



MASTER-2 RECHERCHE
Sciences de la Terre, Univers, Environnement
Option : Océan, atmosphère, hydrologie

Rapport de stage

**Répartition spatiale des précipitations et
conditions de surface en zone sahélienne**

Etudiant : Julien Morel

Encadrant : Luc Descroix, IRD de Niamey, Laboratoire
d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement UMR 5564,
CNRS, INPG, IRD, UJF

Co-encadrants : Arona Diedhiou (idem) et

Isabella Zin, Centre d'étude des Environnements Terrestre et
Planétaires CNRS - UMR 8639 / Université de Versailles-Saint-
Quentin-en-Yvelines

Date d'impression : 11/06/2004

Remerciements

La liste des personnes à remercier est longue, car j'ai travaillé en deux endroits différents, le LTHE à Grenoble et l'IRD de Niamey, au Niger, et avec diverses des personnes d'autres organismes de recherche.

Je remercie tout d'abord mes encadrants pendant le stage et Luc Descroix, encadrant principal, en premier lieu : pour son aide constante pendant le stage malgré ses obligations de terrain, pour son accueil à Niamey, pour la liberté de travail qu'il m'a laissée, son enthousiasme pour le sujet et la confiance dans mon travail.

Je remercie ensuite Isabella Zin, qui a encadré en partie mon premier mois de stage au LTHE, qui a pris beaucoup de son temps pour m'enseigner des éléments de télédétection et de SIG, et pour les nombreuses scènes satellites qu'elles m'a procurées.

Je remercie aussi Arona Diedhiou, qui m'a permis de mieux cerner la problématique du sujet et de chercher dans d'autres directions.

Je remercie Thierry Lebel et Sandrine Anquetin, au LTHE, qui ont permis que mon séjour à Niamey se réalise, malgré les problèmes organisationnels de mon stage, et Thierry pour son aide sur l'orientation de mon travail au début du stage.

Je remercie encore Sylvie Galle, qui m'a aidé à mon retour de Niamey pour terminer la rédaction de ce rapport et pour le temps qu'elle accepte de prendre en faisant partie de mon jury.

Je remercie aussi Alain Morel, pour ce goût de l'Afrique et particulièrement du Niger, qu'il m'a transmis, et les conseils pour mon séjour au Niger.

Je remercie maintenant les personnes qui m'ont le plus aidé au quotidien. A l'IRD de Niamey, je remercie Anne-Laure Besnier, qui m'a bien aidé dans le traitement des données du réseau EPSAT. Au LTHE, je remercie Abdou Ali qui m'a aidé et soutenu dans mon sujet par ses connaissances et Maud Balme qui m'a beaucoup aidé au niveau matériel. Je remercie aussi Yahya Nazoumou, Aïssata, et Eric Le Breton, à l'IRD de Niamey, pour leurs aides et conseils divers.

Je remercie Alzmoumou et Ibrahim qui ont passé 15 jours à m'aider à faire les relevés sur les 16 cartes topographiques au 1/50000 du degré carré.

Je remercie plusieurs personnes pour les données ou aides diverses qu'ils ont pu me fournir : Issifou Alfari du Centre Régional Agrhymet à Niamey, Bernard Cappleare et Yann L'Hôte de l'IRD de Montpellier, Christian Depraetere et Charles Obled du LTHE, Aïda Diongue de Météo-Sénégal, Rachid Nedjaï de l'Institut de Géographie Alpine,

Je remercie enfin les secrétaires Agnès Agarla du LTHE et Aurélie Bauza de l'OSUG pour le temps passé à résoudre mes problèmes de conventions de stage, tout le personnel de l'IRD de Niamey, Fati, Kadidia, Ama, Zodi, les informaticiens et les chauffeurs, et le personnel du LTHE, Sylviane au secrétariat et tout les autres personnes, informaticiens, personnel, thésards, post-doc. qui ont pu m'aider de diverses façons.

Résumé/Abstract

La rétroaction de la végétation sur la pluie est une affirmation qui n'a jamais pu être démontrée clairement, et les études qui se sont penchées sur ce problème portaient sur des zones pluvieuses tropicales ou tempérées. Notre travail se situe lui au Sahel nigérien, dans le degré carré de Niamey. Nous étudions ici les interrelations entre d'une part les conditions de surface, en particulier la rugosité liée au relief et à la végétation, et d'autre part la répartition spatiale des précipitations. A partir de données de cumuls des précipitations à différentes échelles temporelles, de cartes satellites de la végétation et d'un modèle numérique de terrain, nous avons utilisé plusieurs méthodes : tracé de cartes de cumuls pluviométriques, décennales, annuelles et interannuelles, étude des corrélations simples entre d'une part les variables liées à la végétation ou au relief et d'autre part les variables liées aux cumuls de pluie et Analyse en Composante Principale (ACP). Nous avons conclu que les reliefs, faibles sur le degré carré, ne semblaient pas avoir d'impact fort sur la répartition des pluies. Par contre la végétation, en particulier autour de la ville de Niamey où elle est très dense, semble avoir une influence beaucoup plus forte sur la répartition des pluies. Une hypothèse intéressante est que la végétation influencerait cette répartition par l'intermédiaire de sa rugosité.

Vegetation feedback on rainfall is a statement which has never been demonstrated clearly, and researches on this subject were limited to tropical or tempered rainy zones. The work presented here takes place in the Sahel of Niger, in the Niamey square degree. We study here the interrelations between, on the one hand, land surface conditions, particularly roughness due to the relief and to the vegetation, and on the other hand, rainfall spatial distribution. From rainfall data at different temporal scales, vegetation satellite maps and a digital elevation model, several methods have been used : rainfall maps drawing at different temporal scales, 10 day-scale, annual and interannual, simple correlation analysis between vegetation or relief dependant variables and rainfall dependant variables, and Empirical Orthogonal Function Analysis (EOF). The results are that relief, quite smooth on the square degree, do not seem to have any impact on rainfall distribution. Anyhow, vegetation, particularly around Niamey, seem to have a stronger impact on rainfall distribution. An interesting hypothesis would be that vegetation would influence rainfall distribution through its roughness.

Table des matières

Remerciements	2
Résumé/Abstract	3
Table des matières	4
Table des figures, des tableaux et des photos	5
Introduction	6
I. Problématique	7
II. Elements de géographie physique du Niger	8
II.1. Localisation du degré carré de Niamey	8
II.2. Relief et hydrographie (d'après Morel, 1980)	9
II.3. Climat (d'après Morel, 1980)	10
II.4. Végétation (d'après Peyre de Fabrègues, 1980).....	11
III. Etat de l'art	12
IV. Méthodologie	15
IV.1. Ensembles de données utilisées	15
IV.2. Méthodes de traitement des données	17
V. Résultats	20
V.1. Echelle et changement d'échelle	20
V.2. Phénomènes de persistance et singularités dans la répartition spatiale interannuelle des pluies	24
V.3. Etude des corrélations et Analyse en Composante Principale	36
Conclusion	42
Index	44
Bibliographie	45
Annexes	48

Table des figures, des tableaux et des photos

Figure 1. Localisation du degré carré au sein du Niger et de l'Afrique de l'ouest	8
Figure 2. Points de repères essentiels sur le degré carré de Niamey.....	8
Figure 3. Comparaison entre les isohyètes interannuels en mm de la période 1950-1969 (pointillés) et les isohyètes interannuels de la période 1970-1989 (trait plein). Le carré au sud-ouest indique le degré carré de Niamey (d'après Le Barbé, Lebel, 1997)	11
Figure 4. Précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989) sur l'Afrique de l'ouest. Les isohyètes vont de « moins de 200 mm » à « plus de 4000 mm ». D'après L'Hôte et Mahé (1996).....	20
Figure 5. Principaux reliefs de l'Afrique de l'ouest.....	21
Figure 6. La descente des isohyètes interannuels la période 1951-1969 (pointillés) et les isohyètes interannuels de la période 1970-1989 (trait plein). D'après L'Hôte et Mahé (1996).....	22
Figure 7. Série d'évènements de pluie qui ont survenu, de gauche à droite (et d'est en ouest et d'heure en heure): de Agadez, Tahoua, Niamey durant les 21 et 22 août 1994. D'après Shinoda et al. (1999).....	23
Figure 8. Pluie moyenne interannuelle sur 11 ans (1990 à 2000) produits par les évènements de pluie définis sur le réseau Epsat-Niger. Ces évènements sont définis avec un critère spécial : un minimum de 30% des stations fonctionnant doit enregistrer la pluie). Les coordonnées de 0 à 110 km en abscisse et de 0 à 100 km en ordonnée correspondent à peu près au degré carré de Niamey (2-3° long E et 13-14° lat N). D'après Ali et al. (2003). .	25
Figure 9. Représentation de la moyenne arithmétique des pluies de 1990 à 2000 à l'intérieur de chaque maille de 10 km X 10 km, sans interpolation. Les coordonnées de 0 à 110 km en abscisse et de 0 à 100 km en ordonnée correspondent à peu près au degré carré de Niamey (2-3° long E et 13-14° lat N).....	25
Figure 10. Cartes décadaires cumulées sur le degré carré de Niamey de juin à juillet 1998 (isohyètes 20 mm). Abscisse : longitude est en degrés. Ordonnée : latitude nord en degrés.	27
Figure 11. Cartes décadaires cumulées sur le degré carré de Niamey de août à septembre 1998 (isohyètes 20 mm). Abscisse : longitude est en degrés. Ordonnée : latitude nord en degrés.	28
Figure 12. Carte des cumuls saisonniers de 1993 à 1996 sur le degré carré de Niamey. Abscisse : longitude est en degrés. Ordonnée : latitude nord en degrés.....	29
Figure 13. Carte des cumuls saisonniers de 1997 à 2002 sur le degré carré de Niamey. Abscisse : longitude est en degrés. Ordonnée : latitude nord en degrés.....	30
Figure 14. Carte de la moyenne interannuelle des pluies (en haut) de 1989 à 2002 et carte des écart-types interannuels des pluies (en bas) de 1989 à 2002	32
Figure 15. Carte NDVI SPOT vegetation 1 ^{ère} décade de mai 2003 sur le degré carré de Niamey.....	34
Figure 16. MNT/SRTM avec localisation des pluviographes sur le degré carré de Niamey...	35
Figure 17. Plan principal de l'ACP	39
Figure 18. Plan secondaire de l'ACP	41
Tableau 1. Matrice de corrélation	37
Tableau 2. Tableau des valeurs propres	39
Photo 1. Photo d'un kori du degré carré	9

Introduction

Depuis le début des années 70, on observe de grandes transformations du régime des précipitations en Afrique de l'ouest, et plus particulièrement au Sahel : on est passé de conditions humides dans les années 50 et 60 à des conditions beaucoup plus sèches dans les années 70 à 90, causant de véritables problèmes de ressources en eau. Cette forte sécheresse à échelle décennale est encore exacerbée certaines années à cause des variabilités interannuelles : certaines années parmi les 30 dernières années ont été extrêmement sèches. L'étude des précipitations constitue un enjeu majeur pour ces pays ; les ressources en eau, l'agriculture et la santé en dépendent directement.

Dans ce cadre-là, on s'attache à l'étude de l'influence des conditions de surface en zone sahélienne sur la répartition spatiale des précipitations, qui a un fort impact socio-économique et environnemental, puisque certaines zones reçoivent moins de précipitations que d'autres. Nous prendrons comme cadre de l'étude le degré carré de Niamey au Niger, de longitude 2°-3° E et de latitude 13°-14° N. Le Niger est un des pays sahéliens les plus touchés par la sécheresse.

Dans la 1^{ère} partie, nous rappellerons quelle est la problématique de notre sujet et les objectifs que nous souhaitons atteindre.

Dans la 2^{ème} partie, nous mettrons l'accent sur quelques éléments géographiques du Niger et du degré carré de Niamey, permettant de situer le cadre général de notre étude.

Dans la 3^{ème} partie nous ferons un état de l'art des recherches menées sur le thème des rétroactions de la végétation sur la pluie.

Dans la 4^{ème} partie, nous exposerons la méthodologie de notre travail de recherche : données, outils et méthodes utilisées pour mener à bien l'étude.

Enfin, dans la 5^{ème} partie, nous analyserons les résultats obtenus avec les diverses méthodes.

I. Problématique

On cherche à mettre en évidence des interrelations entre les conditions de surface, en particulier la rugosité liée au relief et la végétation et la répartition spatiale des pluies. De nombreux résultats de recherche incitent à entreprendre cette étude, comme nous allons le rappeler dans l'état de l'art.

Pour étudier les interrelations entre les conditions de surface et la répartition spatiale des pluies, nous allons utiliser différentes méthodes et travailler à différentes échelles.

Nous travaillerons tout d'abord à l'échelle régionale de l'Afrique de l'Ouest, en cherchant à voir les liens entre les isohyètes interannuels d'une part et les macro-reliefs et le dessin de la côte d'autre part. On se pose les questions suivantes : Y a-t-il des climats d'abri dus aux reliefs ? Les vallées jouent-elles un rôle ? A l'échelle du Niger, quel est le rôle des reliefs sur la naissance des lignes de grain ?

Deux articles nous incitent ensuite à travailler à l'échelle du degré carré, et à se poser des questions sur le rôle du relief et de la végétation sur la répartition spatiale des pluies. Les travaux de Taylor et Lebel (1997) ont montré la présence de phénomènes de persistance des pluies sous certaines conditions de surface dans le degré carré de Niamey, et les travaux de Ali et al. (2003) ont mis en évidence des singularités dans la répartition spatiale des pluies dans le degré carré de Niamey. Pour approfondir ces deux constatations, nous effectuerons des tracés de cartes pluviométriques, à différentes échelle temporelles, afin de les comparer à des cartes de végétation et de relief.

Afin de quantifier les résultats dus aux analyses de cartes, nous utiliserons ensuite des méthodes statistiques pour montrer les interrelations entre les conditions de surface et la pluie. Les méthodes que nous utiliserons se baseront sur différents types de données :

- différents paramètres topographiques : latitude, longitude, altitude, rugosité du relief, pente
- différents paramètres de végétation : densité de la végétation, rugosité végétale
- différents paramètres pluviométriques : moyenne interannuelle, écart-type interannuel, Coefficient de Variation (CV) interannuel, λ (nombre d'évènements pluviométriques pendant une année, un évènement en une station étant compté pour un cumul de pluie supérieur ou égale à 0.5 mm), β (pluie moyenne annuelle tombée par évènement).

Nous utiliserons deux méthodes statistiques. La 1^{ère} consistera en une analyse des corrélations entre les variables topographiques et de végétation d'une part, et les variables de pluie d'autre part. L'autre méthode consistera en Analyse en Composante Principale.

Les résultats de ces méthodes cartographiques et statistiques nous donnerons des éléments de réponse pour confirmer ou infirmer la réalité de la rétroaction de la végétation sur la pluie, et nous permettrons de voir quel facteur a le plus d'impact sur la répartition des pluies : la végétation ou le relief.

II. Elements de géographie physique du Niger

Nous allons ici aborder différents aspects géographiques du Niger, nécessaires à une compréhension globale du sujet : relief, hydrographie, climat, végétation. Nous axerons ces aspects plus particulièrement sur le degré carré de Niamey.

II.1. Localisation du degré carré de Niamey

Le Niger est un grand pays de 1267000 km² qui est orienté du sud-ouest vers le nord-est. La carte ci-dessous met en évidence la localisation du degré carré de Niamey : il se trouve dans la partie à l'extrême sud-ouest du Niger. Ses coordonnées sont : longitude 2°-3° E et de latitude 13°-14° N.

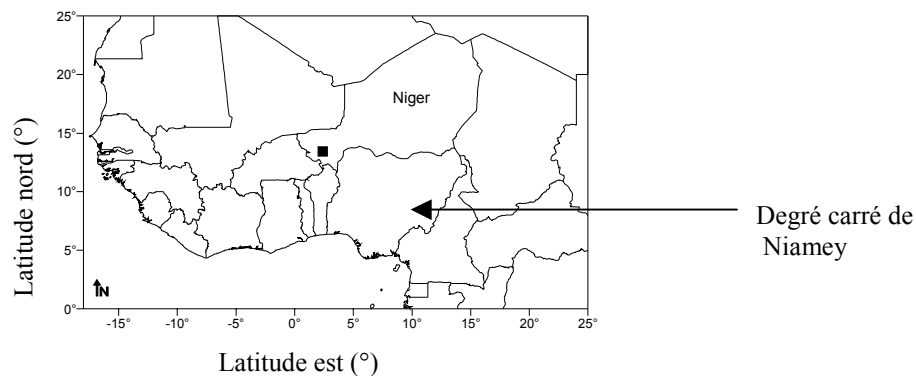


Figure 1. Localisation du degré carré au sein du Niger et de l'Afrique de l'ouest

La carte ci-dessous où on voit le relief du degré carré de Niamey montre des points de repères essentiels pour se situer sur le degré carré : le fleuve Niger, sur les rives duquel se trouve Niamey, capitale du Niger, le *dallol** Bosso et le *kori** de Dantiandou.

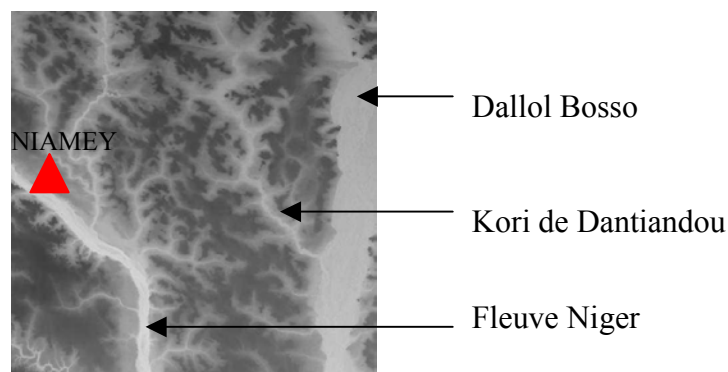


Figure 2. Points de repères essentiels sur le degré carré de Niamey

* les noms en italiques suivis d'une étoile sont définis dans l'index p. 44

II.2. Relief et hydrographie (d'après Morel, 1980)

Le Niger présente des reliefs peu contrastés dans l'ensemble. Les altitudes croissent lentement du sud-ouest vers le nord-est, jusque dans le massif de l'Aïr. L'essentiel du territoire est constitué de plateaux.

Le degré carré de Niamey se situe dans les bas plateaux de l'Ouest et du Sud. Compris entre 200 et 500 m, ils correspondent au bassin des Oulliminden et à ses marges. Ils sont entaillés au Nord par le réseau fossile de l'Azaouagh, à l'Ouest par les vallées du fleuve et de ses anciens affluents, les *dallols*^{*}, et par les *goulbis*^{*} au sud-est.

Le Niger comprend trois domaines hydrographiques : des régions *aréiques*^{*}, où l'absence d'écoulement est permanente ; des régions *endoréiques*^{*}, où l'écoulement occasionnel se perd après quelques dizaines de km ; la région du fleuve, qui traverse le degré carré de Niamey. Le Niger s'écoule normalement toute l'année. Les plus hautes eaux se situent vers janvier-février, les plus basses vers juin-juillet. Ses affluents de rive droite ne sont que saisonniers, par exemple la Sirba, qui a ses hautes eaux en septembre. Sur la rive gauche, les dallols Bosso, Foga, Maouri, vallées fossiles, sont les régions fertiles du pays.

[Cf carte en annexe : présente relief et géographie Niger]

La photo ci-dessous, prise sur le degré carré, montre un kori. On aperçoit des plateaux dans l'arrière-plan. La végétation est éparse sur l'ensemble de la plaine observée, à l'exception d'un important bosquet d'arbres, sur la rive du kori.



Photo 1. Photo d'un kori du degré carré

II.3. Climat (d'après Morel, 1980)

Le Niger est un pays continental où l'on peut considérer que les 4/5 du territoire appartiennent au Sahara.

La circulation atmosphérique de surface est marquée par l'alternance de deux masses d'air chaud qui s'opposent par leur humidité. En hiver, l'alizé continental, vent très sec, appelé harmattan, s'écoule vers le sud-ouest, sous l'influence des hautes pressions qui prennent naissance dans le Sahara. En été, sous l'influence des basses pressions liées à l'énorme apport radiatif que reçoit le Sahara, le flux de « mousson » guinéenne remonte jusqu'à la dépression saharienne ; ce flux de mousson est chargé d'humidité. La surface de discontinuité entre le flux de mousson et l'alizé continental est appelée Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT) ; la trace au sol de la ZCIT s'appelle Front Inter Tropical (FIT) et se situe au nord de la ZCIT. La ZCIT est située en moyenne vers 8° Nord en février pour atteindre 20° Nord en juillet. C'est cette rencontre des deux flux qui créent la majorité des précipitations au Niger, par le phénomène des « *lignes de grain* » qui se déplacent d'est en ouest. Ce balancement saisonnier affecte toute l'Afrique Occidentale, mais la mousson au Niger est à la fin de son trajet. La durée de la saison humide diminue quand on remonte dans le nord.

Le climat du Niger est caractérisé par l'aridité. Les précipitations sont insuffisantes. La partie sud-ouest, dans laquelle se trouve le degré carré de Niamey, reçoit de 400 à 800 mm par an.

Le gradient de pluie nord-sud est présent au Niger : les isohyètes annuelles suivent une direction est-ouest, et diminuent quand on remonte vers le nord. La comparaison des isohyètes sur la période 1950-1960 et 1970-1989 montre que les isohyètes se sont déplacées vers le sud, avec une perte de 100 mm pour chaque isohyète (Cf. Figure 3); depuis les années 70, les totaux annuels connaissent une forte variabilité, certaines années étant extrêmement sèches (Lebarbé, Lebel 1997). La durée de la saison humide au Niger est d'environ 3 mois : de juillet à septembre, avec un maximum en août, mais diminue en remontant dans le nord.

