



HAL
open science

Etude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun : analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques et anthropiques de variabilité du NDVI

Viviane Djoufack Manetsa

► **To cite this version:**

Viviane Djoufack Manetsa. Etude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun : analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques et anthropiques de variabilité du NDVI. Sciences de la Terre. Université de Bourgogne, 2011. Français. NNT : 2011DIJOS075 . tel-00704629

HAL Id: tel-00704629

<https://theses.hal.science/tel-00704629v1>

Submitted on 5 Jun 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

COTUTELLE DE THESE

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I

*Faculté des Arts, Lettres
et Sciences Humaines*

UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE

*Ecole doctorale
« Environnement, Santé, STIC »*

Thèse pour obtenir le grade de

DOCTEUR

de l'Université de Bourgogne et de l'Université de Yaoundé I

Discipline : GÉOGRAPHIE (option CLIMATOLOGIE)

Présentée et soutenue publiquement le 30 septembre 2011 par

Viviane DJOUFACK-MANETSA



Étude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun :

**Analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques
et anthropiques de variabilité du NDVI**

Directeurs de thèse :

Bernard FONTAINE et Maurice TSALEFAC

Jury

M. Vincent DUBREUIL	Professeur d'université	Rapporteur
M. Téléphore BROU	Professeur d'université	Rapporteur
Mme Nadège MARTINY	Maître de conférences	Examinatrice
Mme Yamna DJELLOULI	Professeure d'université	Examinatrice

Je dédie cette thèse à mes parents,
Julienne et Émile,
afin qu'ils trouvent en elle ma reconnaissance
pour leur amour, leur abnégation
et pour tous leurs sacrifices.

Remerciements

Ce travail de thèse, réalisé en cotutelle entre les universités de Yaoundé I et de Bourgogne, a bénéficié du soutien de l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) que je tiens à remercier en premier lieu. Ma reconnaissance va ensuite à Bernard Fontaine qui a accepté de diriger ma thèse et m'a appris d'autres approches et méthodes de la climatologie qui, malgré un aspect quelquefois rébarbatif, est une science passionnante. Qu'il trouve dans cette thèse le témoignage d'une étudiante très redevable envers son codirecteur qui l'a toujours encadrée avec rigueur et abnégation. Je suis également reconnaissante envers Maurice Tsalefac, second codirecteur, qui a suivi mes travaux depuis la Maîtrise.

Tous mes remerciements vont ensuite au personnel de la Météorologie Nationale du Cameroun, ainsi que celui des postes pluviométriques des provinces de l'Ouest et de l'Est, pour avoir mis les données de précipitations à ma disposition.

Au cours de ma thèse, j'ai bénéficié de l'appui des laboratoires « Pôle image » de l'université de Paris-Diderot et « DYRT » (Dynamique des Réseaux et des Territoires) de l'université d'Artois. Je salue ici les directeurs de ces laboratoires, et particulièrement Téléphore Brou et Bernard Lacaze qui ont accompagné mes travaux au cours de mes différents séjours scientifiques.

Je remercie Messieurs Téléphore Brou et Vincent Dubreuil, d'avoir accepté de rapporter sur le mémoire : leurs conseils et suggestions ont permis d'améliorer le rendu final. Merci également à Madame Yamna Djellouli, d'avoir accepté de faire partie du jury.

Toute ma gratitude va aussi aux enseignants et doctorants du département de Géographie de l'université de Yaoundé I, avec un merci particulier à Youta Happi, P. Tchawa, J.-G. Elong, L. Mbang, Théophile, Marie, Dada, Olivier, Jude, Hubert, etc., en souhaitant beaucoup de courage à tous ceux qui n'ont pas terminé leur thèse.

Je ne saurais oublier les membres du Centre de Recherches de Climatologie pour leur accueil et les conditions de travail privilégiées qui m'ont été offertes. Je pense à Nathalie Philippon, Pierre Camberlin et Pascal Roucou qui m'ont accueillie à leur cours de climatologie et de statistiques, et à Nicolas Vigaud, les Benjamin (Polh et Bois), Thierry Castel et Yves Richard, pour avoir toujours répondu efficacement à mes questions.

Merci à toi, Nadège, pour ta gentillesse, tes encouragements et ton appui sans faille.

Je salue la gentillesse et le sens maternel de Corine Quintar et Michèle Dalby que j'ai régulièrement côtoyées au cours de ma thèse ; merci à toi, ma Mimi, pour ta disponibilité et surtout pour avoir relu ma thèse, et pour tout le reste...

Je sais gré également pour le soutien logistique de Pascal Oettli et Simon Guichard, que j'ai constamment « embêté » pendant ma thèse.

Bien qu'ils ne soient plus en poste au CRC, je pense à Malika Madelin, Samuel Louvet, Ernest Amoussou, Expédit Vissin et Constant Houndenou qui m'ont été d'un grand soutien moral à mon arrivée au CRC, alors que je vivais le premier hiver hexagonal de ma vie...

Je salue je remercie aussi tous mes *gamins* : Juju, Jojo, Cédric, Romain, Albin, et encourage vivement ceux qui sont encore sous Matlab et Cie. Je n'oublierai jamais tous les bons moments de rigolades et vos pitreries vont me manquer. Beaucoup de courage également à Adrien, Paul-Arthur, Clémence, Luca et Cloclo.

Dans mes remerciements, je ne saurais oublier les familles Donfack, Djoumessi, Tatize, Assongo, Mermet et Tafré pour leur soutien multiforme auquel j'ai toujours été très sensible. J'espère qu'elles trouveront, grâce à cette thèse, la force de me pardonner pour ma vie autarcique de ces années de préparation. Une mention particulière à J.-B. Djoumessi qui m'a orientée vers la géographie : merci pour ta rigueur et ton soutien durant l'acheminement de cette thèse.

Que Japhet, Laure, Orphée, Vedvine, Martial, Hermann, Judith, Ruphine, Rosine, Grace, Myriam, Adrien, Alain, Hindrich, Pacherel, Pamela, Diane, Yannick, Alex-Stéphane, Linda, Afef K., Afef B. Brice-Lucas et Djaoudath trouvent dans ce travail l'expression de ma reconnaissance pour leur sens de la famille et de l'amitié.

Merci aux familles Lhôte et Sassi, avec une mention particulière pour Danielle, ma seconde maman, pour sa générosité, sa gentillesse et son soutien pluriel. Je pense également à Germaine, Chantal et Catherine pour leurs encouragements et leur sollicitude.

Merci à toi, Christophe, d'avoir été là, encore et toujours, et d'avoir supporté stoïquement tous les aléas de la thèse... et aussi à Enzo, notre « grosse puce », afin que cette thèse soit pour lui un exemple à surpasser.

Enfin, que tous mes cousins, cousines, amis et parents que je ne peux remercier nommément, ainsi que ceux que ma mémoire a pu ingratement oublier, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

LISTE DES ACRONYMES

ACP: Analyse en Composante Principale

AIMP: Africa ITCZ Monitoring Project

AMMA: Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Ouest Africaine

AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer

BUCREP: Bureau Central des Recensements et des Etudes de Population

CAH: Classification Ascendante Hiérarchique

CARPE : Le Programme régional pour l'environnement en Afrique centrale

CDC: Cameroon Development Corporation

CIFOR: Center for International Forestry Research

COPT: COnvection Profonde Tropicale

CRC: Centre de Recherches de Climatologie

CRU: Climatic Research Unit

DOE: Department of Energy

DSCN: Direction de la Statistique et de la Comptabilité Nationale

ETGA : Expérience tropicale du GARP dans l'Atlantique

EPSAT : Estimation des Précipitations par Satellites

FAO: Food and Agriculture Organization

FRIEND-AOC: Flow Regimes from International Experimental and Network Data/ en Afrique de l'Ouest et Centrale

GARP: Global Atmospheric Research Programme

GIMMS: Global Inventory Modeling and Mapping Studies

GLC: Global Land Cover

GWP: Global Water Partnership

ICCARE: Identification et conséquences d'une variabilité du climat en Afrique de l'Ouest non Sahélienne

INS: Institut National de Statistiques

IRD: Institut de Recherches pour le Développement

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectrometer

NCEP: National Centers for Environmental Prediction

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

OMM : Organisation Mondiale de la Météorologie

ORSTOM: Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération

PFBC : Partenariat pour les Forêts du Bassin du Congo

PNUE : Programme des Nation Unies pour l'Environnement

SMWDA: Slip Moving-Windows Dissimilarity Analysis

SOCAPALM: Société Camerounaise de palmeraies

SODECOTON: Société de développement du coton

SPOT: Système Probatoire d'Observation de la Terre

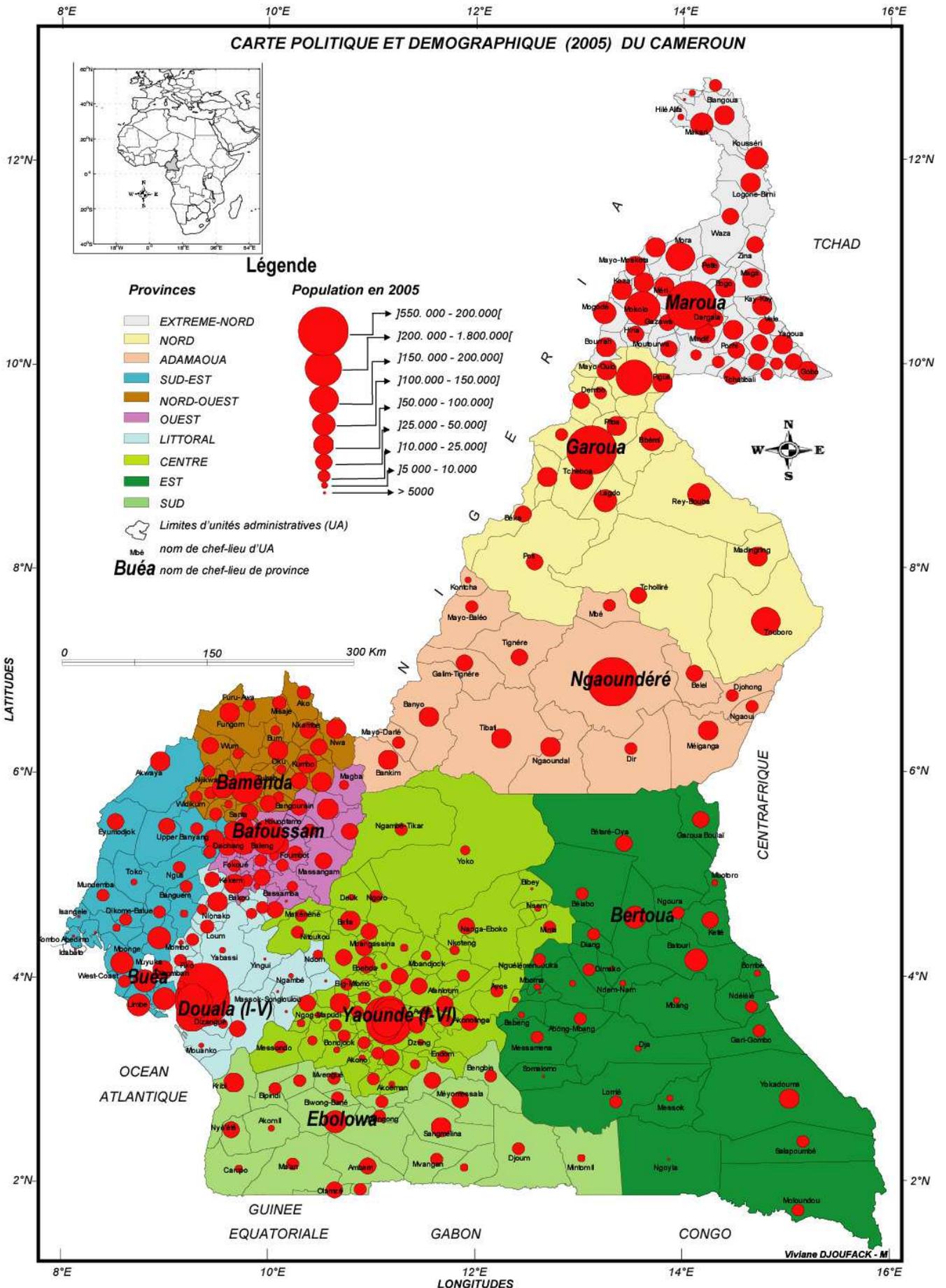
UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

