenne 10% des événements pluvieux qui sont corrélés avec l'évènement antécédent. Un événement pluvieux est dit corrélé avec l'évènement antécédent lorsqu'on a un coefficient de corrélation spatiale supérieur à 0,6 entre les hauteurs de pluies enregistrées au cours des deux événements.

Les figures 9 à 11 présentent la répartition des événements corrélés en fonction de la durée de la séquence sèche séparant deux événements.

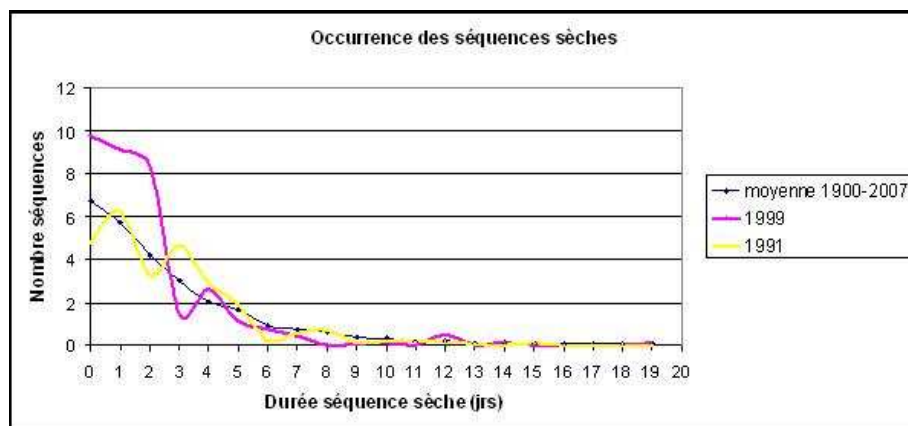


Figure 9 : occurrence moyenne des séquences sèches de 1990 à 2007

Le nombre de séquences sèches diminue en fonction de leur durée. Sur une saison on constate qu'on a le plus de séquences comprises entre 1 et quatre jours (figure 9).

La figure 10 et 11 montrent que la proportion est de 20 % en moyenne pour les séquences de quelques heures à deux jours. On note une forte chute entre les séquences de deux à trois jours, ce qui peut traduire une diminution considérable de l'effet de l'évènement précédent sur l'évènement suivant avec la durée de la phase sèche.

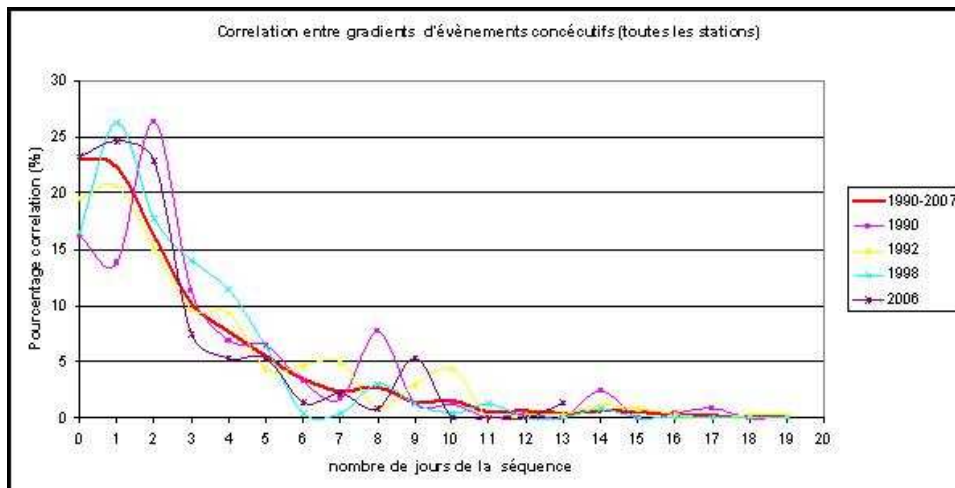


Figure 10 : corrélation entre gradients d'événements pluvieux consécutifs pour toutes les stations

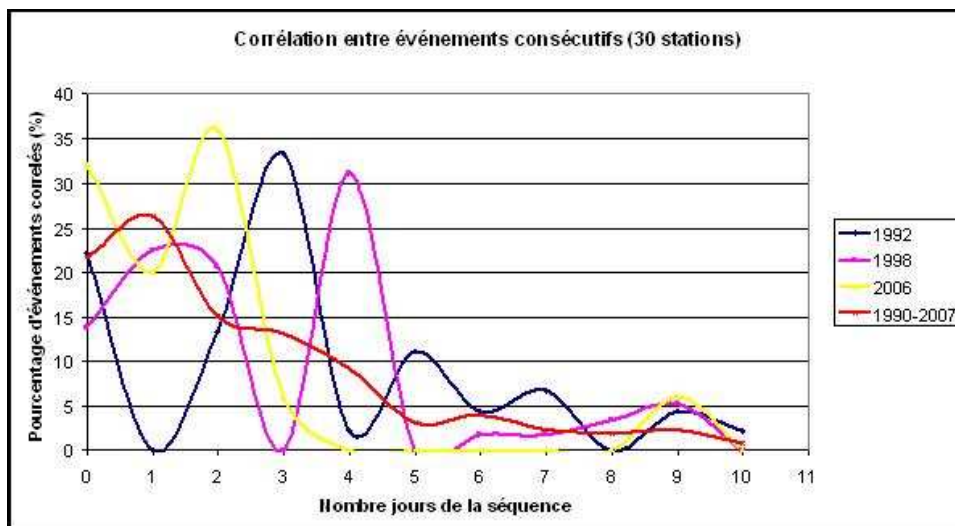


Figure 11 : corrélation entre gradients d'événements pluvieux consécutifs pour les 30 stations

VI. 2 Analyse graphique du gradient pluviométrique

La persistance de la pluviométrie au cours d'une saison peut être perçue à travers l'analyse de l'évolution du cumul des gradients de pluie entre deux stations données (cf IV.2.2). On fait un cumul continu de gradient journalier (gradient de pluie entre les deux stations au cours d'une journée) du premier événement de la saison jusqu'au dernier. Donc en faisant une sommation de gradients journaliers de même type, on aura une tendance à la hausse en valeur absolue et dans le cas des gradients événementiels successifs de signes contraires, on aura une courbe en zig zag.

Les graphiques ci-dessus représentent l'évolution de ces cumuls pour quelques couples de stations de la date de la première pluie jusqu'à la fin de la saison.

Dans le cas d'une bonne persistance, on constate sur les figures 12 et 13 que l'évolution présente une bonne tendance à la hausse en valeur absolue. On constate sur ces figures, que l'évolution du cumul continu des gradients pour un couple de station dessine une tendance à partir d'une certaine période de la saison.

Quelques courbes ont montré une tendance à la hausse en valeur absolue au niveau de certains couples considérés. Cette tendance commence à partir d'une certaine période de la saison.

Ces graphiques de 1991 (figure 12) et 2006 (figure 13), montrent que cette période du début de la persistance du gradient pluviométrique n'est pas la même d'une saison à l'autre ou même d'un couple à un autre.

Quelques exemples de couples avec persistance

1991

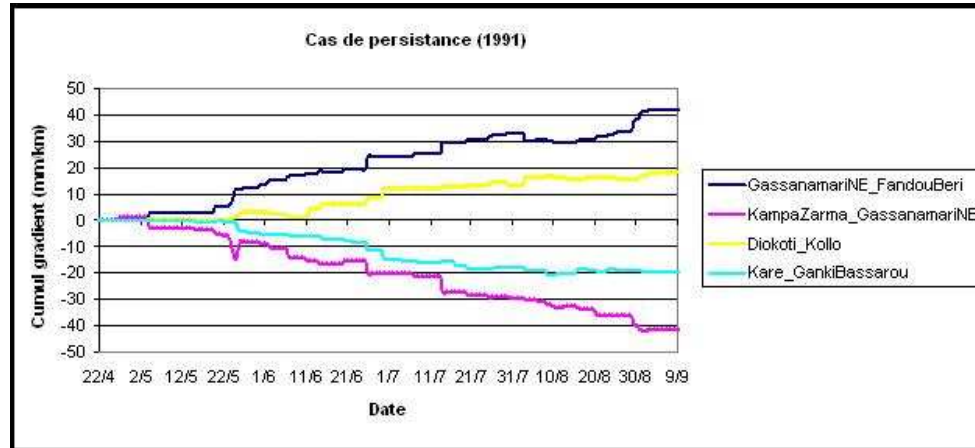


Figure 12 : Evolution du cumul de gradient pour quelques couples avec persistance en 1991

2006

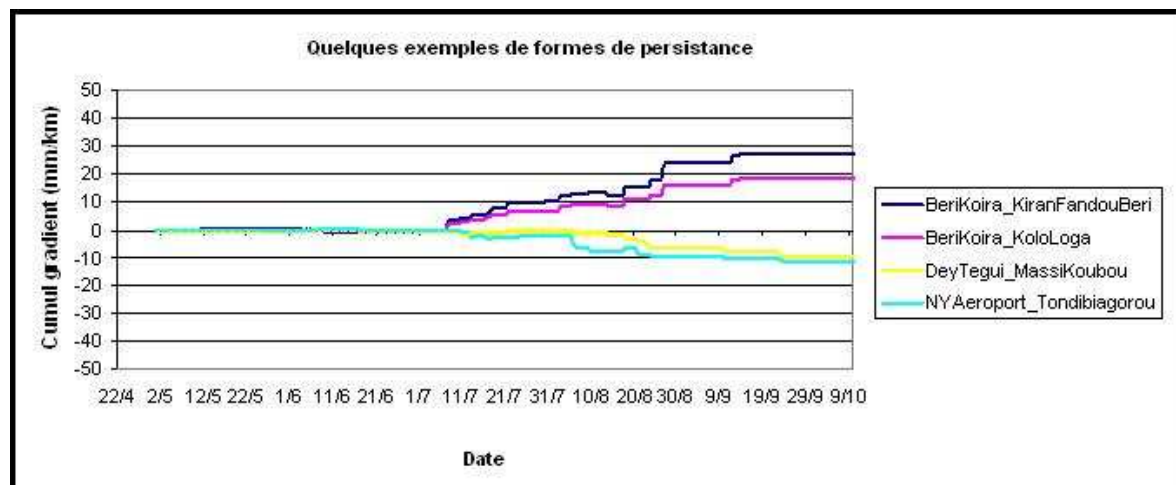


Figure 13 : Evolution du cumul de gradient pour quelques couples avec persistance en 2006

Quelques exemples de couples sans persistance

Il y'a certains couples de stations sur lequel on ne détecte aucune persistance du gradient pluviométrique au cours de la saison (figures 14 et 15). C'est-à-dire que les courbes ne présentent pas une tendance uniforme à la hausse mais sont en zig zag.

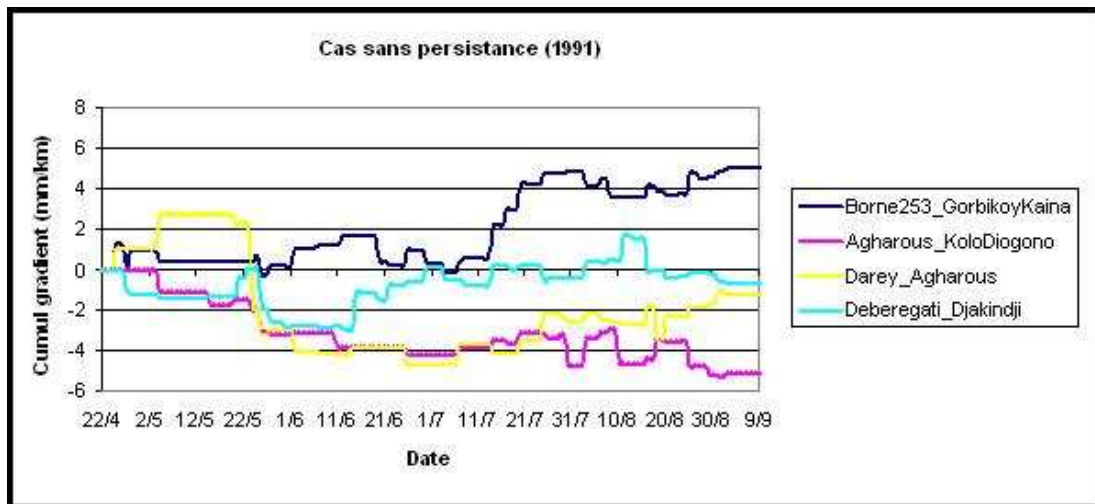


Figure 14 : Evolution du cumul de gradient de quelques couples sans persistance en 1991

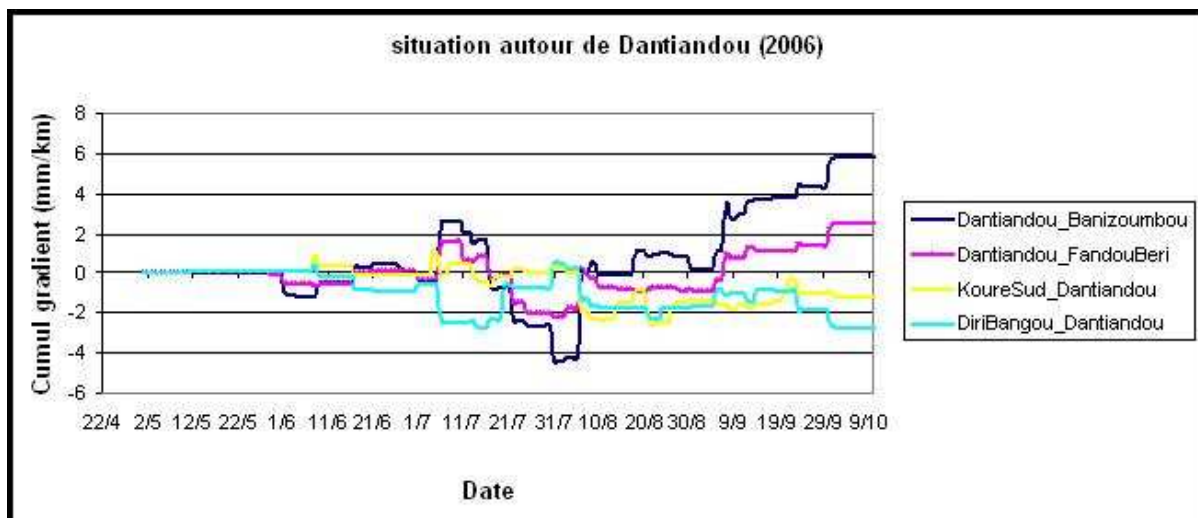


Figure 15 : quelques exemples de couples sans tendance sur le cumul des gradients en 2006

VI. 3 Date la mise en place du gradient saisonnier

Le gradient de pluie saisonnier est la configuration spatiale sur l'ensemble de la zone d'étude des stations déficitaires et excédentaires en fin de saison. La mise en place de ce gradient correspond à la période ou date à partir de laquelle un grand nombre de stations est resté excédentaire ou déficitaire par rapport à la moyenne générale (de l'ensemble des stations) du cumul pluvieux jusqu'en fin de la saison.

L'identification d'une date de mise en place du gradient saisonnier au cours de la saison permet de sélectionner les stations restées excédentaires (très humides) pendant une bonne partie de la saison. Cette date est déterminée à partir du calcul du coefficient de corrélation spatiale entre le cumul pluvieux (cf IV.2.2) au niveau de chacune des stations du réseau à une date donnée et le cumul pluvieux annuel sur chacune de ces stations. La date marquant cette mise en place est la date à partir de laquelle on a un degré de corrélation spatiale acceptable avec r^2 supérieur à 0,36 (soit un r supérieur à 0,6) entre les cumuls pluvieux. Plus de 60% des stations sèches ou humides à cette date le seront en fin de la saison (figure 24 et figure 28).

Ainsi, l'analyse de chacune des saisons a permis de singulariser une saison où la mise en place du gradient saisonnier semble commencer tôt, la saison 2005 (figure 16), à partir de l'événement pluvieux du 17/06/2005 et une saison où elle est un peu tardive, la saison 1995 (figure 17), à partir de l'événement du 07/08/1995.

Il peut être question ici d'un semblant de persistance autour de ces stations excédentaires qu'une analyse plus poussée dans les parties suivantes (VI.4, VI.5 et VI.6) permettra de vérifier.