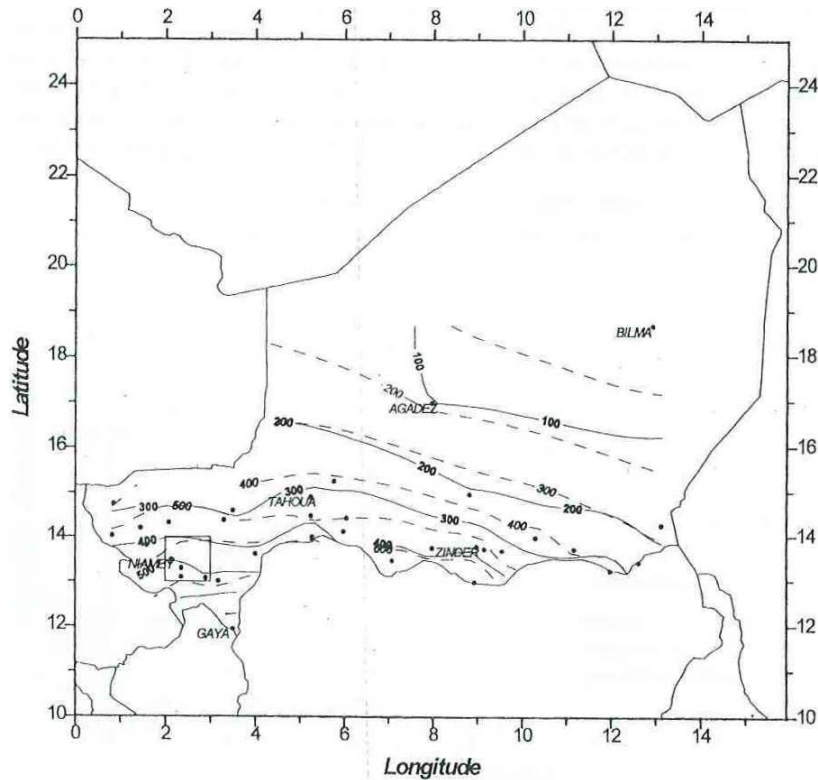


Figure 3. Comparaison entre les isohyètes interannuels en mm de la période 1950-1969 (pointillés) et les isohyètes interannuels de la période 1970-1989 (trait plein). Le carré au sud-ouest indique le degré carré de Niamey (d'après Le Barbé, Lebel, 1997)

II.4. Végétation (d'après Peyre de Fabrègues, 1980)

Du point de vue géobotanique, le territoire du Niger s'étend sur les régions saharo-sindienne et soudano-zambézienne, qui recouvrent elles-mêmes en partie les domaines biogéographiques saharien, sahélien et soudanien (Cf. carte de la végétation du Niger en annexe).

La région saharo-sindienne, qui correspond au Niger aux zones qui ne reçoivent pas de pluies tous les ans, présente de petites variations en fonction des microclimats, des substrats, de l'orographie. Ainsi, par exemple des substrats sableux à modelés plus ou moins dunaires peuvent être caractérisés par une formation à *Panicum turgidum* et *Cormulaca monacantha*, formations végétales herbacées, les *regs** portent fréquemment des *Cymbopogon shoenanthus* et *Stipagrostis uniplumis* tandis que les éboulis du plateau du Djado et du mont Gréboun abritent des flores assez bien différenciées.

La région soudano-zambézienne, au sud de la précédente, peut être subdivisée en deux domaines : sahélien au nord et soudanien au sud. La végétation du domaine sahélien est une steppe qui généralement, passe des formations contractées ou arbustives claires dans la partie septentrionale, à des types plus diffus et arborés dans le sud. Les variations de densité et de hauteur sont accentuées par les changements de substrats et la présence de quelques microclimats.

Plus arrosé que le Sahel, le domaine soudanien porte une végétation de savane caractérisée par une strate herbacée continue où dominent les graminées vivaces de grande taille. Les espèces les plus fréquentes y sont *Andropogon gayanus*, sur sable, divers *Hypparhenia* spp. sur les sols plus humides, et *Loudetia* spp. surtout sur les glacis ou sur les affleurements de substrats concrétionnés.

III. Etat de l'art

De tous temps, l'homme s'est posé la question du rapport entre la pluie et la végétation. Dans les zones pluvieuses, on retrouve très généralement la présence de forêts. Ces zones de forêt sont souvent des zones montagneuses. Mais l'affirmation que la végétation engendre les pluies a toujours divisé, et divise encore les scientifiques aujourd'hui. Signalons que de plus, la corrélation de la pluie sur la végétation est trop forte pour que l'on puisse entrevoir une rétroaction de la végétation sur la pluie dans une matrice de corrélation par exemple.

La perception de fortes baisses pluviométriques et de hausses des températures dans les zones de fort déboisement durant la seconde moitié du 20^{ème} siècle ont relancé la question. Cette perception se retrouve aussi bien au Sénégal qu'au Mexique. Au Sénégal, une surconsommation du charbon de bois a entraîné la transformation de la savane arborée en une steppe très pauvre sur 60 km de profondeur au niveau de Dakar. Au Mexique, la coupe incontrôlée des arbres de la forêt de pins du versant oriental de la Sierra Madre occidentale, a provoqué d'après ses habitants et les responsables politiques une diminution très importante des volumes de pluie, entraînant une grave sécheresse. Le ministre de l'environnement du Mexique semble convaincu que le reboisement des montagnes va entraîner le retour de l'eau dans les aquifères et les barrages. Dans ses travaux concernant le Mexique, Claret (2003) a montré que l'effet de la végétation sur la pluie existe bien, mais qu'il est très faible en regard de celui du relief ; la végétation très clairsemée des déserts d'altitude n'a évidemment pas d'influence sur la pluie.

Les recherches de ces 20 dernières années se sont largement penchées sur une possible rétroaction de la végétation sur les pluies. D'après Poncet (1981), la rugosité aérodynamique des massifs forestiers ralentit les vents jusqu'à une hauteur au-dessus du sol correspondant à la couche limite de turbulence de la circulation atmosphérique. Ce puissant freinage agit sur l'évapotranspiration* réelle des peuplements forestiers. Les échanges thermiques avec la couverture du sol étant facilités par le freinage des vents, la condensation et les précipitations sont favorisées.

Les travaux d'Escourrou (1981) vont dans le même sens. Selon elle, le passage d'une masse d'air d'un plateau dénudé à une forêt entraîne un ralentissement de la vitesse du vent et par conséquent une ascendance de l'air qui renforce l'intensité des pluies.

Selon elle encore, dans les zones de forêt dense en Afrique les pluies sont plus fortes de 30%, l'humidité relative de 15% et les températures plus faibles de 1.5° C que hors des forêts. La destruction de ces forêts peut donc avoir un impact considérable. Grâce à la reforestation, les pluies ont augmenté de 6% en certains endroits, cet effet étant surtout sensible en période sèche.

L'albédo* semble jouer un rôle important dans l'interaction végétation-pluie. L'albédo est plus faible pour une forêt que pour un sol nu et donc la déforestation entraîne une augmentation de l'albédo. Charney (1975) a ainsi montré le rôle de la végétation en zone sahélienne sur le déclenchement de la convection : une augmentation de l'albédo de 14 à 35% au nord de la ZCIT provoque un déplacement de cette ZCIT de plusieurs degrés vers le sud, et une diminution de 40% de la pluviométrie au Sahel durant la saison des pluies.

Cité par Diongue (2001), Anthes (1984) a fait une revue des observations et des études théoriques sur les capacités de la végétation à renforcer les précipitations convectives. Il dénombre trois principaux mécanismes :

i) augmentation de l'énergie statique humide liée à une diminution de l'albédo : l'énergie statique dépend de la chaleur sensible (liée à la température) et également de la chaleur latente

(liée à la vapeur d'eau). Une diminution de l'albédo fait que le rayonnement net à la surface augmente et donc la température et l'évapotranspiration (donc la vapeur d'eau) augmentent aussi. D'où augmentation de l'énergie statique humide.

ii) création de circulations de mésoéchelle associées aux inhomogénéités (effet de rugosité due aux inhomogénéités horizontales lors du passage d'une surface nue suivie d'une surface avec végétation, sur la couche limite atmosphérique),

iii) renforcement de l'humidité atmosphérique grâce à une augmentation de l'évaporation, due à une meilleure infiltration de l'eau dans la couche de sol profonde, du fait des racines.

Les études de Charney et Anthes, qui sont atmosphériciens, ont été réalisées à l'échelle zonale. Mais d'après Dupriez et Leener (1990), l'influence de la végétation sur le climat ne peut être que locale : l'homme ne peut pas agir sur les macroclimats, par contre il peut chercher à organiser ses territoires en vue d'y modifier, d'y créer, ou d'y maintenir des microclimats. Il semblerait notamment que les couverts végétaux isolés jouent un rôle dans la régulation des températures.

De son côté, Bruijnzal (1990) rappelle que les effets de la végétation à méso-échelle ou macro-échelle n'ont pas été démontrés : « de nombreux travaux menés dans les climats tropicaux humides et tempérés ont pourtant généralement conduit à la conclusion que la forêt n'a pas d'influence sur la pluviométrie locale et les résultats contraires qui ont pu être avancés pèchent presque tous par la faiblesse des données sur lesquelles ils reposent ». Cependant, il faut noter que ces travaux dont il est fait mention ont été généralement réalisés dans des régions très pluvieuses.

Certaines observations récentes ont relancé le thème de la rétroaction de la végétation sur la pluie. En utilisant l'imagerie satellitaire et des informations in-situ, il a été observé que la convection se formait d'abord sur une zone avec un sol plus chaud, comme par exemple un champ de blé, plutôt que sur des zones adjacentes recouvertes de végétation « verte » (Rabin et al, 1990). Plus récemment, Taylor et Lebel (1997) ont démontré que « sous certaines conditions de surface, il s'établit une corrélation positive entre les précipitations du jour et les précipitations antérieures. Ces circonstances apparaissent quand les combinaisons d'averses précédentes ont modifié les taux d'évaporation locale. Les gradients de pluie lors des événements subséquents tendent à persister, renforçant la configuration d'humidité des sols ». Ainsi les conditions de surface semblent avoir un rôle important. D'autre part, Lebarbé et Lebel (1997) ont étudié l'évolution des coefficients λ (nombre d'événements pluviométriques pendant un pas de temps donné), et β (pluie moyenne par événement) lors du passage des années humides 1950-1969 au Sahel aux années sèches 1970-1989. λ est un paramètre additif tandis que β est invariant quel que soit le pas de temps : ils ont montré que 90% de la diminution des pluies étaient expliquées par la diminution de λ , tandis que β restait stable.

Philippon et Fontaine (2002) ont eux démontré que les saisons des pluies humides sur le Sahel étaient précédées d'hivers boréaux où la teneur en eau des sols était anormalement élevée sur les régions soudano-guinéennes.

L'arrivée en masse de la modélisation numérique a permis aussi de mettre au point des modèles tenant compte ou non de facteurs comme la rétroaction positive de la végétation sur la pluie. Les travaux de Zeng et al. (1999) montrent que la prise en compte d'une rétroaction de l'humidité du sol et de la végétation reproduisait bien mieux les valeurs des précipitations que la seule prise en compte de ces éléments sans rétroaction de leur part. De plus, quand le modèle couplé atmsphère-terre-végétation est forcé par les températures de surface de la mer, un feedback positif des changements végétaux conduit à une augmentation du gradient spatial entre les régions désertiques et les régions forestières aux dépens des zones de savane.

Les résultats de Shinoda et Gamo (2000) et Shinoda (2000) sont aussi très intéressants : ils mettent en évidence une corrélation entre une végétation plus fournie que la normale (c'est-à-dire de fortes valeurs de NDVI, Cf. Annexes) et des valeurs de température au-dessus de la couche limite de convection inférieures à la normale ; ceci entraîne un gradient de température altitudinal supérieur et donc à une convection améliorée et une pluviométrie supérieure ; ils montrent encore que la « pluie des mangues », qui se produit parfois quelques mois avant la saison des pluies, peut aussi provoquer cette amélioration de la convection. Cette rétro-action végétation-pluviométrie explique en grande partie le mécanisme de la désertification.

IV. Méthodologie

IV.1. Ensembles de données utilisées

Différents types de données ont été utilisés pour étudier les liens entre les paramètres pluviométriques et les paramètres topographiques et paramètres de végétation : la base de donnée EPSAT-NIGER, les cartes NDVI SPOT végétation et NOAA/AVHRR, les paramètres topographiques mesurés sur des cartes topographiques et la carte de relief numérique (MNT/SRTM).

- Base de donnée EPSAT-NIGER

La base de données EPSAT-NIGER contient les relevés des stations pluviométriques du degré carré de Niamey. Le nombre de stations en service a varié depuis 1990, étant de 109 au maximum en 1992 et de 30 au minimum (en réalité seulement 23 dans la stricte limite géographique du degré carré). La maille du réseau EPSAT-Niger est de 12.5 km.

La base de donnée contient des informations sous divers formats de fichiers standards dont la nomenclature est propre à l'IRD. La plupart des données qui nous intéressaient était accessibles au format excel. Certains fichiers ont demandé un traitement spécifique, pour remettre les données en forme. Dans la base de donnée, on trouve pour chaque année les cumuls horaires, les cumuls par événements, les cumuls quotidiens, les cumuls décadaires, les cumuls mensuels et les cumuls saisonniers. On trouve aussi la description du réseau de stations pluviométriques pour chaque année.

Les fichiers de cumuls qui se trouvent sous format excel sont organisés de la sorte : la 1^{ère} colonne contient le nom des stations, la 2^{ème} et la 3^{ème} colonne les coordonnées des stations, et les colonnes suivantes contiennent les cumuls en mm, les colonnes correspondant aux périodes de temps considérées (événement, décade, etc.).

A partir de la base de donnée EPSAT NIGER, nous avons récupéré les valeurs de cumuls décadaires en chaque station pour chaque année et les valeurs de cumuls saisonniers, ce qui nous a permis de calculer les échantillons des variables de pluie et des variables longitude et latitude (chaque échantillon correspondant à la valeur de la variable en une station) :

- **lambda** : nombre d'événements pluvieux en 1992
- **beta** : quantité moyenne de pluie par événement en 1992
- **cum92** : cumul des pluies en 1992
- **mai_2** : cumul de la décade 2 de mai 1992
- **mai_3** : cumul des décades mai_3 et mai_2 1992
- **juin_1** : cumul des décades juin_1, mai_3 et mai_2 de 1992
- **m2j2** : cumul des décades de mai_2 à juin_2 de 1992
- **cum97** : cumul des pluies 1997
- **cum98** : cumul des pluies 1998
- **moyiP** : moyenne interannuelle de la pluie, c'est-à-dire la moyenne des cumuls saisonniers, de 1989 à 2002
- **ectiP** : écart-type interannuel de la pluie, c'est-à-dire l'écart-type des cumuls saisonniers de 1989 à 2002
- **CViP** : Coefficient de Variation interannuel de la pluie ; $CViP = ectiP / moyiP$
- **lat** : latitude en degrés
- **long** : longitude en degrés

Chaque variable ne comporte que 23 échantillons, puisque l'utilisation de variables interannuelles nous obligerait à utiliser les 23 stations du degré carré communes à toutes les années de 1990 à 2003 : Alkama, Banizoumbou, Beri Koira, Berkiawal, Darey, Debere Gati, Fandou Beri, Gardama Kouara, Gorou Goussa, Guilahel, Harikanassou, IH Jachere hapex1, Niamey IRI, Kalassi, Kare, Kokorbe Fandou, Kollo, Koure Sud, Massi Koubou, Niamey Aeroport, Niamey ORSTOM, Tanaberi, Wankama, Yillade.

- Cartes NDVI SPOT végétation et NOAA/AVHRR

Nous avons disposé de deux type de cartes satellites NDVI, en provenance de satellites différents : SPOT et NOAA.

Nous avons les scènes SPOT végétation pour chaque décade de juillet 1999 (démarrage du satellite) à décembre 2003, en format BIL. Nous les avons importées sous Idrisi. Comme nous avons les données sur la zone 0-5° de longitude est et 10-15° de latitude nord, nous les avons redécoupées sur le degré carré de Niamey (2-3° de longitude est et 13-14° de latitude nord). Pour obtenir les cartes en vraies valeurs de NDVI, il fallait ensuite transformer l'image, codée en valeurs numériques, en la multipliant par un gain de 0.004 et en lui soustrayant un offset de 0.1 : $NDVI = 0.004 * ValeurNum - 0.1$. La résolution de SPOT végétation est de 0.0089286°, c'est-à-dire légèrement inférieure au km.

Concernant les scènes NOAA/AVHRR, nous disposions d'une scène décadaire par an, au mois de mai (avant le début des fortes pluies), pour les années 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1997, 1998, 1999, 2001 et 2002. Pour les années 1997 et 1998, nous disposions en fait de toutes les décades de l'année. Les données étant en format Idrisi, et découpées exactement sur le degré carré de Niamey, il n'y avait plus qu'à transformer l'image en vraie valeur de NDVI, de la même façon que pour SPOT végétation : $NDVI = (ValeurNum - 127.5) / 127.5$. La résolution de NOAA/AVHRR est de 0.009090°, c'est-à-dire de 1 km.

A partir des cartes NDVI, nous avons pu extraire les différents échantillons des variables NDVI suivantes :

- **ndvi1** : valeur NDVI de la 1^{ère} décade de mai 2002 au pixel de la station, la résolution spatiale étant de 1 km²
- **ndvi2** : valeur moyenne des NDVI de la 1^{ère} décade de mai 2002, autour de la station sur 25 km²
- **ndviect** : écart-type des NDVI de la 1^{ère} décade de mai 2002 autour de la station sur 25 km²
- **ndviCV** : Coefficient de Variation des NDVI de la 1^{ère} décade de mai 2002 autour de la station sur 25 km² ; $ndviCV = ndviect / ndvi2$

- Relevés de paramètres topographiques sur les cartes topographiques du degré carré NOAA/AVHRR

Nous disposions pour l'étendue du degré carré de 16 cartes au 1/50000^{ème}. Nous avons relevé, les différents paramètres topographiques suivants :

- **rug1** : c'est le coefficient de rugosité du relief, sur 4 km² autour de la station mesuré à partir des courbes de niveau ; il a été calculé en sommant les courbes de niveau équidistantes de 20m (en altitude), à l'aide d'un curvimètre sur une surface 4 km², soit 16 cm² sur la carte autour de chaque station. On obtient bien un coefficient de rugosité du

relief, puisque des fortes valeurs de rug1 représentent soit un fort relief, soit des forts contrastes de reliefs (alternance de vallées et de montagnes).

- **rug2** : c'est le coefficient de rugosité du relief, sur 25 km² (soit 100 cm²) autour de chaque station, calculé de la même façon que rug1.
- **pente** : c'est la pente en % mesurée sur la pente dans laquelle se situe la station, en divisant simplement la dénivelée par la distance.
- **z** : c'est l'altitude de la station relevée sur la carte.
- **Exposition** : c'est l'orientation de la pente sur laquelle se situe la station, la direction allant vers l'aval : nord, sud, est, ouest, nord-est etc.
- **type de site** : c'est le type de site qui a été relevé : plateau, versant, bas-fond, *glacis**, *talweg**.

Les différents paramètres ont été mesurés sur les 23 stations du degré carré communes de 1990 à 2003, et aussi sur toutes les stations du degré carré de 1992 et de 1993, c'est à dire une centaine dans chaque cas. De plus, les relevés ont été deux fois pour chaque station, une fois par chaque étudiant, pour minimiser les erreurs ; les valeurs que nous avons gardées finalement sont la moyenne des deux valeurs obtenues par chacun des étudiants.

- Carte de relief numérique : MNT/SRTM disponible depuis avril 2004

Nous disposons pour les valeurs du relief sur le degré carré d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT, qui contient dans une matrice les valeurs d'altitude numérisées sur des pixels) provenant de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), sur la surface du degré carré de Niamey. Le MNT était sous format BSQ. Sa résolution spatiale est de 0.000833°, soit 90 m ou 3 secondes d'arc et sa précision verticale est de ± 16 m. Nous l'avons importé sous Idrisi, pour pouvoir ensuite extraire les échantillons des variables suivantes :

- **z1** : valeur de l'altitude au pixel correspondant à la station d'après le MNT, la résolution spatiale étant de 90m
- **z2** : valeur moyenne de l'altitude autour de la station sur 0.2025 km²
- **zect** : écart-type de l'altitude autour de la station sur 0.2025 km²
- **zCV** : Coefficient de Variation de l'altitude autour de la station sur 0.2025 km² ; $zCV=zect/z2$

IV.2. Méthodes de traitement des données

La matrice de données a été construite en prenant pour chaque colonne une variable, chaque ligne contenant les données des différents échantillons (postes pluviométriques). Les 23 échantillons pour chaque variable sont les valeurs de la variable aux 23 stations pluviométriques sur le degré carré de Niamey.

Pour résumer, les variables de la matrice sont les suivantes : **lat, long, rug1, rug2, pente, z, ndvi1, ndvi2, ndviect, ndviCV, z1, z2, zect, zCV, lambda, beta, cum92, mai_2, mai_3, juin_1, m2j2, cum97, cum98, moyiP, ectiP, CViP.**

La matrice de corrélation (disponible dans les résultats) a été calculée directement à partir de cette matrice. Elle contient les coefficients de corrélation simple r_{xy} .

L'Analyse en Composante Principale (ACP) a été calculée ici avec le logiciel Statistica, à partir de la matrice des corrélations, ce qui revient à la réaliser sur des variables centrées réduites. L'ACP permet de donner des représentation graphiques des corrélations entre les variables, en passant par l'intermédiaire de variables synthétiques, les composantes principales. Nous rappelons en annexe le principe général d'une ACP.

En complément de la matrice de corrélation et de l'ACP, nous avons tracé de nombreuses cartes, en krigeage simple linéaire de pente 1, avec le logiciel de spatialisation Surfer, à partir de toutes les stations du degré carré et entourant le degré carré de Niamey, mais en ne représentant que la zone du degré carré.

Nous avons tracé trois types de cartes de pluies : cartes de cumuls décennales ajoutés, cartes de cumuls saisonniers, et carte de moyenne, d'écart-type et de CV interannuels des pluies.

Pour le tracé des cartes décennales ajoutées, nous avons procédé ainsi : nous sommes partis des fichiers décennales disponibles dans la base de donnée EPSAT, allant de 1990 à 2003, et dans lesquels les cumuls sont indiqués pour chaque station pluviométrique du degré carré et pour quelques stations entourant le degré.