WAMP: West African Monsoon Project

WMO: World Meteorological Organization

WRI: World Ressources Institute

WWF: World Wide Fund of nature



Résumé

De par sa géométrie et sa situation géographique (2°N-13°N – 8°E-16°E ; ouverture sur l’océan Atlantique), le Cameroun offre l’avantage de proposer un ensemble représentatif des climats régionaux rencontrés en Afrique tropicale. La diminution des cumuls de précipitations enregistrée dans la région pendant la seconde moitié du XX^e siècle, est associée à la récurrence de périodes anormalement sèches, essentiellement au cœur de la saison des pluies. Ces conditions ont amplifié la dégradation du couvert végétal au travers ses contraintes socioéconomiques et démographiques (déforestation, extension des surfaces d’activité). Les conséquences souvent dommageables de la variabilité climatique en général, et des sécheresses en particulier, sur les hommes et leurs activités suscitent l’intérêt de développer des études pour mieux comprendre comment le climat et les pressions naturelles et environnementales interagissent localement. Ainsi, l’objectif de cette thèse est de diagnostiquer la variabilité multiéchelle (saisonnière, interannuelle, intra-saisonnière, synoptique) des précipitations et les relations qu’elle entretient avec le couvert végétal au sens large qui, à ces latitudes, est associé directement ou non, à la dynamique d’occupation et d’utilisation du sol, particulièrement sur la période 1951-2002.

A partir de données de précipitations observées (CRU/ponctuelles), les modes spatiaux de la variabilité ont été définis aux échelles annuelles et interannuelles, par Analyses en Composante Principale (ACP) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). Ces méthodes de classifications ont permis de discriminer cinq zones climatiques, différentes les unes des autres par l’intensité des cumuls et la saisonnalité (unimodal/bimodal). Pour chaque zone, l’attention a été portée sur les paramètres intrasaisonniers qui modulent la variabilité annuelle telle que, les séquences sèches (nombre, longueur, périodes d’occurrence) et les variations des dates de début et de fin des périodes végétatives. La répartition du couvert végétal dans l’espace et dans le temps (1982-2002) a été étudiée, en utilisant des méthodes de classification non supervisée (*ISODATA*) sur les données de NDVI (Normalized Difference Vegetation index) à 8km de résolution. Enfin, des méthodes statistiques et de télédétection ont permis d’évaluer l’impact des facteurs pluviométriques et anthropogéniques (croissance démographique et utilisation du sol) sur la dynamique du couvert végétal en utilisant des bases de données à plus fine résolution (NDVI/1Km ; Global Land Cover (GLC 2000/1Km)). Ces dernières investigations ont été menées dans le Nord-Cameroun (6°N-13°N – 11°E-16°E), qui est la région la plus sensible des points de vue climatique, économique et environnemental.

Mots-clés: Précipitations, couvert végétal, NDVI, variabilité, intrasaisonnier, séquences sèches, démographie, utilisation du sol.

Abstract

Due to its shape and location (2°N-13°N – 8°E-16°E; proximity of the Atlantic Ocean), Cameroon is characterized by a panel of cross-regional climate encountered widely in tropical Africa. Over the region, the decrease rainfall during the second half of the last century has been shown to be associated with stronger recurrence of drier periods, specifically in the core of the rainy season. These conditions have favored the degradation of vegetation cover, driven by socioeconomic and demographic constraints. The substantial impacts on human activities and local society highlight the need to better understand how climate and environmental dynamics do interact locally. The aim of this study is to diagnose multi-scale rainfall variability and its relationship with vegetation cover (natural and/or grown), which is directly or indirectly associated to the land-cover and land-use dynamics at these latitudes.

Using observed rainfall data (Climatic Research Unit/punctual), the spatial modes of rainfall variability at annual and intraseasonal scales are defined through Principal Component Analysis (PCA) and Agglomerative Hierarchical Clustering (AHC). These regionalizations lead to the discretisation of 5 climatic zones, distinguished from each other, by both the amount of rainfall and seasonality (unimodal / bimodal). New intraseasonal dry spells statistics (number, length, period of occurrence) are produced as well as dates of onset and end of the vegetative seasons by sub-regions. Using unsupervised classification methods (such as *ISODATA*) in Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data at a 8km spatial resolution, vegetation cover spatio-temporal distribution and typology were produced. Then, based on a concomitant use of statistical and GIS approaches, higher resolutions of NDVI (SPOT-1Km) and Global Land-cover data (GLC 2000), allowed to further evaluate both the pluviometric and anthropogenic factors (demography, land use) influencing vegetation dynamics. Analysis were carried out in Northern Cameroon (6°N-13°N – 11°E-16°E), which is the most sensitive region with regards to climatic and environmental variability, that could lead to important socio-economic thread locally.

Keys words: rainfall, vegetation cover, NDVI, variability, intraseasonal, dry spells, demography, land use.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	3
➤ Problématique et contexte de l'étude.....	3
➤ Cadre conceptuel	5
➤ Objectifs.....	6
➤ Principaux attendus.....	8
➤ Organisation de la thèse.....	9
CHAPITRE II 1: LES DONNEES ET METHODES	11
I-données utilisées	13
I-1 Les données climatiques.....	13
I-1-1. Les données de précipitations du cru.....	13
I-1-2. Les données de températures de surface océanique (SST initiales en anglais) du Hadley Center	15
I-1-3. Les données de réanalyses atmosphériques du NCEP/DOE2	15
I-1-4. Les données de position de la ZCIT	16
I-1-5. Les données pluviométriques stationnelles	16
I.2- Les données de végétation.....	18
I.2-1. Les indices de végétation	18
I-2.2. Données d'occupation du sol du Global Land Cover (GLC)	22
I-2.3. Les données démographiques : quantification et limites	24
II- METHODES DE TRAITEMENT DE DONNEES	25
II-1. Régionalisation spatiale des données.....	25
II-1-1. La classification ascendante hiérarchique (CAH).....	25
II-1-2. L'Analyse en Composantes Principale (ACP).....	27
II-1-3. Les classifications non supervisées ISODATA	27
II.2. Détection des changements du couvert végétal: le coefficient de Kappa	28
II-3. Détection de changements dans une série statistique.....	30
II-3-1. La Split moving-Windows Dissimilarity Analysis (SMWDA)	30
II-3-3. Le test de Pettitt.....	31
II-3-4. Le test de Mann-kendall	31
II-4. Les tests de corrélation et de significativité statistiques	32
II-4-1. Le test en t de Student	32

II-4-2. Le coefficient de corrélation linéaire (r)	33
II-4-3. Test de Monte –Carlo	33
III- le Cameroun : cadres physique et climatique.....	34
III-1. Le contexte physique	34
III-1-1. La végétation.....	34
III-1-2. le relief	36
III-1-3. Le réseau hydrographique interne (figure I-7).....	39
III-1-4. Les sols.....	40
III-2. Le contexte climatique.....	41
III-2.1. Les masses d’air prépondérantes.....	41
III-2-2. Les grandes unités géo-climatiques du Cameroun.....	42
III-2-3. Synthèse sur les ensembles géo-climatiques au Cameroun	45
CHAPITRE II: RAPPELS SUR LA DYNAMIQUE ATMOSPHERIQUE, OCEANIQUE ET PLUVIOMETRIQUE REGIONALE.....	47
I-Aperçu de la dynamique climatique régionale	49
I-1. La circulation méridienne de Hadley	49
I.2. La circulation de mousson	50
I-3. Structure verticale de l’atmosphère sur la fenêtre ouest africaine.....	51
I-3-1. Le Jet d’Est Africain (JEA).	52
I-3-2. le jet tropical d’est (JTE).	53
I-4 Circulation de basses couches et perturbations d’échelle régionale.....	54
I-4-1. les lignes de grains.....	54
I-4-2. Les ondes d’est africaines.....	56
II- Les SST de l’Atlantique tropical	56
II-1. Cycle annuel moyen.....	56
II-2. L’importance climatique du Golfe de Guinée.....	58
II-3. Les modes principaux de variabilité des SST dans l’Atlantique	60
III- Les champs de précipitations à l’échelle régionale.....	61
III-1. Cumuls annuels et cycle saisonnier moyens des précipitations à l’échelle régionale .	62
III-1-1. Cumuls annuels	62
IV. Les conditions de surfaces continentales	65
IV- 1. Les principales formations végétales	65
IV-2. La dégradation du couvert végétal en Afrique centrale et ses conséquences.....	66
Conclusion	67

CHAPITRE III: VARIABILITÉ INTERANNUELLE ET SAISONNIÈRE DES PRÉCIPITATIONS AU CAMEROUN ENTRE 1951 ET 2002	69
I-Aperçu de la variabilité pluviométrique au Cameroun entre 1901 et 2002.....	71
I-1. Les deux principaux domaines climatiques.....	71
I-1.1 Premier domaine pluviométrique : le Nord-Cameroun	72
I-1.2. Deuxième domaine pluviométrique : le Sud-Cameroun.....	73
I-2. Cycle saisonnier des précipitations au Cameroun entre 1951 et 2002.....	74
I-2-1. Le diagramme latitudes/temps.....	76
I-2-2. Le diagramme longitudes/temps.....	77
I-3. Variabilité des précipitations au cours de la saison des pluies: observations, filtre et résidu.....	79
I-4. Analyse spectrale à l'échelle saisonnière	81
II- structures spatio-temporelles des précipitations du Cameroun	82
II-1. A partir des méthodes factorielles (ACP)	82
II-1-1. L'échelle annuelle	83
II-1-2. L'échelle interannuelle	84
II-2. Régionalisation des précipitations au Cameroun à partir de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).....	86
II-2-1. Le cycle saisonnier (les analyses des figures 10 et 11 seront effectuées concomitamment.).....	87
II-2-2. Le cycle interannuel	91
II-2-3 Évolution des domaines pluviométriques du point de vue spatial	96
Synthèse partielle	101
II-3. Facteurs saisonniers de la variabilité interannuelle des pluies au Cameroun	103
II-3.1. Relations entre longueur de la saison des pluies et variabilité interannuelle	103
II-3.2. Contribution des pluies saisonnières au total annuel.....	108
Discussion	116
Conclusion.....	118
CHAPITRE IV: VARIABILITE INTRASAISONNIERE DES PRECIPITATIONS AU CAMEROUN (1951-2002).	121
I-Répartition spatio-temporelle des précipitations quotidiennes au Cameroun (1951-2002). 124	
I-1. Variations interannuelles du nombre de jours humides et relations avec les cumuls annuels	124
I-1-1. En domaine bimodal	124
I-1-2. En domaine unimodal	125