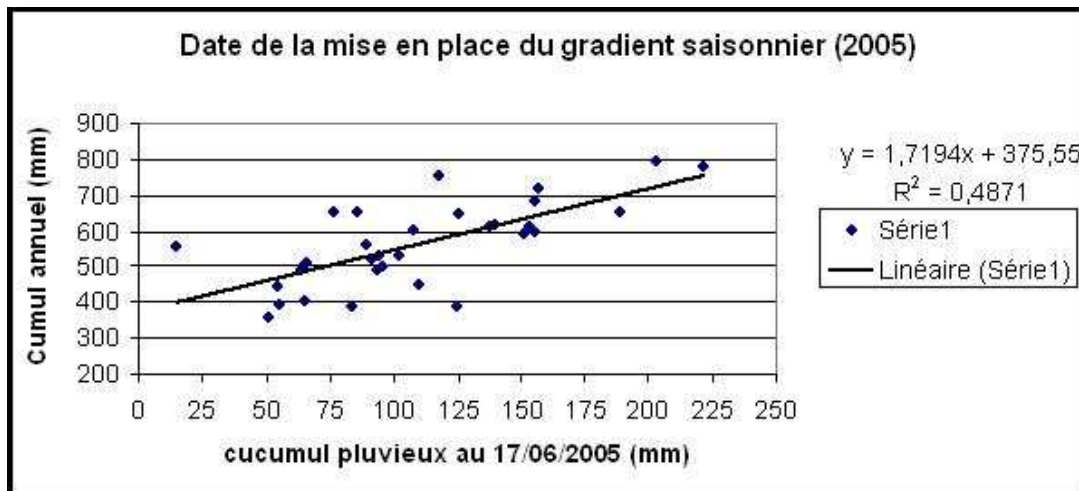


Figure 16 : Corrélation entre cumul pluvieux au 17/06/2005 et le cumul annuel

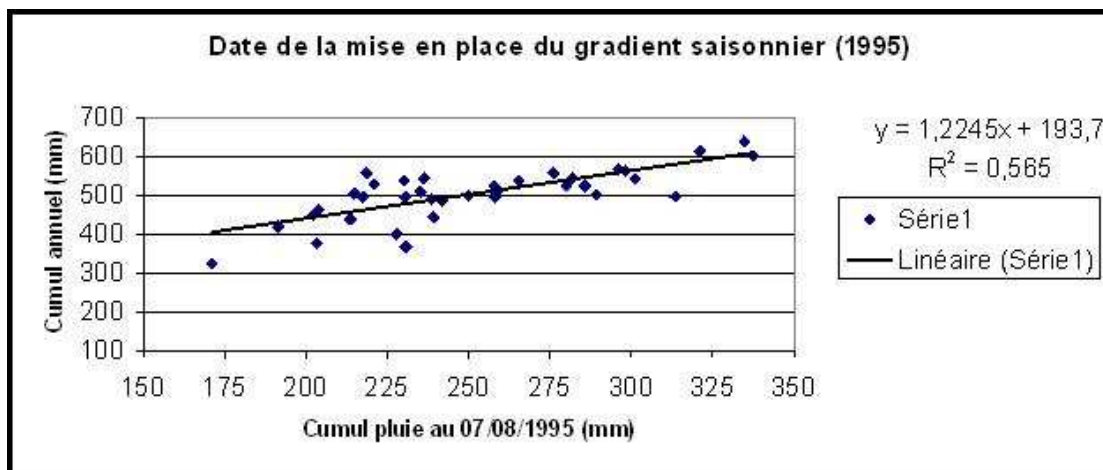


Figure 17 : Corrélation entre cumul pluvieux au 07/08/1995 et le cumul annuel

La détermination de la date de la mise en place du gradient saisonnier permet de voir que la succession des événements pluvieux varie d'une saison à une autre. Somme toute, cette date est antérieure à la quatrième semaine du mois de juillet pour plus de 60% des saisons (12/18) (figure 18).

Il est à noter que cet établissement du gradient saisonnier ou début d'une persistance possible est détectée à partir de 35% en moyenne du cumul pluvieux annuel (un minimum de 12% en 1999 et un maximum de 59% en 2001 et 2003) (figure 19).

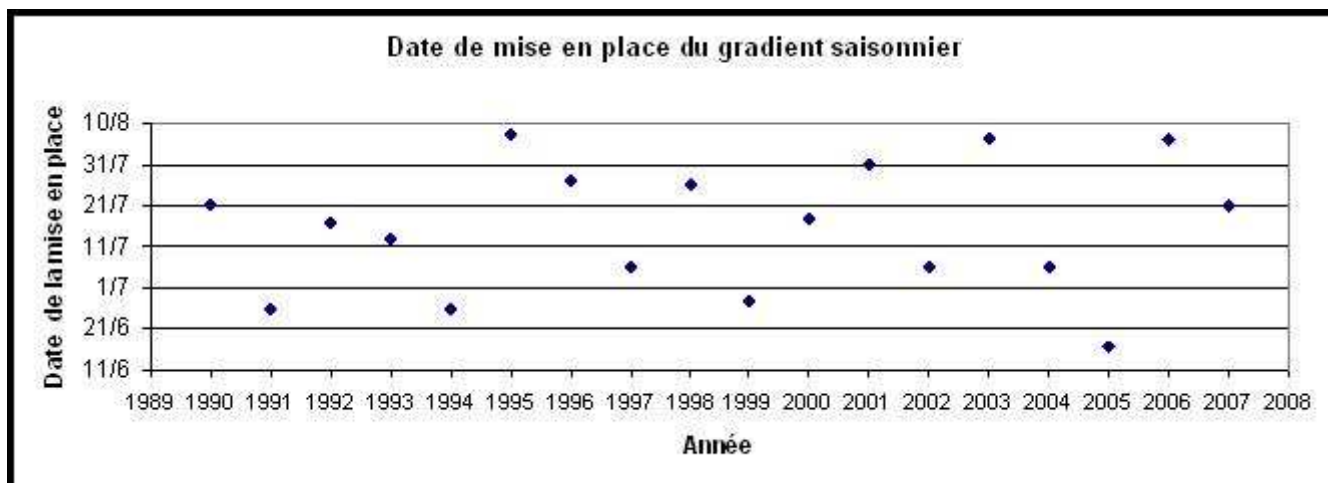


Figure 18 : Dates de mise en place du gradient saisonnier de 1990 à 2007

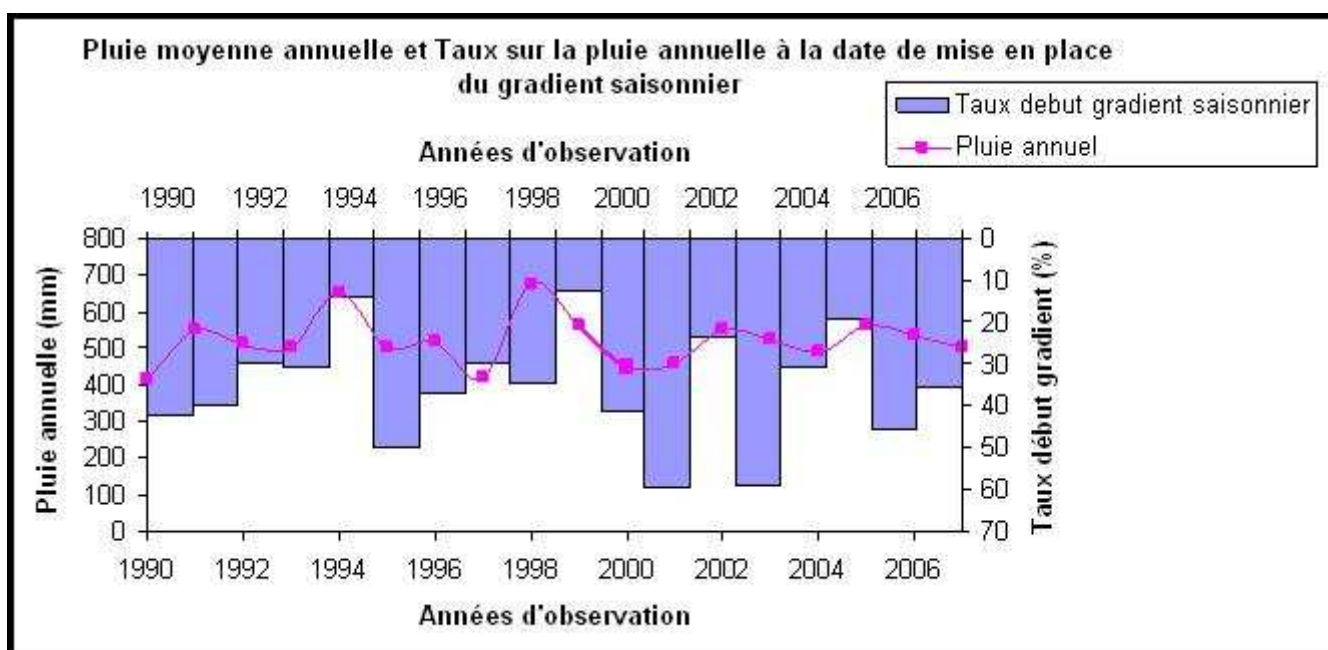


Figure 19 : Pluie moyenne annuelle et poids du cumul pluvieux à la mise en place du gradient saisonnier

VI. 4 Analyse aux alentours des stations excédentaires

Après la détermination de la date de la mise en place du gradient saisonnier, on calcule l'indice de pluviométrie du cumul pluviométrique (cf IV.2.2) à cette date et en fin de la saison. Les stations fortement excédentaires à ces deux dates, sont considérées comme très humides sur toute la période. Ainsi, pour chacune des saisons, on sélectionne un ensemble de stations excédentaires et on constitue des couples de stations avec les stations déficitaires situées dans les voisinages, 7 à 25 km. Pour chacune des stations excédentaires, on cherchera à former quatre couples avec des stations situées dans les quatre points cardinaux (Est, Sud, Ouest, Nord) de la station.

Cas de la saison de 1991

La date de mise en place du gradient saisonnier déterminée précédemment est le 26/06/1991 avec un cumul de pluie moyen de 219 mm sur un cumul moyen annuel de 551 mm soit 40%.

Quatre stations excédentaires furent sélectionnées (figure 24), Gankibassarou, Kolodiogono, Nioumey et Sékoukou. Gankibassarou et Sékoukou sont dans la même zone, les deux stations sont très proches.

Les figures 20 à 23 d'évolution du cumul des gradients par situation journalière, montrent une certaine persistance (plus de trois événements successifs avec même type de gradient) autour de Gankibassarou (figure 20) et Sékoukou (figure 21) au cours de certaines périodes pour certains couples de stations. Par contre au niveau des deux autres stations Kolodiogono (figure 23) et Nioumey (figure 23), on remarque une dominance de l'effet de deux événements.

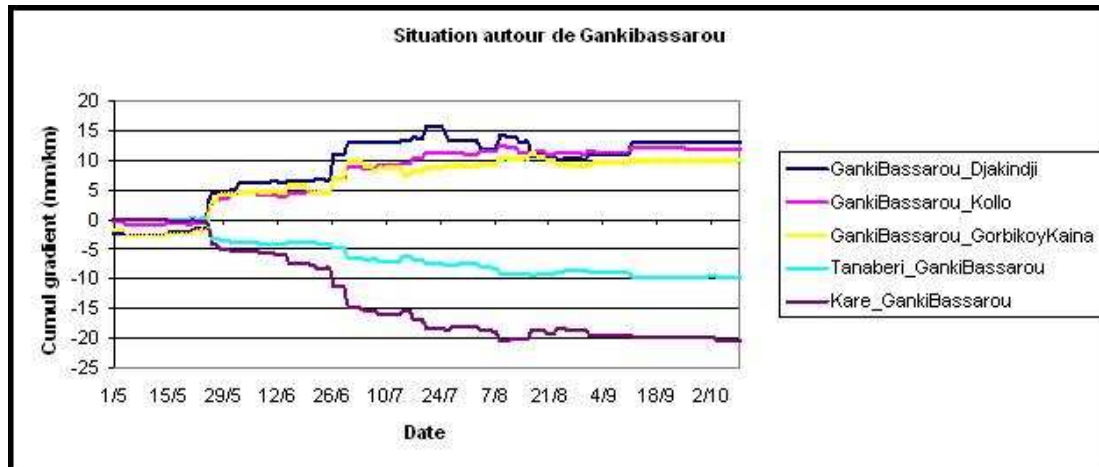


Figure 20 : Cumul de gradient autour de la station excédentaire de Gankibassarou (1991)

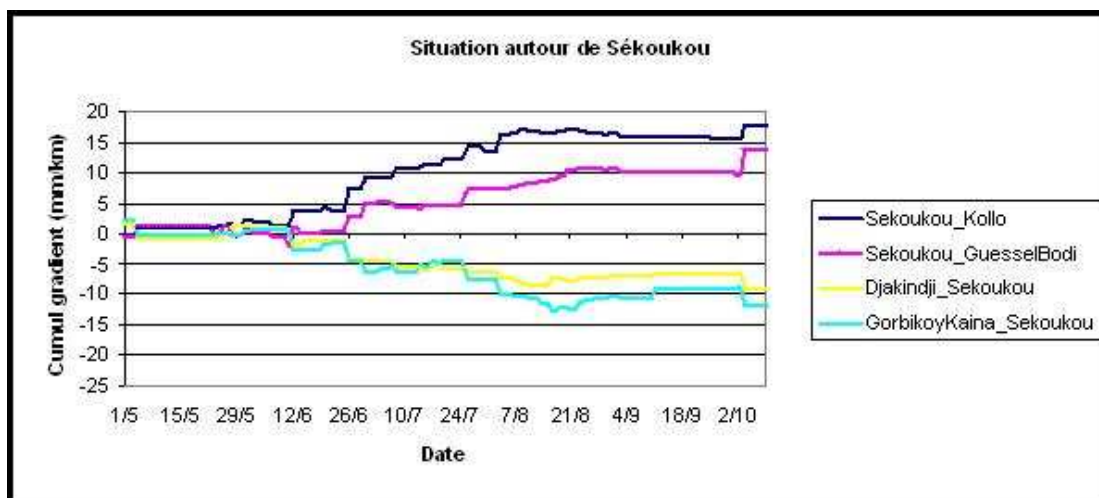


Figure 21 : Cumul de gradient autour de la station excédentaire de Sékoukou (1991)

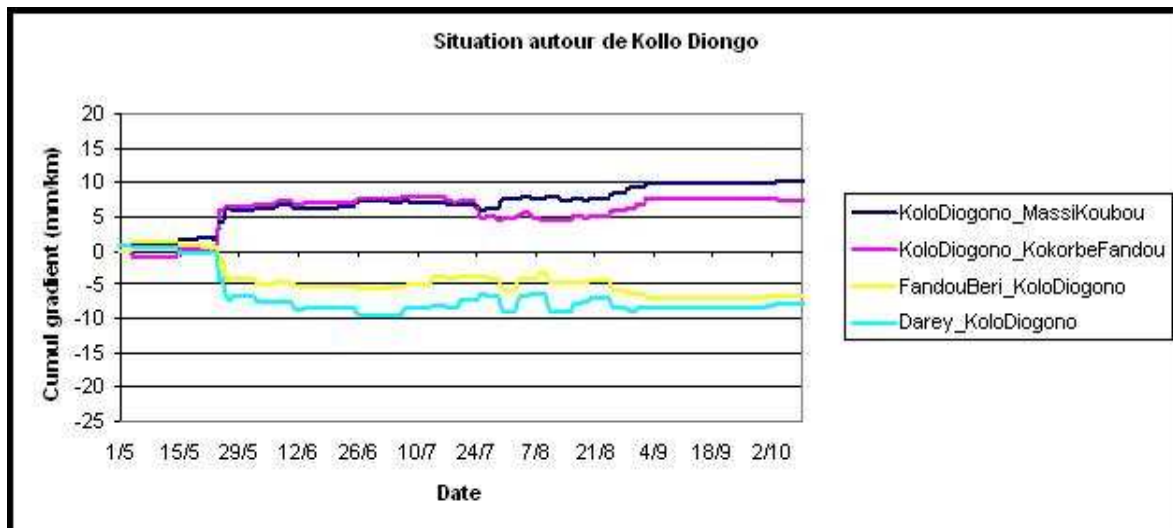


Figure 22 : Cumul de gradient autour de la station excédentaire de KoloDiogono (1991)

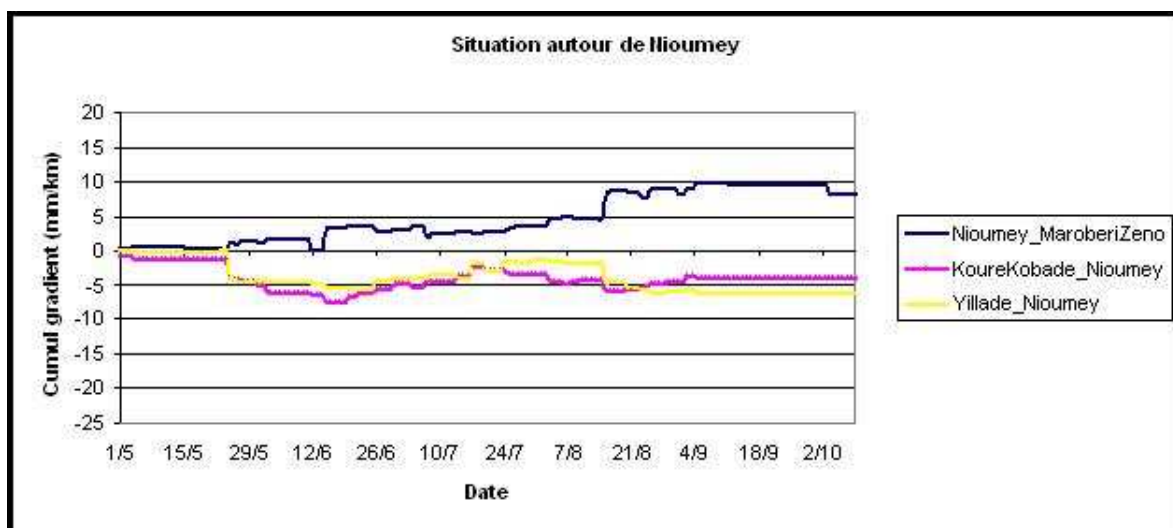


Figure 23 : Cumul de gradient autour de la station excédentaire de Nioumey (1991)

La figure 24 montre la grande ressemblance de gradients entre le 26 juin et la fin de la Mousson pour l'année 1991.