Le nombre et la configuration des stations ont été changés chaque année, allant d'une trentaine à une centaine. Pour chaque année, nous avons utilisé toutes les stations disponibles.

A partir des fichiers de cumuls décennales de la saison des pluies, nous avons fait la somme des cumuls décennales, en ajoutant pour chaque nouvelle décennie la somme des décennales précédentes, ceci pour chaque année ; par exemple, pour la 1^{ère} décennie de mai, on garde son contenu, puis pour la 2^{ème} décennie de mai on somme la 1^{ère} et la 2^{ème} décennie de mai, puis pour la 3^{ème} décennie de mai on fait la somme des 3 décennales de mai, et ainsi de suite jusqu'en septembre, fin de la saison humide.

A partir de chaque fichier de cumul décennal obtenu, nous avons tracé la carte correspondante sur le degré carré. Pour chaque année, nous avons fait défiler ces cartes avec un diaporama.

Pour le tracé des cartes de cumul saisonniers, nous nous sommes limités de 1990 à 2002. Chaque carte de cumul saisonnier correspond à la dernière carte des cumuls décennales ajoutés d'une année, bien qu'on note quelques différences, dues au nombre de stations différent utilisé pour les cartes de cumul saisonnier, et à l'utilisation des cumuls seuil au lieu des cumuls par auget (comme c'est le cas pour les cumuls décennales). De plus, dans la base de donnée EPSAT, nous ne savons pas toujours très bien si les cumuls indiqués sont des cumuls auget ou des cumul seuils.

Les cartes de cumul saisonnier ont été directement tracées à partir des fichiers de cumul saisonnier pour chaque année, en se servant uniquement des 23 stations communes à toutes les années sur le degré carré, de 1989 à 2003 (en considérant toutes les stations du réseau EPSAT, 30 stations sont communes à toutes les années).

Nous avons enfin tracé les cartes de moyenne, d'écart-type et de CV interannuels des pluies. Pour chacune de ces variables, nous avons tracé deux types de cartes : celles présentées dans les résultats ont été tracées sur le réseau des 23 stations du degré communes de 1989 à 2002, et celles qu'on trouvera en annexe ont été tracées sur les 30 stations communes aux 13 années : 1990 à 2002.

La matrice de corrélation et les graphiques de l'ACP sont disponibles et analysés dans les résultats. Les cartes de cumuls décennaires ajoutés de 1998, les cartes de cumul saisonnier de 1993 à 2002 et les cartes de moyenne et d'écart-type interannuels des pluies réalisées à partir des 23 stations sont disponibles et analysés dans les résultats. Les cartes interannuelles de pluie réalisées à partir des 30 stations sont disponibles en annexe.

Signalons par ailleurs que n'avons pas utilisé de méthodes géostatistiques telles que la méthode PLUVIA (Humbert, Mahr et Perrin, 1994, Strasbourg) pour la simple raison qu'ici le relief est très faible et que ces méthodes trouvent leur intérêt dans les zones de montagne.

V. Résultats

V.1. Echelle et changement d'échelle

- Liens entre reliefs et pluviométrie en Afrique de l'Ouest

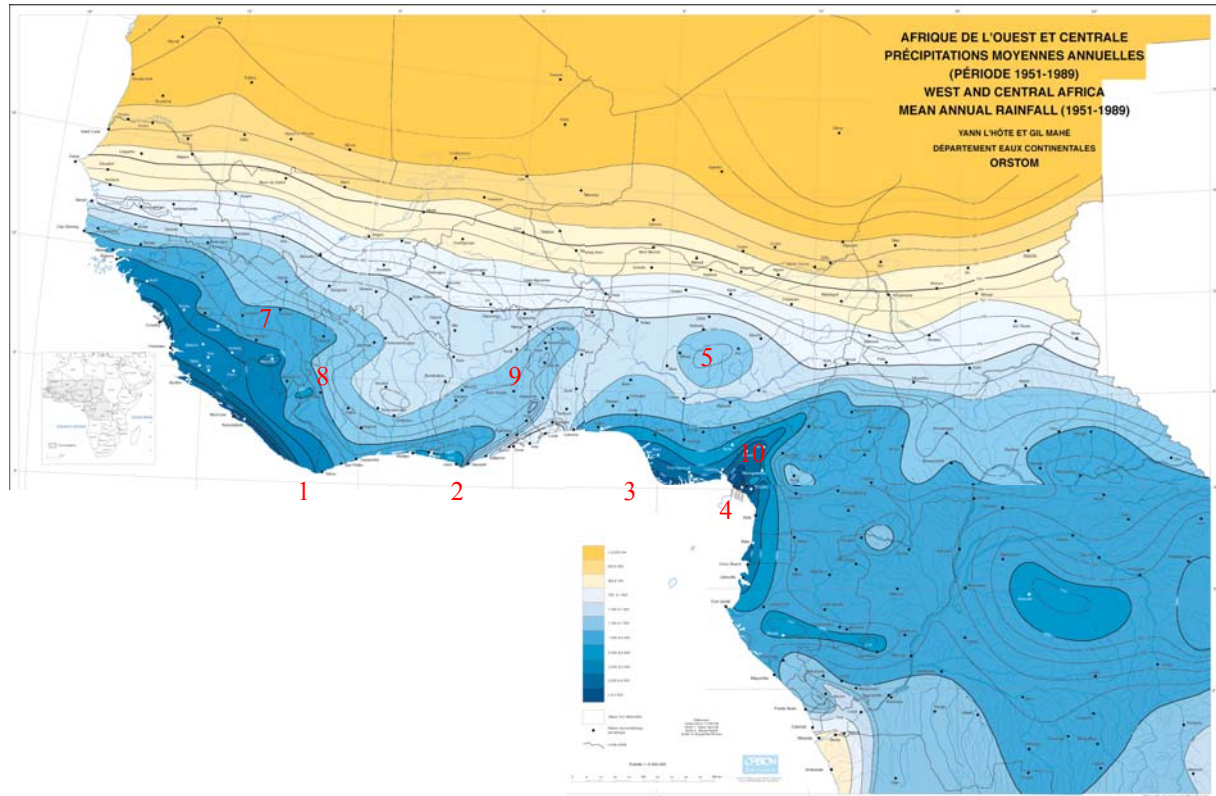


Figure 4. Précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989) sur l'Afrique de l'ouest. Les isohyètes vont de « moins de 200 mm » à « plus de 4000 mm ». D'après L'Hôte et Mahé (1996).

Avant de travailler sur le degré carré de Niamey, nous allons nous intéresser à l'Afrique de l'Ouest. Sur la partie nord de l'Afrique de l'ouest (bande sahélienne), où les isohyètes sont jaunes ou bleu clair, on constate que les isohyètes de pluie moyenne interannuelle (1951-1989) sont parallèles à l'axe est-ouest (Cf. Figure 4), et que les valeurs décroissent du nord au sud (présence du gradient nord-sud). Ce parallélisme est causé par la continentalité de la bande sahélienne où il y a peu de reliefs.

Dans la zone allant de la Guinée au Cameroun, les isohyètes ne sont plus parallèles à l'axe est-ouest, et les valeurs de pluie moyenne interannuelle sont très fortes en certaines zones bien particulières.

Il est intéressant de procéder à un examen du dessin de côte et son influence sur les isohyètes. Lorsque la côte est perpendiculaire au flux de mousson de sud-ouest, les pluies sur la côte sont beaucoup plus fortes ; c'est ce qu'on observe pour la bande allant de la Guinée jusqu'à la pointe du Liberia (zone 1), particulièrement arrosée. C'est aussi ce qu'on observe sur la pointe sud du Ghana (zone 2), sur la pointe sud du Nigéria (zone 3) et sur la côte du Cameroun, surtout sur la partie orientée nord-ouest/sud-est (zone 4). Par contre les pointes de terre dépassant de la côte semblent provoquer une diminution des pluies à l'est (« sous le vent » de mousson) de ces pointes comme si elles abritaient leur flanc est du flux de mousson

(notons aussi que ces morceaux de littoraux orientaux sont presque parallèles au flux de mousson de sud-ouest).

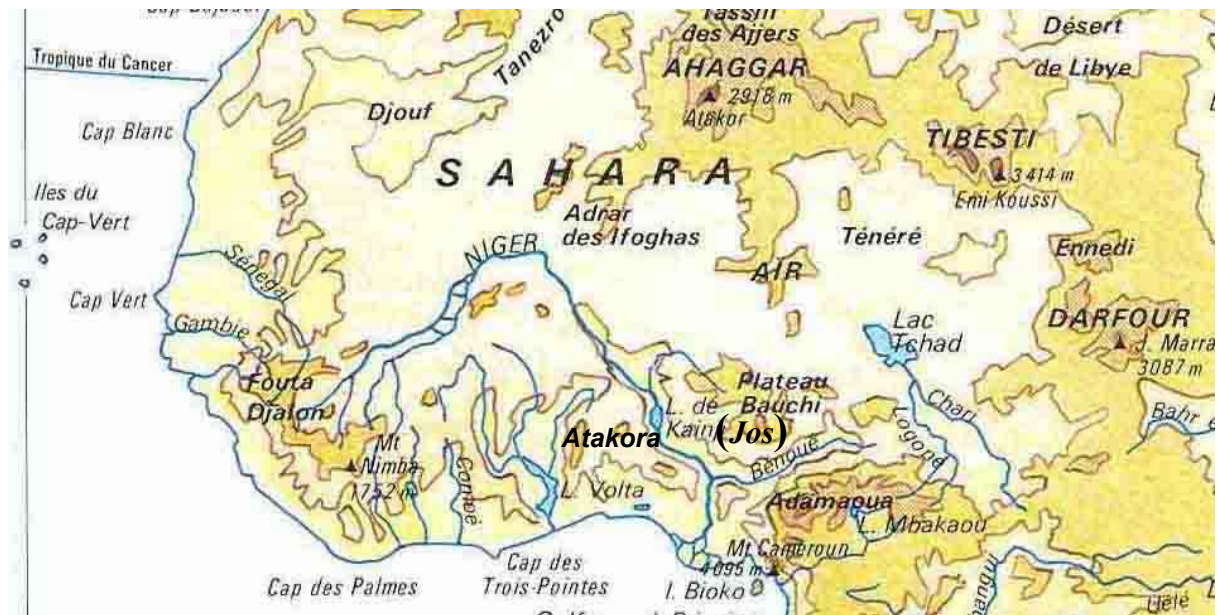


Figure 5. Principaux reliefs de l’Afrique de l’ouest.

Regardons maintenant les macro-reliefs proches des côtes de l’Afrique de l’ouest ; les plus importants sont le Fouta Djallon et le Mont Nimba (zones 7 et 8, les numéros se rapportent à la Figure 4) en Guinée, l’Atakora au Togo et Bénin (zone 9), le plateau de Jos au Nigéria (zone 5) et le Mont Cameroun et l’Adamaoua au Cameroun (zone 10). On constate, ce qui est classique :

- tout d’abord que ces reliefs sont plus arrosés que les autres zones à latitude équivalente
- ensuite qu’à l’est et au nord-est de chacune de ces montagnes, on observe une diminution de la pluie moyenne interannuelle. Il y a donc présence de climats d’abris derrière ces montagnes, qui « absorbent » une grande partie du flux de mousson.

Le plateau de Jos est un cas particulier : il reçoit plus d’eau aussi, mais, plus éloigné de la côte, ce plateau est entouré de toutes parts de plus faibles valeurs pluviométriques.

Les isohyètes moyens interannuels que nous avons considérés jusqu’à maintenant présentent le défaut, par définition, de ne pas montrer l’évolution des isohyètes au cours du temps. La carte ci-dessous met en évidence cette évolution : on observe la forte descente des isohyètes moyens vers le sud pour les 30 dernières années, comparées aux 30 années précédentes, ce qui met bien en évidence la sécheresse des trente dernières années. La désertification progresse bel et bien vers le sud.

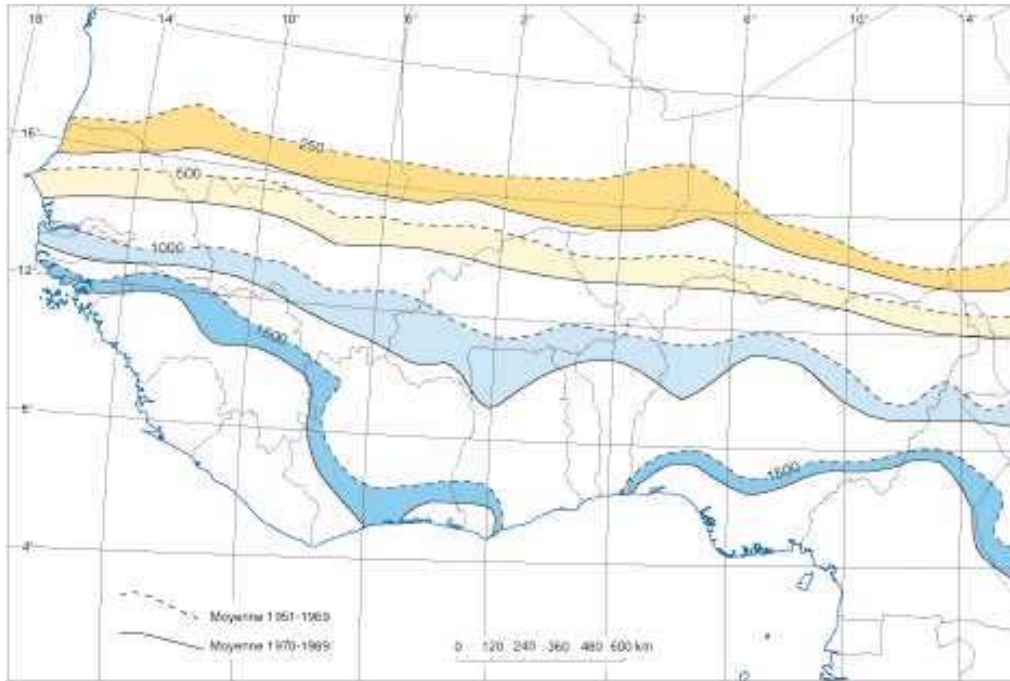


Figure 6. La descente des isohyètes interannuels la période 1951-1969 (pointillés) et les isohyètes interannuels de la période 1970-1989 (trait plein). D’après L’Hôte et Mahé (1996).

- **Deux zones de naissance des lignes de grain, le plateau de Jos et l’Aïr**

Nous avons vu le rôle joué par les montagnes côtières sur le flux de mousson, et donc sur les pluies de mousson. Mais les montagnes continentales jouent aussi un rôle sur les pluies : elles provoquent le déclenchement des systèmes convectifs à l’origine des lignes de grains, qui vont d’est en ouest. D’après Shinoda et al.(1999), les lignes de grain sont préférentiellement générées près des régions des montagnes de l’Aïr et du plateau de Jos, en fin d’après-midi, et se propagent en direction de l’ouest. La Figure 7 ci-après, extraite de leur article, illustre un exemple typique de ligne de grain qui s’est déclenchée dans l’Aïr à la date du 21 et 22 août 1994: les pluies les plus à l’est sont survenues à Agadez vers 15 h-16 h, heure locale, puis se sont déplacées vers l’ouest pour arriver à Tahoua vers minuit, pour finalement arriver à Niamey le lendemain matin vers 6 h. La vitesse de déplacement de la pluie est très proche de la moyenne des vitesses de déplacement des lignes de grain de longue durée observées sur la région, et la durée (14 h) et la distance parcourue (770 km) classent aussi cette pluie parmi les lignes de grain de longue durée. D’après les observations, les lignes de grains déclenchées dans l’Aïr suivent des horaires assez proches de ceux de l’exemple.

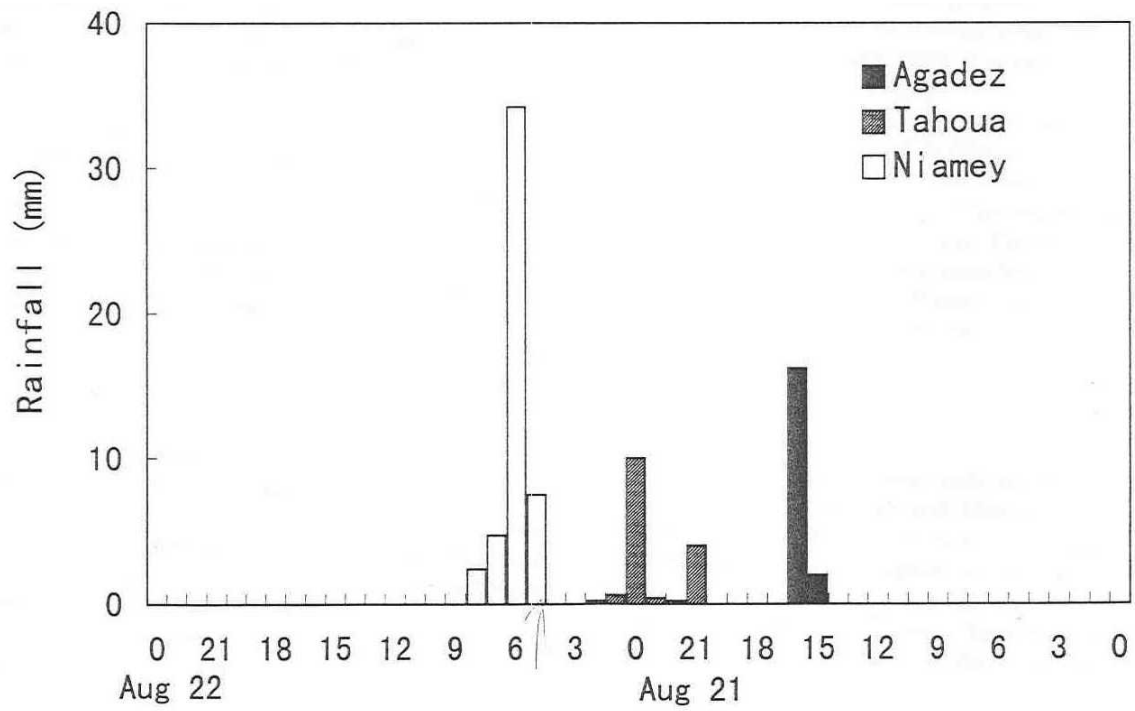


Figure 7. Série d'évènements de pluie qui ont survécu, de gauche à droite (et d'est en ouest et d'heure en heure): de Agadez, Tahoua, Niamey durant les 21 et 22 août 1994. D'après Shinoda et al. (1999).

V.2. Phénomènes de persistance et singularités dans la répartition spatiale interannuelle des pluies

- **Phénomène de persistance des pluies**

Taylor et Lebel (1997) ont montré l'existence de phénomènes de persistance, dans le degré carré de Niamey. Leurs conclusions montrent une bonne corrélation entre les gradients de pluie des précipitations du jour et ceux des précipitations antérieures, à l'échelle de l'évènement (1 à 2 jours entre deux évènements) mais aussi à l'échelle décadaire et mensuelle.

Le mécanisme de rétroaction de surface, à une dimension, qui est proposé dans l'article pour expliquer le phénomène de persistance, repose sur deux facteurs clés : la sensibilité de la pluie à l'évaporation de surface et la sensibilité de l'évaporation aux pluies antérieures.

Le 1^{er} facteur dépend de facteurs météorologiques. Pour que l'évaporation de surface influence directement les précipitations, il faut que la pluie soit convective.

Le 2^{ème} facteur, la sensibilité de l'évaporation aux pluies antérieures nous intéresse particulièrement. Il est déterminé par les propriétés du sol et de la végétation. L'évaporation dans une région semi-aride telle que le Sahel, où la végétation est éparse, est plus sensible aux pluies dans le jour ou les deux jours suivant la pluie. A cette échelle de temps, c'est l'assèchement de la couche de sol supérieure, typiquement de 10 cm, qui est mise en jeu. Pendant cette période, des taux d'évaporation d'environ 3-4 mm/jour peuvent être maintenus (Wallace and Hollwill, 1997). Ainsi, l'évaporation totale pour une surface de végétation éparse est typiquement le double de celle d'une surface avec une couche supérieure sèche (Gash et al., 1997). A l'échelle de plusieurs semaines, la pluie affecte l'évapotranspiration via les réservoirs d'humidité des sols profonds et le développement des feuilles.

Pour les persistances de courte durée, de 1 à 2 jours, le contraste d'évaporation entre les zones humides et sèches est fort, et dans les zones où les pluies ont été les plus fortes, il a été observé de bonnes corrélations entre gradients des pluies du jour et gradients des pluies antérieures de quelques jours. On peut ainsi relier l'humidité de la surface supérieure à la persistance des pluies sur de courtes durées.

Pour les persistances de longue durée, supérieures à la décade, quand la couche supérieure du sol sèche, sur des surfaces de végétation éparse, la composante de l'évaporation due au sol nu diminue rapidement. Après plusieurs jours de conditions sèches, l'évaporation totale est fortement liée à l'évapotranspiration et à l'humidité du sol profond, due aux pluies accumulées sur plusieurs semaines. L'évaporation est aussi plus sensible aux pluies hebdomadaires et mensuelles quand la couche supérieure sèche depuis quelques jours. La persistance à l'échelle de plusieurs semaines a été observée en divers endroits du degré carré, et une explication plausible est le rôle joué par l'évaporation de la couche de sol profond.

L'étude de Taylor et Lebel ne concerne que les années 1991 et 1992, sur un réseau dense de stations (101 stations en 1991 et 109 stations en 1992) réparties régulièrement sur le degré carré, typiquement tous les 12,5 km.

- **Singularités dans la répartition spatiale des pluies**

Une figure tirée de Ali et al. (2003) met en évidence la présence de singularités dans la répartition spatiale des pluies : sur la Figure 8, extraite de l'article, qui représente la pluie moyenne interannuelle dans le degré carré de Niamey (moyenne sur 11 ans, de 1990 à 2000, critère de 30% de stations qui enregistrent la pluie au minimum), on observe deux pics en

forme de « bulles » au milieu de la carte, dont l'ordonnement est méridien (nord-sud). Ces singularités ne sont pas causées par un biais géostatistique, comme on le vérifie en représentant la moyenne arithmétique des pluies à l'intérieur de chaque maille de 10 km X 10 km, sans interpolation (Figure 9): on y voit l'effet de frontière (bord), comme sur la carte 4a, mais on voit que les 2 bulles sont ordonnées au niveau même des données de base (la taille des points étant proportionnelle à la pluie moyenne enregistrée sur les 11 ans). Les stations alignées nord-sud entre les 2 bulles semblent avoir en moyenne une pluviométrie plus faible que les 2 bulles les entourant.