I-2. Cycles annuels du nombre de jours pluvieux et relations avec les cumuls annuels (1951-2002)	126
I-3. Cycles annuels de l'intensité des cumuls journaliers au Cameroun.....	128
I-4. Typologie de pluies journalières selon différents seuils et relations avec les cumuls annuels	129
I-5. Corrélations entre intensité de jours pluvieux et cumuls annuels.	131
II- Démarrage de la saison des pluies au Cameroun suivant différentes approches	134
II-1. Rappels sur la délimitation de la saison des pluies en région tropicale	135
II-2. Les approches basées sur les méthodes de probabilité	137
II-3. Les approches basées sur les méthodes de fréquences cumulées	141
II-4. Pertinence comparée des méthodes de fréquences cumulées et des probabilités pour la délimitation de la saison des pluies au Cameroun	147
III- Délimitation de la saison des pluies à partir des critères agronomiques.....	150
III-1. Exemple de définitions des critères agronomiques dans quelques régions d'Afrique tropicale.....	151
III-1-1. La question du début de période végétative.....	151
III-1-2. Définition de la fin de période végétative.....	152
III-2. Application des critères agronomiques au Cameroun	153
III-2-1. Début de la saison des pluies à partir des critères agronomiques.....	153
III-1-2. Fin de saison des pluies suivant les critères agronomiques	156
III-1-3. Longueur de la saison des pluies suivant les critères agronomiques	157
III-2. Relations entre dates de début, dates de fin et longueur de la période végétative au Cameroun suivant les critères agronomiques.....	158
III-3. Corrélations entre cumuls saisonniers et dates de démarrage et de fin de période végétative au Cameroun par la méthode agronomique.....	158
III-4-Cohérence spatiale des dates de début et de fin de saison des pluies à partir des critères agronomiques	160
IV-Répartition des séquences sèches intra-saisonnières au Cameroun.....	163
IV-1. Nombre et longueur de séquences sèches intra-saisonnières dans différents domaines pluviométriques.....	163
IV-2. Evolution temporelle (1951-2002) du nombre de séquences sèches dans les domaines pluviométriques du Cameroun	165
CHAPITRE V: ÉTAT DES LIEUX, ÉVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DU COUVERT VÉGÉTAL (1982-2006) ET ANALYSE DES PRINCIPAUX DETERMINANTS	169
I- Etat des lieux du couvert végétal	171
I-1. Dans le sud-Cameroun	171

I-2. Dans le nord-Cameroun : quelques rappels.....	172
I-3. Évolution du couvert végétal au Cameroun dans l'espace et le temps (1982-2006) ...	173
I-3-1. Cycle annuel de la variabilité spatiale du NDVI au Cameroun.....	174
I-3-2. Répartition spatiale des moyennes annuelles	176
II. Régionalisation du NDVI par classification automatique	181
II-1. Cycles annuels des différentes phénologies végétales au Cameroun	182
II-1-1 Cycles annuels moyens du NDVI au nord du 6 ^e parallèle	183
II-1-2. Cycles annuels moyens du NDVI au sud du 6 ^e parallèle	183
II-1-3. Amplitudes de variation du NDVI selon les classes de végétation.....	185
III-Rapport pluies/NDVI : impacts de la variabilité intra-saisonnière des précipitations sur le cycle végétatif.	193
III- 1. Problématique, contexte, résumé, et texte intégral de l'article.....	193
III-1.1. Problématique et contexte	193
III-1-2. Résumé détaillé de l'article.	194
IV. Les facteurs de variabilité et d'évolution du couvert végétal au Cameroun.....	196
IV-1. Problématique, contexte, résumé et texte intégral de l'article.....	197
IV-1.1. Problématique et contexte	197
IV-1-2. Résumé détaillé de l'article	199
V-Evolution du couvert végétal dans le Nord-Cameroun.....	202
V-1. Étude de la différence pixel à pixel des images.....	202
V-2. Les types d'occupation du sol d'après le GLC2000 et leur évolution spatiotemporelle au Cameroun à partir du NDVI-SPOT.....	205
V-2.1. Les cycles annuels des types d'occupation du sol.....	205
V-2.2. Évolution temporelle des types d'occupation du sol au Cameroun	208
Discussion et conclusion	213
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	217
I-Conclusion générale	217
II. Perspectives	224
BIBLIOGRAPHIE	227
ANNEXE A.....	249
TEXTE INTEGRAL DE L'ARTICLE A PARAITRE DANS SECHERESSE	249
ANNEXE B.....	271
TEXTE INTEGRAL DE L'ARTICLE A PARAITRE DANS INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING	271

INTRODUCTION GÉNÉRALE

➤ PROBLÉMATIQUE ET CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Situé au fond nord-est du golfe de Guinée, le Cameroun occupe une position charnière entre l'Afrique de l'Ouest proprement dite et l'Afrique centrale Atlantique, deux entités où les éléments du climat, la circulation atmosphérique, le cycle saisonnier et la variabilité interannuelle des paramètres climatiques dépendent, pour l'essentiel, du système de mousson africain. Or, l'une des particularités des circulations de type mousson est d'être extrêmement sensibles aux contrastes de températures qui s'établissent entre surfaces marines à forte inertie thermique et surfaces continentales qui s'échauffent et se refroidissent beaucoup plus vite. Ceci génère des gradients d'énergie auxquels répond une dynamique atmosphérique particulière dans les basses couches. Par ailleurs, les interactions entre ces surfaces et l'atmosphère contrôlent étroitement le cycle de l'eau en régulant les flux verticaux de chaleurs sensible et latente, et donc conditionnent l'environnement, la vie des sociétés, le développement économique.

C'est la raison pour laquelle la variabilité pluviométrique et la circulation de mousson africaine qui l'explique en grande partie sont devenues des champs d'étude privilégiés. Plusieurs programmes internationaux et campagnes de mesures ont ainsi été définis. Certains ont cherché à comprendre les mécanismes se déroulant à certaines échelles (Global Atmospheric Research Programme [GARP], 1974 ; Expérience tropicale du GARP dans l'Atlantique [ETGA], 1974 ; Convection Profonde Tropicale [COPT], 1981 ; d'autres, plus intégrateurs, ont étudié la mousson africaine dans toute sa complexité (West African Monsoon project [WAM], 2002 ; Analyse Multidisciplinaire de la Mousson ouest Africaine [AMMA], 2007). Le plus récent, (programme AMMA) a été certainement le plus ambitieux et le plus efficace. Les données récoltées lors des campagnes de terrain de 2005 à 2009 ont permis d'améliorer les outils d'analyse et la connaissance au regard des interactions d'échelles. Les principaux sites d'étude étaient situés au Bénin, au Niger et au Mali, précisément où les gradients latitudinaux entre golfe de Guinée et zone

sahélienne s'expriment le mieux. Ils ne concernaient donc pas le Cameroun qui se positionne un peu à la charnière entre Afrique de l'Ouest et Afrique centrale et qui, pourtant, est souvent décrit comme une « Afrique en miniature ». Son extension méridienne de la forêt dense à la steppe sahélienne permet en effet d'y retrouver une large gamme de climats et d'environnements présents en Afrique de l'Ouest, alors que son positionnement au nord-est du golfe de Guinée et son relief caractéristique sont propices aux études multiéchelles.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du programme international à initiative française qui a regroupé, entre 2005 et 2009, plus de cent quarante structures de recherches européennes, africaines et américaines, et dont l'objectif était de mieux connaître les mécanismes de la mousson africaine pour mieux prévoir ses variations et ses répercussions sur le climat et les populations (voir pour plus de détails le Livre Blanc sur <http://medias.obs-mip.fr/amma>). Ce travail s'inscrit également dans des problématiques complémentaires du programme ICCARE (Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en Afrique de l'Ouest non Sahélienne) mené par l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le développement en Coopération (actuel Institut de Recherches pour le Développement) au sein du projet FRIEND-AOC (Flow Regimes from International Experimental and Network Data/ en Afrique de l'Ouest et centrale) du Programme Hydrologique international de l'UNESCO (Servat, 1994), dont l'objectif était d'étudier la variabilité du climat en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne, ainsi que ses conséquences sur les ressources en eau. Cette étude se situe également en amont de la modélisation climatique dont la paramétrisation souffre encore de l'insuffisance d'études climatiques d'échelle fine, ainsi que de la validation terrain. En effet, les emboîtements d'échelles constituent l'un des soucis majeurs de la mise au point des modèles de simulation qui intègrèrent des processus de surface liés à la dynamique de la végétation, dont les mécanismes ne sont pas encore bien représentés (Rosnay, 1999).

La thèse doit être vue comme une contribution à l'étude de la variabilité pluviométrique enregistrée au Cameroun et à certains de ses effets majeurs sur la vulnérabilité et l'adaptation des sociétés sur un espace-frontière entre les deux sous-régions mentionnées précédemment.

Il ne s'agit donc pas d'actualiser l'ensemble des connaissances en revenant sur les travaux pionniers de climatologie dévolus au Cameroun (Génieux, 1955 ; Suchel, 1987 ; Tsalefac, 1983 ; Santiago, 1998 ; Tchiadeu, 2000), ni d'ailleurs de compléter certaines études appliquées à ce sous-espace, telle que, par exemple, la thèse récente de Bella-Medjo (2008) portant sur les relations climat-agronomie. Il s'agit de porter l'attention sur l'évolution observée de l'interface climat-société au cours des soixante dernières années. Or, cette période se place dans le cadre de la transition climatique qui a touché l'Afrique

de l'Ouest dans son ensemble et qui a vu alterner trois sous-périodes caractéristiques : une succession de saisons des pluies anormalement arrosées dans les années 1950 et 1960, puis déficitaires dans les années 1970 et 1980, avec, depuis le milieu des années 1990, un certain retour à des conditions plus normales.

La gamme de variabilités des valeurs mesurées sur ces périodes est, en fait, beaucoup plus large que l'échelle saisonnière : elle s'étend de l'échelle synoptique (quelques jours) à celle des tendances climatiques, en passant bien sûr par les variations intrasaisonnières et interannuelles. Cette variabilité, d'origine naturelle et/ou anthropique, exerce des impacts différentiels sur l'environnement et donc sur l'écologie des milieux et les ressources économiques, puisque le Cameroun est aussi un état africain dont le développement économique dépend en large partie de l'exploitation des ressources naturelles et des activités du secteur primaire. De par sa situation, le pays a subi ces aléas récurrents, avec cependant certaines variations par rapport au schéma général.

En effet, la zonation classique des formations végétales est ici altérée par la topographie, les types de sols, mais aussi l'occupation humaine qui entraîne un recul de la forêt dense par déforestation au profit des cultures sur brûlis. La population enregistre une dynamique démographique complexe, où les modes de production reflètent en partie les origines diverses, qu'elles soient sociales, culturelles, linguistiques ou encore ethniques. Ainsi, la composition des groupes humains, les moyens technologiques et l'exploitation du milieu — avec les conflits séculaires entre éleveurs et agriculteurs — reflètent l'histoire et le terrain. Plusieurs crises de subsistance ont touché les populations lors des années anormalement sèches dans les années 1970 et 1980 avec leur cortège de poussées épidémiques, de migrations et de problèmes économiques qui, en fait, perdurent depuis une trentaine d'années.

Le Cameroun est, en quelque sorte, un pays *mosaïque* où les concepts de vulnérabilité et d'adaptabilité à la variabilité climatique, directe ou induite, ne peuvent s'étudier sur des ensembles larges et, pour cette raison, il est nécessaire de prioriser les études faisant apparaître les aspects différentiels dans le temps et dans l'espace et de travailler sur des espaces réduits mais à peu près cohérents, d'où la question centrale de l'étude : **quels sont les modes spatiaux et multitemporels des précipitations au Cameroun et quels sont les répercussions des modulations pluviométriques et anthropiques sur la dynamique du couvert végétal ?**

➤ CADRE CONCEPTUEL

Un certain nombre de concepts et mots-clés seront utilisés tout au long de la thèse : ils doivent être précisés afin d'éviter toute ambiguïté.