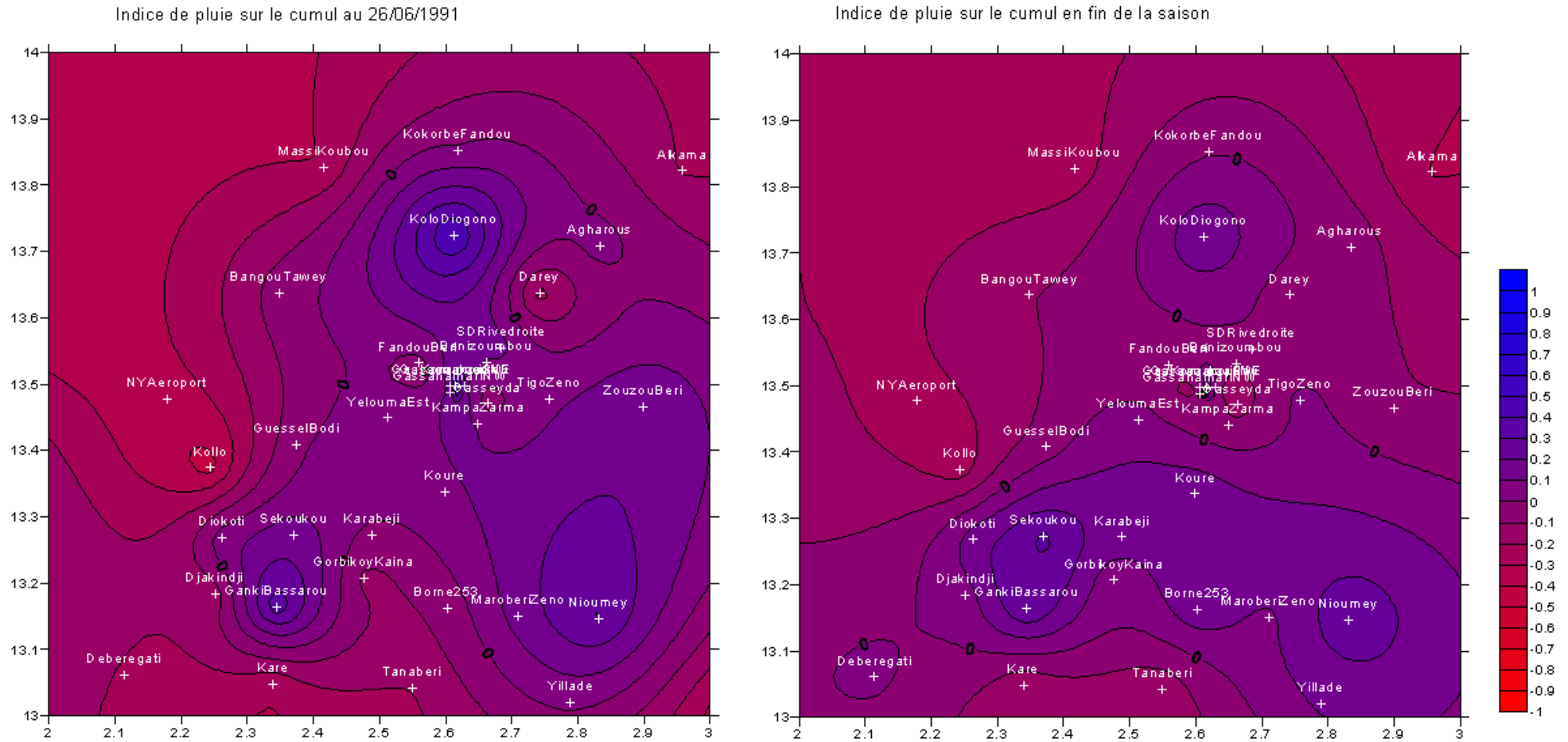


Figure 24 : Carte d'indice de pluie à la date de mise en place du gradient saisonnier et en fin de la saison (1991)

Cas de la saison de 1995

C'est la saison où on a obtenu une date très tardive de la mise en place du gradient saisonnier. La date obtenue est le 07/08/1995 avec un cumul pluvieux moyen de 252 mm sur 503 mm comme cumul annuel, soit à un taux de 50%.

Trois stations excédentaires sont sélectionnées pour l'analyse de la persistance avec les stations voisines déficitaires (figure 28), il s'agit de Bérikoira (figure 25), de Gardama (figure 26) et de Guilahel (figure 27).

Aucun des dix couples analysés ne présente une phase de persistance sur une bonne période de la saison, on a une situation due à quelques événements.

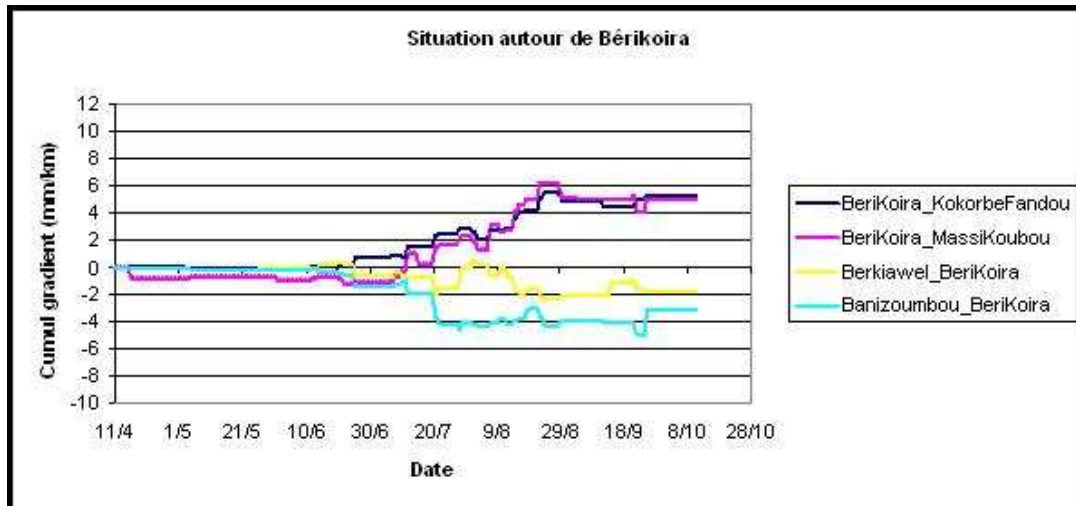


Figure 25 : Cumul de gradient autour de la station excédentaire de Bérikoira (1995)

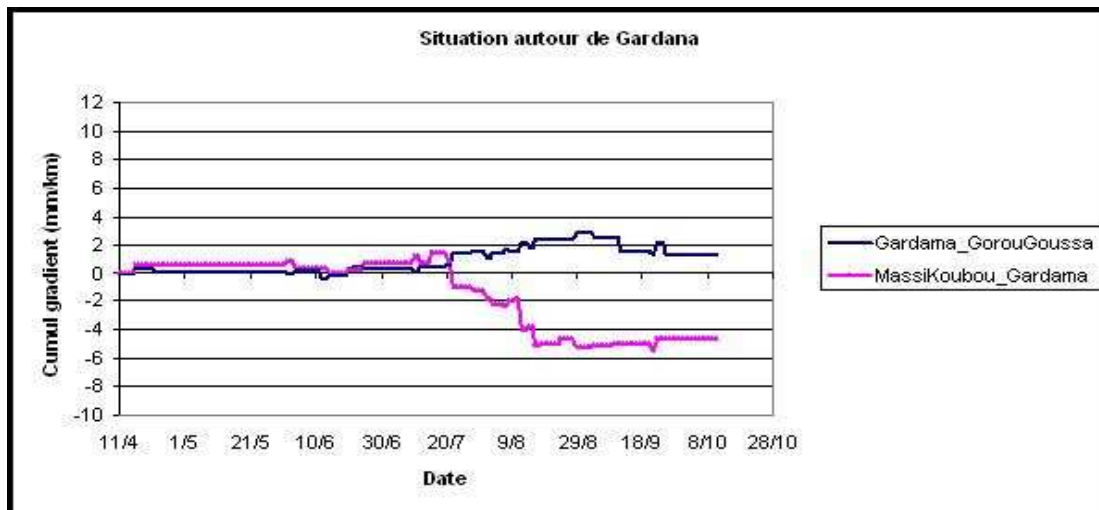


Figure 26 : Cumul de gradient autour de la station excédentaire de Gardana (1995)

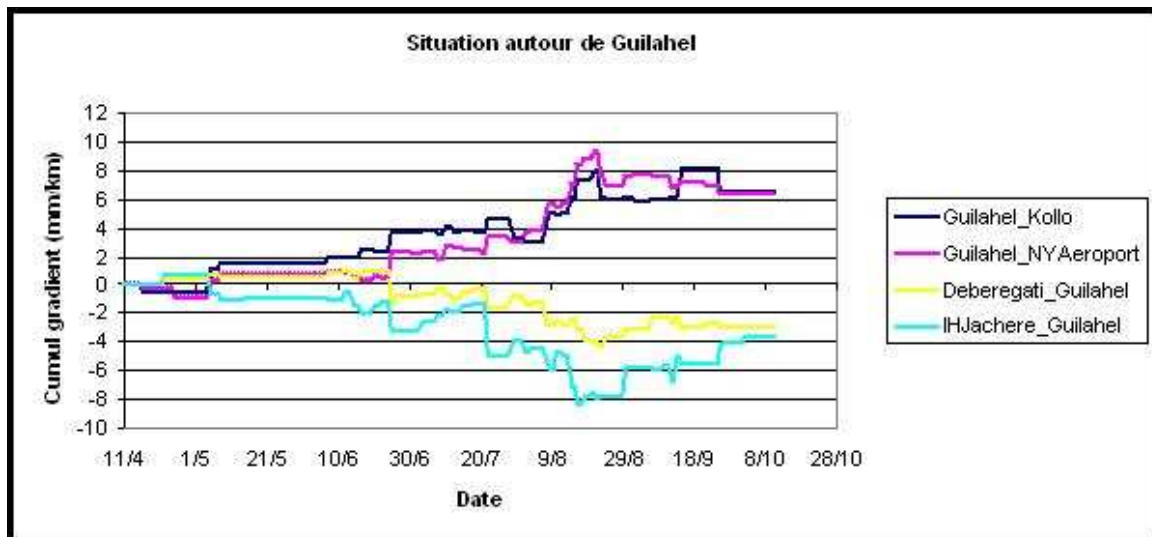


Figure 27 : Cumul de gradient autour de la station excédentaire de Guilahel (1995)

Toutefois, la figure 28 montre encore une fois une grande similitude des gradients entre la situation du 7 août et celle de la fin de la Mousson.

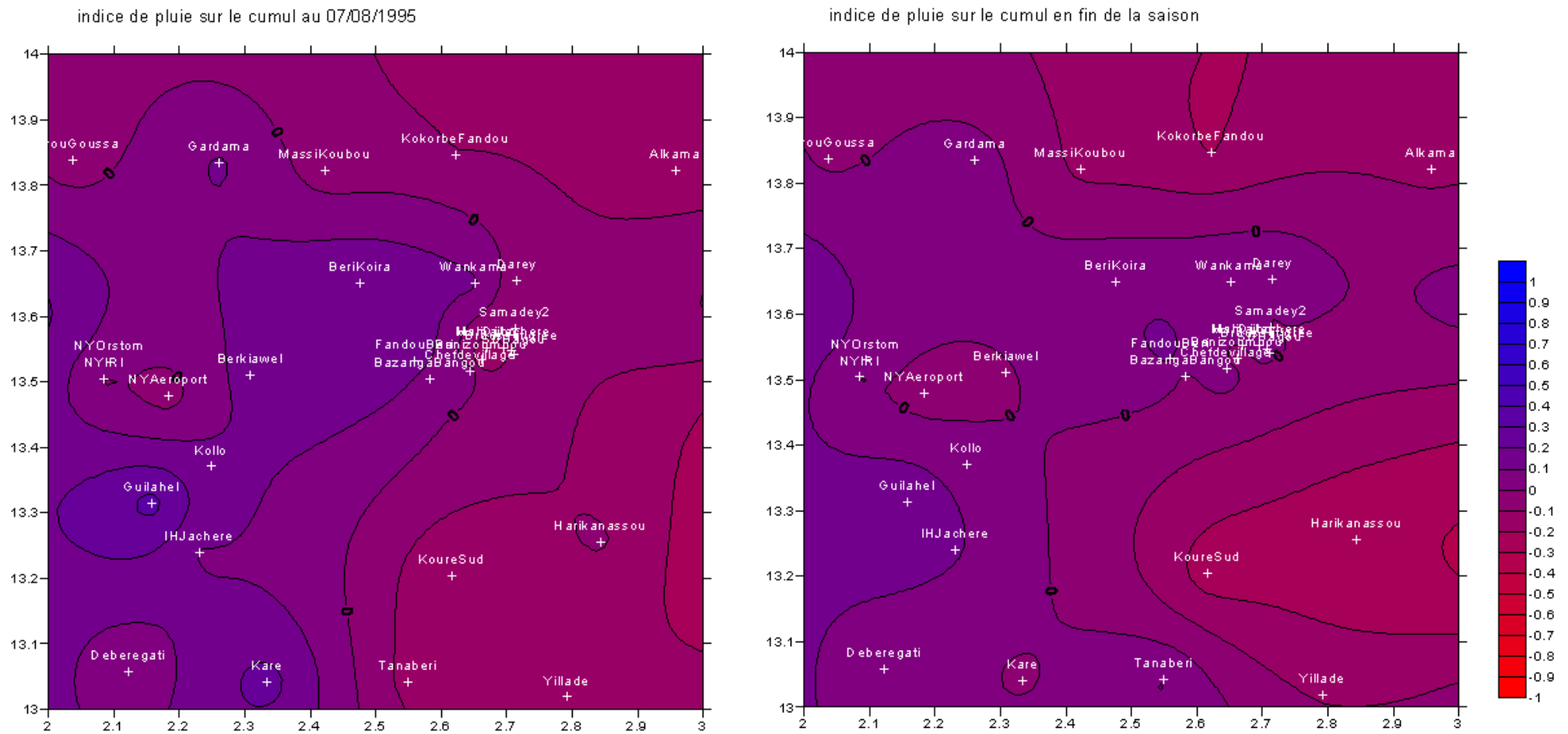


Figure 28 : Carte d'indice de pluie à la date de mise en place du gradient saisonnier et en fin de la saison (1995)

VI. 5 Analyse des couples ayant le plus fort gradient annuel

Cette analyse vise à caractériser la succession des événements pluvieux entre deux stations ayant une forte différence de cumul pluvieux en fin de la saison. Le but principal est de voir si la forte différence du cumul pluvieux entre les deux stations est due à un effet de persistance pluviométrique sur l'ensemble de la saison ou seulement à l'impact de quelques événements. Pour chaque couple identifié, on déterminera le taux du gradient journalier (gradient de pluie entre les deux stations au cours d'un jour pluvieux) (cf IV.2.2) sur le gradient annuel. Les gradients journaliers du même type que le gradient annuel sont représentés sur les figures ci-dessus avec un signe positif et l'inverse avec un signe négatif. Une succession des taux du même signe montre une phase de persistance entre les deux stations.

Quatre cas sont présentés ci-dessus.

- Premier cas : Sékoukou-Kollo, en 1991, on a observé une différence de 315 mm entre les deux stations qui sont distantes de 18 km. Sékoukou, située au sud est la station la plus arrosée. On note une phase de persistance du gradient de fin juin à fin juillet mais pas sur toute la saison (figure 29).

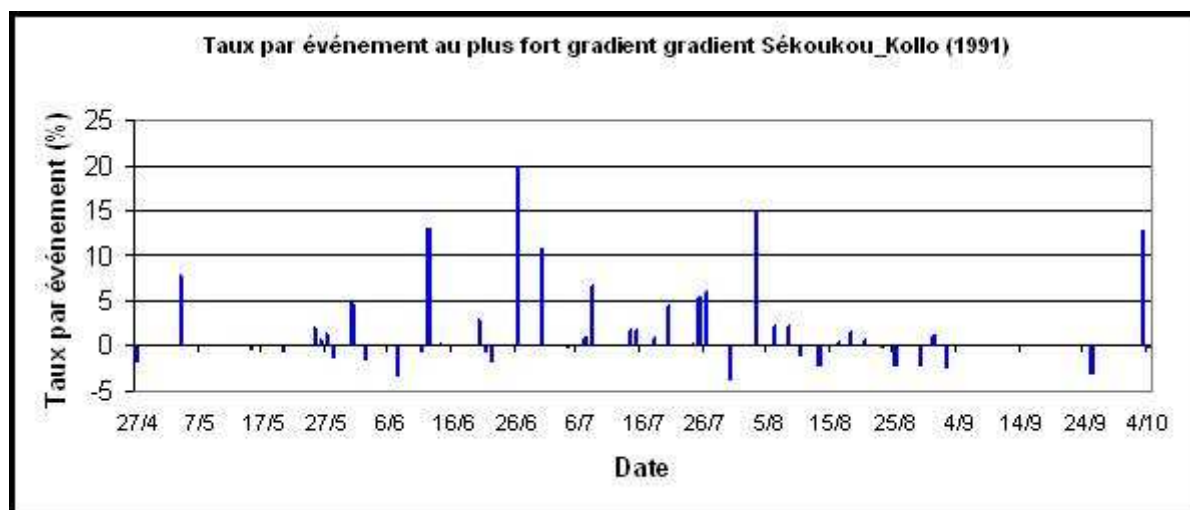


Figure 29 : Poids de gradient à l'événement sur le plus fort gradient Sékoukou-Kollo en 1991

- Le deuxième cas est une différence de 285 mm entre Diokoti et Djakindji, deux stations distantes de 9,4 km, pour l'année 1992. On remarque que la station de Diokoti, bien que située au nord de l'autre station, est la plus arrosée. On note une phase de persistance du gradient pendant la période de forts gradients par événement, de la dernière semaine du mois de juillet à mi-septembre mais avec deux événements de gradients inverses (figure 30).

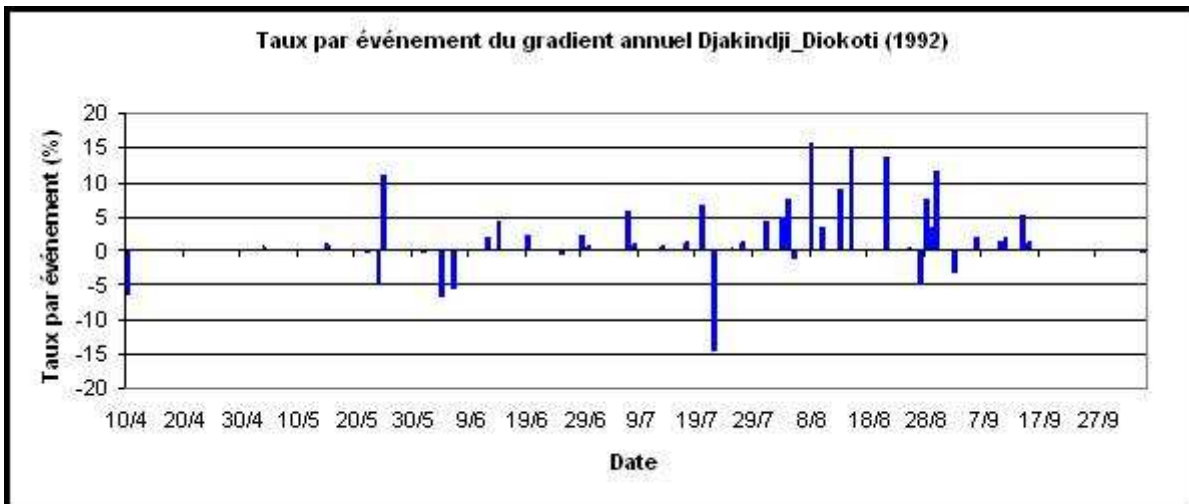


Figure 30 : Poids de gradient à l'événement sur le plus fort gradient Djakindji-Diokoti en 1992

- Le troisième cas, est une différence de 178 mm entre la station de Banizoumbou et celle de Fandoubéri, les deux stations sont distantes de 11 km, en 2003. Ici, on remarque que cette différence est due à l'effet de trois événements successifs au cours des deux premières semaines du mois d'août (figure 31). Banizoumbou, la station la plus arrosée est située à l'est de Fandoubéri.