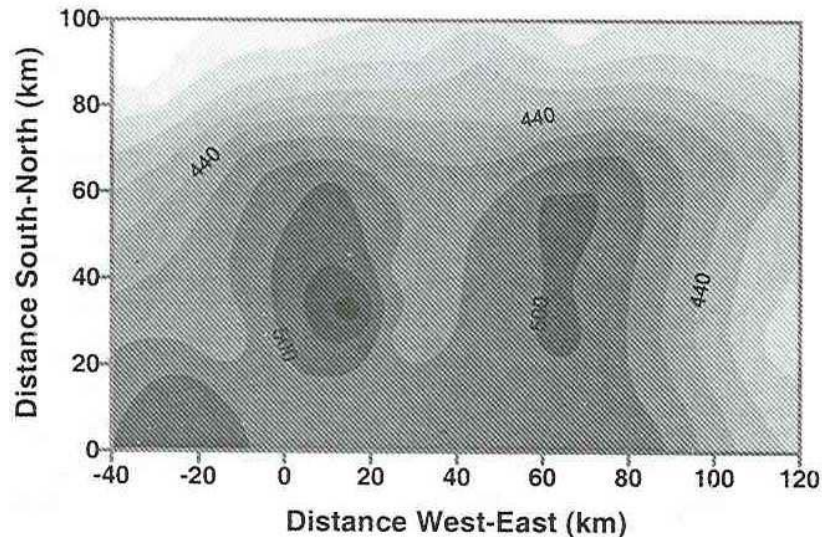


Figure 8. Pluie moyenne interannuelle sur 11 ans (1990 à 2000) produits par les événements de pluie définis sur le réseau Epsat-Niger. Ces événements sont définis avec un critère spécial : un minimum de 30% des stations fonctionnant doit enregistrer la pluie). Les coordonnées de 0 à 110 km en abscisse et de 0 à 100 km en ordonnée correspondent à peu près au degré carré de Niamey (2-3° long E et 13-14° lat N). D'après Ali et al. (2003).

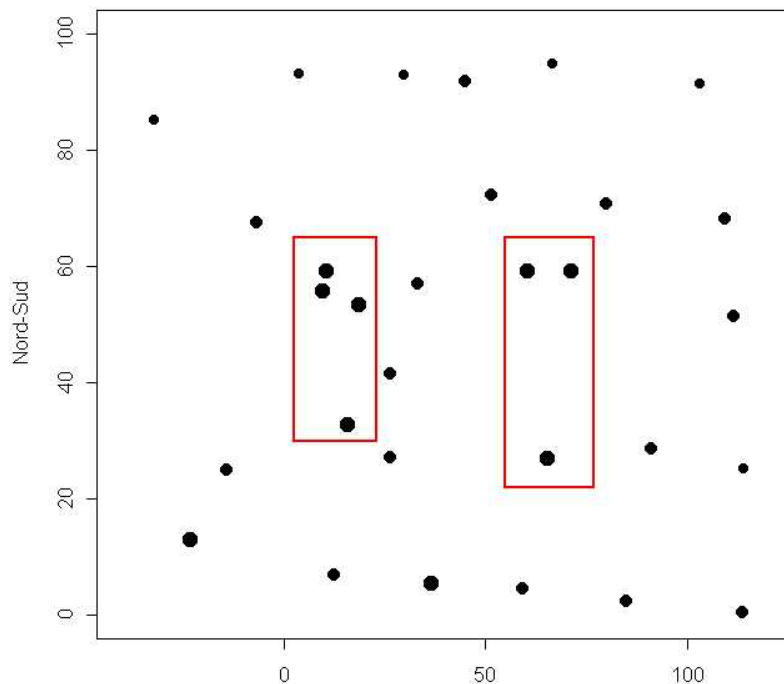


Figure 9. Représentation de la moyenne arithmétique des pluies de 1990 à 2000 à l'intérieur de chaque maille de 10 km X 10 km, sans interpolation. Les coordonnées de 0 à 110 km en abscisse et de 0 à 100 km en ordonnée correspondent à peu près au degré carré de Niamey (2-3° long E et 13-14° lat N).

- **Conséquences sur l'orientation du travail**

Ces travaux nous ont amené à nous poser des questions sur l'influence du relief et de la végétation sur la persistance et sur les singularités dans la répartition spatiale des pluies dans le degré carré de Niamey (la persistance ayant évidemment elle-même un rôle dans la répartition spatiale des pluies au sein d'une même saison).

D'une part, la persistance avait été observée pour des périodes de quelques jours et de quelques semaines ; nous essaierons d'observer si cette persistance peut perdurer sur l'ensemble de la saison. Seules les années 1991 et 1992 ayant été étudiées auparavant, nous regarderons ce qu'il en est de toutes les années de 1990 à 2003, et par la même occasion comment évoluent les maxima et minima de pluie d'année en année. Sont-ils situés dans les mêmes zones ? Nous chercherons aussi à mettre en évidence si la végétation et le relief présentent des caractéristiques particulières dans ces zones, si elles existent, ce qui permettrait de mettre en évidence l'influence des conditions de surface sur la persistance.

D'autre part nous essaierons aussi de voir si il y a un rapprochement possible entre les singularités dans la répartition spatiale des précipitations dans le degré de Niamey et les zones caractéristiques du relief et de la végétation. Les singularités sont-elles liées aux zones éventuelles de persistance interannuelle des pluies ?

- **Cartes de cumuls décadaires ajoutés**

Pour étudier le phénomène de persistance sur l'ensemble des saisons, nous avons tracé des cartes de cumuls décadaires ajoutés, pour chaque année de 1990 à 2003. Rappelons pour chaque année, chacune des cartes décadaires ajoutées correspond à une décade, et qu'elle représente la somme de tous les cumuls décadaires depuis le début de la saison jusqu'à la décade considérée incluse.

Pages suivantes, voici un exemple de cartes décadaires cumulées, pour l'année 1998, année très humide (isohyètes 20 mm) :

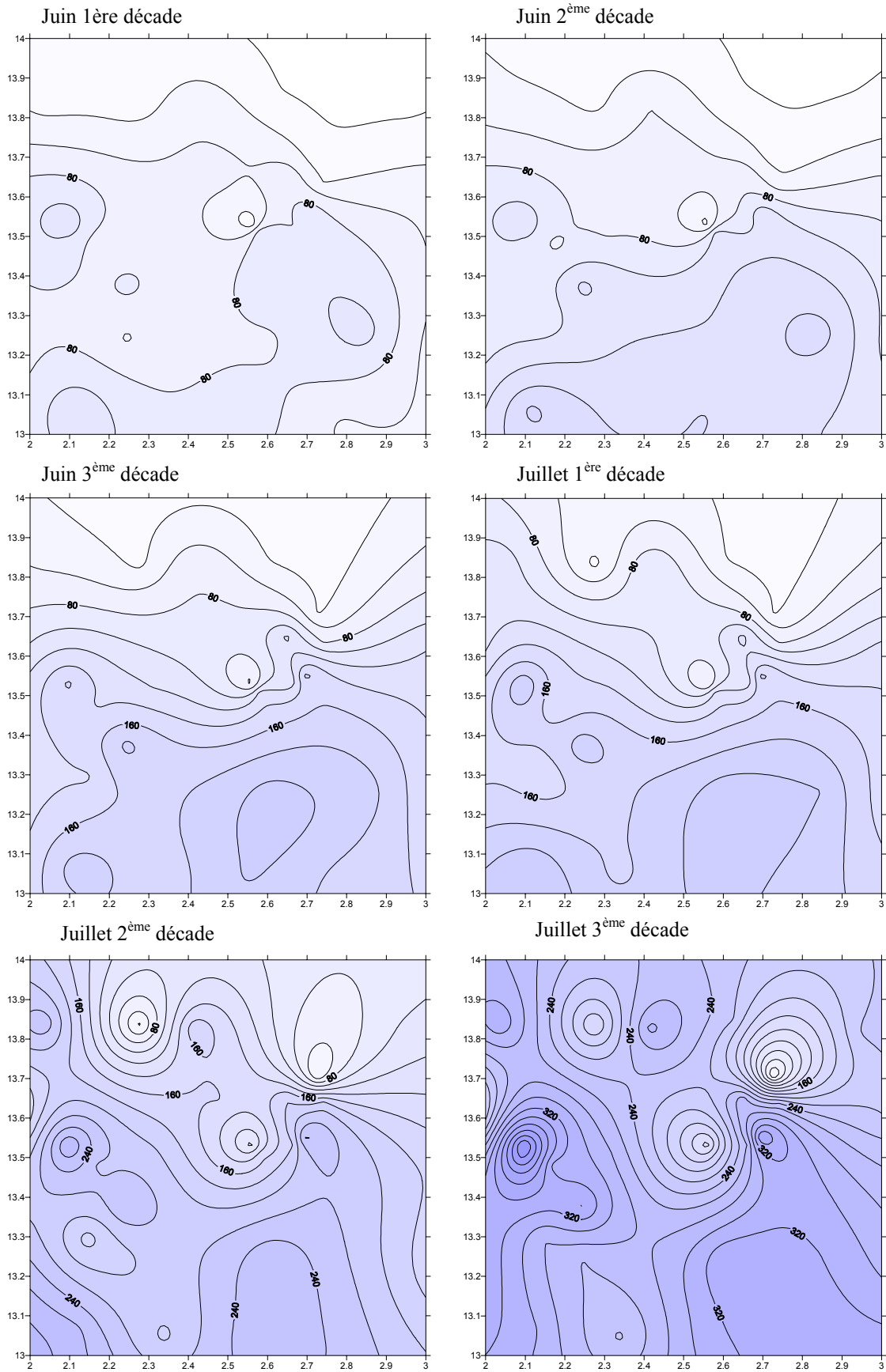


Figure 10. Cartes décadaires cumulées sur le degré carré de Niamey de juin à juillet 1998 (isohyètes 20 mm). Abscisse : longitude est en degrés. Ordonnée : latitude nord en degrés.

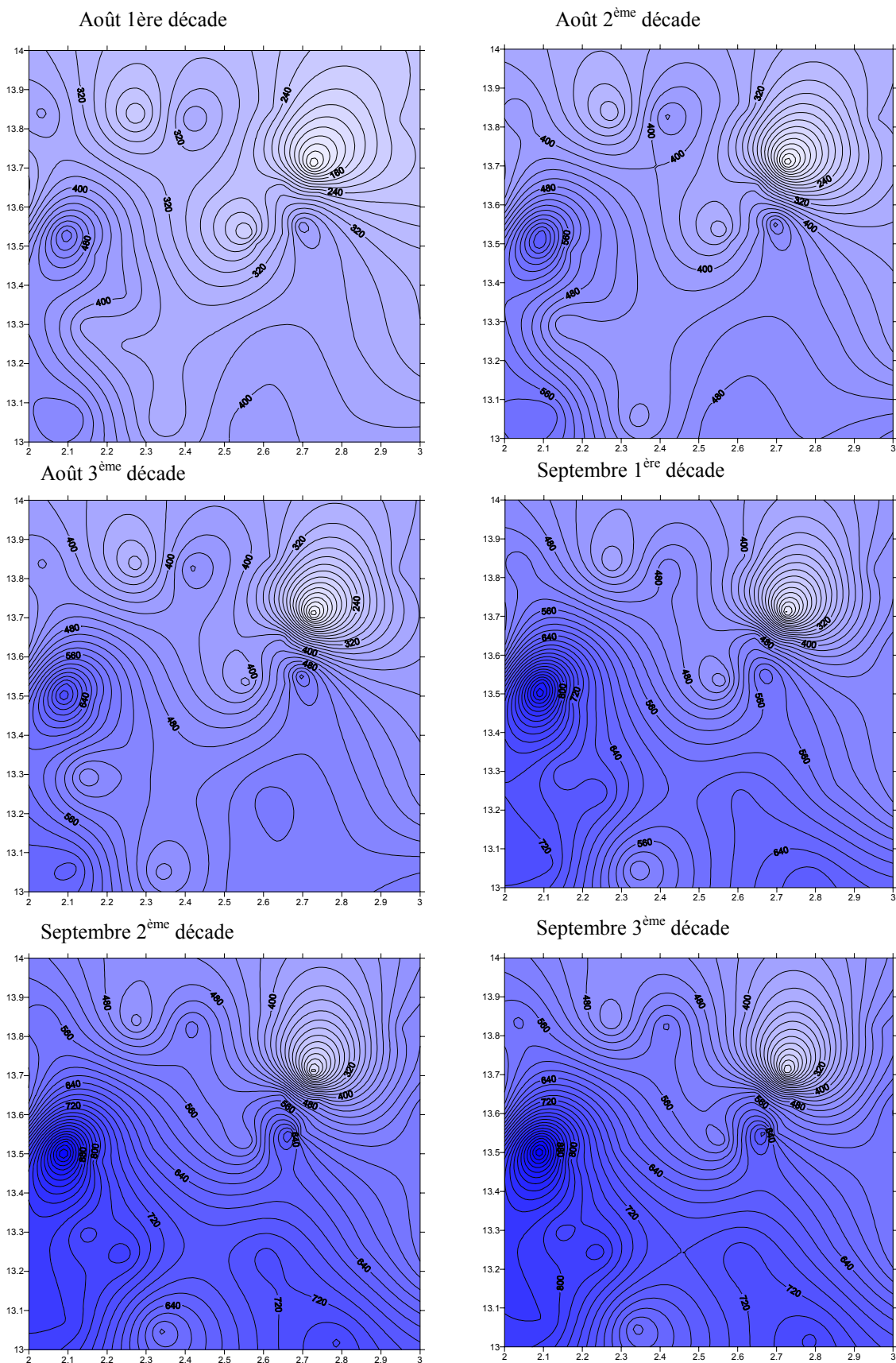


Figure 11. Cartes décadaires cumulées sur le degré carré de Niamey de août à septembre 1998 (isohyètes 20 mm). Abscisse : longitude est en degrés. Ordonnée : latitude nord en degrés.

On peut faire plusieurs remarques sur ces cartes : on observe d'abord que les maxima et les minima restent centrés aux mêmes endroits de carte en carte, ce qui signifie que dans les zones de maxima (respectivement de minima), les cumuls de la décade suivante vont être maximaux aussi (respectivement minimaux). On voit aussi que, décade après décade, la densité des isohyètes augmente en même temps qu'ils se resserrent, autour des maxima et minima. Les plus forts cumuls de pluie vont donc aux zones qui ont déjà reçu les premières pluies, ce qui correspond à la persistance décrite par Taylor et Lebel. Mais on l'observe ici à l'échelle de la saison, en fréquence décadaire.

Les observations sont globalement les mêmes chaque année : persistance des cumuls de décade en décade. Toutefois, pour deux ou trois années, on remarque que certains maxima ou minima des 1^{ères} décades disparaissent ensuite : cela a lieu lorsque les premières pluies sont particulièrement sèches.

- **Cartes des cumuls saisonniers**

Regardons maintenant les cartes de cumul saisonnier de 1993 à 2002 (Figure 12 et Figure 13). Chaque carte correspond à la dernière carte des cumuls décadaires ajoutés d'une année.

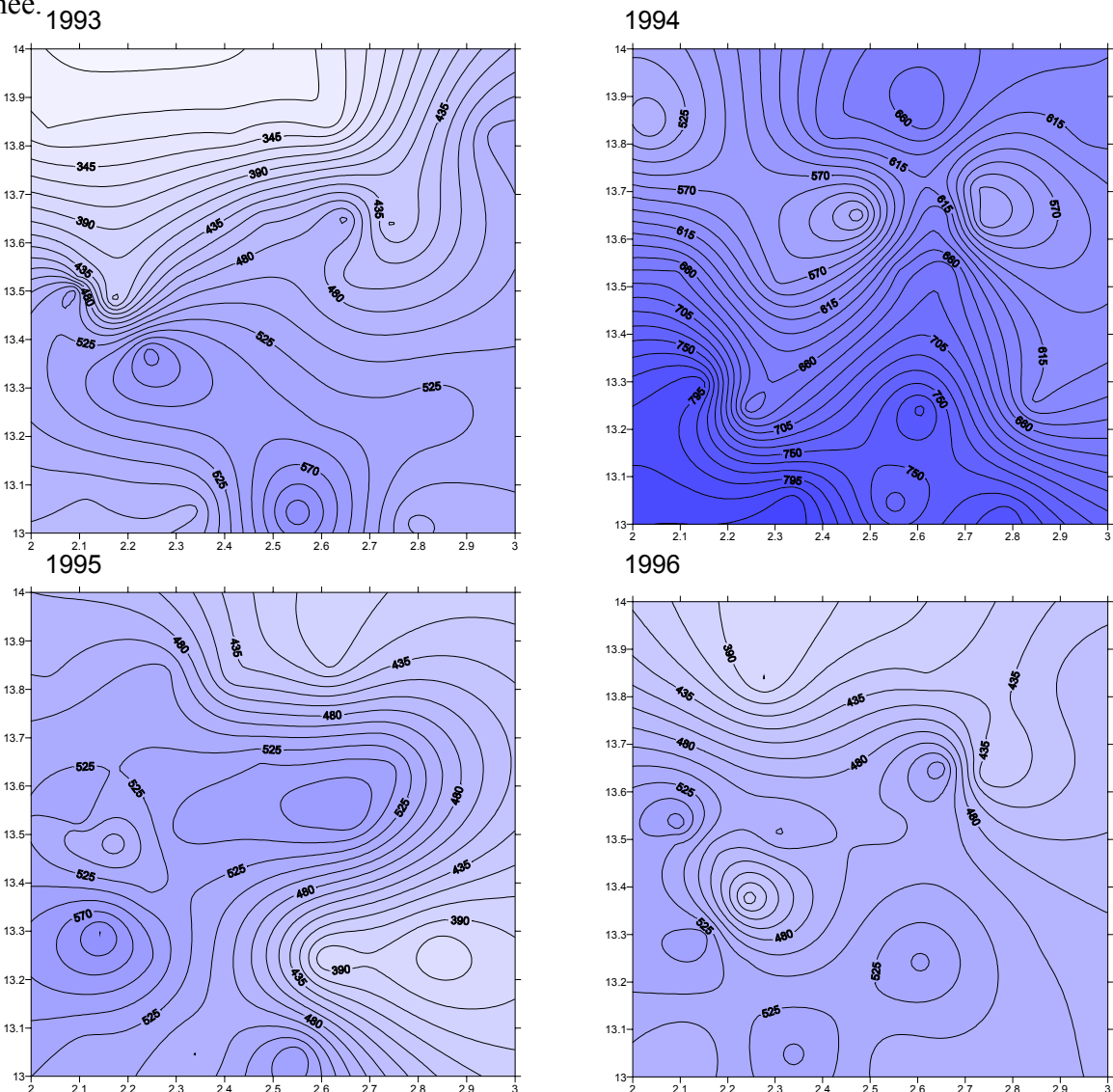


Figure 12. Carte des cumuls saisonniers de 1993 à 1996 sur le degré carré de Niamey. Abscisse : longitude est en degrés. Ordonnée : latitude nord en degrés.

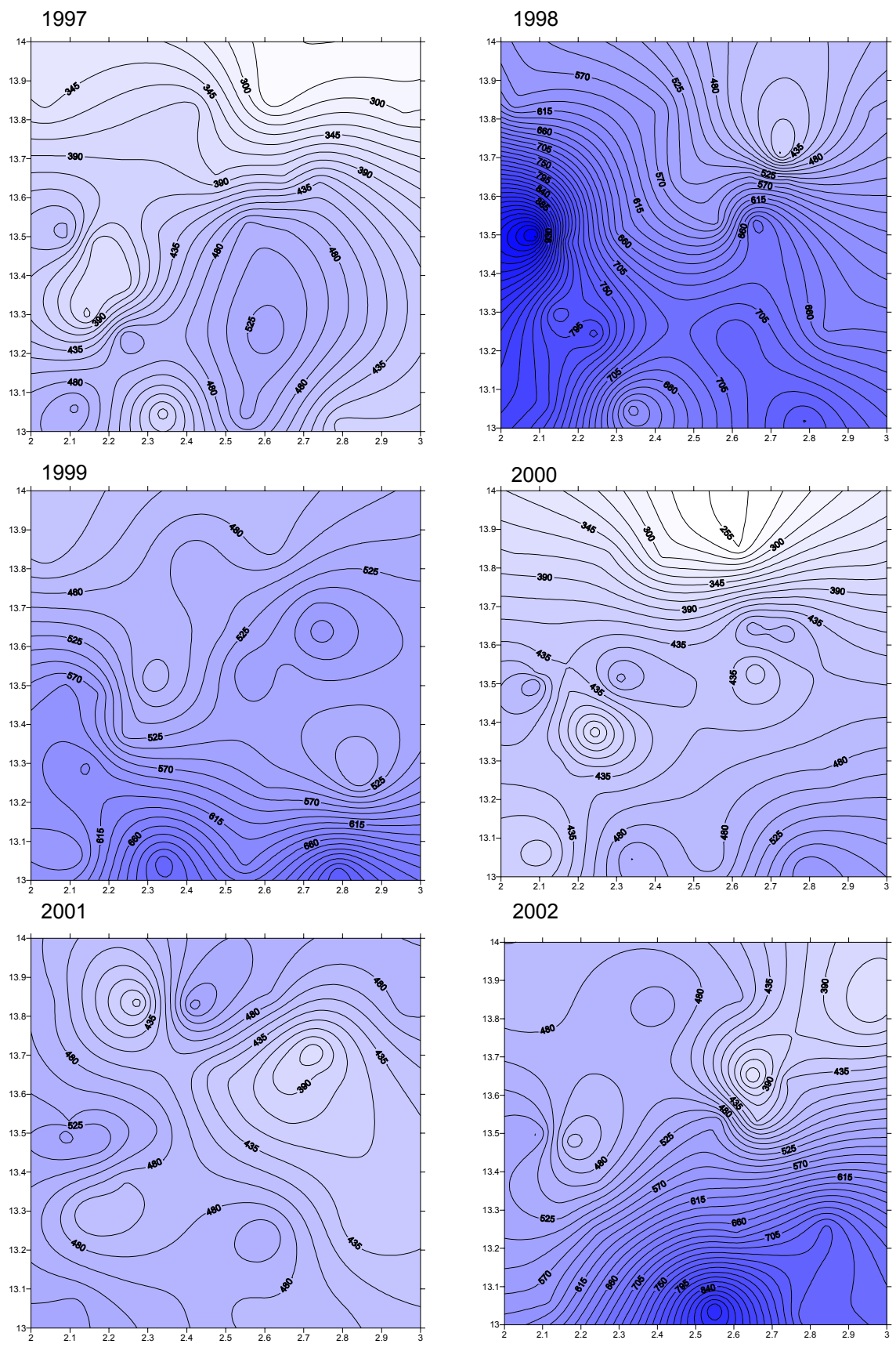


Figure 13. Carte des cumuls saisonniers de 1997 à 2002 sur le degré carré de Niamey. Abscisse : longitude est en degrés. Ordonnée : latitude nord en degrés.