- **« Nord-Cameroun, Sud-Cameroun »**

Les termes Nord-Cameroun et Sud-Cameroun (ou encore Nord du Cameroun, Sud du Cameroun) représentent les régions situées respectivement au nord et au sud de 6°N, respectivement, et non les provinces du Nord et du Sud du Cameroun. Lorsque les analyses s'intéresseront au Nord-Cameroun, les parties septentrionale et méridionale seront considérées par rapport à cette seule région (et non pas à l'ensemble du Cameroun).

- **Nomenclature des domaines climatiques**

Le défi majeur de la classification phytogéographique du couvert végétal reste l'uniformisation de la typologie des paysages végétaux et des légendes de figures. En effet, face à l'imprécision des critères descriptifs, toute classification physionomique n'a qu'une valeur relative. De ce fait, les corrélations entre les nomenclatures et leur répartition spatiale peuvent varier entre auteurs, ou même évoluer pour un même auteur suivant les échelles spatiales et les publications. Par exemple, pour Letouzey (1968), la zone soudanienne du Cameroun englobait toutes les savanes boisées et arborées, ainsi que les forêts claires du bassin de la Bénoué. En 1968, ce même auteur discrimine le domaine médio-soudanien dans la partie méridionale du bassin et le domaine soudano-sahélien dans la partie septentrionale. Par ailleurs, Génieux (1958) préfère l'appellation de « tropical » plutôt que de « soudanien ». Le même constat est signalé pour Sillans (1958) qui subdivise la zone soudanienne en climat soudano-guinéen et sahélo-sahélien. Suivant le critère pluviométrique, Suchel (1972) montre que le véritable climat soudanien correspond à des conditions humides en pluviométrie alors que pour Bowden (1966) au Nigéria, cette région a une saison des pluies de quatre mois et une pluviométrie comprise entre 700 et 800 mm.

Cette incohérence de la nomenclature se généralise, en fait, à l'ensemble des couverts végétaux car les perceptions changent selon la sensibilité des auteurs et le type de données climatiques (Boutrais, 1984).

Dans cette thèse, on évoquera cinq domaines camerounais suivant des critères pluviométriques et géographiques : le domaine soudano-sahélien au nord des latitudes de l'Adamaoua qui, avec les hautes terres de l'Ouest, forme le domaine tropical humide ; plus au sud, le domaine subéquatorial, puis le domaine proprement équatorial ; enfin, le domaine côtier qui suit la ligne côtière.

➤ **OBJECTIFS**

Le questionnement qui sous-tend ce travail peut se résumer à une double interrogation :

(i) quelles sont les modifications des états de surface récemment observées à l'échelle du Cameroun, qui sont associées à la variabilité climatique observée ces soixante dernières années sur toute l'Afrique de l'Ouest ? ;

(ii) quelle est la part qui revient aux activités humaines et aux changements d'occupation des sols liés plus directement au développement ?

La réponse à ces questions nécessite une progression de l'étude en quatre étapes.

1) Actualiser la base pluviométrique du Cameroun entre 1951 et 2002

La disponibilité des données climatologiques constitue un souci majeur et perpétuel pour les études en Afrique centrale en général et au Cameroun en particulier, en raison de la précarité du réseau d'observation au sol. Cette précarité résulte de la grande hétérogénéité spatiale des stations et du caractère souvent lacunaire des données — quand elles existent. Cette situation est d'autant plus préoccupante que les secteurs d'activités potentielles (agriculture, tourisme, production hydroélectrique, etc.) ont besoin de ces données pour prévoir leurs activités. Si l'avènement des satellites météorologiques offre une information disponible à plus large échelle et à des pas de temps intéressants, leur calibration nécessite de disposer de mesures fiables *in situ* (Guillot, 1990). De plus, les conditions d'observations au sol et en altitude doivent pouvoir être comparées et rester quasi constantes au cours du temps pour répondre aux critères de stabilité des séries, de représentativité des mesures et donc de réalisme des résultats d'analyse. Ceci n'est évidemment pas possible vu l'hétérogénéité géographique, la longueur des relevés nécessaires, sans parler des changements de capteurs embarqués ou de postes au sol. Comment alors pallier ces insuffisances ? Quelles études méritent d'être conduites dans un contexte où les données présentent tant de lacunes ? Comment concilier données conventionnelles et données satellitaires, dès lors que les échelles d'observation ne sont pas les mêmes ?

Ces questions sont encore plus centrales quand il s'agit d'évaluer les précipitations. La base de données de pluviométrie quotidienne du Cameroun disponible au Centre de Recherches de Climatologie (CRC) comprend les données plus ou moins corrigées d'une vingtaine de stations jusqu'en 1993. Cela représente spatialement une station pour plus de 20 000 km². La priorité a donc été de compléter cette base sur une période plus récente avec un plus grand nombre de stations.

2) Documenter la variabilité spatio-temporelle des précipitations au Cameroun entre 1951 et 2002

La disponibilité des données ne permet pas d'appréhender les fluctuations pluviométriques sur la période la plus récente, mais la profondeur temporelle semble toutefois suffisante pour des analyses pertinentes à différentes échelles (annuelle, interannuelle, saisonnière et intrasaisonnière). Les analyses contribueront à approfondir les connaissances sur la dynamique des systèmes précipitants et des précipitations générées à l'échelle locale et d'étudier les différents modes de variabilité pour mieux appréhender leurs impacts sur la couverture végétale.

3) Dresser un état des lieux de la couverture végétale au Cameroun pour étudier son évolution dans le temps

Dans la partie appliquée de cette thèse, la couverture végétale occupe une place centrale, et est considérée au sens large (naturel et cultivé). On utilisera des données satellitales multisources à différentes résolutions spatiales pour quantifier l'étendue et la production nette primaire associée aux différents types de végétation. Les indices de végétation seront mis à contribution pour reproduire les variations de la biomasse verte.

4) Étudier et évaluer l'impact des facteurs qui conditionnent et modulent l'évolution de la couverture végétale.

Ici, on cherchera à comprendre les poids relatifs des paramètres bioclimatiques à l'origine de la modification du couvert végétal, notamment i) les précipitations ; ii) la croissance démographique en tant que facteur indirect d'occupation et d'utilisation du sol ; iii) les types d'occupation du sol (*via* les activités humaines) qui, on le verra, jouent un rôle très important non seulement dans l'évolution des états de surfaces, mais aussi dans le rythme de reconstitution du couvert végétal après dégradation ou reconversion.

➤ PRINCIPAUX ATTENDUS

Chaque étape est subordonnée à un ou plusieurs attendus.

- **L'étude de la variabilité des précipitations** (étapes 1 et 2 ci-dessus) sera faite sur une profondeur temporelle de cinquante-deux ans et suivant des échelles emboîtées afin de permettre l'amélioration des connaissances en climatologie descriptive pour des applications dans des disciplines connexes comme l'hydrologie et l'écologie, l'agronomie, etc.

- **L'analyse des indices de végétation** par des méthodes de télédétection et d'analyse spatiale permettra de rendre compte de l'évolution spatiotemporelle du couvert végétal aux bonnes échelles pour le Cameroun.

▪ **L'étude de la dynamique du couvert végétal** sera réalisée dans un contexte associant facteurs pluviométriques, occupation du sol, utilisation et descripteurs démographiques afin de considérer la part anthropique du système.

➤ ORGANISATION DE LA THÈSE

Pour des raisons didactiques, le mémoire comporte 5 chapitres virtuellement subdivisés en trois parties :

▪ **La première** présente les éléments majeurs du cadre climatique et géographique et de ses modifications temporelles, en prenant en compte la littérature afférente. Elle est organisée en deux chapitres et, par souci d'exposition, comprend des conclusions partielles sur quelques points importants mais non nécessaires à la continuité thématique.

• *Le premier chapitre* présentera les données et méthodes utilisées, ainsi que les caractéristiques géographiques et physiques de la zone de l'étude.

• *Le deuxième chapitre* est dévolu à la description succincte des dynamiques atmosphérique, océanique et terrestre qui sont connectées au climat de la zone d'étude, avec un accent particulier sur la pluviométrie qui sera le paramètre climatique le plus considéré dans la thèse.

La deuxième partie présente les caractéristiques dominantes de la variabilité pluviométrique aux échelles interannuelles, intrasaisonnières et journalières.

• *Le troisième chapitre* documentera les caractéristiques interannuelles et saisonnières des précipitations au travers des modes principaux de la variabilité. Il définira aussi les indices pluviométriques sur lesquels la suite des analyses reposeront ainsi que les paramètres saisonniers modulant la pluviométrie annuelle (cumuls annuels, longueur des saisons...).

• *Le quatrième chapitre* présentera les paramètres intrasaisonniers susceptibles de moduler la variabilité des précipitations — et donc le cycle végétatif — au cours de chaque type de saison : nombre, répartition et intensité des jours pluvieux ou secs, relations avec les cumuls annuels et saisonniers. La question de la délimitation des saisons sera également abordée, ainsi que celle des séquences sèches intrasaisonnières (nombre, fréquence, durée).

▪ **La troisième partie** de la thèse présentera l'état des lieux et l'évolution spatio-temporelle du couvert végétal tout en analysant leurs principaux déterminants. Elle s'organise autour du chapitre 5 et de deux annexes qui reproduisent les articles en cours de publication.

• **Le chapitre 5** s'articule autour de cinq volets : (i) l'étude diagnostique du couvert végétal du Cameroun est d'abord réalisée à partir de l'indice de végétation normalisé (NDVI) : variabilités spatiales latitude/temps, longitude/temps ; (ii) puis une typologie de la végétation à partir de la régionalisation du NDVI est proposée, ainsi qu'une étude des variations aux pas de temps annuel et interannuel ; (iii) ensuite, on évalue le rôle de la pluviométrie intra-saisonnière sur le développement du couvert végétal dans le Nord-Cameroun au travers d'un article à paraître dans la revue *Sécheresse*¹, reproduit *in extenso* dans l'annexe A ; (iv) enfin, on discute de l'importance combinée des facteurs naturels (pluviométrie) et anthropiques (socio-démographiques) sur l'évolution du couvert végétal, au travers d'un article accepté dans la revue *International Journal of Remote Sensing* dont le texte intégral figure dans l'annexe B ; (v) le dernier volet est consacré à l'étude des principaux types d'occupation du sol associés au NDVI, et propose une étude de cas sur les changements du couvert végétal dans le Nord-Cameroun.

¹ Au moment où s'effectue les corrections de cette thèse, l'article est déjà paru dans la revue *sécheresse* : volume 22, N° 3 de juillet-septembre 2011

CHAPITRE I

LES DONNEES ET METHODES

Dans ce chapitre, sont décrits très succinctement, les principaux jeux de données climatiques (pluviométrie, atmosphériques, océaniques), et d'états de surface (indice de végétation multi-échelles, occupation du sol), ainsi que les méthodes d'analyses utilisées pour atteindre les objectifs de la thèse.

Cette thèse se fonde sur l'analyse de données recueillies ou modélisées par différents services spécialisés et de ce fait, les résultats qui en sont issus sont nécessairement contraints par leur représentativité, qualité, étendue temporelle et densité spatiale. Il s'agit notamment de données d'observation d'échelle large et *in situ* de précipitations, de données de température de surface océanique, d'estimations d'indice de végétation et de nombreuses variables issues de réanalyses atmosphériques. Ces données sont ensuite soumises à plusieurs techniques statistiques ou de classification selon différentes approches. Pour la description, on va par exemple s'appuyer sur des représentations visuelles de valeurs chronologiques (segmentations de séries, moyennes mobiles, etc.) et sur des analyses empiriques pour décrire un « comportement » compte tenu de l'inhomogénéité spatio-temporelle de la zone d'étude et parfois des données. Ces approches consistent à partitionner des séries statistiques admises comme stationnaires en plusieurs segments, dans le but de rechercher l'occurrence de certains phénomènes (météorologiques ou climatiques) ainsi que leur périodicité.