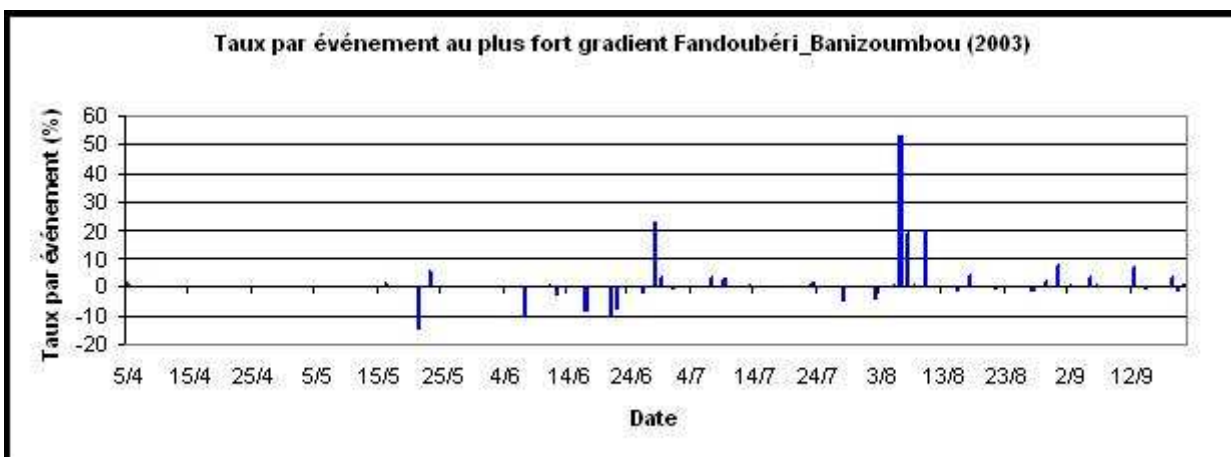


Figure 31 : Poids de gradient à l'événement sur le plus fort gradient Fandoubéri-banizoumbou en 2003

- Le quatrième cas est une différence de 341 mm entre la station de Bérikoira au sud et la station de Kiranfandou au Nord, les deux stations sont distantes de 12,6 km, pour l'année 2006. On note une persistance sur quasiment toute la saison, depuis mi-juin avec un seul gradient de sens inverse (figure 32).

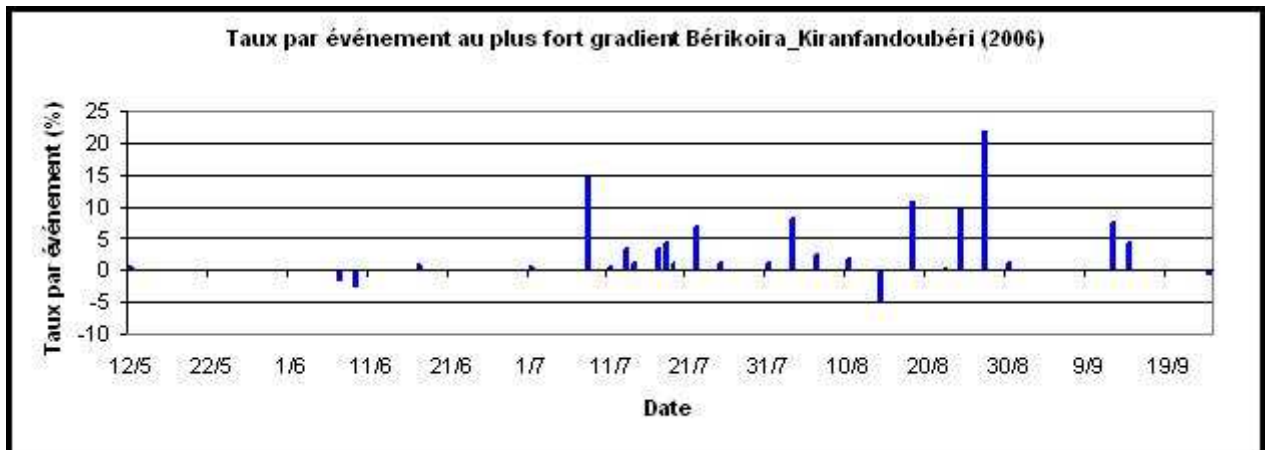


Figure 32 : Poids de gradient à l'événement sur le plus fort gradient Bérikoira-Fandoubéri en 2006

VI. 6 Poids des événements pluvieux

L'analyse précédente a permis de déterminer pour chacune des saisons la date de mise en place du gradient saisonnier par l'obtention d'une bonne corrélation spatiale entre le cumul pluvieux intermédiaire et le cumul annuel. L'interrogation qui subsiste est de savoir si cette bonne corrélation n'est pas due à l'effet d'un ou de quelques événements à cause de leur poids sur le cumul annuel. Pour faire cette investigation, on a fait le calcul du poids des événements (cf IV.2.2) et du coefficient de corrélation entre les hauteurs de pluie enregistrée au cours de l'événement et les cumuls annuels au niveau de ces stations.

L'étude révèle par exemple que l'événement du 26/06/1991, qui a marqué le début du gradient saisonnier, représente 6% du cumul annuel et présente le meilleur pattern spatial corrélé au pattern spatial du cumul annuel ($r=0.56$). On peut dire qu'il a bien marqué la répartition spatiale de pluie annuelle. Cependant, on note que les trois événements successifs du 24, 25 et 26/05/1991 qui font ensemble un poids de 13% n'ont qu'un coefficient de corrélation de 0,25.

Pour l'événement le plus important de la saison 1992, 9% du cumul annuel tombé le 21/08/1992, ne présente qu'un coefficient de corrélation de 0,19. L'événement marquant le début du gradient saisonnier, le 17/07/1992, a un poids de 5,2% et un coefficient de corrélation de 0,32. L'événement ayant donné la meilleure corrélation de 0,5 est celui du 25/05/1992 qui n'a qu'un poids de 1,1% (figure 34).

Une recherche directe de corrélation entre les hauteurs moyennes des événements et les coefficients de corrélations spatiales correspondants sur le cas de la saison de 1992 donne un mauvais ajustement avec un r^2 de 0,05 (figure 33).

Comme le montre ce cas de la saison 1992, il n'y a pas de lien direct entre le poids de l'événement sur le cumul annuel et la répartition spatiale de la pluviométrie en fin de saison.

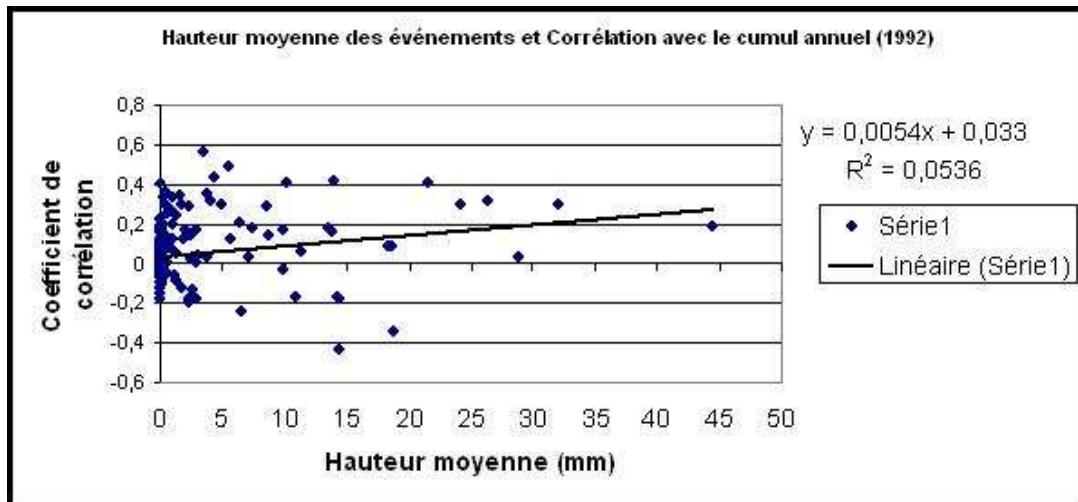


Figure 33 : Hauteur moyenne des événements et corrélation spatiale avec le cumul annuel (1992)

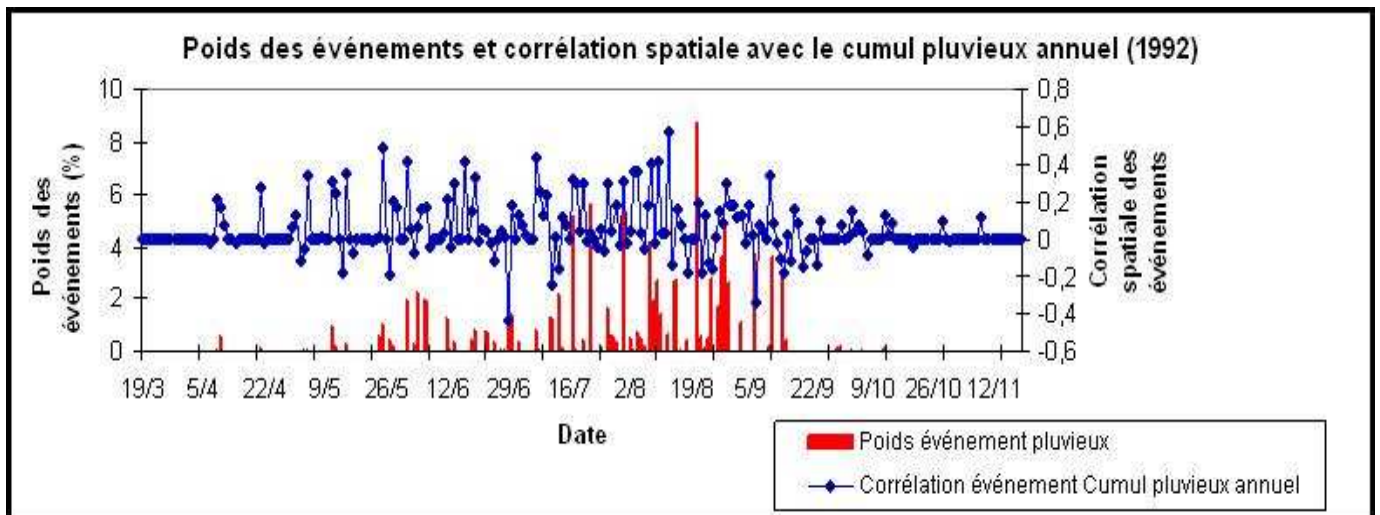


Figure 34 : Poids des événements et corrélation spatiale avec le cumul annuel (1992)

VI. 7 Conclusion partielle

Sur l'ensemble des saisons de 1990 à 2007, on a analysé la persistance dans le voisinage de 66 stations excédentaires autour desquelles 248 couples de stations ont été constitués.

On a remarqué qu'un fort gradient entre deux stations n'est pas uniquement dû à une quelconque persistance dans la saison, mais parfois à une forte disparité spatiale au cours de quelques événements au sein de la saison.

Sur les 248 couples analysés, seuls 55, soit 22% ont présenté des phases de persistance ou de répétition de gradient du même signe (RGMS) sur des événements pluvieux successifs.

On constate qu'il existe des saisons pour lesquelles les forts gradients ne sont nullement dus à une quelconque persistance tel qu'illustré par la station de Tanabéri en 1997 (figure 35).

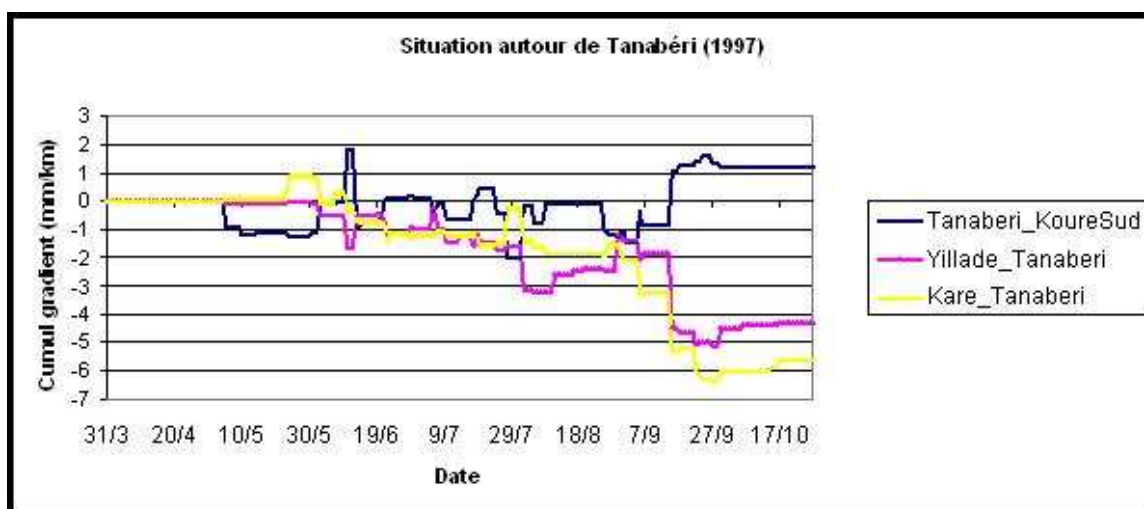


Figure 35 : Un exemple très illustratif de l'effet de quelques événements

La figure 36 indique le nombre de couples avec persistance détecté, par année, durant la période d'observation, ainsi que le nombre de couples empreints d'une éventuelle persistance.

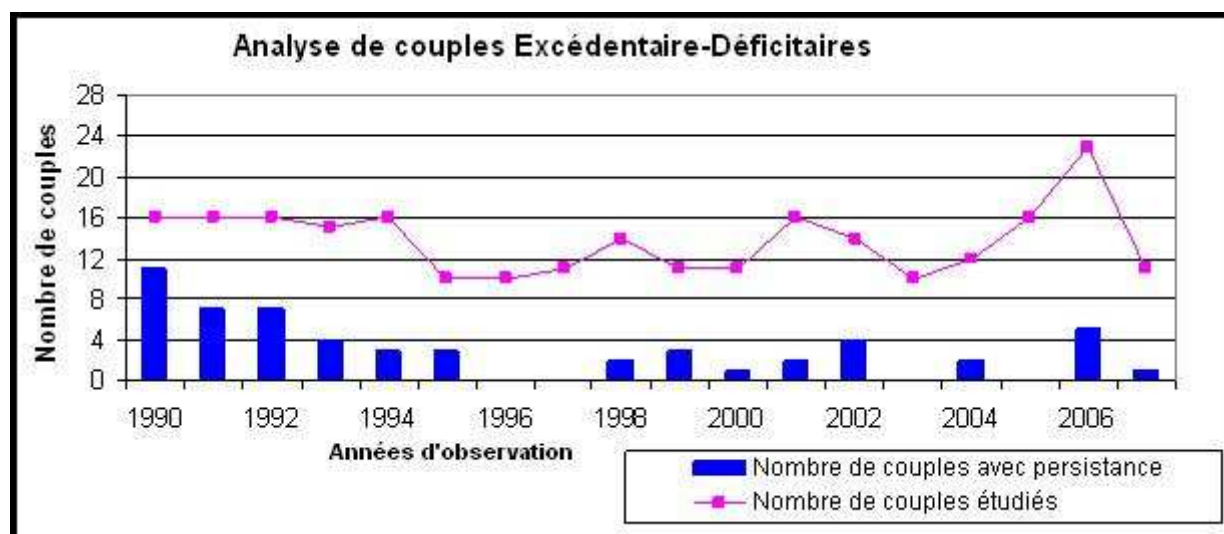


Figure 36 : Nombre des couples avec persistance de 1990 à 2007

VII. Analyse de la persistance à partir des événements pluvieux

Dans cette partie on cherche à caractériser de manière plus fine la persistance éventuelle entre les événements pluvieux. Le but est de voir si des effets de persistance tels que mis en évidence par Taylor et Lebel (1998) pour le cas particulier de l'année 1992, peuvent se retrouver au cours des autres années (jusqu'en 2007). On se base donc dans cette partie principalement sur les travaux de Taylor et Lebel (1998) en utilisant les différents critères de traitement qu'ils avaient définis. Cette étude est ensuite complétée par une analyse de corrélation directe entre des événements pluvieux consécutifs.

On utilise dans cette partie les données pluviométriques au pas de temps horaire et on se réfère aux travaux de D'Amato (1998) qui considère qu'on a un nouvel événement pluvieux lorsqu'aucune station du réseau n'a enregistré de pluie pendant 30 minutes, mais avec les données horaires on prendra une heure.

VII. 1 Etude sur la base des critères de l'étude précédente

L'objectif de cette partie est de se placer dans des conditions idéales de persistance et de voir si effectivement elle va se produire. On expose d'abord les critères définis par Taylor et Lebel (1998) permettant d'atteindre ces conditions. Puis on présente quelques événements pour lesquels l'effet de persistance semble avéré et d'autres pour lesquels elle ne l'est pas.

VII. 1.1 Critères d'analyse

Critère 1: La hauteur de pluie au niveau de toutes les stations retenues doit être supérieure à un seuil $T=1$ mm (événement i)

Critère 2: Toutes les stations se trouvant aux alentours d'une station retenue au critère 1 dans un rayon de 30 km doivent avoir une hauteur de pluie supérieure ou égale à la moitié de T (événement i)

Critère 3: Pour éviter d'avoir un grand nombre d'échantillons dans une zone, les centres de gravité des différents couples de stations doivent être distants de plus de 7 km et dans le cas échéant on prend le couple ayant le plus fort gradient au cours de l'événement i . Ce critère a été modifié par rapport à l'original.