Ces cartes saisonnières mettent bien en évidence aussi l'extrême variabilité des pluies d'une année sur l'autre. 1994, 1998, 1999 sont des années très humides, tandis que 1997 et 2000 sont particulièrement sèches. On a ici la confirmation que les persistances intranannuelles ne se reproduisent pas d'une année sur l'autre. Cependant certaines zones semblent «attirer» la pluie plus que d'autre. Certains maxima se retrouvent presque systématiquement chaque année, par exemple celui de Niamey (environ 2.09° de longitude est et 13.5 de latitude nord), celui de Wankama (environ 2.65° de longitude est et 13.65 de latitude nord), qui a l'air de disparaître en 2001, 2002 et 2003. On peut se demander si les arbres ont été très exploités autour de Wankama récemment ; il y a beaucoup de plateaux autour de Wankama et il est possible qu'ils aient eu jusqu'à peu une végétation plus dense que les zones cultivées, bien qu'en principe les plateaux soient globalement plus pelés.

On trouve toujours aussi un maximum dans la partie la plus au sud du degré carré, mais qui se déplace selon l'axe est-ouest.

Pour expliquer la persistance des pluies au cours d'une saison, pour chaque décade, on peut évoquer le rôle de l'évaporation de l'humidité du sol profond et de l'évapotranspiration, donc de la végétation. Nous avons de plus remarqué que la végétation verdissait une à deux décades après un événement pluvieux: par exemple, herbes qui poussent sur un sol entièrement nu auparavant en début de saison. Ainsi, on pourrait avancer l'explication suivante : les zones assez humides initialement , c'est-à-dire les zones où les premières pluies tombent au début de la saison, engendrent une recrudescence de la végétation, qui elle-même entretient le taux d'humidité en permettant l'infiltration de l'eau dans la couche profonde du sol notamment, qui influe ensuite sur la convection. On peut aussi évoquer la baisse de l'albédo engendrée par cette pousse de la végétation, qui pourrait aussi influencer la localisation des convections. On peut parler enfin d'un troisième mécanisme, qui est évoqué par Escourrou : «[La] rugosité varie avec la croissance des plantes. Dans les steppes tropicales, par exemple, la rugosité diminue lors de la saison sèche, ce qui a pour conséquence l'accroissement de la vitesse du vent et de l'évaporation ». Ainsi la végétation transitoire ou intrasaisonnière (herbes etc.) pourrait expliquer la persistance des pluies pendant la saison.

Mais dans ce cas, quel rôle joue la végétation permanente (arbres, etc.), qui est plus haute ? Si la rugosité due à la végétation transitoire joue un rôle, nécessairement la rugosité due à la végétation permanente aussi, de façon plus importante et au niveau interannuel. Est-ce la végétation permanente qui est la cause de la préférence des pluies pour certaines zones chaque année? La réponse est rendue encore plus difficile par le fait que la végétation permanente tend à diminuer à cause du déboisement, ce qui ne peut que restreindre son rôle.

Une hypothèse intéressante serait de considérer qu'il existe un signal de pluie de base, le cumul saisonnier moyen, fortement lié à la végétation permanente, auquel se superpose un signal (aléatoire en début de saison, mais qui se perpétue sur les mêmes zones une fois les lères pluies passées), entretenu par la rétroaction positive de la végétation transitoire sur les pluies, et qui donc change chaque année.

- **Pluie interannuelle : moyenne et écart-type 1989-2002**

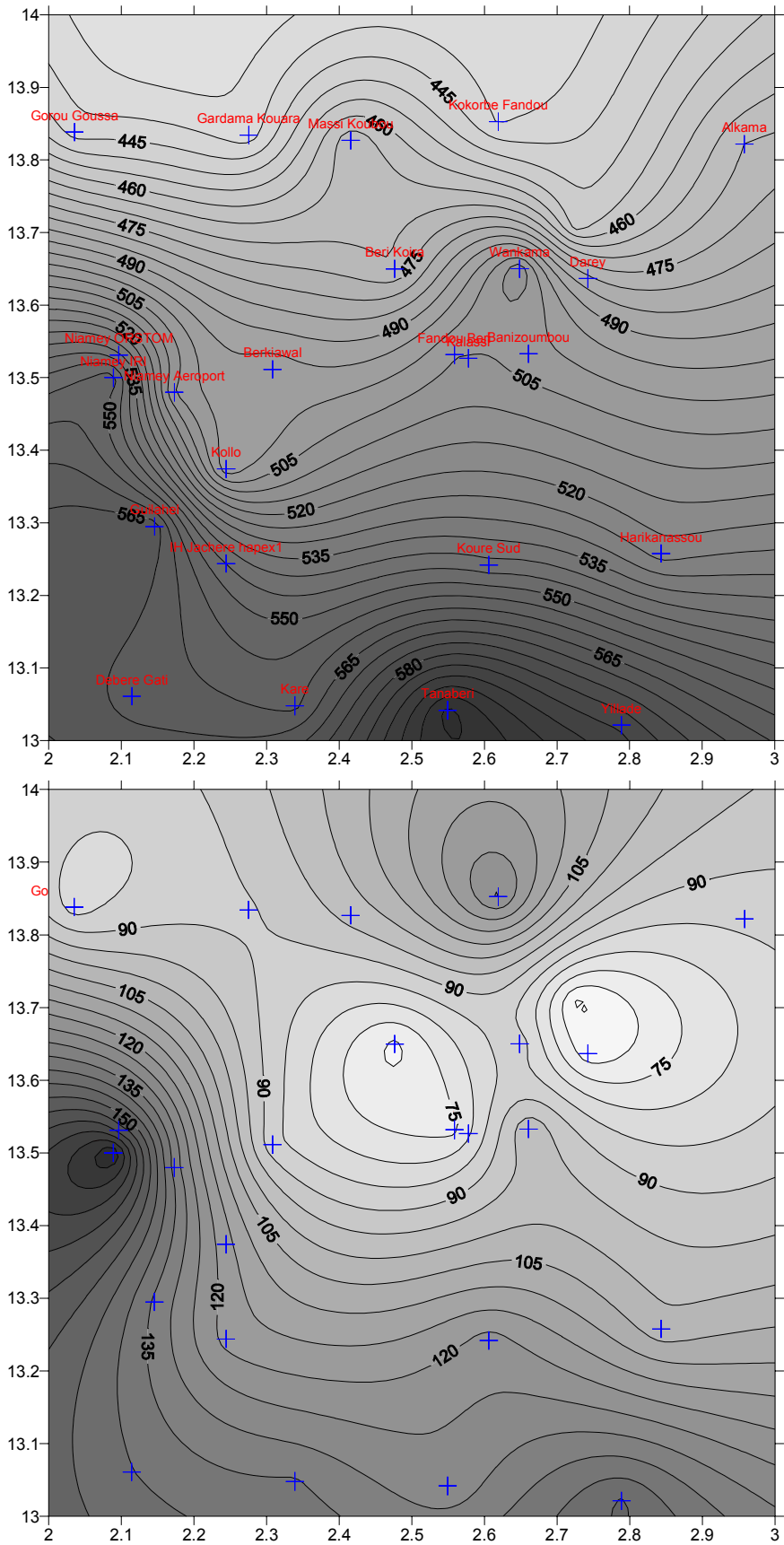


Figure 14. Carte de la moyenne interannuelle des pluies (en haut) de 1989 à 2002 et carte des écart-types interannuels des pluies (en bas) de 1989 à 2002

La carte de la pluie moyenne interannuelle (Figure 14) nous donne une synthèse des observations faites sur les cartes des cumuls saisonniers. On retrouve la localisation des maxima et minima. Conformément à nos remarques précédentes, on observe un maximum à l'ouest du degré carré, à Niamey, un maximum au sud, à Tanaberi, un maximum près du centre, à Wankama. Il y a deux minima au nord-est et nord-ouest du degré carré, mais ils s'expliquent principalement par le gradient de pluie nord-sud et peut-être aussi par l'effet de bord statistique. On voit bien le gradient nord-sud sur tout l'ensemble du degré carré, mais les isohyètes ne sont pas parallèles à l'axe est-ouest. La partie sud du degré carré est la plus arrosée, et la partie sud-ouest l'est parfois autant que la partie sud du degré carré.

D'après la carte des écart-types interannuels (Figure 15) de la pluie, on constate que la pluie varie le plus d'une année sur l'autre vers Niamey, vers Kokorbe Fandou au nord, et dans la partie sud, où on observe là-aussi un gradient nord-sud. On remarque que deux minima se situent de part et d'autre de Wankama. Les effets de bord atténuent ici aussi le signal sur chaque bord de la carte.

En traçant les mêmes cartes sur une zone un peu plus étendue que le degré carré, on s'affranchit des effets de bords est et ouest à l'intérieur du degré carré, et pour la moyenne interannuelle, on constate à peu près les mêmes caractéristiques de localisation des maxima et des minima, avec toujours des maxima à Niamey et Tanaberi ; toutefois on n'observe plus de maximum à Wankama. La carte d'écart-type est quasiment identique (Cf. cartes en annexes). Les différences peuvent aussi provenir du fait qu'une année en moins est prise en compte dans les cartes interannuelles de l'annexe.

Notons aussi que sur ces cartes interannuelles, on retrouve aussi à peu près la forme des deux « bulles » de l'article de Ali et al. Ces deux bulles se retrouvent aussi schématiquement pour la plupart des cumuls saisonniers. Il est possible que ces singularités de la répartition spatiale des pluies sont liées au phénomène de persistance, puisque les zones globalement favorisées par les pluies correspondent aux deux « bulles ».

- **Végétation et relief sur le degré carré de Niamey**

Nous allons maintenant comparer la répartition de la végétation et du relief dans le degré carré à la répartition des pluies.

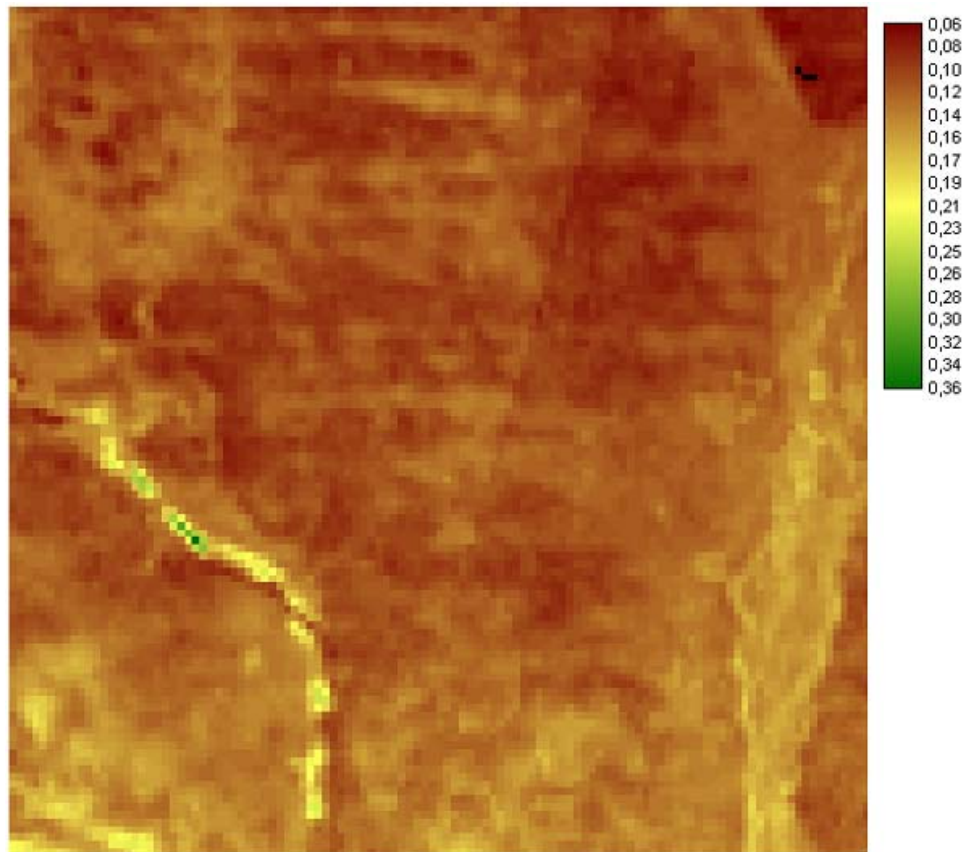


Figure 15. Carte NDVI SPOT végétation 1^{ère} décennie de mai 2003 sur le degré carré de Niamey

D'après la carte NDVI de la 1^{ère} décennie de mai 2003 (Figure 15), les zones où la végétation est la plus dense sont les bords du fleuve, le dallol Bosso et globalement la partie la plus méridionale du degré carré. Le pic de végétation est observé aux alentours de Niamey ; la ville de Niamey est la zone la plus arborée du sahel nigérien ! C'est ce que l'on observe aussi depuis l'avion lorsque l'on atterrit à Niamey. Dans la capitale, les arbres permettent de donner de l'ombre, et ils ne sont donc pas abattus pour leur bois ! Et le phénomène est même en croissance, car la ville s'étend de plus en plus, ce qui engendre de plus en plus d'arbres et de vergers aux alentours immédiats.

Notons que cette carte représente la végétation de 2003 pendant la 1^{ère} décennie de mai, c'est-à-dire à la fin de la saison sèche ; c'est donc la végétation permanente, qui reste présente d'année en année, même pendant les huit mois sans précipitations (en gros la végétation arborée et arbustive). De la sorte, nous nous affranchissons du fait que la pluie influe sur la végétation.

Ainsi, nous constatons que la zone la plus verte du degré carré, aux alentours de Niamey, correspond aussi à une des zones où la pluie paraît la plus abondante, mais en même temps la plus variable d'une année à l'autre. La zone délimitée à l'est par le fleuve, plus verte que dans la partie nord, semble également « pluviogène » (carte de moyenne interannuelle en annexe). Le fleuve délimite des zones de maxima à l'ouest et de minima à l'est. Le maximum de pluie de Tanaberi correspond aussi à une zone où il y a plus de végétation. Au niveau du dallol Bosso, on constate que les isohyètes s'incurvent légèrement vers le sud (ceci est moins net sur la carte de moyenne interannuelle en annexe).

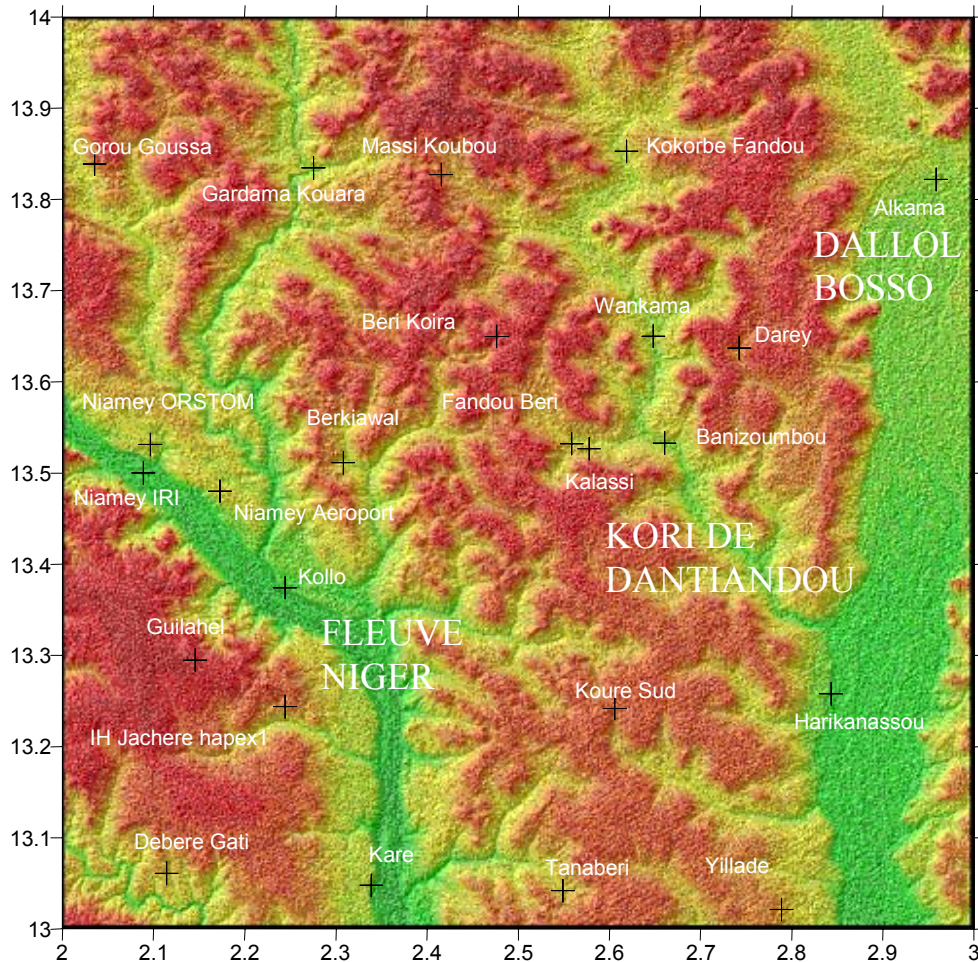


Figure 16. MNT/SRTM avec localisation des pluviographes sur le degré carré de Niamey

Au niveau du relief (Figure 16), on constate la présence de deux vallées principales : la vallée du fleuve Niger, à l'Ouest et le dallol Bosso, plus large, à l'est. On peut considérer que reste du degré carré est constitué approximativement de plateaux plateaux et de dépressions et vallées peu prononcées.

Le relief qui devrait avoir le plus d'impact est le dallol Bosso, qui est la plus grande « irrégularité » sur le degré carré, et pourtant ce n'est pas dans sa zone que sont observées les plus fortes précipitations. Le fleuve a un impact beaucoup plus fort sur les pluies (fortes pluies à l'ouest du fleuve, peut-être à cause du relief du fleuve par rapport aux lignes de grain d'est ?).

Le kori de Dantiandou, qui passe par Wankama et Banizoumbou pour aller dans le dallol Bosso, pourrait aussi jouer un rôle dans la répartition des pluies. Sur la carte de pluie moyenne interannuelle 1989-2002, il y a un pic de pluie à Wankama ; et sur la carte d'écart-type interannuel des pluies, on constate que la zone de Wankama à Banizoumbou, donc dans le kori de Dantiandou, est entourée à l'est et à l'ouest de minima. C'est aussi ce qu'observent, pour l'année 2002, les chercheurs de l'ICRISAT (International Crops Research In Semi Arid Tropics) à partir d'un réseau de 60 pluviomètres installés dans la région (communication personnelle de Bruno Gérard).

L'orientation méridienne (nord-sud) des reliefs (fleuve, dallol Bosso, principaux kori) est à noter. Ces reliefs représentent une « rugosité » vis-à-vis des flux d'est beaucoup plus forte que s'ils étaient orientés est-ouest.

Nous avons évoqué précédemment de l'influence de la végétation du fleuve et du dallol Bosso sur les pluies, sans parler du relief ; ces deux vallées principales correspondent aux zones les plus vertes du degré carré. Il est difficile de dire à ce stade là si c'est la végétation ou le relief qui ont le plus d'influence sur les pluies. Et jusqu'à présent nous avons parlé du rôle de la végétation à travers l'évaporation engendrée, mais pas de la rugosité de la végétation. Si on considère la rugosité de la végétation comme mécanisme de rétraction sur la pluie, dans ce cas la rugosité du relief devrait logiquement avoir un rôle bien plus important (végétation : hauteur caractéristique de 10 m, amplitude du relief sur le degré carré : 100 m, les reliefs allant à peu près de 180 à 280 m d'après le MNT).

V.3. Etude des corrélations et Analyse en Composante Principale

Maintenant que nous avons analysé les différentes cartes de pluie, de végétation et de relief, nous allons pouvoir approfondir les recherches à l'aide de méthodes quantitatives : calculs des corrélations et Analyse en Composante Principale.

Avant d'analyser nos résultats, faisons deux remarques :

- Les variables **ndvi1** et **ndvi2** ici ne représentent pas ici un indice de verdure mais un indice de la masse végétale, puisque la carte NDVI choisie représente la végétation à la fin de la saison sèche. La variable **ndviect** représente une pseudo-rugosité de la végétation : l'écart-type des valeurs de NDVI sur la zone considérée (25 km²) peut s'interpréter comme la variabilité la plus probable de la masse végétale sur cette zone, et en supposant que les plus fortes masses végétales correspondent avec une végétation plus haute, comme la rugosité de la végétation.
- Les variables **rug1** et **rug2** représentent la rugosité du relief, puisqu'ils ont été calculés en sommant les courbes de niveau à l'aide d'un curvimètre sur une surface autour de la station, différente dans chaque cas (on ajoute les longueurs de toutes les courbes de niveau 20m présentes sur la zone considérée). Des fortes valeurs de **rug1** et **rug2** représentent soit un fort relief, soit des forts contrastes de reliefs (alternance de vallées et de montagnes). La variable **zect** représente aussi un indice de rugosité du relief, puisqu'il s'agit de l'écart-type de l'altitude autour de la station, sur 0.2025 km².