Plusieurs tests statistiques sont utilisés pour évaluer la significativité des résultats selon le type de données, leur structure (distribution, univariée, bivariée, auto-corrélation, etc.), mais aussi selon la taille spatio-temporelle des échantillons ou du type d'information recherchée : tendance ; rupture(s). Ces tests sont soit paramétriques, c'est-à-dire recourant à un modèle à forte contrainte avec souvent des hypothèses de normalité des distributions, d'égalité des variances etc., soit non paramétriques, lorsque ces conditions ne sont pas réalistes ou précisées, ou encore lorsque celles-ci sont particulièrement souples (distribution aléatoires et supposées continues).

Le but de ce chapitre est de décrire sommairement les principaux jeux de données utilisés, ainsi que les méthodes d'analyse sélectionnées. Il ne comporte donc pas de conclusion. L'objectif n'est pas d'être exhaustif mais d'indiquer les cadres d'utilisation, les contraintes et les limites de ces jeux et méthodes, tout en donnant, quand nécessaire, les références techniques et/ou bibliographiques.

I-DONNEES UTILISEES

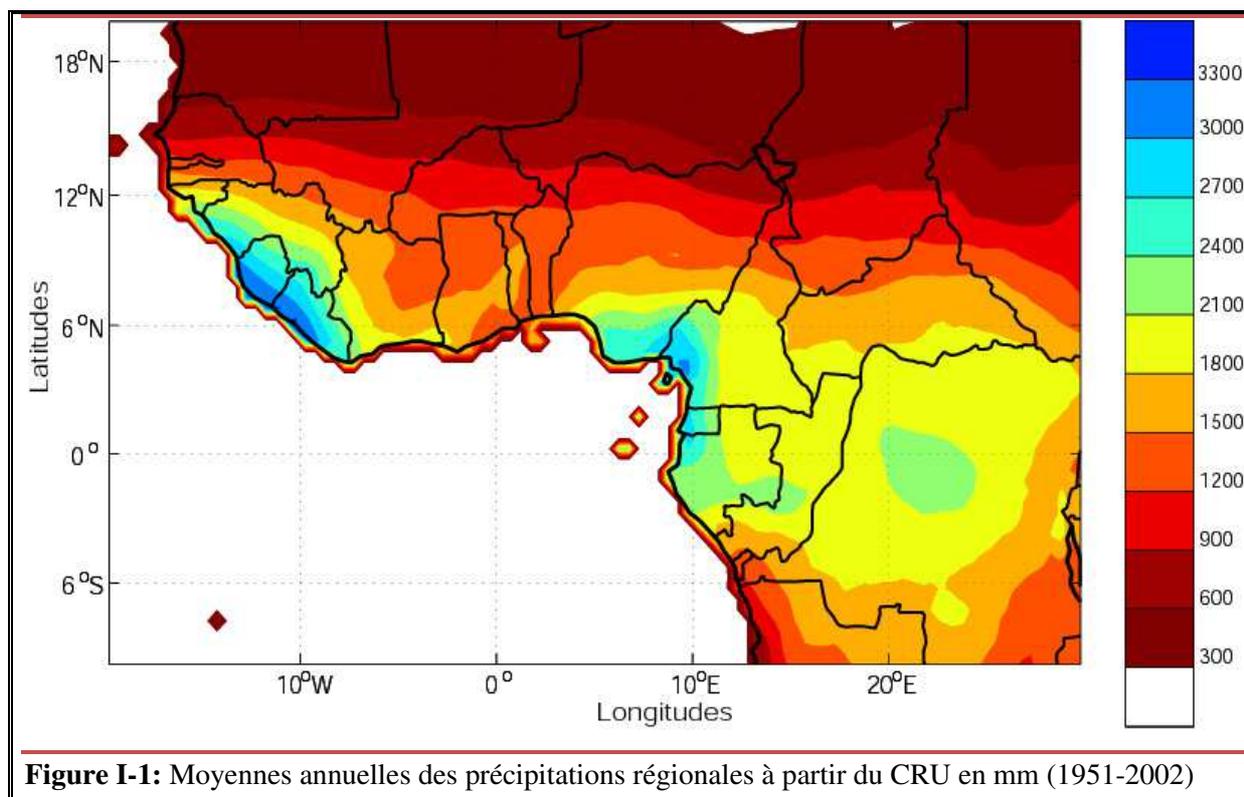
I-1 Les données climatiques

En dehors des données de précipitations, les données climatiques utilisées dans cette thèse, ont permis de décrire les éléments de la dynamique régionale qui sont capables de moduler le climat dans la zone de l'étude.

I-1-1. Les données de précipitations du cru

Le CRU est une unité de recherche de l'université de l'East Anglia en Angleterre, qui étudie les changements climatiques naturels et anthropogéniques. Dans le souci de mettre à la disposition des scientifiques des données de plus en plus fiables et de moins en moins

fragmentées, le CRU effectue des mises à jour permanentes de 9 variables climatiques sur environ 1224 fichiers. Dans cette étude, nous avons utilisé le CRUTS2.1 de la variable « précipitations », qui est la version améliorée de CRUTS2.0 (Mitchell et Jones, 2005). Il s'agit des données couvrant la surface continentale à l'échelle globale sur une grille régulière de $0,5^\circ$ de côté (67420 points). Ces données, archivées à l'échelle mensuelle sur la période 1901-2002 sont issues de différentes sources de données stationnelles et suivant des méthodes d'interpolation et d'homogénéisation, où les données manquantes sont estimées à partir de la période de référence 1961-1990 (Mitchell et al., 2005). Dans cette thèse, ces données ont été considérées sur une fenêtre recouvrant l'Afrique occidentale et équatoriale.



Toutefois, les données du CRU ne sont pas exemptes de limites car, sur le plan spatial, l'accent est mis sur la recherche de meilleures évaluations des modèles aux grandes échelles spatiales et de ce fait ne donnent pas une représentation spatialement homogène de la variabilité climatique. De ce fait, si un point de grille du réseau présente une hétérogénéité significative, les analyses de séries temporelles donneront des résultats imprécis sur ce point de grille. Par ailleurs, l'utilisation de ces données nécessite des précautions à partir des années 1990, année à partir de laquelle le nombre de mesures aux stations a considérablement baissé en Afrique sub-saharienne. Pour des informations plus exhaustives, l'auteur pourra se référer à Mitchell et Jones (2005). Dans cette thèse, les données du CRU ont été utilisées pour valider la régionalisation des données *in situ* qui sont très disparates dans la zone de l'étude (voir section d).

I-1-2. Les données de températures de surface océanique (SST initiales en anglais) du Hadley Center

Les données SST ont deux origines : celles provenant du ICOADS (International Comprehensive Ocean-atmosphere Data Set) pour la période 1850 à 1997 et celles provenant du NCEP-GRS de 1998 à nos jours. Le HadSST2 prend en compte les mesures *in situ* provenant des bateaux et des bouées, élimine les données après le contrôle de qualité, puis les convertit en anomalies de température en soustrayant les valeurs climatologiques mesurées. Les anomalies résultantes sont disponibles sur grille de 5° de côté. Les biais sont corrigés afin supprimer les tendances erronées liées à la diversité des procédés de mesure avant l'année 1942, ainsi que des changements intervenus dans les conditions de mesure au fil du temps (Rayner and *al*, 2005). Une analyse de ces incertitudes consiste à explorer tous les paramètres de construction de chaque donnée et à produire de multiples versions en utilisant la méthode de Monte Carlo. Une évaluation moyenne des incertitudes dans chaque grille est obtenue en combinant ces corrections avec celles inhérentes aux mesures et aux prélèvements.

Les températures de surface océanique sont des variables essentielles de la mousson africaine. Elles ont été utilisées dans cette thèse pour décrire les modes de variabilité annuelle et interannuelle des températures de l'Atlantique tropical qui intéressent directement la zone de l'étude.

I-1-3. Les données de réanalyses atmosphériques du NCEP/DOE2

Les modèles de réanalyses assimilent des données d'observations multi-sources (radiosondages, estimations satellitales) mais hétérogènes au plan spatio-temporel, et produisent aussi des prévisions à courte échéance. Elles sont construites à partir d'observations ponctuelles qui sont intégrés dans un modèle de climat sur une période donnée. Ensuite on force le modèle à générer les points observés à partir des méthodes d'extrapolation assez complexes. Les données réanalysées résultent donc d'observations réelles et d'extrapolations et se déclinent en plusieurs variables : des variables dynamiques et thermodynamiques tels que la pression au niveau de la mer (SLP), la température, le vent (à 17 niveaux de pression), l'humidité relative et spécifique, etc., le tout couvrant la totalité de la troposphère (90N-90S et 0E-357.5E) sur grille régulière de 2,5° de côté.

Les réanalyses NCEP/DOE2, sont une version améliorée des réanalyses du NCEP/NCAR (Kalnay et *al*, 1996), après correction et mise à jour des paramétrisations et processus physiques (Kanamitsu et *al*, 2002). Les données sont disponibles aux échelles courtes (4 données /jour), journalière et mensuelle, sur la période 1979-2005. Dans cette étude, nous avons utilisé les données de réanalyses pour décrire la dynamique mensuelles du vent à différents niveaux de pression et précisément dans la haute (200 hPa), la moyenne (600 hPa) et la basse (925 hPa) troposphère, où circulent les flux thermiques et les perturbations dont les climats de la zone d'étude sont sensibles. Les données de

pression au niveau de la mer (SLP) ont également permis de décrire les principaux centres d'action atmosphérique régionale sur la période 1979-2002.

1-1-4. Les données de position de la ZCIT

Les données des différentes positions méridiennes et zonales de la ZCIT sont produites par le Climate Prediction Center (CPC) dans le cadre de l'Africa ITCZ Monitoring Project (AIMP). Elles sont calculées par interpolation des points de condensation à 15°C, ainsi que des cartes modélisées de vent en surface, et comprennent des positions moyennes décennales de la ZCIT au nord de l'équateur, entre 15W–35E. Elles sont archivées d'avril à octobre et pour les années de 1988 à 2005 sur le site suivant : <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/fews/data.shtml>

Les données de position de la ZCIT seront utilisées dans cette thèse pour discuter les contrastes pluviométriques entre le nord et de sud de la zone d'étude, ainsi qu'entre années exceptionnellement humides ou sèches.