Critère 4: Qu'il n'ait pas plu au niveau des deux stations le jour précédent c'est-à-dire au moins six heures de phase sèche ($\Delta 1$) entre les deux événements (jour $i-1$ sec) (figure 37). Il ne doit y avoir de pluie qu'à l'une seulement des deux stations au cours de l'événement précédent (événement $i-1$), la seconde station est restée sèche jusqu'à l'événement i . La pluie enregistrée à la station humide au cours de l'événement précédent doit être supérieure à 1 mm.

Critère 5: Qu'on ait au moins deux jours secs avant le précédent événement pluvieux ($\Delta 2$ d'au moins 48 heures)

L'intérêt d'un $\Delta 1$ d'au moins six heures est d'avoir une phase d'évaporation après le précédent événement pluvieux et aussi $\Delta 1$ doit être inférieur à deux jours. Une phase d'évaporation de plus de deux jours entrainera d'après les explications de Taylor et Lebel (1998) une évaporation de l'humidité profonde du sol due aux événements pluvieux passés il

y'a plus de deux jours avant. C'est cette même hypothèse qui fait qu'on exige un delta 2 d'au moins deux jours. L'évaporation entre l'événement i-1 et l'événement i ne va pas solliciter l'humidité due à l'événement i-2.

SCHEMA DE LA SUCCESSION DES EVENEMENTS PLUVIEUX

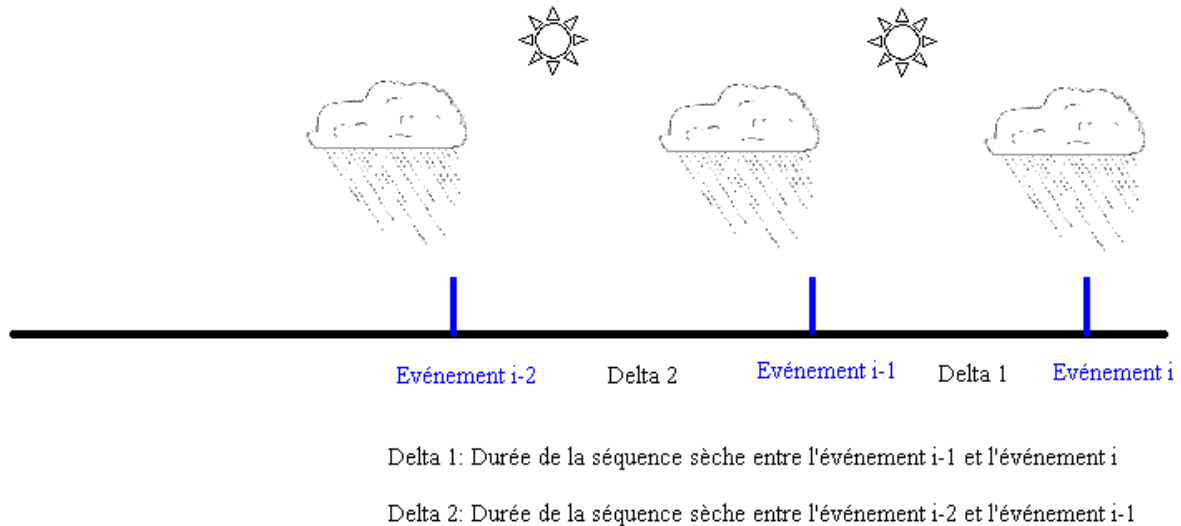


Figure 37 : Schéma des conditions de manifestation d'une persistance entre deux événements consécutifs

Les critères ont été appliqués sur les données horaires de la période 1990-2007 et ont permis d'identifier 76 événements réunissant les conditions de persistance potentielle.

VII. 1.2 Quelques événements avec persistance

Sur les 76 événements sélectionnées par les critères de Taylor et Lebel (1998) 14 événements ont été identifiés comme persistants.

L'analyse est faite ici, à partir des gradients des couples de stations. On calcule le coefficient de corrélation r^2 entre les gradients de l'événement antérieur et ceux de l'événement du jour, et le pourcentage des couples ayant présenté une persistance c'est-à-dire gardé le même type de gradient (taux de persistance). On dit qu'on est en présence d'une persistance lorsque le r^2 est supérieur à 0,3 et un taux de persistance supérieur à 60%. Dans certains cas, on considère plus le pourcentage des couples ayant un même type de gradient pour les deux événements.

On va présenter dans le détail les résultats des deux événements dont la persistance est la plus marquée. Le premier est l'événement du 22/07/1992 qui fut aussi identifié par Taylor et Lebel (1998). Le second événement est celui du 07/07/1993.

VII.1.2.1 Evénement du 22/07/1992

C'est un événement d'une hauteur de pluie moyenne de 28 mm avec un maximum de 72,5 mm et qui a touché l'ensemble des stations situées à l'intérieur du degré carré. Il fut précédé 45 heures (delta 1) avant, c'est à dire le 20/07, par un événement qui n'a touché que 30% des stations du réseau et avec un maximum de 28 mm. Cet événement fut aussi précédé par un autre événement, environ 48 heures (delta 2) avant (figure 37). Donc, on est dans une situation qui répond bien aux critères définis avec une forte disparité spatiale de l'événement antérieur qui est suivi par une phase sèche d'au moins 6 heures de soleil pour favoriser l'évaporation.

L'analyse des couples a permis d'en sélectionner 109 sur lesquels on a obtenu un taux de persistance (cf IV.2.2) de 71% soit 77 couples qui ont gardé le même type de gradient. L'ajustement de la répartition des points sur le graphique (figure 38) donne une droite croissante bien orientée du troisième cadran au premier cadran et un r^2 de 0,34.

Comme déterminé dans la précédente étude (Taylor et Lebel 1998), les deux représentations montrent bien un effet de persistance de l'événement du 20/07/1992 sur l'événement du 22/07/1992. Cet effet est beaucoup plus net lorsqu'on ne considère, pour l'événement antérieur, que des stations ayant enregistré plus de 10 mm de pluie. L'ajustement est bien meilleur avec un r^2 de 0,54 (figure 39).

Sur les deux cartes des isohyètes correspondantes aux deux événements pluvieux, on remarque une direction très humide le long de la diagonale, Nord-Est et Sud-Ouest (figure 40).

Notons que la sélection de cet événement nous a permis de vérifier la cohérence de notre algorithme en comparaison de ceux présentés par Taylor et Lebel (1998) sur le même événement.

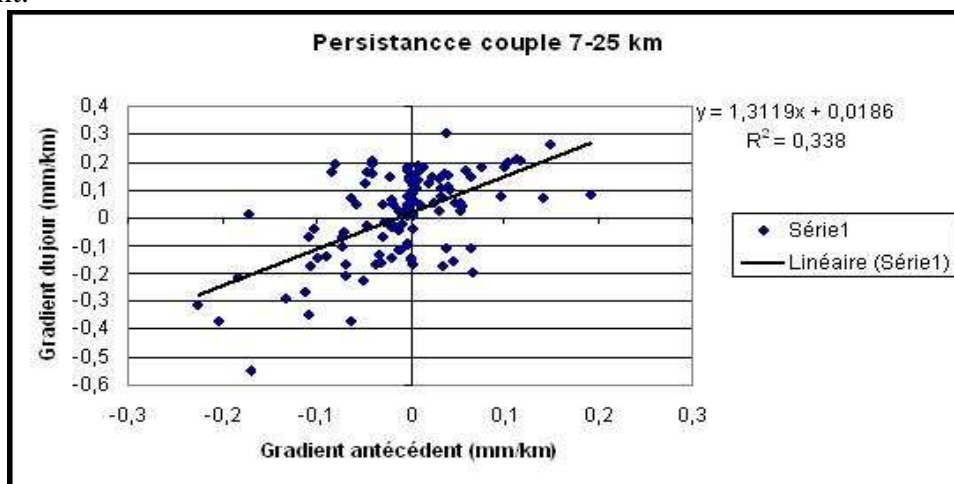


Figure 38: Corrélation entre gradient antérieur 20/07/1992 et du jour au 22/07/1992 (seuil T de 1 mm)

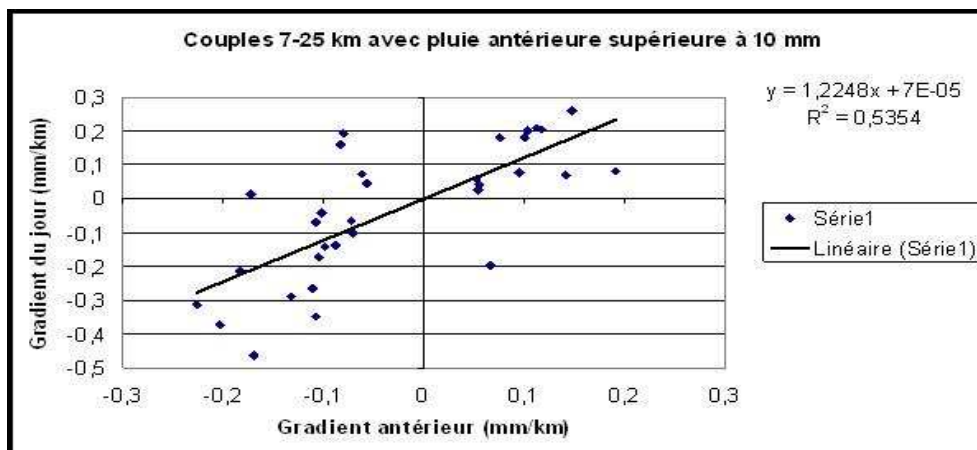


Figure 39 : Corrélation entre gradient antérieur et du jour au 22/07/1992 (seuil T de 10 mm)

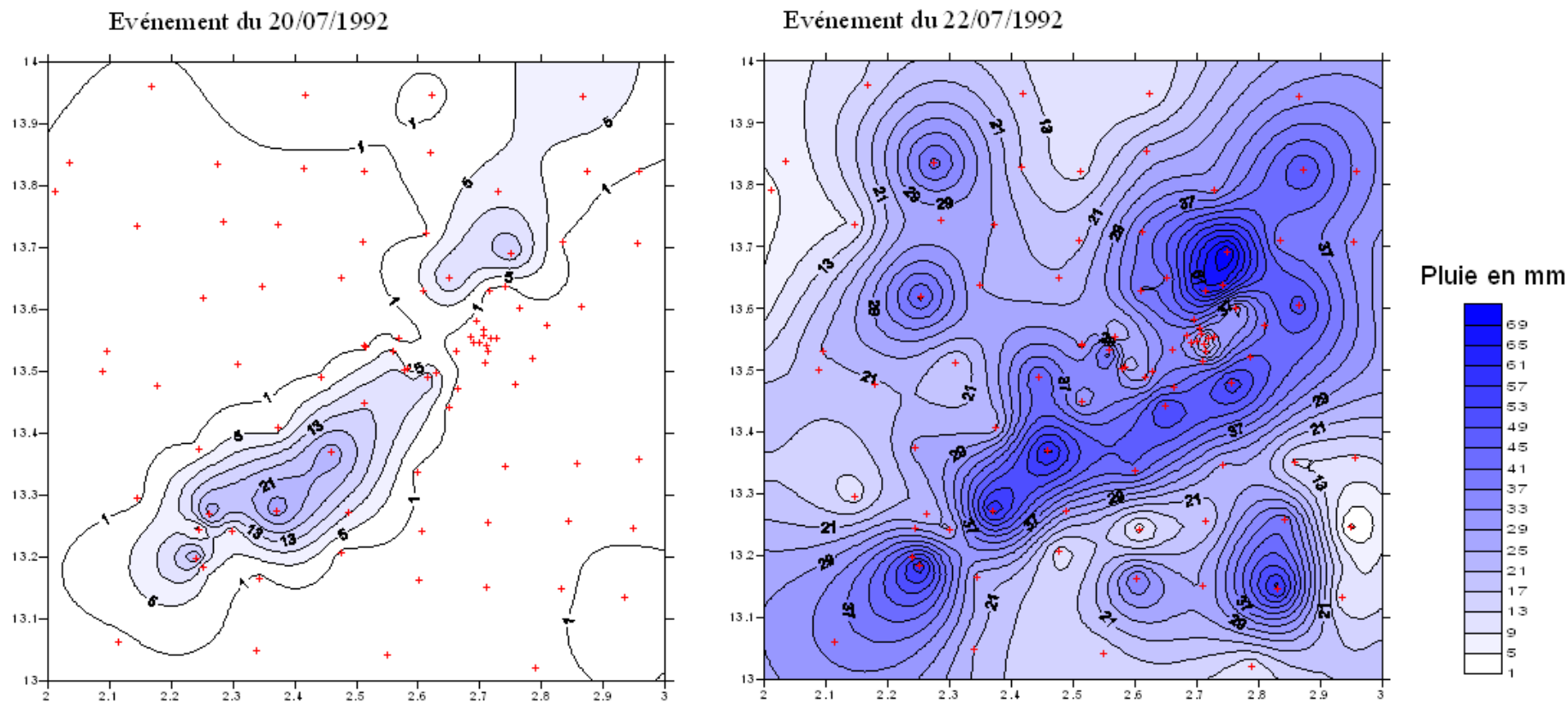


Figure 40 : Isohyètes de deux événements consécutifs, le 20/07/1992 et 22/07/1992

VII.1.2.2 Événement du 07/07/1993

C'est un événement très important qui a touché plus de 95% des stations du réseau avec une hauteur maximale de 71 mm et une moyenne de 20 mm. Cet événement a eu lieu dans la nuit du 07 au 08/07, il fut donc précédé de l'ensoleillement de la journée du 07/07 (delta 1). La journée du 06/07 fut orageuse de 7h du matin à minuit avec une phase d'interruption de 13h à 22h. Cet événement a touché 87% du réseau avec 13 stations sans pluie. On a enregistré une hauteur maximale de 29,5 mm et une moyenne de 9 mm. L'événement du 06/07 fut précédé de 50 heures (delta 2) sans pluie soit deux jours d'assèchement comme l'exige les critères.

Le traitement de données a permis de constituer 58 couples de stations distantes de 7 à 25 km. Seuls trois de ces couples n'ont pas présenté le même type de gradient pour les deux événements, ce qui fait un taux de persistance de 95%.

L'ajustement des gradients du jour en fonction des gradients antérieurs donne une droite croissante avec un r^2 de 0,7. Ce qui montre qu'il y a bien eu une persistance entre les deux événements avec une bonne reproduction des types de gradients (figure 41).

La comparaison des cartes des isohyètes des deux événements montre une même zone de forte pluie dans la partie centrale (figure 42).

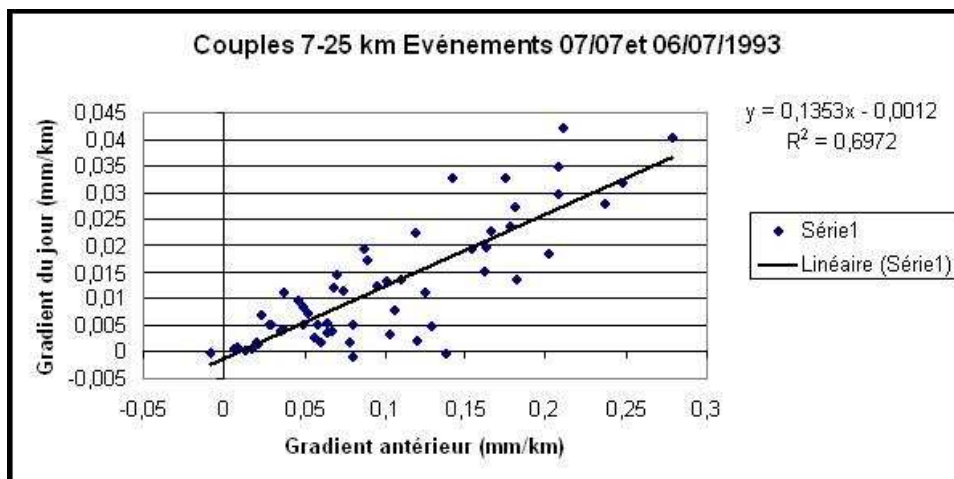
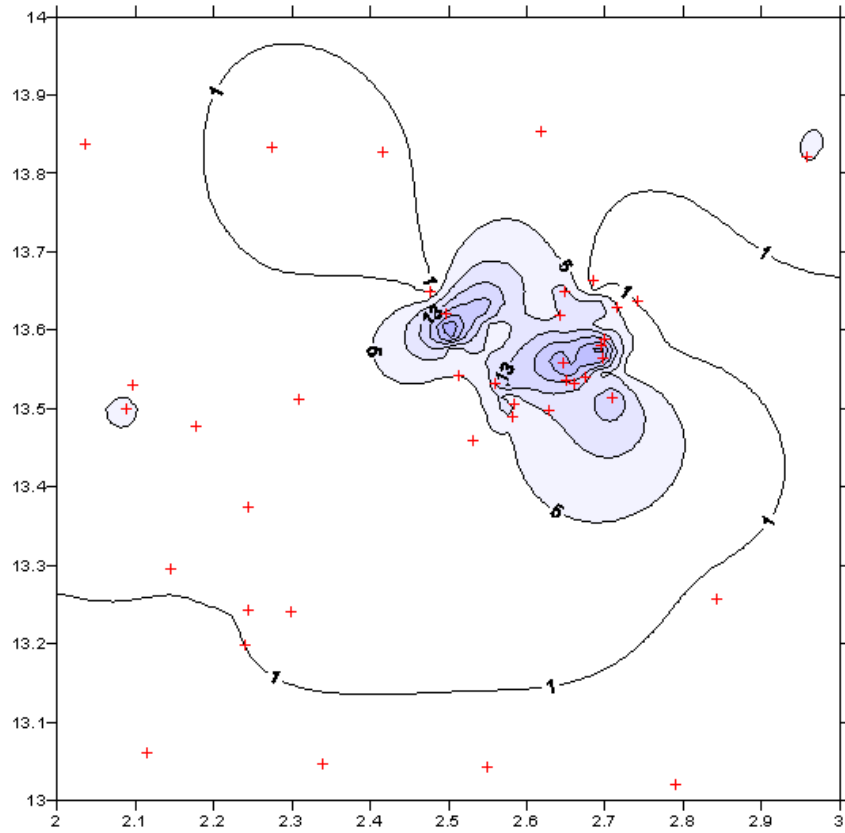