- **Etude des corrélations simples entre les paramètres topographiques et pluviométriques**

La matrice de corrélation que nous avons obtenue (Cf. Tableau 1) nous permet de tirer diverses conclusions. Nous nous intéressons évidemment qu'aux coefficients de corrélations entre les paramètres topographiques et paramètres NDVI, et les paramètres pluviométriques.

La latitude est corrélée négativement avec la moyenne interannuelle de la pluie et l'écart-type interannuel de la pluie : plus on remonte vers le nord, moins il y a de pluie, ce qui est un résultat logique car on retrouve le gradient de pluie nord-sud.

La longitude est négativement corrélée avec l'écart-type interannuel des pluies, ce qui signifie que l'écart-type diminue en allant vers l'est. C'est aussi ce qu'on constate sur la carte d'écart-type interannuel des pluies. Mais ceci semble dû au fait que le maxima d'écart-type se

Tableau 1. Matrice de corrélation

	lat	long	rug1	rug2	pente	z	ndv1	ndv2	ndviect	ndviCV	z1	z2	zect	zCV	lambda	beta	cum92	mai_2	mai_3	juin_1	m2j2	cum97	cum98	moyP	ectP	CVIP
lat	1,000																									
long	-0,016	1,000																								
rug1	0,366	-0,190	1,000																							
rug2	0,147	-0,366	0,764	1,000																						
pente	0,061	-0,077	-0,021	0,156	1,000																					
z	0,054	-0,041	-0,249	-0,178	0,240	1,000																				
ndv1	-0,510	-0,365	-0,163	-0,145	-0,214	-0,030	1,000																			
ndv2	-0,419	-0,306	-0,066	-0,031	-0,099	-0,241	0,643	1,000																		
ndviect	-0,438	0,136	-0,383	-0,156	0,109	-0,173	0,056	0,445	1,000																	
ndviCV	-0,237	0,312	-0,352	-0,103	0,250	-0,014	-0,350	-0,122	0,826	1,000																
z1	0,086	0,032	-0,223	-0,249	0,268	0,696	-0,320	-0,414	-0,102	0,191	1,000															
z2	0,072	0,094	-0,149	-0,158	0,095	0,948	-0,108	-0,369	-0,283	-0,055	0,722	1,000														
zect	-0,057	-0,551	0,150	0,380	0,207	-0,150	0,178	0,237	0,026	-0,050	0,090	-0,206	1,000													
zCV	-0,108	-0,557	0,171	0,405	0,180	-0,330	0,216	0,303	0,099	-0,023	-0,087	-0,399	0,974	1,000												
lambda	0,052	-0,163	0,401	0,281	-0,228	0,174	-0,112	0,029	-0,200	-0,229	0,057	0,227	-0,144	-0,191	1,000											
beta	-0,038	-0,193	-0,310	-0,186	0,262	-0,146	0,119	0,069	0,028	0,019	0,133	-0,158	0,276	0,283	-0,366	1,000										
cum92	-0,312	-0,302	-0,233	-0,166	0,290	0,304	0,165	0,057	-0,150	-0,158	0,266	0,238	-0,129	-0,155	0,108	0,768	1,000									
mai_2	-0,595	-0,407	-0,356	-0,205	-0,065	0,139	0,569	0,292	0,161	-0,016	-0,009	0,000	-0,046	0,008	-0,037	0,140	0,631	1,000								
mai_3	-0,409	-0,451	-0,072	0,136	0,023	0,143	0,537	0,332	-0,085	-0,287	-0,150	0,028	0,043	0,075	0,158	0,167	0,636	0,740	1,000							
juin_1	-0,678	-0,352	-0,224	0,033	-0,054	0,114	0,571	0,373	0,079	-0,111	-0,124	0,044	0,033	0,061	0,150	0,184	0,654	0,749	0,879	1,000						
m2j2	-0,668	-0,382	-0,248	0,030	-0,122	0,097	0,533	0,290	0,004	-0,152	-0,046	0,058	0,060	0,075	0,158	0,261	0,667	0,729	0,847	0,963	1,000					
cum97	-0,463	0,133	-0,114	0,095	0,203	0,172	-0,055	-0,008	0,241	0,320	0,047	0,143	-0,039	-0,064	0,330	-0,350	0,104	0,046	-0,026	0,253	0,175	1,000				
cum98	-0,399	-0,472	-0,294	-0,026	0,044	-0,029	0,203	0,450	0,523	0,304	-0,105	-0,220	0,165	0,215	0,241	-0,042	0,231	0,461	0,317	0,394	0,371	0,447	1,000			
moyP	-0,850	0,024	-0,574	-0,276	0,090	0,131	0,305	0,257	0,558	0,469	0,148	0,040	0,035	0,052	-0,045	0,081	0,297	0,506	0,278	0,542	0,551	0,581	0,606	1,000		
ectP	-0,458	-0,321	-0,421	-0,125	-0,055	-0,093	0,385	0,501	0,678	0,422	-0,125	-0,299	0,208	0,280	-0,121	0,003	0,033	0,528	0,396	0,425	0,390	0,152	0,789	0,645	1,000	
CVIP	-0,201	-0,385	-0,245	-0,024	-0,126	-0,181	0,342	0,489	0,582	0,316	-0,208	-0,384	0,235	0,315	-0,123	-0,041	-0,091	0,430	0,375	0,299	0,254	-0,070	0,677	0,354	0,941	1,000

trouve à Niamey, à l'ouest (surpoids des trois stations de Niamey), et que les minima se trouvent à l'est, autour de Wankama.

Concernant la variable **rug1**, on constate qu'elle est négativement corrélée avec la moyenne et l'écart-type interannuels de la pluie, ce qui signifie que plus le relief est marqué, moins il pleut et moins la pluie varie d'une année sur l'autre ! C'est contraire à ce qu'on attend pour la moyenne de pluie interannuelle, mais il faut remarquer que rug1 a été calculé sur 4 km² seulement, ce qui est une petite surface, et que les reliefs sont faibles en dehors des quelques vallées.

La variable **rug2** est encore corrélée négativement avec la moyenne et l'écart-type interannuels de pluie, mais de façon beaucoup plus faible que pour rug1, et ces valeurs sont calculées ici sur 25 km². On peut ainsi relativiser les conclusions du paragraphe précédent. De plus la variable **zect** n'est pas corrélée avec la moyenne interannuelle de pluies, mais positivement (et assez faiblement) corrélée avec l'écart-type de pluies ; ici encore les chiffres sont difficiles à interpréter, étant donnée la faible surface considérée (0.2025 km²).

Concernant les altitudes, on constate que **z** est négativement corrélée avec le CV interannuel des pluies, et que **z1** aussi, avec une valeur assez proche. Ceci signifie donc que plus on est haut, plus CV diminue, donc plus l'écart-type interannuel des pluies diminue et plus la moyenne interannuelle augmente (ce qui correspond aux coefficients positifs de **z** et **z1** avec **moyiP** et négatifs avec **zctiP**). Cet impact du relief sur les pluies est tout de même très faible, étant donnée les faibles valeurs de *r* (moins de 0.2).

Concernant les variables de NDVI, on constate que les quatre variables sont corrélées positivement avec la moyenne, l'écart-type et le CV interannuels des pluies. Ainsi, d'après **ndvi1** et **ndvi2**, plus la végétation au mois de mai est importante, plus la moyenne des pluies et surtout l'écart-type des pluies sont forts. La pseudo-rugosité **ndviect** est encore plus fortement corrélée avec la moyenne, l'écart-type et le CV interannuels. Les coefficients de corrélation végétation-pluie étant beaucoup plus forts que les coefficients relief-pluie, on peut penser que la rugosité due à la végétation a plus d'influence sur les pluies que celle due au relief sur le degré carré de Niamey, ce qui est contraire aux résultats de Claret (2003) et de Ciardini (2003) obtenus au Mexique dans deux zones différentes de montagnes.

Nous ne discuterons pas des valeurs de **lambda** et **beta** : les quelques fortes valeurs de corrélation de **lambda** et **beta** ne se retrouvent pas en prenant les 93 stations du degré carré de l'année 1992 (cette autre matrice obtenue ne nous permet pas de calculer les valeurs de pluie interannuelles, puisque ces stations n'ont été toutes fonctionnelles qu'en 1991 et 1992).

Tous ces résultats sont à relativiser et demandent confirmation : nos statistiques sont très peu robustes car il n'y a que 23 échantillons pour chaque variable.

- **Etude des liens entre les paramètres topographiques et pluviométriques à l'aide de l'Analyse en Composantes Principale**

L'ACP a été réalisée à partir de 23 des variables utilisées pour la matrice de corrélation : **lat**, **long**, **rug1**, **rug2**, **pen**, **z**, **ndvi1**, **ndvi2**, **ndviect**, **ndviCV**, **z1**, **z2**, **zect**, **zCV**, **lambda**, **beta**, **m2j2**, **cum92**, **cum97**, **cum98**, **moyiP**, **ectiP**, **CViP**.

Nous avons choisi de faire une ACP sur 5 axes : d'après le tableau des valeurs propres (Tableau 2) le pourcentage de variance totale expliquée par chaque axe est assez important, même s'il n'est jamais très grand (seulement 25% pour le 1^{er} axe, et inférieur pour les axes suivants). Le pourcentage de variance totale expliquée par l'ensemble des 5 axes est de 75%.

Tableau 2. Tableau des valeurs propres

Val. Propres (24stacp2.sta)				
Extraction: ACP				
		% Total	Cumul	Cumul
	ValPropr	Variance	ValPropr	%age
1	5,70405439	24,8002365	5,70405439	24,8002365
2	3,84540687	16,7191603	9,54946126	41,5193968
3	2,93092119	12,7431356	12,4803824	54,2625324
4	2,37039564	10,306068	14,8507781	64,5686004
5	2,29323467	9,97058551	17,1440128	74,5391859

Nous allons maintenant regarder le plan principal de l'ACP, constitué des axes 1 et 2, qui représente 41% de l'information (Cf. Figure 17).

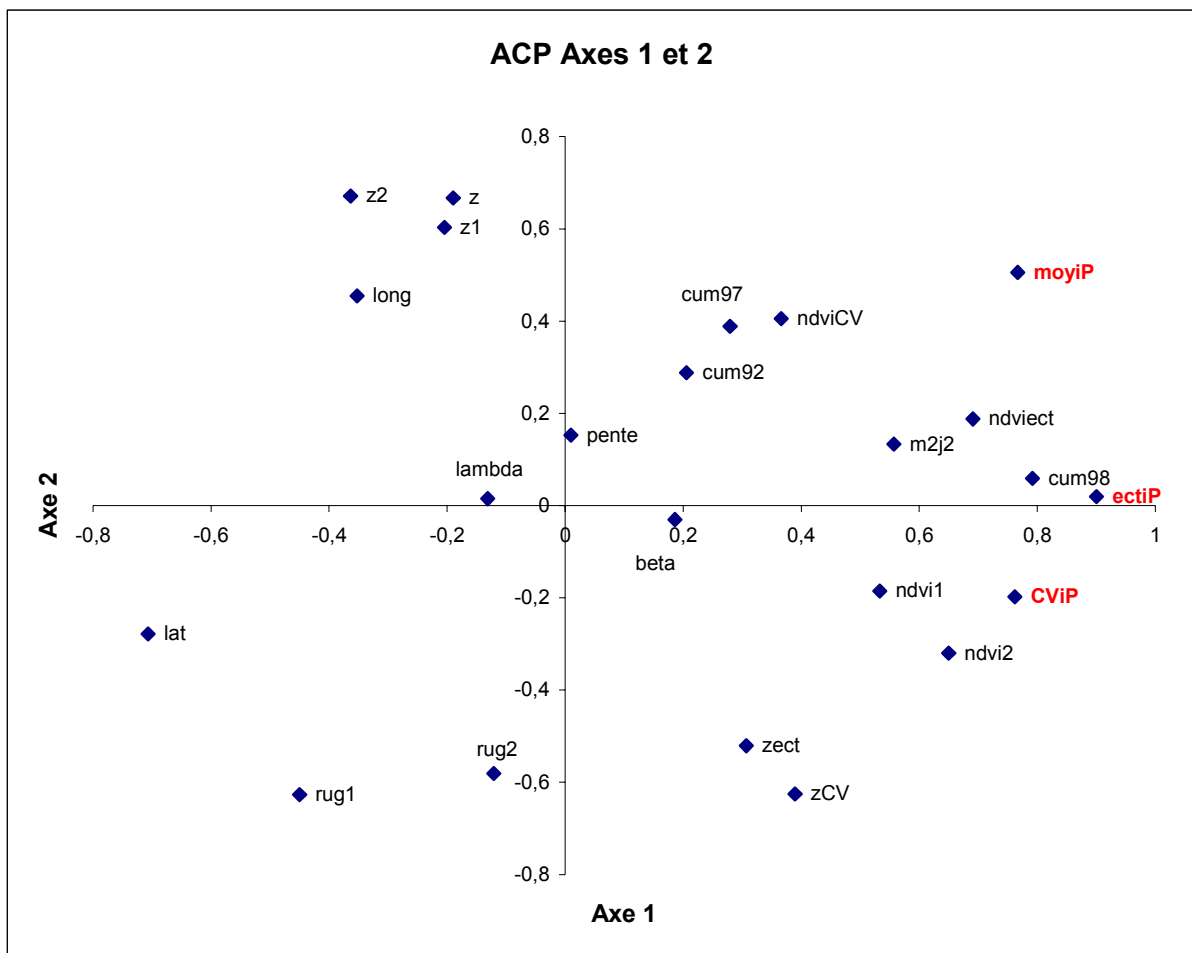


Figure 17. Plan principal de l'ACP

Les variables les mieux représentées par l'axe principal (qui sont le plus proches du cercle unité) sont **ectoP**, **moyiP**, **CviP**, **ndviect**, **ndvi2**, **ndvi1**, **lat**, **z2**, **z**, **z1**, **lat**, **rug1** et **rug2**. **Lambda**, **beta** et la **pente** ont des valeurs trop faibles pour avoir un intérêt quelconque.

L'axe 1 est déterminé surtout par **ectiP**, **CViP** et **lat**, un peu moins par **ndvi2**, **ndviect** et **ndvi1**. L'axe 2 est déterminé par **z** et **rug2**. La variable **moyiP** contribue aussi moyennement à l'axe 1 et un peu à l'axe 2, ce qui peut s'interpréter de la sorte : **moyiP** dépend surtout de la latitude et de la masse ou de la rugosité de la végétation, mais l'altitude et la rugosité du relief l'influencent aussi, de façon moindre.

Les deux axes sont non corrélés entre eux, par définition de l'ACP. On en conclut que **ectiP** et **CViP** sont peu corrélés avec l'altitude et la rugosité du relief, ce qui contredit les résultats que nous avons dans la matrice de corrélation.

Sur l'axe 1, on note encore la forte opposition de **lat** avec **ectiP** et **moyiP** : l'écart-type et la moyenne de pluie interannuelle diminuent quand on va vers le nord, ce qui est le même résultat que celui constaté dans la matrice de corrélation, et correspond une fois encore au gradient de pluie nord-sud. Les variables **ndvi1**, **ndvi2**, **ndviect** sont proches des variables **ectiP**, **moyiP** et **CViP**, sur l'axe 1, ce qui permet de conclure qu'il existe une certaine corrélation entre ces variables de pluies et ces variables de NDVI (de la 1^{ère} décade de mai 1992), ce qui est aussi conforme aux résultats de la matrice de corrélation.

On remarque aussi l'opposition entre **long** d'une part et **ectiP**, **CViP** et **moyiP** d'autre part, même si **long** est assez mal représentée sur l'axe 1. Ceci signifie qu'en allant vers l'est, **ectiP**, **CViP** et **moyiP** diminuent ; en effet, quand on regarde les cartes d'écart-type, de moyenne et de CV interannuels des pluies (cartes en annexe), on remarque que chacune de ces variables interannuelles est plus forte à l'ouest, en partie à cause du surpoids des trois stations de la ville de Niamey. On peut remarquer aussi que **ndvi1** et **ndvi2** sont aussi en opposition avec **long**, ce qui signifie qu'en allant vers l'est la végétation diminue. Il y a aussi un surpoids de la ville de Niamey pour la végétation. Ceci pourrait faire penser que si il y a une influence de la longitude sur les pluies, ce n'est pas en tant que tel, mais par l'intermédiaire de la végétation (dont la répartition est a priori aléatoire sur le degré carré).

Nous allons maintenant regarder le deuxième plan de l'ACP, déterminé par les axes 3 et 4, plan qui contient encore 23% de l'information (Cf. Figure 18).

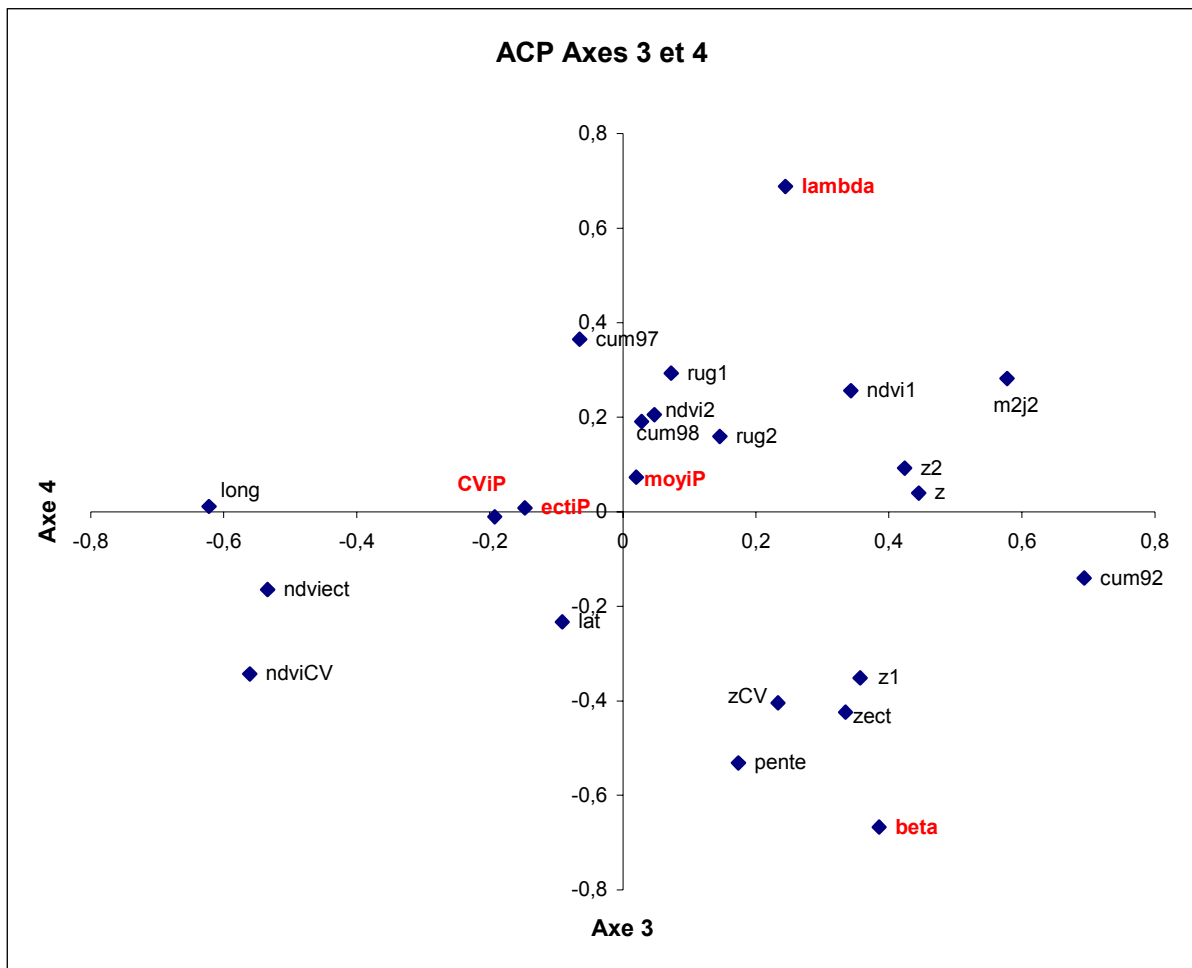


Figure 18. Plan secondaire de l'ACP

L'ACP sur ce plan donne peu de résultats : **CViP**, **ectiP** et **moyiP** sont très mal représentés sur ce plan. Un seul élément est remarquable : l'opposition de **lambda** et **beta** sur l'axe 2 signifie que le nombre d'événement pluvieux de l'année 1992, est corrélé négativement à la quantité de pluie moyenne par événement de l'année 1992 (chaque échantillon correspondant à une station pluviométrique). Donc plus il y a d'évènements pluvieux, plus la pluie moyenne par évènements est faible. Ceci n'est pas une tendance générale puisque cela ne concerne que l'année 1992.

L'ACP sur d'autres plans ne donne aucun résultat intéressant.

Conclusion

A l'échelle de l'Afrique de l'ouest, il est très net que les forts reliefs influent fortement sur les précipitations issues de l'humidité apportée par le flux de mousson du sud-ouest. A l'échelle du degré carré de Niamey, nous nous sommes demandés si le relief et la végétation influent aussi sur la distribution spatiale des pluies dues aux lignes de grains allant d'est en ouest, qui résultent de la rencontre du flux de mousson et des alizés d'est). Le tracé des cartes d'isohyètes, l'analyse des corrélations et l'analyse en composantes principale nous ont permis d'étudier les interrelations entre les conditions de surface, représentées ici par le relief et la végétation, et la répartition spatiale des précipitations, à l'échelle de la saison, en fréquence décennale, et à l'échelle interannuelle, de 1990 à 2003.