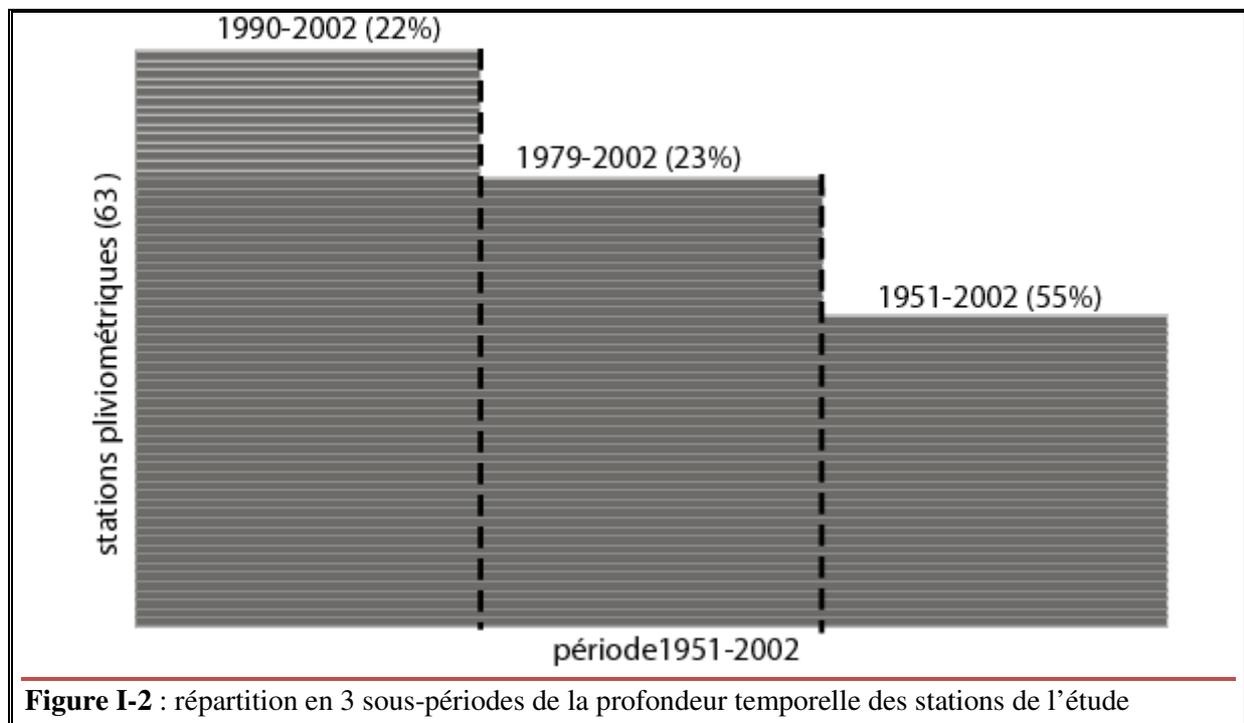
1-1-5. Les données pluviométriques stationnelles

En Afrique sub-saharienne, les difficultés de disposer de données climatologiques de qualité avec une profondeur temporelle suffisante, constituent la principale limite des études. Comme déjà souligné par Suchel en 1987, l'incapacité à produire des données fiables au Cameroun, relève essentiellement de la crise économique des années 80, qui a conduit à la fermeture d'un nombre important de stations créées à l'époque coloniale. Les stations qui ont échappées à la fermeture sont pour la plupart mal entretenues et ne respectent pas toujours les normes exigées par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM). De plus, on note une démotivation du personnel de mesure, en raison des baisses salariales qui ont suivies la crise économique de la fin des années 80. Ceci conduit à des relevés souvent fantaisistes ou comportant beaucoup de lacunes.

Dans cette étude, ce sont les fichiers pluviométriques de la Section Hydrologie de l'ORSTOM (tomes 1 et 2) qui ont permis de constituer les séries de données journalières pour la période antérieure à 1972. Ces documents comportent un récapitulatif des totaux mensuels et annuels ainsi que les tableaux en années calendaires des précipitations journalières pour chaque station. Des travaux précédents de recueil et de correction des données de précipitations *in situ* de l'Afrique avaient été menés au Centre de Recherches de Climatologie (CRC), et comporte des données d'une vingtaine de stations sur le Cameroun, entre 1951-1993. Les bases de données de la Direction de la Météorologie Nationale, des postes pluviométriques du réseau de la SODECOTON (Nord-Cameroun), de la SOCAPALM (société camerounaise d'huile de palme) et de la CDC (Sud-ouest) ont été consultées pour compléter la série après 1990. Plusieurs données ont été recueillies dans l'arrière pays, puisque le relais entre le service de la Direction de la Météorologie

Nationale et les postes pluviométriques annexes n'est pas toujours assuré. Pour l'ensemble, une soixantaine de stations irrégulièrement réparties sur le territoire camerounais ont été recensées, dont une trentaine présentant des données complètes pour la période 1951-2002. Par ailleurs, soixante trois stations présentent des données pour la période 1990-2002, dont 17 provenant du réseau pluviométrique de la SODECOTON. Les stations présentant beaucoup de lacunes comme celles situées à l'est du pays n'ont pas été retenues puisque la reconstruction de données, basée très souvent sur des méthodes d'interpolation plus ou moins complexes et réalistes ne faisait pas l'objet de cette thèse.

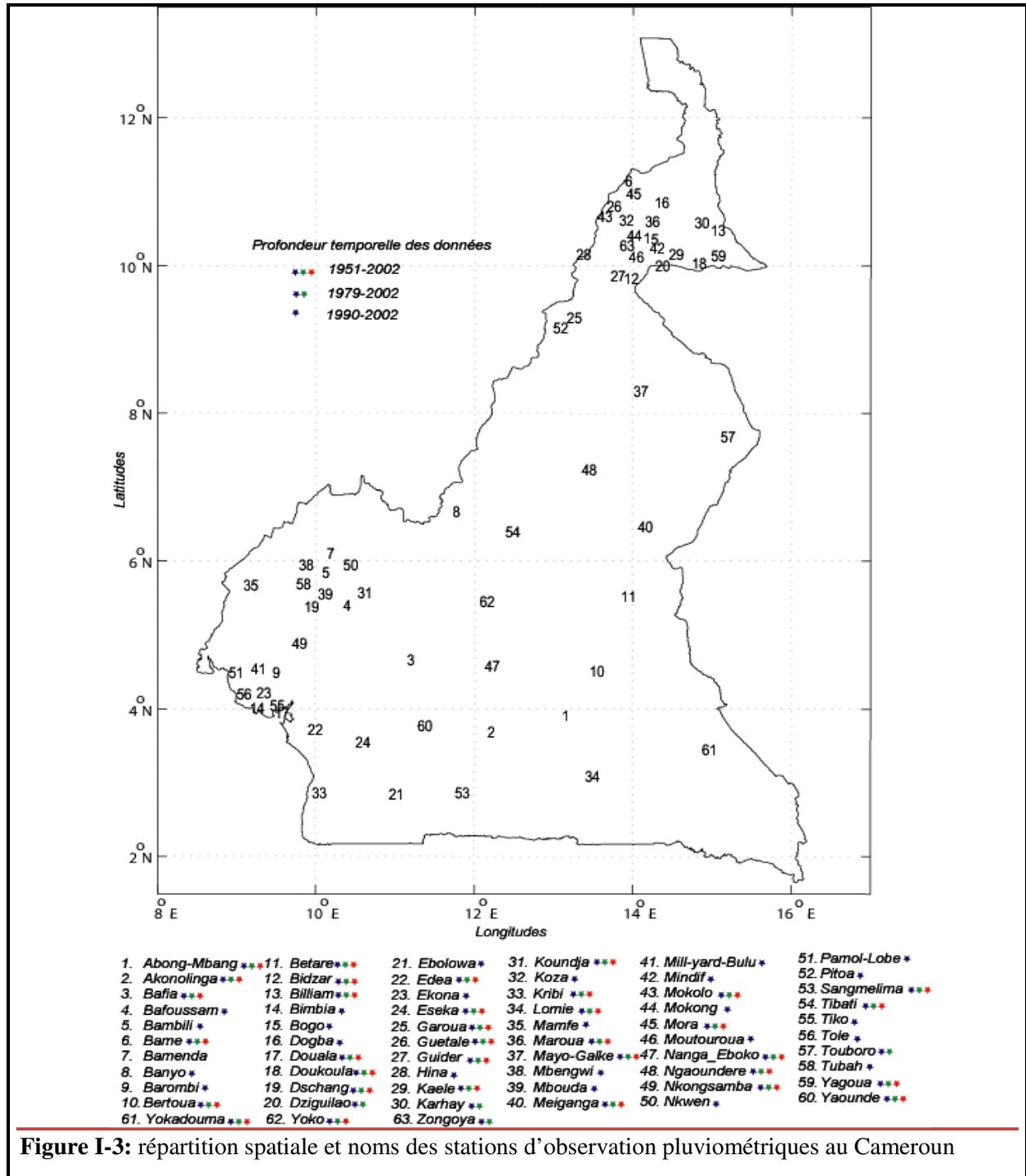
La figure I-2 montre les statistiques de la profondeur temporelle des données (quotidiennes) dans différentes stations. Il ressort que 35 stations sur 63 présentent des données sur la période 1951-2002, soit 55%, alors que ce taux est de 23% pour la période 1979-2002. Par ailleurs, seules 22% de stations ont des données disponibles sur la période 1990-2002.



Les données de la période post-1979 ne sont pas directement utilisées dans cette thèse, mais sont mises à contribution dans des articles qui sont disponibles dans les deux derniers chapitres.

La figure I-3 présente outre la répartition spatiale des stations, leurs noms ainsi que la profondeur temporelle des données. Il ressort que les stations sont très inégalement réparties car, si l'on considère que les points au sol sont répartis de manière homogène, une station couvrirait une superficie de 7540Km². Les zones situées au nord de 11,5°N, entre 7°N-8°N et dans le sud-est du pays sont les moins couvertes Fig. I-3). Il s'agit des

localités difficilement accessibles : zones forestières, très escarpées ou hostiles du point de vue climatique.



I.2- Les données de végétation

I.2-1. Les indices de végétation

a) Bref historique

La conception d'indices de végétation requiert une bonne connaissance des métadonnées des images satellitales (conditions physiques et atmosphériques, caractéristiques orbitales, capteurs etc.) dans les bandes spectrales auxquelles la végétation est sensible : il s'agit notamment des canaux visibles rouge (R), proche infrarouge (PIR) et vert. Cette dernière bande est plus dépendante des conditions atmosphériques et pour cela, est moins utilisée dans l'élaboration des indices de végétation. En 1975, Colwell et *al* propose l'indice de végétation: $VIN=PIR/R$ (VIN pour Vegetation Index Number). Si cette formule a l'avantage d'être rapide d'utilisation, elle reste très sensible au cycle de l'évolution de la végétation et présente un faible pouvoir de discrimination lorsque le taux de recouvrement du sol est inférieur à 50% (Collet et Régis, 2001). De plus, le VIN est un mauvais indicateur de la déficience hydrique des plantes. L'Indice de Végétation Normalisé (NDVI) proposé par Rouse et *al* (1974) est lui défini par le rapport $NDVI = (PIR-R) / (PIR+R)$, la normalisation permettant de réduire les effets de pente. Les valeurs du NDVI sont proches de 1 pour les surfaces forestières, quasi-nulles pour les sols nus et négatives pour les surfaces hydriques. Afin de pallier la présence des valeurs négatives dans le NDVI, Rouse (1974) a proposé un nouvel indice $TVI=\sqrt{NDVI+0,5}$ (TVI pour Indice de Végétation Transformée). Cet indice présente quasiment les mêmes propriétés que le NDVI mais, produit une meilleure corrélation statistique en raison de l'utilisation de la racine carré (Bariou et *al*, 1985).

Au fil de l'évolution des recherches, la définition du NDVI a subi plusieurs ajustements dans le but de réduire les influences atmosphériques ainsi que celles relatives au recouvrement du sol. Afin de compenser les effets atmosphériques qui modifient la luminance des images à différentes dates, Kaufmann et *al* (1992) ont produit un nouvel indice en intégrant la bande bleue (sensible aux conditions atmosphériques) dans la formule initiale du NDVI : $ARVI$ (Atmospherically Resistant Vegetation Index)= $(PIR-RB)/(PIR+RB)$, avec $RB=R-\gamma(B-R)$, où γ dépend de la présence et du type d'aérosols et est calculé suivant une estimation des luminances ou reflectances intrinsèques de l'atmosphère dans les canaux R et B. Mais sa valeur est de 1 en l'absence de ces informations. Par ailleurs, les approches développées par Huete (1988) et Baret et *al*, (1993) consistent à réduire la contribution spécifique des sols pour que la sensibilité de l'indice ne concerne que la végétation, dans le cas où celle-ci ne couvre que partiellement le sol : $SAVI$ (Soil Adjusted Vegetation Index) = $(PIR-R)(1+L)/(PIR+R)+L$, où L représente la densité de couverture du sol : elle prend la valeur 1 pour les densités végétales faibles ; 0,5 pour les densités moyennes et 0,25 pour les fortes densités.