Figure 41 : Corrélation entre gradient antérieur 06/07/1993 et du jour au 07/07/1993 (seuil T de 1 mm)

Événement du 06/07/1993



Événement du 07/07/1993 à partir de 20h

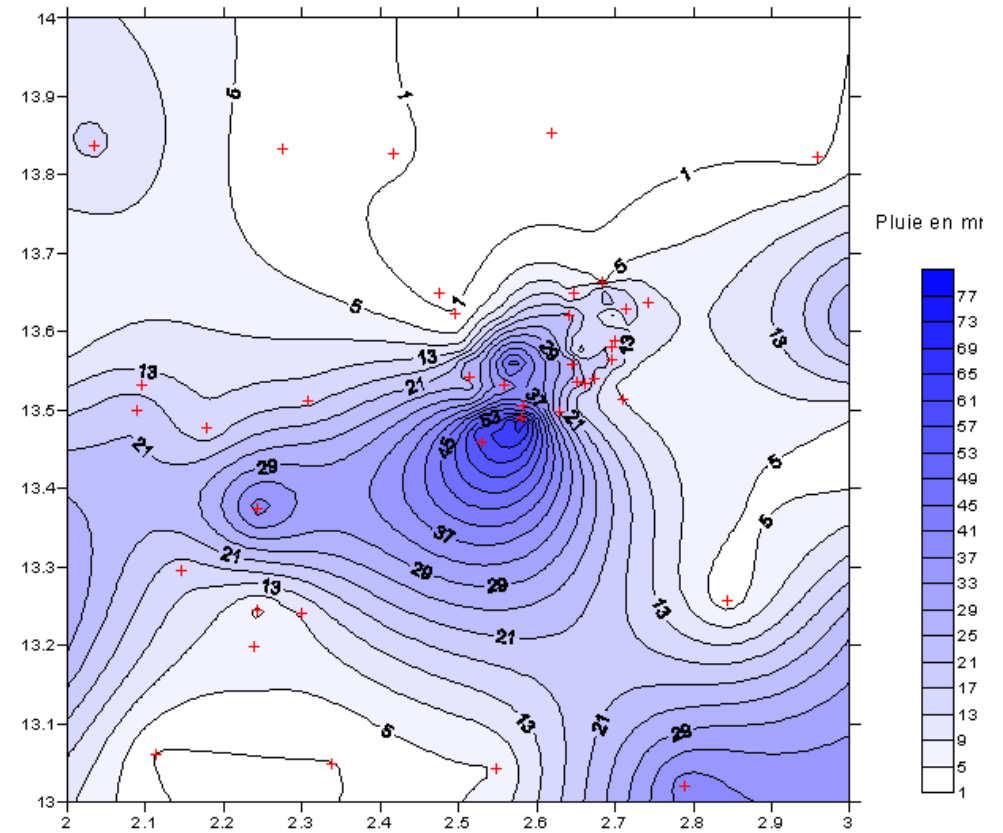


Figure 42 : Isohyètes de deux événements consécutifs, le 06/07/1993 et 07/07/1993

VII. 1.3 Quelques événements sans persistance

VII.1.3.1 Événement du 07/09/1990

L'événement du 07/09/1990 a arrosé 87% de 92 stations du réseau. On a enregistré une hauteur de pluie maximale de 72 mm avec une moyenne de 15 mm. Il fut précédé 45 heures (delta 1) avant c'est-à-dire le 05/09 par un événement qui a concerné 80% des stations du réseau, avec une pluie maximale de 40,5 mm et une moyenne de 8 mm. Il est lui aussi précédé par plus de deux jours et demi (delta 2) sans pluie.

Dix neuf couples de 7-25 km ont pu être constitués pour l'ajustement. L'analyse des gradients du jour et antérieurs montre une mauvaise corrélation entre les deux, r^2 de 0,02 et un taux de persistance de 42%, ce qui est en deçà du seuil (figure 43).

Les isohyètes des deux événements montrent même une contre persistance, les zones précédemment sèches sont les plus arrosées au cours de l'événement suivant (figure 44).

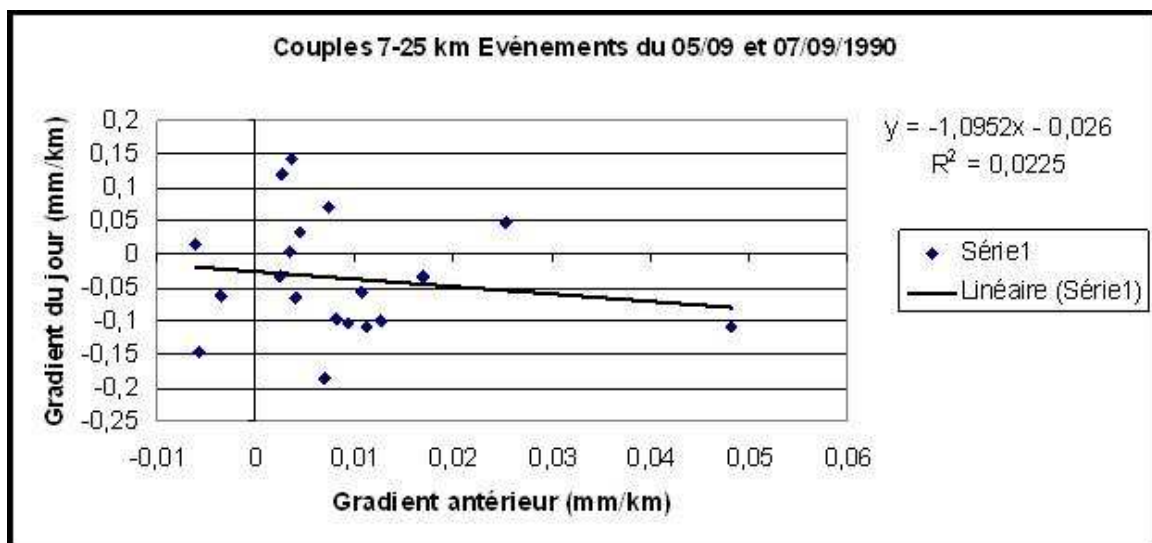


Figure 43 : Corrélation entre gradient antérieur 05/09/1990 et du jour au 07/09/1990 (seuil T de 1 mm)

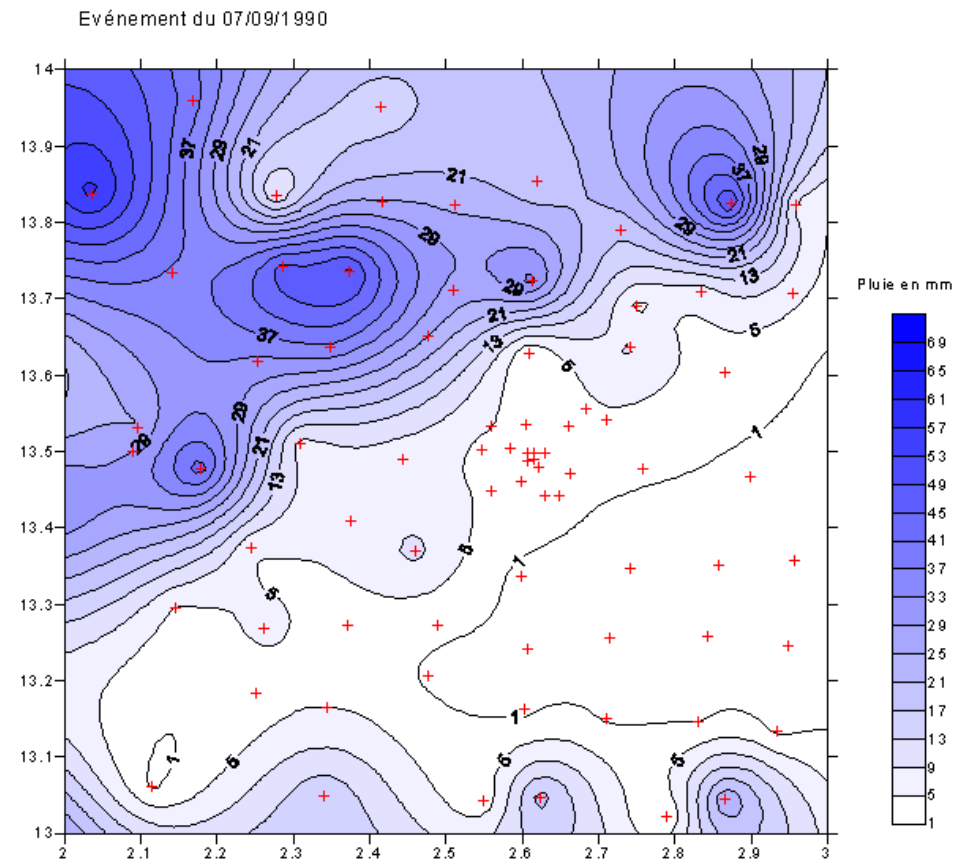
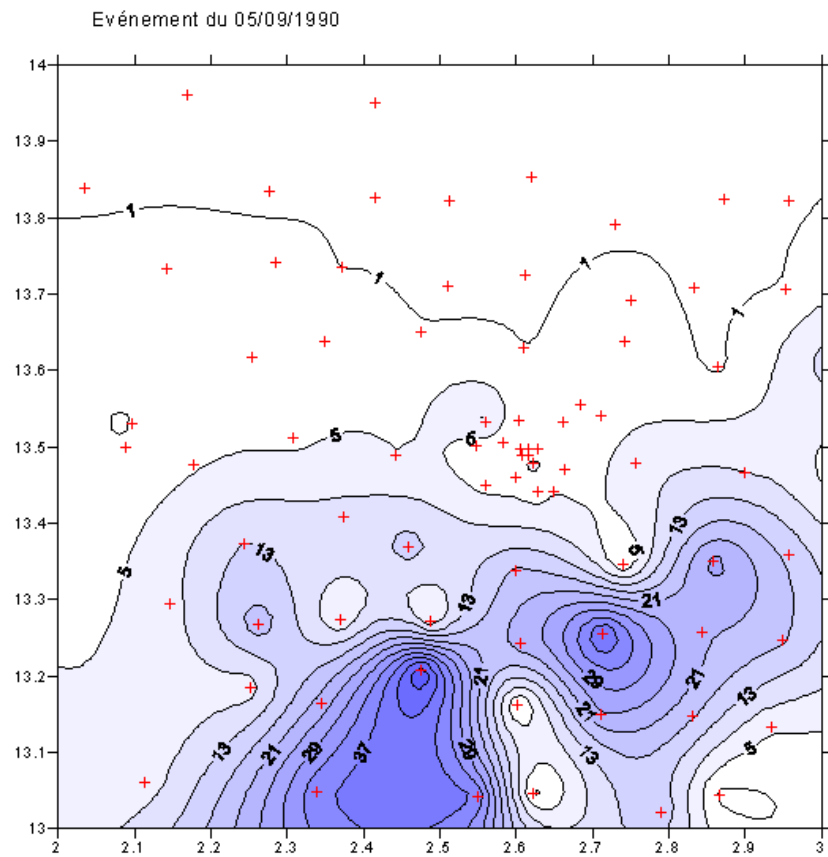


Figure 44 : Isohyètes des événements sans persistance du 05/09/1990 et 07/09/1990

VII.1.3.2 Événement du 03/06/2002

C'est un événement qui a touché l'ensemble des stations du réseau. On a enregistré une hauteur de pluie maximale de 63 mm avec une moyenne de 22,5 mm. Il fut précédé par une séquence sèche de 18 heures (du 03/06 à 3h au 03/06 à 21h) (delta 1), et l'événement antérieur du 02/06 est aussi précédé de plus d'une semaine de phase sèche (delta 2).

L'événement du 02/06 a touché 45% du réseau avec une hauteur de pluie maximale de 51,9 mm et une moyenne de 9 mm.

Cette situation correspond bien aux conditions favorables à la manifestation d'une persistance de l'événement antérieur sur l'événement suivant. Sur les 15 couples constitués, on a obtenu un taux de persistance de 47% et un coefficient d'ajustement de r^2 de 0,01 (figure 45).

Cependant, les deux observations, à partir des cartes des isohyètes et à partir du calcul des gradients entre les stations distantes de 7 à 25 km, ne révèlent aucune persistance (figure 46).

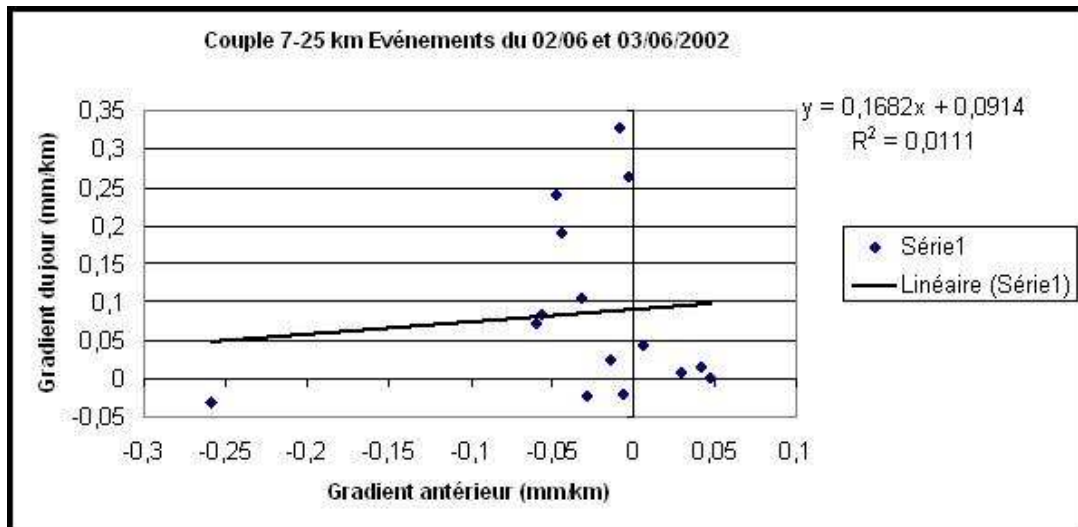


Figure 45 ; Corrélation entre gradient antérieur 02/06/2002 et du jour au 03/06/2002 (seuil T de 1 mm)

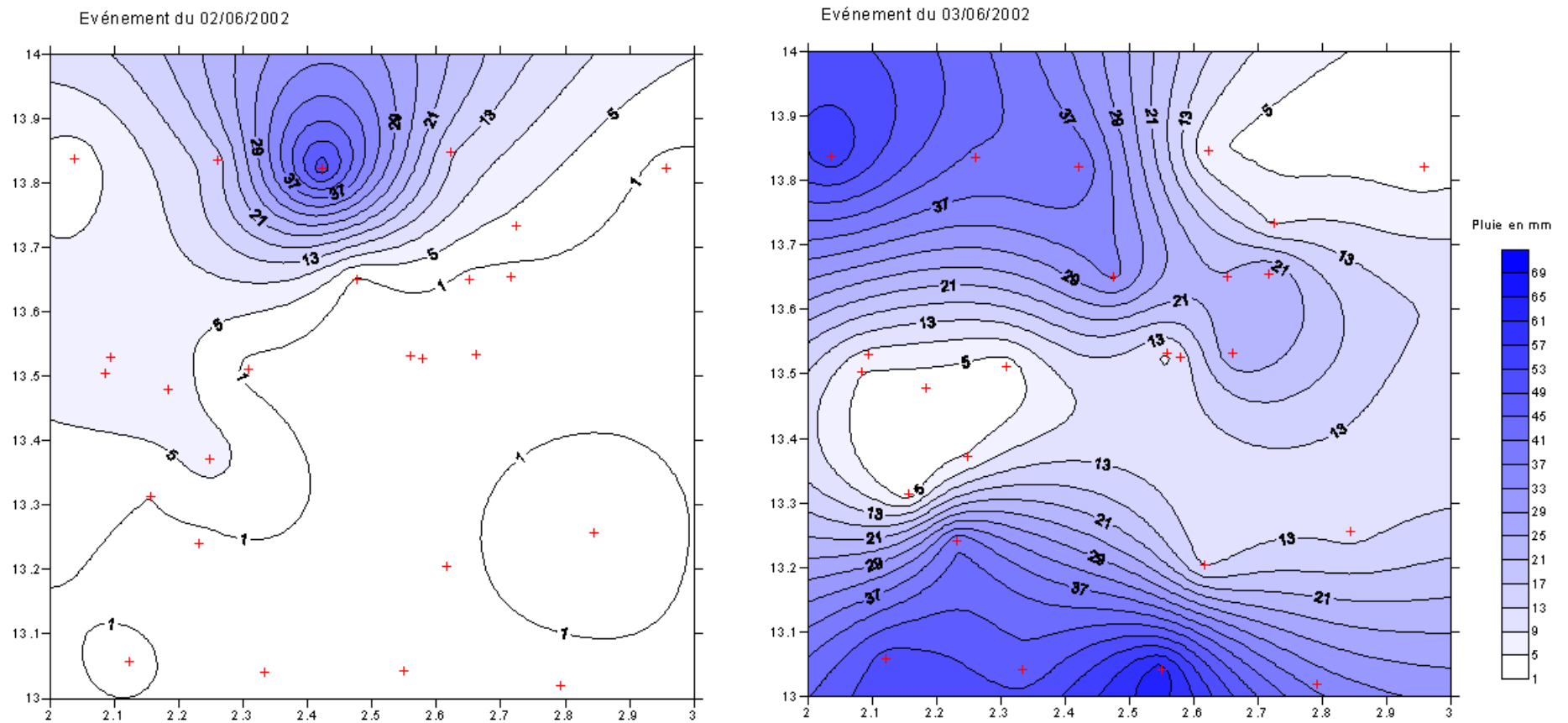


Figure 46 ; Isohyètes des événements sans persistance du 02/06/2002 et 03/06/2002

VII. 1.4 Résultats de l'analyse

Sur l'ensemble des saisons de 1990 à 2007, on a obtenu soixante seize (76) événements qui répondent aux critères énumérés ci-dessus.