Nous avons obtenu divers résultats grâce à ces méthodes, certains se recoupant. Nous avons ainsi pu confirmer le phénomène de la persistance des pluies, de décennie en décennie au cours de la saison, pour chaque année et observer que les maxima et minima des précipitations se retrouvaient globalement chaque année aux mêmes lieux. Parmi ces lieux, plusieurs sont notables : le maximum de pluie autour de Niamey, et à l'ouest du fleuve Niger ; le maximum de pluie vers Wankama et le maximum du sud du degré carré de Niamey. Ainsi nous pouvons penser que le processus de la persistance des pluies entraîne des pluies plus fortes dans certaines zones, ceci assez régulièrement. Les éléments de relief, essentiellement représentés par le fleuve Niger, le kori de Dantiadou et le dallol Bosso, ne semblent pas jouer beaucoup sur la répartition des pluies, en tout cas beaucoup moins que la végétation. Les corrélations entre pluie-végétation sont plus fortes que les corrélations pluie-relief obtenues. Une explication intéressante est que la répartition spatiale des pluies serait due en partie à la persistance, et que celle-ci dépendrait de la végétation. Les résultats trouvés au Mexique par Claret (2003) et Ciardini (2003) montraient au contraire que seul le relief jouait dans la répartition des pluies au Mexique, mais notre étude ne se situe pas du tout dans les mêmes conditions : la végétation et le relief ont des hauteurs caractéristiques respectives de 10 et 100 m au Sahel et de 25 et 2500 m au Mexique ; les rapports Hauteur végétation/ Hauteur relief sont donc de 1/10 pour le Niger alors qu'il est de 1/100 au Mexique.

D'autres observations vont encore dans le sens d'une rétroaction de la végétation sur les pluies. A l'échelle du Niger, les isohyètes interannuels sont parallèles à l'axe est-ouest, et les pluies augmentent du nord vers le sud, conformément au gradient de pluie nord-sud bien connu au Sahel. Mais dans le degré carré de Niamey, les isohyètes interannuels ne sont pas tous parallèles à l'axe est-ouest. Les isohyètes semblent légèrement déformés par le dallol Bosso (inflexion des isohyètes vers le sud), mais surtout par certaines zones très fortement boisées.

En observant la bande sud de la carte des isohyètes moyens, on constate que les pluies sont relativement fortes et homogènes d'ouest en est. Pour la bande nord du degré carré, les pluies sont aussi homogènes d'ouest en est, avec le fait que les isohyètes sont parallèles à l'axe est-ouest dans ce cas. Par contre la bande qui correspond à la latitude de Niamey est très inégale ; les pluies à l'est de Niamey semblent encore s'accorder à peu près avec le gradient nord-sud de pluie, mais par contre les pluies autour de Niamey sont anormalement fortes.

Or la ville de Niamey est la zone la plus boisée du degré carré. Ainsi nous pouvons émettre l'hypothèse suivante : la végétation entourant Niamey pourrait provoquer une « rugosité » susceptible d'influencer le tracé des isohyètes et d'expliquer une plus forte pluviométrie. Et il n'y a à priori aucune raison logique pour que la pluie ait engendré plus de

végétation sur la ville de Niamey. Sans élément de relief fort, on devrait avoir normalement des isohyètes parallèles à l'axe est-ouest au niveau de Niamey. Il est évident que l'homme a joué un rôle dans le boisement du degré carré de Niamey.

Pour approfondir les interrelations entre les conditions de surface et les précipitations, il serait intéressant de disposer de beaucoup plus de stations pluviométriques ; nous n'en disposons que de 23 à l'intérieur même du degré carré, à la limite duquel nous avons décidé de nous arrêter. Il serait déjà possible d'utiliser les cumuls de pluie pour la trentaine de stations disponibles sur la zone EPSAT-Niger ; mais le traitement des données de végétation et de relief est à faire pour les stations débordant du degré carré. Et il serait aussi intéressant pour affiner ces résultats à long terme de disposer de beaucoup plus de stations pluviométriques, pendant plusieurs années.

Index

Albédo : fraction d'énergie solaire incidente réfléchie à la surface de la Terre vers l'espace.

Aréique : caractérise les régions désertiques où l'absence d'écoulement fluvial est permanente (Atlas Jeune Afrique Niger, 1980).

Dallol : terme utilisé dans les régions de Niamey et de Filingué désignant une grande vallée fossile pouvant abriter un cours d'eau temporaire (Atlas Jeune Afrique Niger, 1980).

Endoréique : se dit d'une région dont le réseau hydrographique, bien qu'ayant un écoulement saisonnier ou même pérenne, se raccorde à une mer intérieure, un lac, une sebkhas (Atlas Jeune Afrique Niger, 1980).

Evapotranspiration : c'est la combinaison de l'évaporation physique et de la transpiration biologique d'une plante, résultant de processus complexes ; pour estimer les valeurs de l'évapotranspiration, deux concepts simplificateurs ont été définis : l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR). L'ETP peut se définir comme la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée dans des conditions climatiques données par une surface d'eau libre, ou un couvert végétal pour lequel l'eau n'est pas un facteur limitant. L'ETR se définit comme la réponse, en termes de vapeur d'eau, d'un milieu donné à la demande exercée par l'ETP, compte tenu de la quantité d'eau disponible (Cosandey et Robinson, 2001).

Glacis d'érosion : surface très plane légèrement inclinée s'étendant largement sur des roches relativement tendres, au pied de versants montagneux et notamment au débouché de vallées encaissées (définition des géomorphologues). En région semi-aride, il a été établi que ces glacis résultent du rabotage ou de l'érosion des crues brutales au sortir des vallées montagnardes ; ils s'étalent sur une topographie presque dépourvue de couverture végétale (Lacoste, 2003).

Goulbi : terme haoussa utilisé dans la région de Maradi pour désigner une grande vallée fossile pouvant abriter un cours d'eau temporaire. Goulbi est synonyme de dallol (Atlas Jeune Afrique Niger, 1980).

Kori : désigne l'oued dans la région montagneuse de l'Aïr (Atlas Jeune Afrique Niger, 1980).

Ligne de grain : les lignes de grains sont des alignements "en muraille" de cumulonimbus orageux, qui se propagent en arrière de la traîne des fronts froids dans les régions tempérées ou qui accompagnent les invasions d'air équatorial humide dans les latitudes intertropicales. Bien qu'appelées lignes de grains, ces bandes étroites ne sont pas obligatoirement accompagnées de phénomènes de grain ; un grain qualifie une évolution subite du temps au cours duquel la vitesse du vent s'accroît de façon brusque et marquée tandis que sa direction éprouve un net changement, l'évolution durant quelques minutes, étant suivie rapidement d'un amortissement (définition Météo France).

Regs : dans les régions arides et semi-arides, surface caillouteuse débarrassée de ses éléments les plus fins (Atlas Jeune Afrique Niger, 1980).

Talweg : ligne joignant sur une carte les points les plus bas d'une vallée (Lacoste, 2003).

Bibliographie

Ali, A., Lebel, T., Amani A., 2003, Invariance in the spatial structure of sahelian rain fields at climatological scales, *Journal of hydrometeorology*, Vol. 4, No. 6, 996-1011.

Anthes, R., 1984. Enhancement of convective precipitation by mesoscale variations in vegetative covering in semiarid regions. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23 : 541-554.

Atlas Jeune Afrique du continent africain, Les éditions du Jaguar, 1993.

Atlas Jeune Afrique Niger, éditions j.a., 64 p., 1980.

Charney, J.G., 1975. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Q.J of the Roy. Meteo. Soc.*, 101 (248) :193-202.

Ciardini, V., 2003 , Relation entre le relief et la pluviométrie : estimation des valeurs pluviométriques en zone de montagne subtropicale à partir des facteurs topographiques. Mémoire de maîtrise de [? ?], [? ?], Université Joseph Fourier.

Claret, J, 2003. Le rôle de la végétation dans le cycle de l'eau : le cas du Mexique. Rapport de DEA Mécanique des milieux géophysiques et environnement. Mémoire de DEA de l'université Josph Fourier, Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement.

Cosandey C. et Robinson, M., 2001. Hydrologie Continentale. Armand Colin,359 p., Paris.

Descroix, L, Nouvelot, J.F, Estrada, J., Lebel, T., 2001. Complémentarités et convergences de méthodes de régionalisation des précipitations : application à une région endoréique du Nord-Mexique, *Revue des sciences de l'eau*, 14/3 : 281-305.

Diedhiou A., Mahfouf J-F, 1996. Comparative influence of land and sea surfaces on the Sahelian drought : a numerical study, *Ann.Geophysicae* 14, 115-130.

Diongue A., 2001. Interactions entre convection et écoulement de la grande échelle au sein de la mousson de l'Afrique de l'Ouest. Thèse de l'Université Toulouse III-Paul Sabatier, Physique de l'atmosphère, 248 p.

Dupriez, H., De Leener, P., 1990. Les chemins de l'eau : ruissellement, irrigation, drainage. *Terres et Vie*, L'Harmattan ENDA, Nivelles Belgique, 380 p.

Escourrou, G., 1981. Climat et environnement : les facteurs locaux du climat. Masson, coll. Géographie, 180 p., Paris.

Fontaine, B., Philippon, N., Trzaska, S. et Roucou, P., 2002. Spring to summer changes in the West African monsoon through NCEP/NCAR reanalyses (1968-1998), *JGR*, 107 in press.

Gash, J.H.C., and Coauthors, 1997. The variability of evaporation during the HAPEX-Sahel intensive observation period. *J.Hydrol.*, 189, 385-399.

- Gong, C., and E. A. B. Eltahir, 1996. Sources of Moisture for Rainfall in West Africa, *Water Resources Research*, 32(10), 3115-3121.
- Hayward, D., Clarke, T.T., 1996. Relationship between rainfall, altitude and distance from the sea in the Freetown Peninsula, Sierra Leone, *Hydrological Sciences Journal*, 41(3), 337-384.
- Holben, B.N., 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data, *IJRS*, Vol7, No. 11, pp1417-1434
- Humbert, J., Diogre, G., Mahr., N., 1998. Cartographie objective des précipitations par paramétrisation omnidirectionnelle du relief : la méthode Pluvia, Université Louis Pasteur, CEREG/CNRS, Strasbourg (ou communication publiée au 11ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Lille, 2-5 sept. 1998). ?
- Lacoste, Y., 2003. De la géopolitique aux paysages, *Dictionnaire de la géographie*, Armand Colin, 416 p.
- Le Barbé, L., Lebel, T., 1997. Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990, *J. of hydrol.*, 188-189, 43-73.
- Lebel, T., Laborde, J.P., 1998. A geostatistical approach for areal rainfall statistics assessment, *Stochastics Hydrol. Hydraul.*, 2, 245-261.
- Lebel, T., Amani, A., Taupin, J.D., 1994. La pluie au Sahel : une variable rebelle à la régionalisation, *Xe journées hydrologiques*, Orstom.
- Lillesand, T.M., Kiefer R.W., 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*, Third Edition, Wiley and Sons.
- L'Hôte, Y., Mahé., G., 1996. Afrique de l'ouest et centrale; précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989). Carte à l'échelle 1/ 6000000 ème, Edition de l'Orstom, Paris.
- Long, M., D. Entekhabi and S.E. Nicholson, 2000. Interannual variability in rainfall, water vapor flux and vertical motion over West Africa, *J. Clim.*, 13, 3827-3841.
- Mahé G., 1993. Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique, Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Thèse de doctorat de l'université Paris X, éditions de l'ORSTOM, 439 p.
- Marquinez, J., Lastra, J., Garica, P., 2002. Estimation models for the precipitation in mountainous regions : the use of GIS and multivariate analysis, *J. of hydrol.*, 270, 1-11.
- Morel, A., 1980, in *Atlas Jeune Afrique Niger*, éditions j.a., 64 p.
- Peyre de Fabrègues, B, 1980, in *Atlas Jeune Afrique Niger*, éditions j.a., 64 p.
- 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.

Polcher, J., Laval, K., 1994. The impact of african and Amazonian deforestation on tropical climate, *J. of hydrol.*, 155, 389-405.

Poncet, A., 1981. Interactions Forêts et Climats, in « Eaux et climats », mélanges offerts en hommage à Ch. Péguy, Grenoble CNRS, 1981, pp. 445-461.

Rabin, R., Stadler, S., Wetzell, P., Stensrud, D. and Gregory, M., 1990. Observed effects of landscape variability on convective clouds. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71: 272-279.

Shinoda, M., 2000. Desertification and drought as a possible land-surface/atmosphere interaction. *Global Environmental Research*, 3 (1):9-15.

Shinoda, M., et Gamo, M., 2000. Interannual variations of boundary layer temperature over the African Sahel associated with vegetation and the upper troposphere. *Journal of Geophysical Research*, 105 (D10): 12317-12327.

Shinoda, M., Okatani T., Saloum M., 1999. Diurnal variations of rainfall over Niger in the west african sahel : a comparison between wet and drought years, *International journal of climatology*, 19, 81-94.

Taylor, C. and Lebel Th., 1998. Observational Evidence of persistent Convective-scale rainfall patterns. *Monthly Weather Review*, 126:1597-1607.

Wallace, J.S. and C.J.Hollwill, 1997. Soil evaporation from tiger bush in south west Niger. *J.Hydrol.*, 189, 426-442.

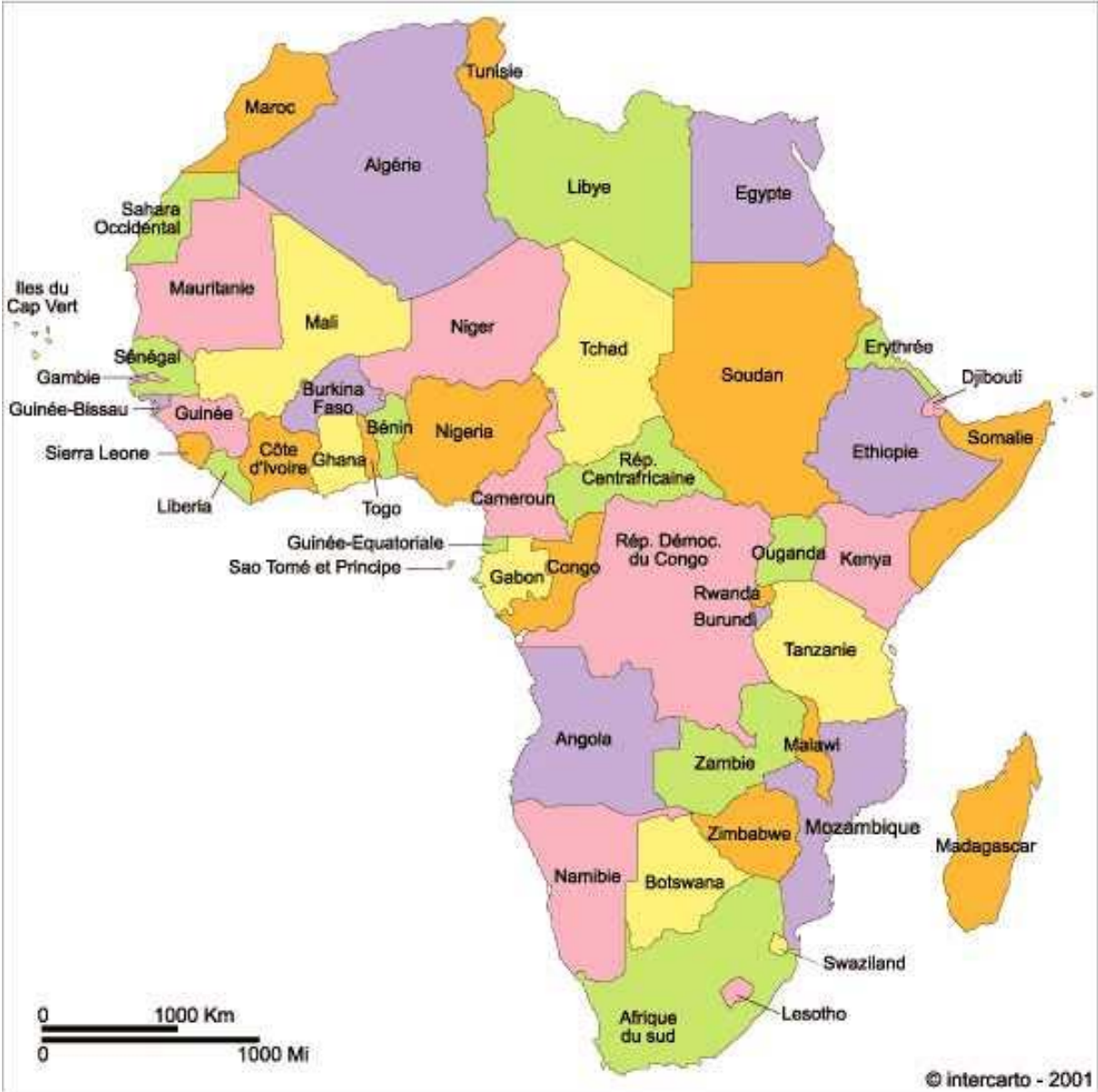
Wotling, G., Bouvier, Ch., Danloux, J., Fritsch, J.-M., 2000. Regionalization of Extreme precipitation distribution using the principal components of the topographical environment, *J. of hydrol.*, 233, 86-101.

Zeng, N. J. and D. Neelin, 2000. The role of vegetation-climate interaction and interannual variability in shaping the African savanna, *J. Clim.*, 13:2665-2670.

Zeng, N., Neelin, J.D., Lau, K.M., Compton J. Tucker, 1999. Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science*, 286:1537-1540.

Annexes

Annexe 1. Carte politique de l'Afrique



Annexe 2. Eléments de géographie de l'Afrique de l'Ouest

- Relief (d'après Atlas Jeune Afrique du continent africain, 1993)

L'Afrique est un continent d'aspect plutôt massif et homogène ; sa superficie est de 30310000 km², et il s'étend sur plus de 7000 km entre ses extrémités est-ouest et nord-sud. C'est un continent constitué de plateaux et de larges cuvettes intérieures bordés de reliefs périphériques qui créent une nette séparation avec la mer.

L'Afrique occidentale, qui est la partie la plus homogène de l'Afrique, est surtout constituée de plaines et de plateaux. Les grandes dépressions des bassins du Niger, du Tchad et du Congo ont une altitude d'environ 200 m. Le relief se relève vers le nord avec les hauts massifs du Hoggar (Algérie), de l'Aïr (Niger), du Tibesti (Tchad), et du Darfour (Soudan) qui dominent les plateaux sahariens.

Du Sénégal à l'Angola les cuvettes sont séparées de la mer par une série de plateaux et de chaînes montagneuses : massif du Fouta Djallon (Guinée), dorsale guinéenne, Adamaoua (Cameroun), monts de l'Angola.

- Réseau hydrographique (d'après Atlas Jeune Afrique du Continent Africain, 1993, et Mahé, 1993)

Sur le continent africain, plus de la moitié des terres n'ont pas d'écoulement vers la mer (endoréisme) car les eaux de pluie sont rapidement absorbées par infiltration et évaporation. Cette zone sans écoulement externe se situe essentiellement sur toute la zone aride qui va de l'Atlantique à la Mer Rouge- à l'exception de l'Égypte où coule le Nil.

Dans les régions où les pluies se concentrent en une seule saison, le régime des fleuves est extrêmement variable. Le fleuve Sénégal par exemple, a un débit de plus de 3500 m³/s en septembre, fin de la saison des pluies, mais se trouve presque à sec en mai, à la fin de la saison sèche. Le fleuve Niger, lui, est plus complexe. Il rejoint l'océan au Nigéria, après avoir traversé une grande partie de l'Afrique de l'Ouest. C'est le 3^{ème} grand fleuve d'Afrique (4200 km). Son régime est complexe car il traverse des régions climatiques notablement différentes ; le Niger s'écoule toute l'année, mais on a constaté depuis quelques années des arrêts exceptionnels de l'écoulement du fleuve à la fin de la saison sèche, durant les années très déficitaires (pour la 1^{ère} fois de mémoire d'homme en 1985). La source du Niger se situe dans les monts de Guinée, surnommés le « château d'eau de l'Afrique de l'Ouest ». Le Sénégal y prend aussi sa source, dans le Fouta Djallon.

Dans la zone allant du Sénégal à l'Angola, l'ensemble des bassins versants des fleuves recouvre une superficie d'environ 7.9 millions de km², c'est-à-dire environ deux-tiers de la surface totale de ces pays. Les branches du réseau alimentent deux drains principaux : le fleuve Niger et le fleuve Congo. Les ramifications de ces 2 fleuves s'étendent sur les 2 tiers de la surface totale.

Au sud du Niger et à l'est des monts de Guinée, l'orientation principale des écoulements est nord/sud. L'étirement des bassins suit cet axe, le plus grand étant celui des Volta, au Burkina Faso et Ghana.

- Climats (d'après Atlas Jeune Afrique du continent africain, 1993)

L'Afrique est essentiellement un continent chaud ; près de 75% du continent s'étend dans la zone intertropicale. Le régime des pluies détermine les principales variations climatiques.

Le climat qui s'étend sur la cuvette congolaise est de type équatorial. Les températures sont élevées et varient peu durant l'année (25° en moyenne), et il pleut toute l'année, le total dépassant 1500 voire 2000 mm.

Le climat le long des côtes de la Guinée est proche du climat équatorial, même si les pluies sont moins régulières qu'à l'équateur.

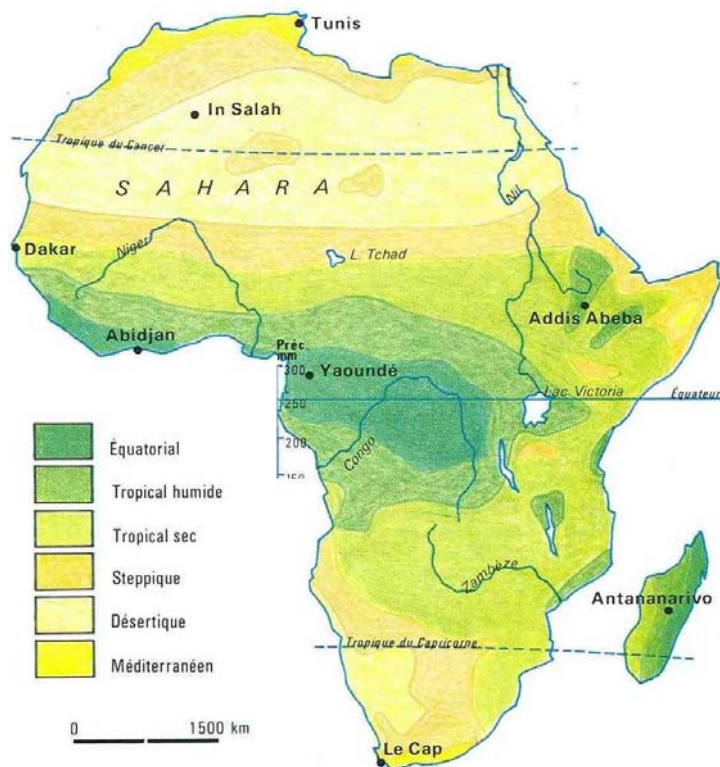
Dans les climats tropicaux, saison sèche et saison humide alternent. L'amplitude thermique y est plus forte, et le total des précipitations diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur. A cause de la forme du continent, l'influence de la latitude est prépondérante dans l'hémisphère nord ; les différentes zones climatiques se succèdent en bandes parallèles à l'équateur.