Toutefois, si l'introduction de ces formulations plus ou moins complexes permettent d'augmenter la sensibilité de l'indice et mieux représenter certaines situations spécifiques, la plus haute spécification des indices accroît leur complexité et compromet leur concrétisation ou leur mise en œuvre (Rondeaux et *al*, 1996 ; Rollet et Caloz, 2001). De ce fait et malgré ses limites, le NDVI, moins complexe, demeure le plus utilisé pour

suivre les caractéristiques biophysiques des couverts végétaux à leurs différents stades phénologiques (phase active, sèche ou sénescence).

b) La base de données du Global Inventory Modeling and Mapping Studies GIMMS

La base de données du (GIMMS) est constituée de données bimensuelles de NDVI, diffusée en accès libre sur le site Internet de l'Université du Maryland (<http://glcf.umiacs.umd.edu/data/gimms>). Ces données couvrent la surface continentale à l'échelle globale suivant une résolution de 8km (Tucker et *al*, 2005). Elles sont disponibles de juillet-1981 à décembre-2006 sous forme de cartes bimensuelles générées par la technique de synthèse temporelle dite MVC (Monthly Maximum Value Composite), fondée sur la recherche de la valeur maximale de NDVI sur chaque intervalle de 15 jours (Holben, 1986). Ces données dérivent de l'instrument AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) à bord des satellites de la NOAA après les corrections géométriques, de calibration et celles inhérentes aux aérosols atmosphériques et volcaniques.

Tableau I-1. Couverture temporelle des capteurs AVHRR

Numéro de satellite	Date de lancement	Date de début	Date de fin
NOAA-6	06/27/1979	06/27/1979	11/16/1986
NOAA-7	06/23/1981	08/24/1981	06/07/1986
NOAA-8	03/28/1983	05/03/1983	10/31/1985
NOAA-9	12/12/1984	02/25/1985	05/11/1994
NOAA-10	09/17/1986	11/17/1986	08/30/2001
NOAA-11	09/24/1988	11/08/1988	09/13/1994
NOAA-12	05/13/1991	05/14/1991	12/15/1994
NOAA-13	08/09/93	-,-	-,-
NOAA-14	12/30/1994	12/30/1994	Present
NOAA-15	05/13/1998	05/13/1998	Present
NOAA-16	09/21/2000	09/21/2000	Present
NOAA-17	06/24/2002	10/15/2002	Present
NOAA-18	05/20/2005	06/10/2005	Present

Les dérives orbitales du satellite ont également été corrigées par la méthode de Décomposition en Modes Empiriques (EMD ; Pinzon et *al*, 2005).

Le tableau I-2, présente les missions de satellites qui se sont succédé lors de la prise des données ainsi que leur date de début et de fin de service, alors que certains sont toujours opérationnels de nos jours.

Les données d'archives concernant les années 2004 à 2006 ont été constituées par le Biospheric Sciences Branch, NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt,

Maryland, USA. Les caractéristiques des données NDVI-GIMMS pour le continent africain sont résumées dans le tableau I-3.

Tableau I-2: Caractéristiques des images NDVI-GIMMS pour le continent africain

Coordonnées zone couverte	Bas gauche lat : -42.2°	Bas gauche lon : -23.5°
	Haut gauche lat : 43.7°	Haut gauche lon : -24.6°
	Bas droite lat : -42.2°	Bas droite lon: 63.4°
	Haut droite lat : 43.7°	Haut droite lon: 64.5°
projection	Albers Equal Area Conic	
résolution spatiale	8 km	
taille image	1152 colonnes x 1152 lignes	
format	GeoTiff	
codage comptes numériques CN	de -10000 à + 10000 (<i>signed integer</i>)	
relation entre CN et NDVI	CN = 10000 x NDVI	
valeurs extrêmes de NDVI	-1 et +1	

Cependant, la base de données du NDVI-GIMMS présente quelques inconvénients comme par exemple sa sensibilité aux changements des capteurs ainsi qu'à la variabilité des aérosols atmosphériques (en raison des éruptions volcaniques d'El Chichon en 1982 et du Mt. Pinatubo en 1991) et de la vapeur d'eau. Ces constituants affectent différemment les bandes 1 et 2 de l'instrument AVHRR, ce qui peut introduire d'importantes variations dans les données. Ainsi, malgré les corrections, des erreurs de signal peuvent persister et surtout dans les zones de végétation dense des zones tropicales.

c) La base de données du VITO

Dans le but de produire des données spatiales de qualité portant sur la couverture végétale et la surveillance environnementale, les capteurs 1 et 2 de VÉGÉTATION embarqués à bord des satellites SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre) des séries 4 et 5 fournissent des données pleine résolution (1 km) d'images composites S10 de type 10 jours, diffusées par le Centre national d'études spatiales (CNES). Chaque image composite comprend quatre bandes visibles en réflectance à la surface : bleu (0,43-0,47 mm), rouge (0,61-0,68 mm), proche infrarouge (0,78-0,89 mm) et infrarouge à courte longueur d'onde (1,58-1,75 mm), ainsi que deux couches de données comprenant l'indice différentiel normalisé de végétation (NDVI), ainsi que le masque de nuages. Ces données sont pré-traitées au VITO (Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek) en Belgique et archivées sur la plate forme VGT depuis avril 1998.

Les traitements tiennent compte d'une part, des corrections des effets de réflectance diffuse bi-directionnelle et la contamination par les nuages, et d'autre part, de la normalisation des données sous forme d'images observées au nadir dans des conditions sans nuages. De ce fait, les jeux de données représentent des mesures de la réflectance à la surface de la Terre, sans obscurcissement par des effets perturbateurs et d'erreurs résiduelles. Les données de NDVI de SPOT/VEGETATION sont disponibles en accès libre sur le site <http://free.vgt.vito.be/>. A ce jour, les données sont disponibles jusqu'au 31 octobre 2009, sachant qu'elles sont archivées avec un délai de 3 mois. Le lecteur voudra bien consulter ce site pour de plus amples informations sur les données de NDVI/SPOT-VEGETATION. Le tableau I-4, présente les caractéristiques des scènes décennales du NDVI/SPOT sur le continent africain.

Tableau I-3: Caractéristiques du NDVI/SPOT-VEGETATION pour l'Afrique

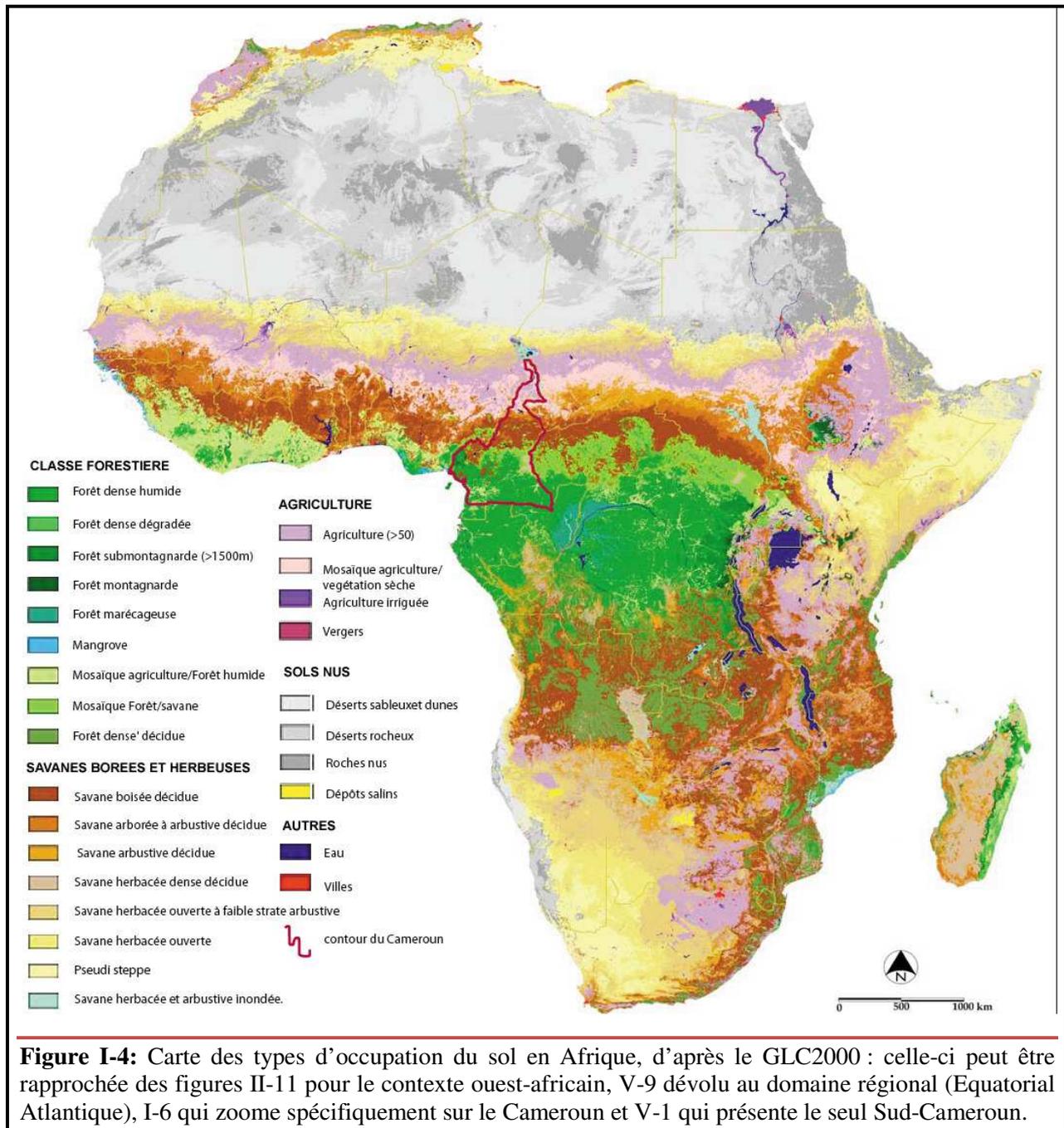
latitudes	de 38° nord à 35° sud
longitudes	de 26° ouest à 60° est
projection	Plate carrée
résolution spatiale	0,008929° (environ 1km)
taille image	9633 colonnes x 8177 lignes
codage comptes numériques	de 0 à 255 (byte)
Valeur réelle de NDVI (VR)	$VR = 0,004 \times NDVI - 0,1$
valeurs max et min de NDVI	-0,1 et 0,92

I-2.2. Données d'occupation du sol du Global Land Cover (GLC)

Le GLC est la résultante d'un partenariat international entre près de 30 organismes de recherche, coordonnés par le Centre commun de recherche (CCR) de la Commission européenne. L'objectif de cette équipe était de produire un outil à même de permettre une meilleure surveillance de l'environnement, afin d'anticiper les catastrophes naturelles/anthropiques et contribuer à l'étude des écosystèmes, de la diversité biologique et du changement climatique (Mayaux, et al, 2003). Ce projet a consisté en des observations quotidiennes de la surface de la Terre entre le 1^{er} novembre 1999 et le 31 décembre 2000 à l'aide de plusieurs types de données de télédétection (SPOT-4, JERS-1 et ERS (Radar à Ouverture de Synthèse) ; données du DMSP (Defence Meteorological Satellite Program) ; MNT ("GTOPO30"), etc.).