Sur ces 76 événements, seuls 14 événements soit 18% ont présenté une certaine persistance.

Il est à noter qu'il y a des années avec un seul événement répondant aux critères et en 2001 on n'a eu aucun événement qui respecte les conditions (figure 47).

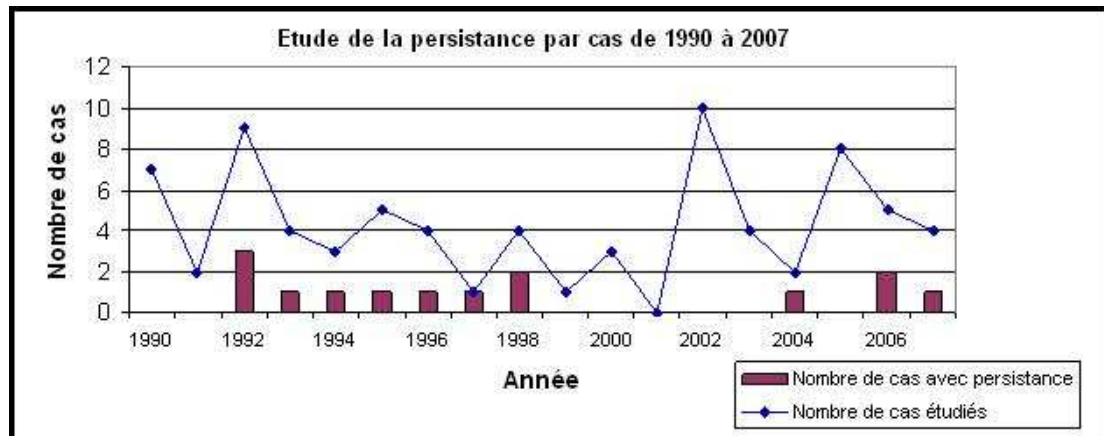


Figure 47 : Nombre d'événements avec persistance par saison de 1990 à 2007

VII. 1.5 conclusion partielle

Cette analyse, basée sur les critères définis au cours de la précédente étude, confirme qu'il semble bien avoir un phénomène de persistance pour l'événement du 22/07/1992.

Cependant, on trouve que seuls 18% des événements répondants à ces critères présentent un aspect de persistance. On peut conclure que les seules conditions définies par la précédente étude ne sont pas suffisantes pour engendrer une situation de persistance.

Il est à noter qu'étant donné que l'analyse des gradients du jour en fonction des gradients antérieurs ne concerne que quelques couples, il y a des risques d'omettre certaines parties de la zone d'étude.

D'ailleurs sur les cartes d'isohyètes de l'événement du 22/07/1992 et 07/07/1993, on remarque des parties plus sèches pour l'événement antécédent devenir plus humides que celles qui étaient déjà humides. On peut dire qu'on n'a pas une persistance globale sur l'ensemble de la zone mais sur quelques parties.

VII. 2 Analyse sur la base de la corrélation entre événements consécutifs

La recherche des cas de persistance est fondée sur le calcul du coefficient de corrélation entre des événements consécutifs. Le seul critère est qu'il y ait plus d'une dizaine de stations arrosées au cours des deux événements.

De 1990 à 2007, 250 cas ont été analysés, et seulement sur une douzaine de cas (soit 5%), on a obtenu un coefficient de corrélation supérieur à 0,6. Les cas les plus intéressants sont ceux des événements du 05/09/1990 et du 01/09/1997.

L'événement du 05/09/1990, d'une hauteur maximale 49,5 mm et d'une moyenne de 7 mm présente une bonne corrélation (r^2 de 0,39 ; figure 48) avec l'événement antécédent du 02/09/1990 (maximale de 102,5 mm et une moyenne de 16,5 mm). On a un delta 1 de deux jours et demi et un delta 2 de plus de trois jours.

Les cartes des indices de pluie (figure 49) montrent que cette persistance n'est pas générale car au delà de la latitude 13,8° on a deux situations différentes.

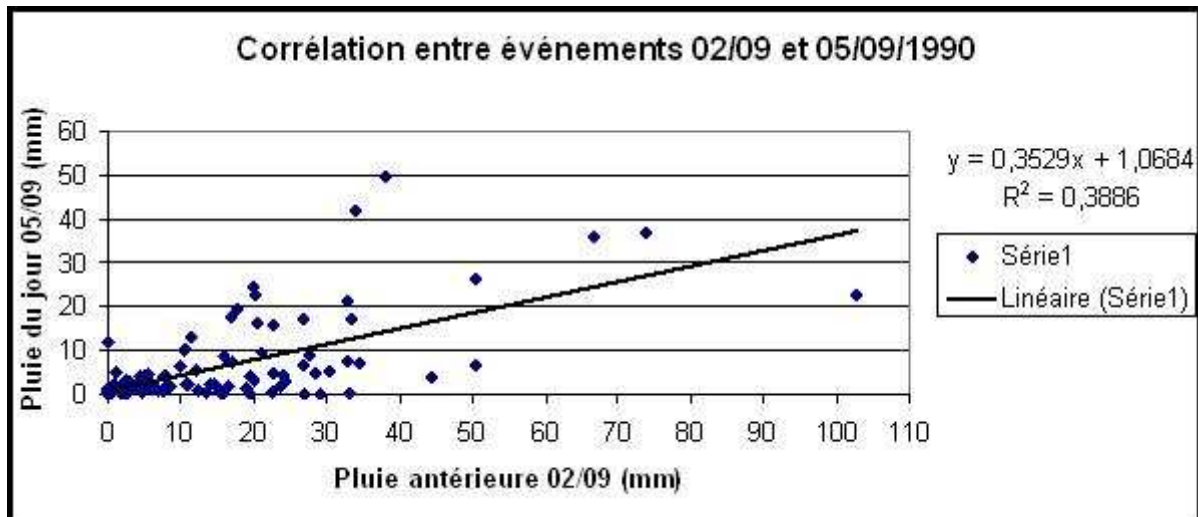


Figure 48 : Persistance par corrélation directe entre les événements du 02/09/1990 et 05/09/1990

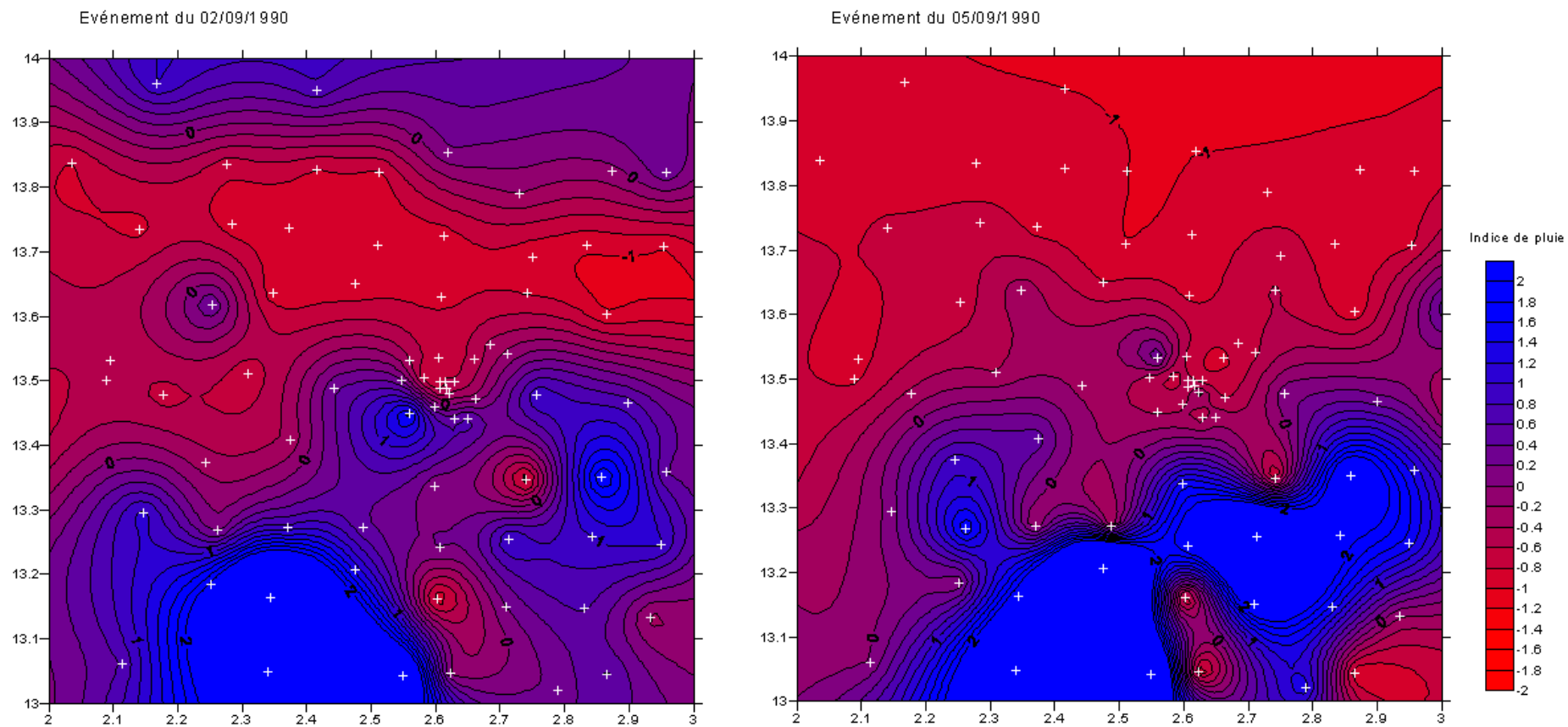


Figure 49 : Indice de pluie entre les événements du 02/09/1990 et 05/09/1990

L'événement du 01/09/1997 est le mieux corrélé avec l'événement précédent sur toutes les saisons, de 1990 à 2007. Il a produit un maximum de 110 mm à la station de Niamey aéroport et une moyenne de 22 mm sur l'ensemble du réseau. Il fut précédé par l'événement de la nuit du 31/08/1997 au cours duquel on a enregistré une hauteur maximale de 80 mm toujours à la station de Niamey aéroport et une moyenne de 17 mm sur le réseau. La station de Niamey aéroport a été enlevée de l'échantillon afin d'avoir un ajustement plus représentatif de la situation.

La figure 50 montre une excellente corrélation entre les deux événements avec un r^2 de 0,51. Aussi, les cartes des indices de pluie se ressemblent à plus de 80%, en termes de zones excédentaires et déficitaires (figure 51).

On a ici un bon exemple de manifestation de la persistance à travers les événements, seulement les deux événements ne sont séparés que par une phase de 6 heures (delta 1), de 01/09/1997 à 0h au 01/09/1997 à 6h, on peut dire qu'il n'y a pas eu une période d'évaporation entre les deux événements. Le delta 2 est de 11 heures, du 30/08/1997 à 18h au 31/08/1997 à 5h, là aussi pas de phase d'ensoleillement.

Donc, le cas de cet événement ne répond pas aux conditions définies par la précédente étude.

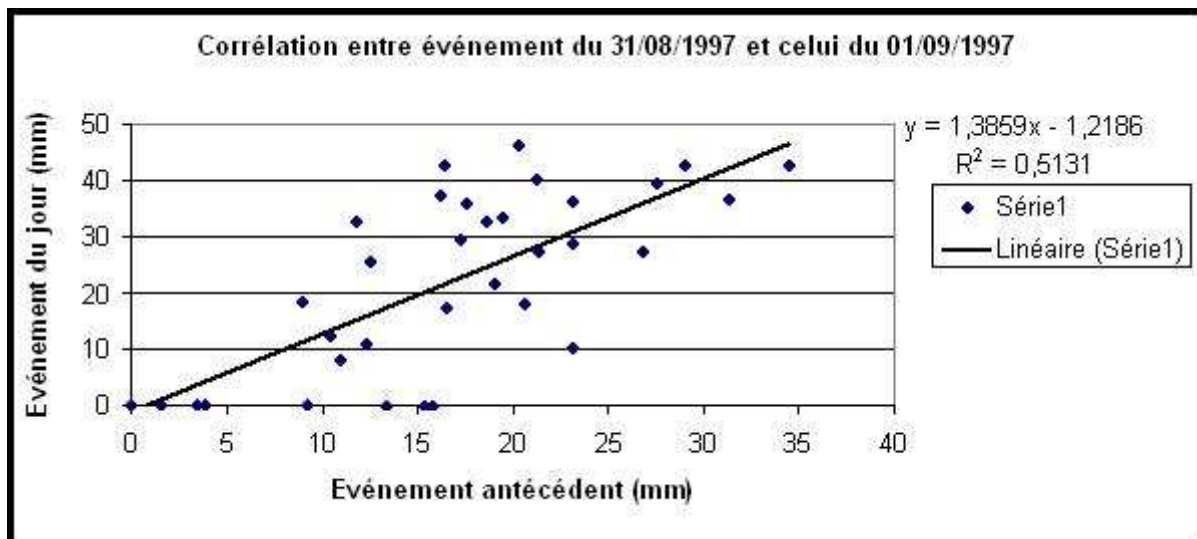


Figure 50 : Persistance par corrélation directe entre les événements du 31/08/1997 et 01/09/1997

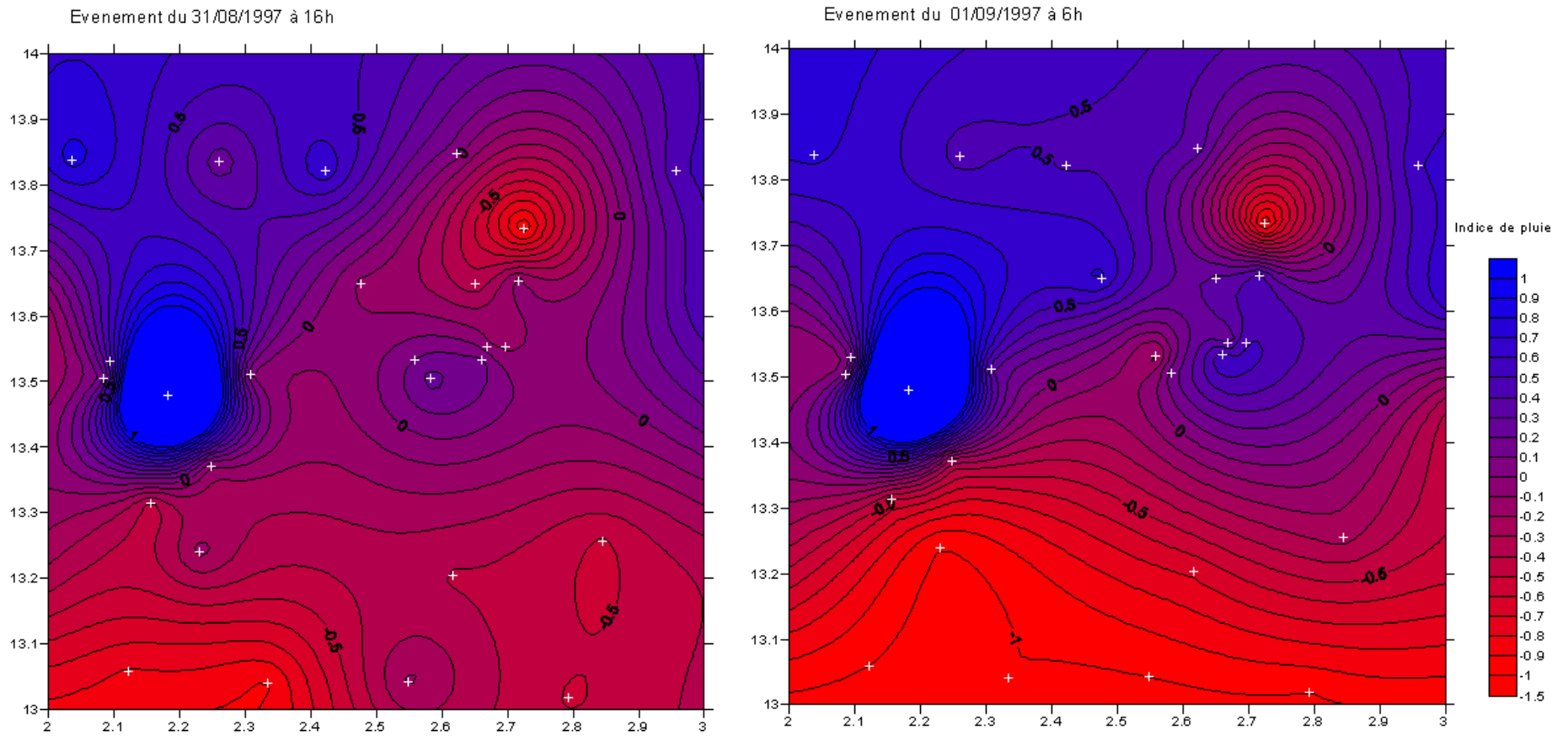


Figure 51 : Indice de pluie entre les événements du 31/08/1997 et 01/09/1997

VIII. Analyse la pluviométrie annuelle

VIII. 1 Orientation du gradient annuel

Cette analyse est faite pour voir s'il n'y a pas une orientation préférentielle dans l'organisation spatiale des gradients. Pour ce faire, on a travaillé sur les deux échantillons, l'échantillon global et l'échantillon soumis à la condition 2. Le tableau 2 présente le résultat moyen sur la période de 1990 à 2007. On voit que les pourcentages de couples de stations orientés suivant les deux principales directions (latitudinale et longitudinale) sont du même ordre de grandeur (50%) sur les deux échantillons. On peut conclure qu'à l'échelle de la saison, on ne détecte aucune direction préférentielle.

Le résultat le plus illustratif de cette situation est celui de la condition 2, où l'échantillon est constitué de façon aléatoire et avec un seuil représentatif du gradient annuel (supérieur à 1 mm/km) considérable par rapport à la moyenne de la zone.