Le climat tropical humide, qu'on retrouve dans le Golfe de Guinée, de la Sierra Leone à la Côte d'Ivoire, est proche du climat équatorial par l'abondance des précipitations. Il y a par contre deux saisons sèches, inégales.

Dans le climat tropical sec, ou soudanien, il n'y a qu'une saison humide, qui se situe en été, et dont la durée diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur. La sécheresse est accentuée par l'harmattan, vent chaud qui souffle du Nord-Est vers l'Atlantique. Le total des pluies annuelles est supérieur à 1000 mm au sud du Mali par exemple mais inférieur à 800 mm au nord du Nigéria.

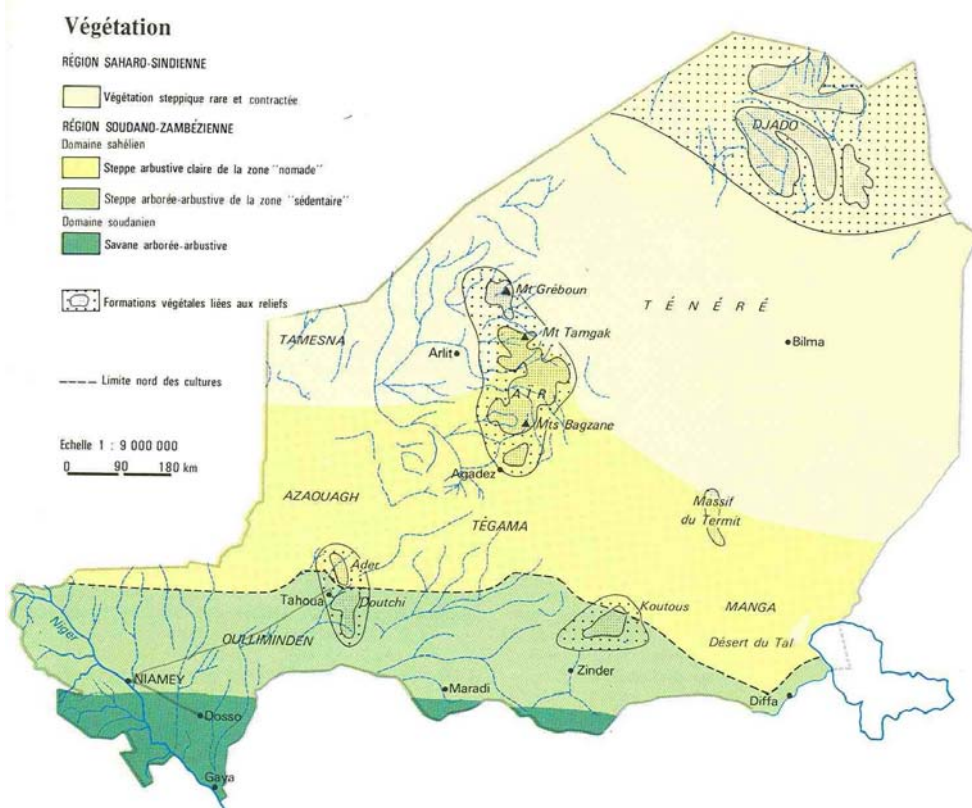
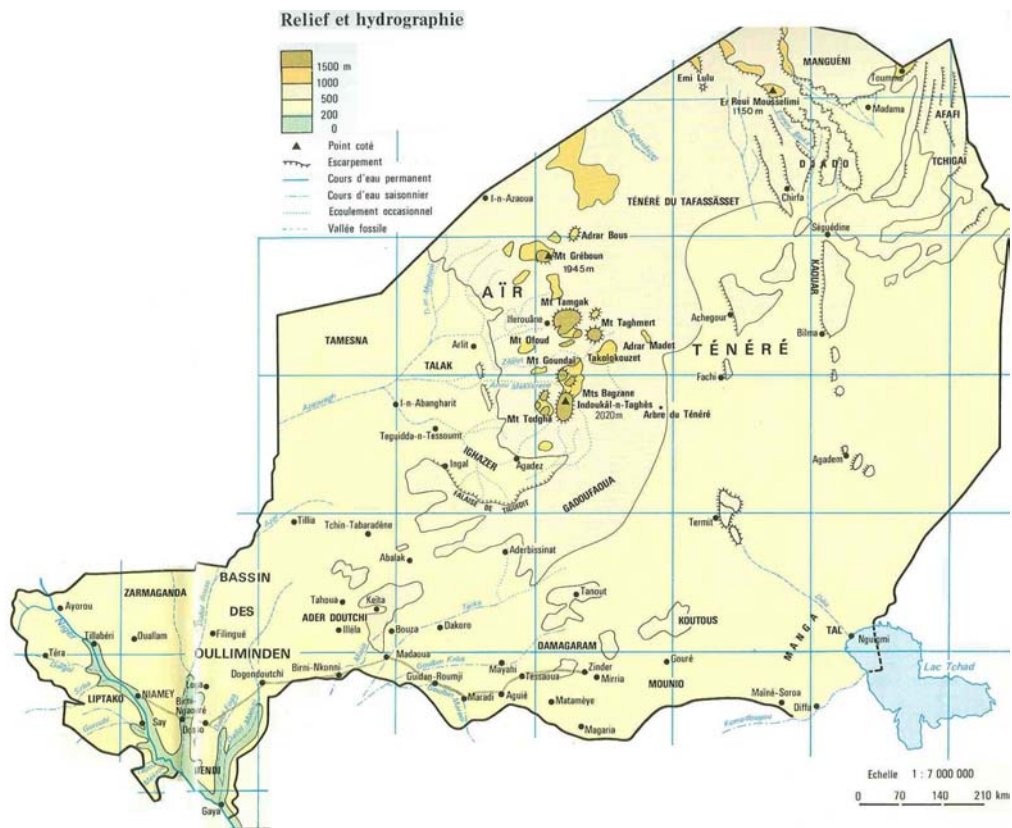
Le climat sahélien constitue la transition vers le climat désertique. « Sahel » signifie « rivage » en arabe, et désigne le rivage du désert (qui se dit « Sahara » en arabe). Les pluies sont plus rares (moins de 500 mm) et tombent pendant moins de 3 mois par an. Elles sont très irrégulières d'une année sur l'autre. Les températures sont plus élevées que dans les climats humides et dépassent 40°C à la fin de la saison sèche.

Au nord de la bande sahélienne, on trouve le climat désertique du Sahara. Les pluies sont inférieures à 100 mm par an, les différences de température nuit/jour peuvent atteindre 50° C, et l'amplitude thermique annuelle est de 25 à 30° C.

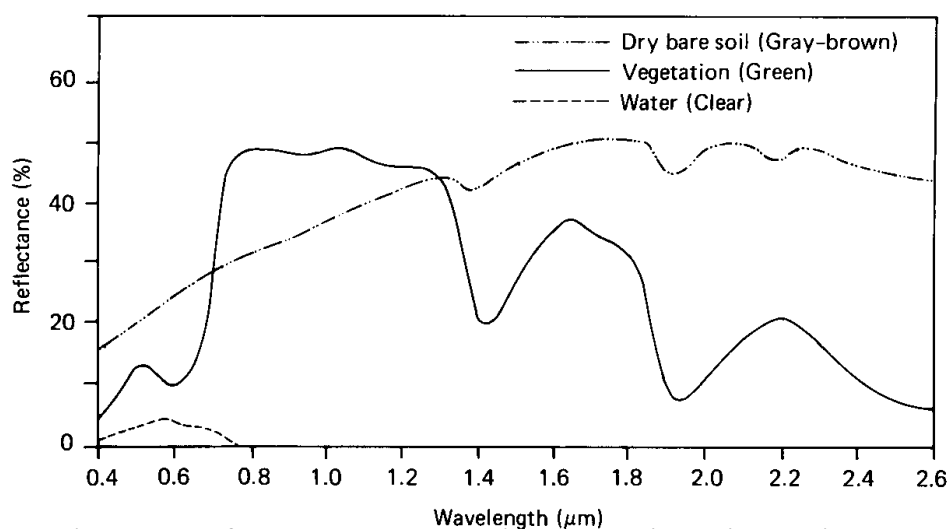


Les climats du continent africain

Annexe 3. Cartes du relief et de la végétation du Niger



Annexe 4. L'indice de végétation NDVI



Courbes typiques de la réflectance pour la végétation, le sol et l'eau, d'après Lillesand and Kiefer (1994)

L'indice NDVI est l'Indice de la Différence Normalisée de la Végétation. Sa définition mathématique est :

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_r}{\rho_{nir} + \rho_r}$$

où ρ_{nir} représente ρ la radiance dans le proche infra-rouge (near infra red), la radiance étant un synonyme de réflectance (c'est-à-dire le pourcentage de énergie solaire réfléchi au sol) et ρ_r représente la radiance dans la bande de fréquence du rouge.

Comme on le vérifie sur les figures de la page précédente, il y a pour la végétation une forte différence entre la réflectance dans le visible et la réflectance dans le proche infrarouge, ce qui est en contraste avec presque tous les autres types de surface, comme l'eau ou le sol nu, ou il n'y a pas de différence prononcée entre les deux bandes de fréquence. La chlorophylle absorbe la lumière dans le rouge (0.58-0.68 microns) et le feuillage réfléchit la lumière dans le proche infrarouge (0.72-1.10 microns).

La valeur NDVI étant normalisée, elle varie entre -1 et +1. Une valeur de zéro signifie pas de végétation et une valeur de +1 (0.8 - 0.9) indique la plus haute densité possible de feuilles vertes. Les sols nus ont des valeurs entre 0 et 0.1 et la végétation a des valeurs supérieures à 0.1. Le tableau ci-dessous donne quelques exemples de valeurs ndvi.

Valeurs de NDVI typiques pour différents types de couverts, d'après Holben (1986)

TYPE DE COUVERTURE	Rouge	Proche IR	NDVI
végétation dense	0.1	0.5	0.7
sol nu sec	0.269	0.283	0.025
nuages	0.227	0.228	0.002
neige et glace	0.375	0.342	-0.046
eau	0.022	0.013	-0.257

Annexe 5. Principes de l'Analyse en Composante Principale

Rappelons maintenant rapidement le principe de l'Analyse en Composante Principale. L'ACP permet de synthétiser une matrice contenant différentes variables dans ses colonnes, matrice de données telle que celle que nous avons construite. La synthèse se fait à l'aide de variables synthétiques, qui sont des combinaisons linéaires des variables initiales. Ces variables synthétiques sont appelées composantes principales (ou axe principal) ; la 1^{ère} composante est la composante pour laquelle la variance des individus est maximale ; une 2^{ème} composante principale est ensuite recherchée, qui réunit deux conditions : avoir une corrélation linéaire nulle avec la 1^{ère} composante, et avoir la plus grande variance possible. On peut continuer ainsi jusqu'à la p^{ième} composante. Chaque composante principale contient autant d'individus que les variables initiales évidemment.

La transformation des variables initiales en composante principales nous fournit aussi deux matrices supplémentaires : la matrice des vecteurs propres, et la matrice (diagonale) des valeurs propres. Les vecteurs propres contiennent les coefficients des combinaisons linéaires des p variables initiales, chaque axe ayant un vecteur propre, et les valeurs propres représentent les variances des individus pour chaque axe. En pratique, on s'intéresse aux valeurs propres mais pas aux vecteurs propres.

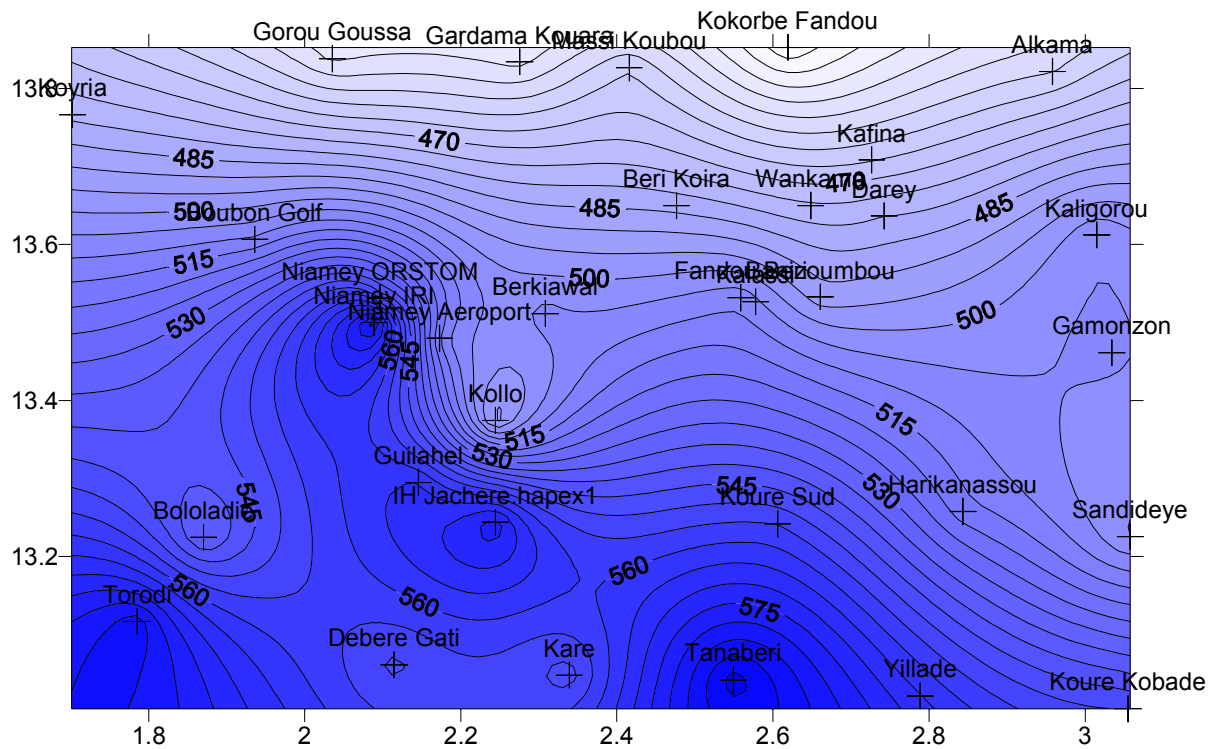
La matrice qui nous intéresse en fait est une matrice dont chaque colonne correspond à une composante principale. Chaque ligne correspond à une variable. Dans chaque colonne, les éléments sont les coefficients de corrélation entre les variables initiales et l'axe principal considéré.

Les représentations graphiques de l'ACP sont tracées à partir de cette dernière matrice. Pour des raisons pratiques, on ne fait que des représentations planes, on se limite donc à deux axes. Pour chaque variable, on place un point sur le plan. Par exemple, si on prend le plan principal, formé des axes 1 et 2, les coordonnées d'un point que l'on place sont le coefficient de corrélation entre l'axe 1 et la variable considérée pour l'abscisse (axe 1) et le coefficient de corrélation entre l'axe 2 et la variable considérée pour l'ordonnée (axe 2). On place ainsi un point sur le plan pour chaque variable.

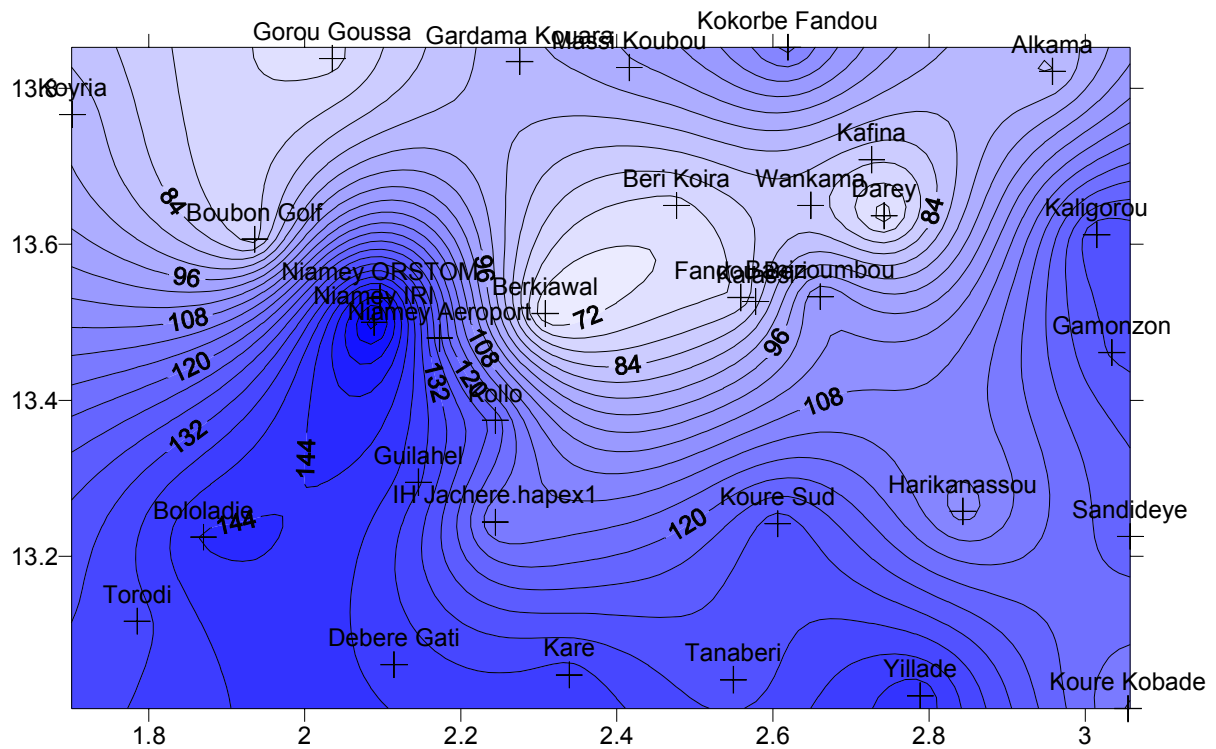
En conséquence, plus le point est proche du cercle unité, plus la variable qu'il représente est corrélée avec les deux axes (ou un seul s'il se trouve sur un des deux axes, qui ne sont pas corrélés entre eux).

Le pourcentage de la variance totale expliquée par un axe est déduit à partir des valeurs propres. On peut ainsi juger de la qualité d'un axe. Le cumul des pourcentages de la variance expliquée nous donne aussi le pourcentage de la variance expliquée par l'ensemble de tous les axes choisis. On se limite souvent à 4 ou 5 axes.

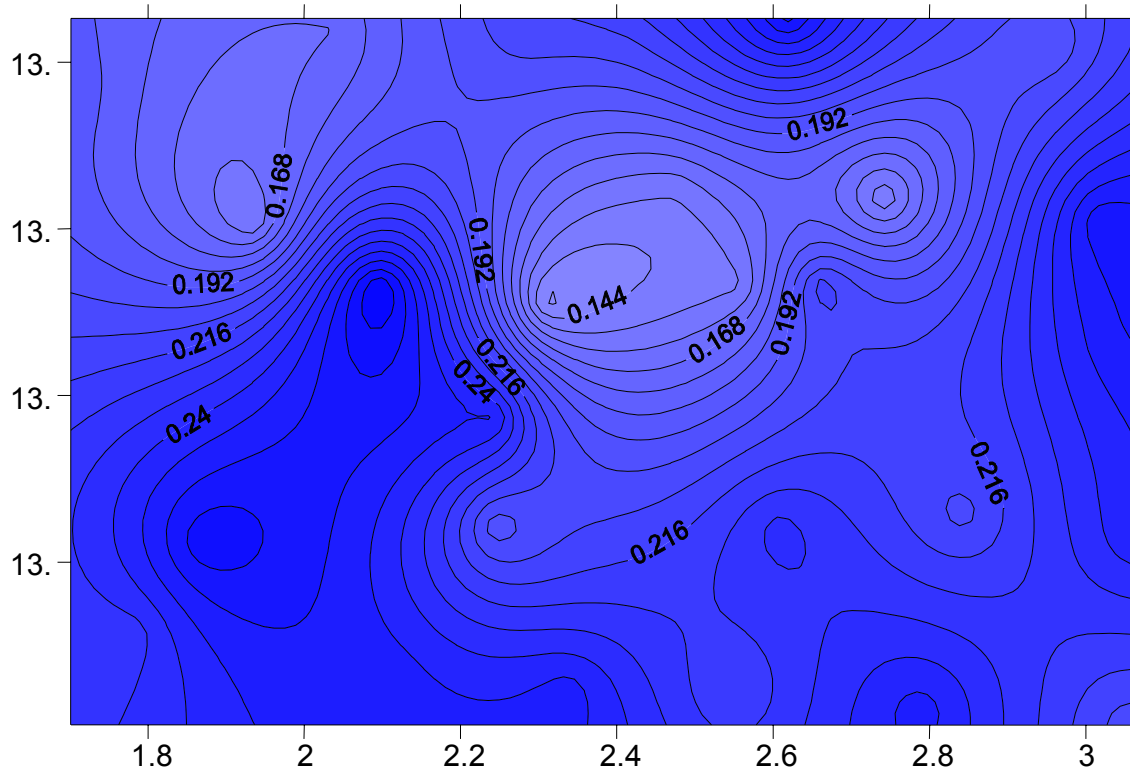
Annexe 6. Cartes interannuelles des pluies autour du degré carré



Carte de pluie moyenne interannuelle (cumuls saisonnier moyens), 1990 à 2002, sur 30 stations communes aux 13 années.



Carte de écart-types interannuels des cumuls saisonnier, 1990 à 2002, sur 30 stations communes aux 13 années.



Carte des CV interannuels des cumuls saisonnier, 1990 à 2002, sur 30 stations communes aux 13 années.