Tableau 2 : Orientations dominantes des couples de stations comportant des gradients répondant aux critères de l'étude

Direction	Global	Condition 2
N S (%)	16,0	23,8
S N (%)	32,8	30,5
E O (%)	23,2	21,8
O E (%)	28,0	23,8

VIII.2 Persistance du gradient annuel

Une comparaison du gradient annuel des couples est faite entre deux saisons successives pour des couples communs. La question est de vérifier à travers l'analyse des gradients annuels, si la station la mieux arrosée au cours d'une saison le sera à la prochaine saison. Cette analyse est faite avec le calcul des deux coefficients, le coefficient de corrélation et celui de persistance de signe. Cette analyse est faite sur les données complètes des stations du réseau standard du degré carré (30 stations).

On note, un mauvais coefficient de corrélation (inférieur à 0,5) (figure 52) et un coefficient de persistance moyen de 50% (tableau 3). Ces résultats traduisent que les saisons sont indépendantes les unes des autres et qu'il n'y a pas un certain effet de mémoire d'une saison à l'autre.

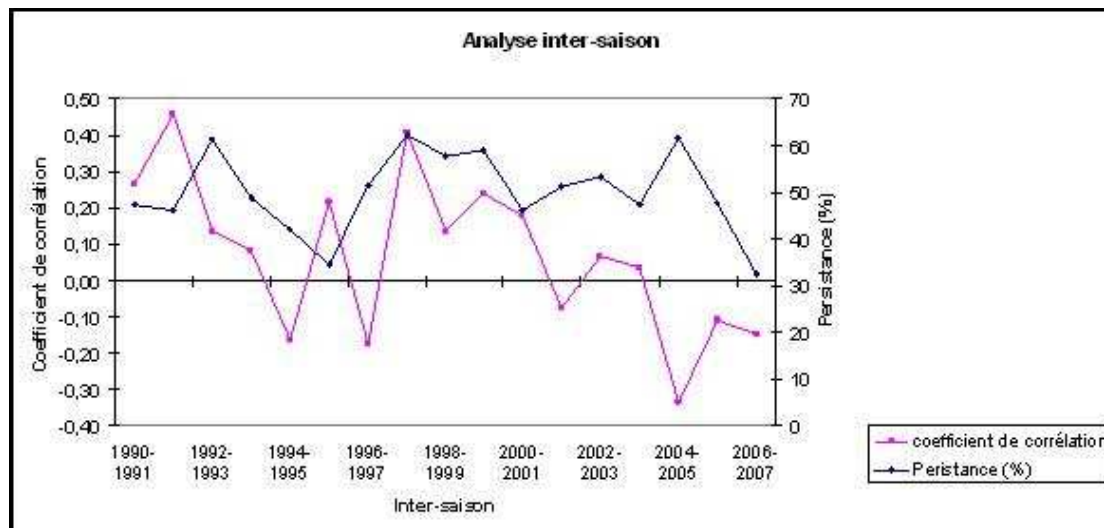


Figure 52 : Coefficient de corrélation et persistance interannuelle entre les gradients annuels de 1990 à 2007

Tableau 3: corrélation et persistance de signe d'une année sur l'autre

Années	coefficient de corrélation	Taux de persistance de signe (%)
1990-1991	0,27	47,27
1991-1992	0,46	46,28
1992-1993	0,14	61,33
1993-1994	0,08	49,00
1994-1995	-0,16	42,12
1995-1996	0,22	34,62
1996-1997	-0,17	51,59
1997-1998	0,41	62,12
1998-1999	0,14	57,93
1999-2000	0,24	59,07
2000-2001	0,18	46,20
2001-2002	-0,08	51,32
2002-2003	0,07	53,28
2003-2004	0,04	47,37
2004-2005	-0,33	61,54
2005-2006	-0,11	47,67
2006-2007	-0,15	32,43

Ce résultat est illustré par la figure 53 qui représente les gradients annuels de quelques couples de stations de 1990 à 2007. Dans l'ensemble, on constate que les courbes oscillent autour de l'axe de la valeur 0 (figure 53). Aucune tendance n'est détectée sur l'ensemble des dix huit saisons.

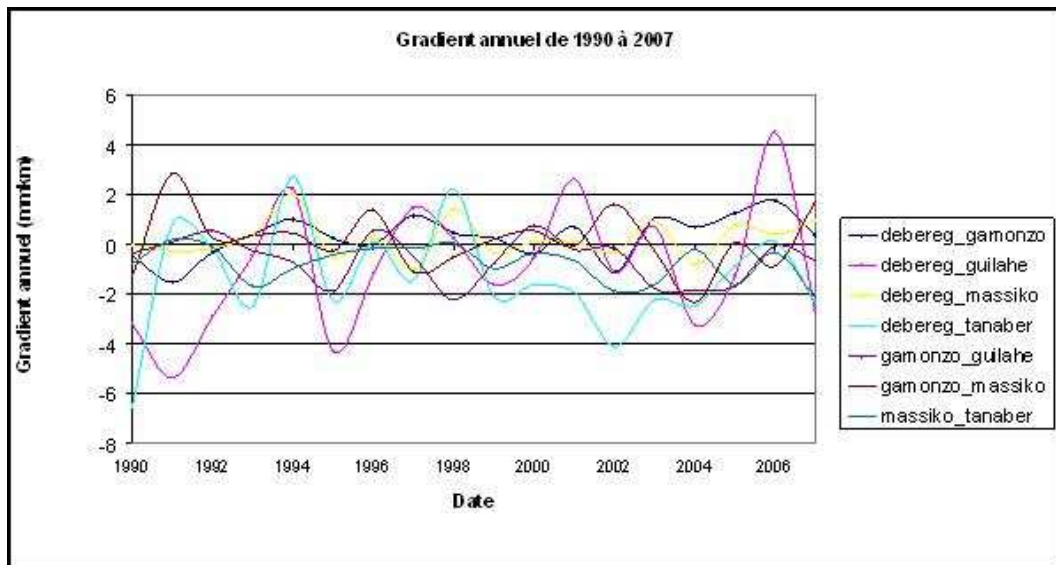


Figure 53 : Evolution interannuelle du gradient saisonnier de 1990 à 2007 pour quelques couples

Conclusion

Les deux précédentes études sur l'analyse de la pluviométrie sur le degré carré de Niamey ont constaté la manifestation d'une certaine persistance au sein de la saison 1992.

Elles ont surtout présenté deux cas de persistance, une persistance sur sept semaines entre les stations de Diokoti et Djakindji et une entre l'événement pluvieux du 22/07/1992 et celui du 20/07/1992. Ces cas de persistance ont bien été identifiés au cours de la présente étude. Cependant l'analyse de plusieurs autres cas d'événements favorables à une manifestation de la persistance pluviométrique montre une certaine nuance.

Ainsi, une analyse des couples ayant un fort gradient annuel révèle que seuls 22% (55 couples) des 248 cas identifiés sur les dix huit saisons ont présenté des phases de répétition de gradient de même signe (RGMS). Il est à noter, qu'au sein d'une même saison, il y a des couples qui n'ont pas eu ce type de comportement à la même période. Aussi, un fort gradient annuel n'est pas automatiquement synonyme d'une quelconque persistance, mais d'un contraste dû à quelques événements éloignés dans le temps.

Aussi, l'analyse des événements pluvieux montre que sur les soixante seize événements satisfaisant aux conditions de production d'une persistance, on n'a pu identifier une certaine persistance que sur 14 d'entre eux (soit 18% du total).

Une autre analyse sur l'identification des événements corrélés avec l'événement antécédent a montré des cas de persistance entre des événements consécutifs sans que ces événements ne remplissent les conditions de persistance définies par la précédente étude.

Somme toute, bien que des cas de persistance aient été identifiés entre des événements pluvieux consécutifs et même entre deux stations, la notion de persistance pluviométrique doit être limitée à un domaine spatial et temporel de faible étendue. Le fait d'observer une persistance pluviométrique entre deux stations quelconque pendant une certaine période de la saison ne signifie pas que la situation est générale sur l'ensemble du réseau.

Recommandations

Cette étude de persistance entre les événements pluvieux à partir des données pluviométriques révèle certaines insuffisances. On a un faible taux de cas de persistance sur l'ensemble des saisons de 1990 à 2007. Il sera plus intéressant d'entreprendre une étude de la persistance pluviométrique en incluant d'autres paramètres météorologiques des orages comme évoqués par Chen et Avissar (1994). Les études précédentes définissent les perturbations sur la couche limite engendrées par l'évaporation comme étant le moteur principal de la persistance. Or on sait que la capacité d'évaporation de l'air n'est pas constante sur toute la saison et aussi qu'on n'a pas un couvert végétal uniforme sur toute la zone. Il sera donc intéressant de caractériser l'intensité de cette perturbation locale dans la couche limite avant l'orage et aussi de connaître la force de ces orages. En effet, au Sahel, les pluies dues aux lignes de grains sont généralement précédées de vents très forts. Une distinction aussi doit être faite entre les événements dus aux lignes de grains et les événements dus aux convections locales.

Il faudra dans le futur pour une analyse plus pertinente tenir compte des conditions météorologiques avant les orages et l'intensité de ces orages.

Références bibliographiques

Altin Théodore Mantho 2005 : Echange sol-atmosphère application à la sécheresse. Thèse de doctorat, spécialité géotechnique, Ecole nationale des ponts et chaussées de Paris.

Andréassian Vazken, 2002 : Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de doctorat, université Paris VI.

Anthes, R. A. 1984 : Enhancement of Convective Precipitation by Mesoscale Variations in Vegetative Covering in Semiarid Regions. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 23, Issue 4, pp.541-554.

Balme-Debionne Maud, 2004: Analyse du régime pluviométrique sahélien dans une perspective hydrologique et agronomique. Etude d'impact de sa variabilité sur la culture du mil. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

Charney, J. G. 1975: Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 101. 193-202.

Chen Fei et Avissar Roni, 1994: Impact of Land-Surface Moisture Variability on Local Shallow Convective Cumulus and Précipitation in Large-Scale Models *Journal of applied meteorology, Department of Meteorology and Physical Oceanography, Rutgers University, New Brunswick, New Jersey.*

D'Amato Nathalie, 1998: Etude climatologique et statistique des événements pluvieux en zone sahélienne, analyse à partir des données pluviographiques de l'expérience EPSAT-Niger. Thèse de doctorat, université de Montpellier II, sciences et techniques de Languedoc.

Descroix Luc, 1994 : L'érosion actuelle dans la partie dans la partie occidentale des Alpes du sud. Thèse de doctorat, université Lyon II.

Koster, R. et co-auteurs, 2004: Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, 305:1138-1140.

Lanicci, J. M., Carlson, and T. T. Warner, 1987: sensitivity of the great plains severe-storm environment to soil moisture distribution. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 2660-2673.

Massuel S., 2005: Evolution récente de la ressource en eau consécutive aux changements climatiques et environnementaux du sud-ouest Niger. Modélisation des eaux de surface et souterraines du bassin du kori de Dantiandou sur la période 1992-2003. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II.

Philippon, N. et Fontaine, B., 2002: The relationship between the Sahelian and previous 2nd Guinean rainy seasons: a monsoon regulation by soil wetness? *Annales geophysicae*, 20:575-582.

Rabin Robert M., Steven Stadler, Peter J. Wetzel, David J. Stensrud, et Mark Gregory, 1990: Observed Effects of Landscape Variability on Convective Clouds. *Bulletin American Meteorological Society*, Vol. 71, No. 3, March 1990.

Taylor, C. M., F. Saïd, et T. Lebel, 1997: Interactions between the Land Surface and Mesoscale Rainfall Variability during HAPEX-Sahel. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 2211-2227.

Taylor, C. M. et T. Lebel, 1998: Observational evidence of persistent convective rainfall patterns. *American Meteorological Society*, june 1998, 1597-1607.

Taylor, C. M.; Parker, D. J.; Lloyd, C. R.; Thorncroft, C. D. 2003: Observing synoptic scale land surface variability and its impact on the atmosphere. *EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Abstracts from the meeting held in Nice, France, 6 - 11 April 2003.*

Trier, S.B., Chen, F., Manning, K.W., LeMone, M.A, and Davis, C.A., 2008: Effects of regional soil moisture anomalies on PBL moisture and precipitation over the Central United States. National Center for Atmospheric Research, Colorado; Gewex News Feb 2008.

Xue Y. et al, 2006: Role of land surface processes in South American monsoon development. *University of California Postprints*, year 2006, paper1332.

Page web1 : http://www.secheresse.info/article.php3?id_article=388

Page web2: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=5333568>

Liste des figures

Figure 1 : zone d'étude.....	7
Figure 2 : Mécanisme climatique de la mousson (Source : Massuel 2005).....	7
Figure 3 : Variation saisonnière moyennée par mois de la température, de l'ETP, et de la pluie à la station de Niamey aéroport (source : Balme, 2004)	8
Figure 4 : Réseau de 1992	9
Figure 5 : Réseau de 2004	9
Figure 6 : Corrélacion gradient pluviométrique et hauteur de pluie	12
Figure 7 : Deux gros événements de la saison 1998 et 2007	13
Figure 8 : Evolution moyenne de l'orientation des isohyètes annuelles en fonction de la taille de la série des données	14
Figure 9 : occurrence moyenne des séquences sèches de 1990 à 2007.....	15
Figure 10 : corrélation entre gradients d'événements pluvieux consécutifs pour toutes les stations.....	16
Figure 11 : corrélation entre gradients d'événements pluvieux consécutifs pour les 30 stations	16
Figure 12 : Evolution du cumul de gradient pour quelques couples avec persistance en 1991	17
Figure 13 : Evolution du cumul de gradient pour quelques couples avec persistance en 2006	17
Figure 14 : Evolution du cumul de gradient de quelques couples sans persistance en 1991 ...	18
Figure 15 : quelques exemples de couples sans tendance sur le cumul des gradients en 2006	18
Figure 16 : Corrélacion entre cumul pluvieux au 17/06/2005 et le cumul annuel.....	19
Figure 17 : Corrélacion entre cumul pluvieux au 07/08/1995 et le cumul annuel.....	19
Figure 18 : Dates de mise en place du gradient saisonnier de 1990 à 2007.....	20
Figure 19 : Pluie moyenne annuelle et poids du cumul pluvieux à la mise en place du gradient saisonnier.....	20
Figure 20 : Cumul de gradient autour de la station excédentaire de Gankibassarou (1991)....	21
Figure 21 : Cumul de gradient autour de la station excédentaire de Sékoukou (1991)	21
Figure 22 : Cumul de gradient autour de la station excédentaire de KoloDiogono (1991)	22
Figure 23 : Cumul de gradient autour de la station excédentaire de Nioumey (1991)	22
Figure 24 : Carte d'indice de pluie à la date de mise en place du gradient saisonnier et en fin de la saison (1991).....	23
Figure 25 : Cumul de gradient autour de la station excédentaire de Bérikoirau (1995)	24
Figure 26 : Cumul de gradient autour de la station excédentaire de Gardana (1995).....	24
Figure 27 : Cumul de gradient autour de la station excédentaire de Guilahel (1995).....	25
Figure 28 : Carte d'indice de pluie à la date de mise en place du gradient saisonnier et en fin de la saison (1995).....	26
Figure 29 : Poids de gradient à l'événement sur le plus fort gradient Sékoukou-Kollo en 1991	27
Figure 30 : Poids de gradient à l'événement sur le plus fort gradient Djakindji-Diokoti en 1992.....	28
Figure 31 : Poids de gradient à l'événement sur le plus fort gradient Fandoubéri-banizoumbou en 2003	28
Figure 32 : Poids de gradient à l'événement sur le plus fort gradient Bérikoira-Fandoubéri en 2006.....	29
Figure 33 : Hauteur moyenne des événements et corrélation spatiale avec le cumul annuel (1992)	30
Figure 34 : Poids des événements et corrélation spatiale avec le cumul annuel (1992)	30

Figure 35 : Un exemple très illustratif de l'effet de quelques événements	31
Figure 36 : Nombre des couples avec persistance de 1990 à 2007	31
Figure 37 : Schéma des conditions de manifestation d'une persistance entre deux événements consécutifs.....	33
Figure 38: Corrélation entre gradient antérieur 20/07/1992 et du jour au 22/07/1992 (seuil T de 1 mm).....	34
Figure 39 : Corrélation entre gradient antérieur et du jour au 22/07/1992 (seuil T de 10 mm).....	34
Figure 40 : Isohyètes de deux événements consécutifs, le 20/07/1992 et 22/07/1992.....	35
Figure 41 : Corrélation entre gradient antérieur 06/07/1993 et du jour au 07/07/1993 (seuil T de 1 mm).....	36
Figure 42 : Isohyètes de deux événements consécutifs, le 06/07/1993 et 07/07/1993.....	37
Figure 43 : Corrélation entre gradient antérieur 05/09/1990 et du jour au 07/09/1990 (seuil T de 1 mm).....	38
Figure 44 : Isohyètes des événements sans persistance du 05/09/1990 et 07/09/1990.....	39
Figure 45 ; Corrélation entre gradient antérieur 02/06/2002 et du jour au 03/06/2002 (seuil T de 1 mm).....	40
Figure 46 ; Isohyètes des événements sans persistance du 02/06/2002 et 03/06/2002.....	41
Figure 47 : Nombre d'événements avec persistance par saison de 1990 à 2007	42
Figure 48 : Persistance par corrélation directe entre les événements du 02/09/1990 et 05/09/1990.....	43
Figure 49 : Indice de pluie entre les événements du 02/09/1990 et 05/09/1990.....	44
Figure 50 : Persistance par corrélation directe entre les événements du 31/08/1997 et 01/09/1997.....	45
Figure 51 : Indice de pluie entre les événements du 31/08/1997 et 01/09/1997.....	46
Figure 52 : Coefficient de corrélation et persistance interannuelle entre les gradients annuels de 1990 à 2007	48
Figure 53 : Evolution interannuelle du gradient saisonnier de 1990 à 2007 pour quelques couples.....	49

Liste des tableaux

Tableau 1 : Nombre de stations analysées par année.....	8
Tableau 2 : Orientations dominantes des couples de stations comportant des gradients répondant aux critères de l'étude	47
Tableau 3: corrélation et persistance de signe d'une année sur l'autre.....	48

Annexe

Les trois principales années marquant la variabilité interannuelle de la pluviométrie, année la plus sèche, année de pluviométrie moyenne et l'année la plus humide.