Après la cartographie du couvert végétal par des experts locaux, a suivi leur régionalisation, suivant un système de classification mis au point par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et le programme des Nations

Unies pour L'environnement (PNUE. Cette classification avait pour but de traiter et de présenter d'une manière systématique, les cartes régionales détaillées. En somme, le GLC 2000 est né de l'utilisation de diverses techniques de télédétection sur des données de terrain et satellitaire multi-sources (Fig. I-4). Il en résulte 22 types d'occupation du sol allant des couverts forestiers et sahéliens à d'autres types d'occupation du sol comme les sols nus, des villes ou des cours d'eaux (Di Gregorio et Jansen, 2000).



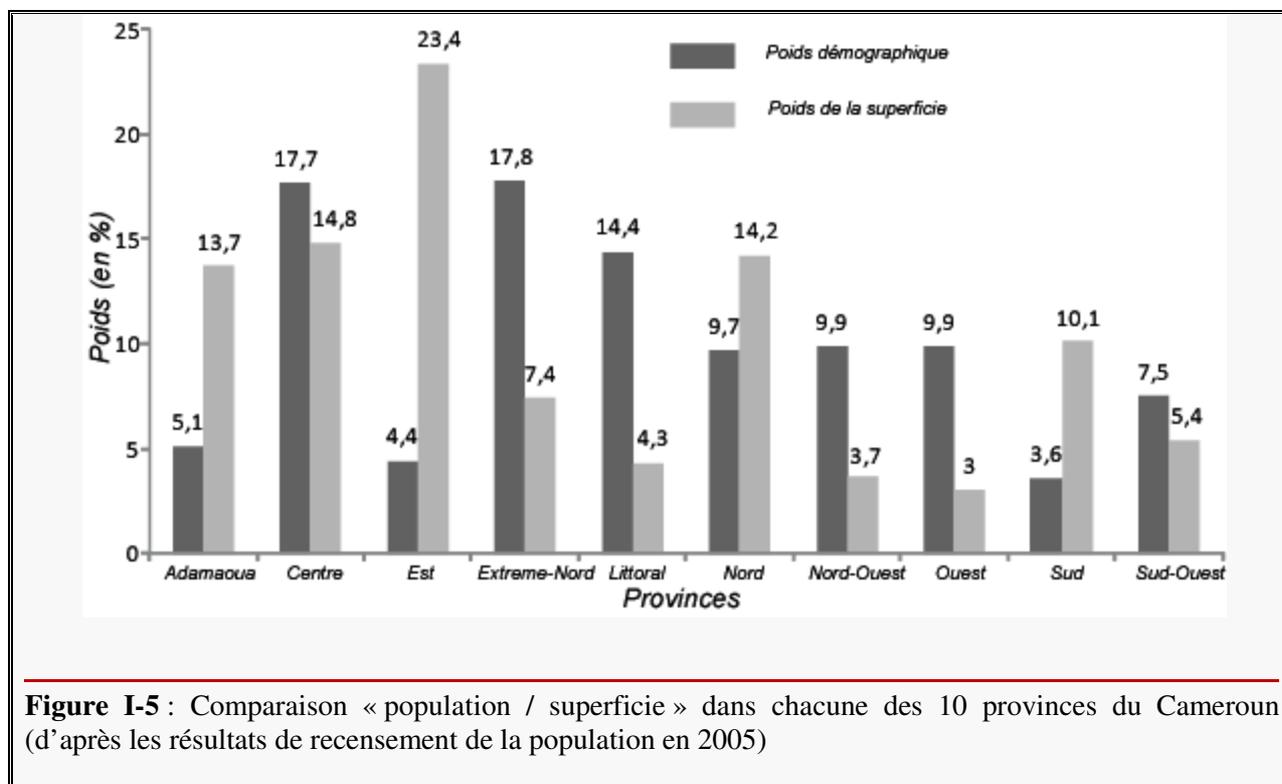
Dans cette thèse, les données du GLC sont considérées sur la fenêtre du Cameroun, où les vecteurs, concomitamment avec les données du NDVI SPOT (1Km), sont sélectionnés

pour évaluer les variations interannuelles des différents types d'occupation du sol, et particulièrement dans des zones de mosaïques.

Bien entendu, nous sommes conscients que, comparativement aux produits SPOT (20m, 2,5m) et Landsat (30m), une résolution de 1Km est assez grossière pour appréhender les paramètres anthropogéniques d'occupation et d'utilisation du sol. Cependant, l'objectif est, dans un premier temps, de dégager les principaux types d'occupation du sol au Cameroun et de regarder les modifications qui s'y opèrent sur une période considérée. Cette première étape permettra de cibler de manière objective les zones tests pour lesquelles l'on appliquera les données à plus forte résolution et les enquêtes socio-économiques plus approfondies, que le temps matériel imparti ne nous a pas permis de faire dans cette thèse.

I-2.3. Les données démographiques : quantification et limites

Selon les résultats des recensements de la population et les projections démographiques effectuées par le Bureau Central des Recensements et des Etudes de population (BUCREP), la population du Cameroun est passée de moins de 8 millions en 1976 à plus de 10 millions en 1987. Elle a atteint plus de 17 millions en 2005 et plus de 19 millions en 2010. Mais ces chiffres masquent des inégalités régionales, la population camerounaise étant très inégalement répartie à travers les 10 provinces du pays (Fig.I-5).



Les résultats du recensement de la population en 2005 montrent que les provinces de l'Est, du Sud et de l'Adamaoua (localisations sur la carte de présentation politique et démographique ci-dessus) présentent les plus faibles densités de population, alors que les provinces de l'Extrême-Nord, du Littoral et de l'ouest sont plus densément peuplées. Par ailleurs l'importance numérique des personnes vivant en zone urbaine s'affirme de plus en plus. Par exemple, en 2005, près de 49% de la population du Cameroun était concentrée dans 312 villes, toutes chefs-lieux d'unités administratives, sauf Lara et Mutenguené, respectivement dans les provinces de l'Extrême-nord et du Sud-Ouest.

Reste que les données démographiques en Afrique sont sujettes à caution et si l'on en croit Loungoulah (1995), les politiques qui ont été fondées sur des informations démographiques se sont bien souvent avérées erronées. On peut, par exemple, citer la surprise des autorités Nigérianes, lors du recensement de novembre 1991, qui constatent un total de 88 millions d'habitants -en lieu et place des 123 millions prévus-. Ceci vient du fait que les enquêtes et sondages utilisent encore des méthodes indirectes pour estimer les paramètres démographiques de premier ordre tels que la fécondité et la mortalité, alors que l'on sait que dans certaines tribus africaines, ces informations relèvent encore de l'ordre du tabou.

Toutefois, à l'échelle de l'Afrique, le Cameroun est l'un des pays où les progrès réalisés sur la collecte et la diffusion des données socio-démographiques sont le plus significatifs même si les résultats sont quelquefois controversés. Ce bilan mitigé est dû, pour une large part, à l'utilisation inappropriée des ressources humaines et à l'application insuffisante des textes (Ngwé, 1997).

Les données de population ne sont donc pas utilisées telles quelles dans cette thèse ; elles ont fait l'objet d'un article qui pourra être retrouvé en annexe. Elles proviennent du croisement de données provenant de plusieurs sources : l'Institut National de Statistiques (INS), la Direction de la Statistique et de la Comptabilité Nationale (DSCN) et le BUCREP. Ce croisement multi-sources à permis de minimiser les erreurs grâce à l'utilisation d'autres paramètres démographiques (taux de natalité, de mortalité, taux d'urbanisation, d'exode rural et urbain, etc.)

II- METHODES DE TRAITEMENT DE DONNEES

II-1. Régionalisation spatiale des données

II-1-1. La classification ascendante hiérarchique (CAH)

La CAH est un mode de régionalisation, qui consiste à agréger d'abord les individus les plus semblables entre eux, puis les observations ou groupes d'observations un peu moins semblables et ainsi de suite jusqu'au regroupement trivial de l'ensemble de l'échantillon.

Principe : On dispose d'un ensemble de n individus caractérisés par p variables X_1, X_2, \dots, X_p que l'on souhaite regrouper en k classes ou sous-classes aussi homogènes que possible suivant des critères définis. Pour ce faire, on recherche suivant chaque critère, les individus les plus proches que l'on relie entre eux par un U dont la hauteur des branches détermine la distance qui sépare les individus entre eux. De proche en proche, l'on regroupe tous les individus suivant un arbre hiérarchique ou dendrogramme. Ce dendrogramme présente la composition des différentes classes ainsi que l'ordre dans lequel elles sont formées. La hiérarchisation des individus dans le dendrogramme se fait suivant les distances qui les séparent. Le choix du type de "distance" entre individus dépend des données étudiées ; L'on distingue entre autres, le percent disagreement qui est particulièrement utile pour des données de nature catégorielle ; la distance à la puissance et la distance Euclidienne qui est le type de distance le plus couramment utilisé, puisqu'il s'agit simplement d'une distance géométrique dans un espace multidimensionnel.

Effectuer une CAH consiste donc à effectuer une partition en plusieurs sous-ensembles tels que tous les éléments de la population soient dans un sous-ensemble et un seul. Le choix d'un indice d'agrégation (distance entre groupes ou entre un individu et un groupe) s'effectue en plusieurs étapes :

- mesurer les distances interindividuelles (calcul des distances selon une métrique)
- déterminer la plus petite d'entre elles (calcul du minimum)
- regrouper ces deux individus entre eux (calcul du barycentre)
- recalculer les distances interindividuelles sur $n-2$ individus plus 1 groupe, et ainsi de suite

On recense un grand nombre de critères d'agrégation entre autres: le "single linkage" (distance minimum) ; le "complete linkage" (distance maximum) ; la moyenne non pondérée des groupes associés; le centroïde non pondéré des groupes associés ; la méthode de Ward. Ce dernier critère a été pris en compte parce qu'elle est une méthode du moment d'ordre 2 qui se distingue des autres par sa capacité à minimiser la somme des carrés de tous les couples de classes pouvant être formés à chaque étape. En d'autres termes, elle utilise une analyse de la variance approchée pour évaluer les distances entre classes, et se justifie bien lorsque la "distance" entre les individus est le carré de la distance euclidienne.

En coupant l'arbre (dendrogramme) au niveau d'un saut important de l'indice d'agrégation, on peut espérer obtenir une partition de bonne qualité car les individus

regroupés en-dessous de la coupure sont proches, alors que ceux regroupés après la coupure sont éloignés.

II-1-2. L'Analyse en Composantes Principale (ACP)

Les variations d'un phénomène donné sont rarement expliquées à partir des variations d'un seul autre phénomène (cas d'une relation linéaire simple). On découvre très souvent l'intervention d'autres variables explicatives qui font donc naître le concept de « relation linéaire multiple ».

L'Analyse en Composante Principale est une technique mathématique qui permet de détecter les dépendances statistiques entre un grand nombre de variables quantitatives. Elle sert essentiellement à réduire un système complexe de corrélations en un plus petit nombre, c'est-à-dire de « résumer » les grandes masses de données sous la forme de vecteurs représentatifs (vecteurs propres) montrant la dispersion des individus que l'on peut lier aux influences susceptibles d'expliquer la variabilité du champ étudié. A chaque champ spatial, est associée une chronique temporelle (composante principale) qui reproduit le résumé des variables obtenues par combinaison linéaire et explique un certain pourcentage par rapport à la variance totale.

A la différence de beaucoup de techniques statistiques, l'ACP requiert une connaissance préalable des variables observées pour définir le nombre de facteurs (composantes principales) susceptibles d'être rattachés à un phénomène physique. Des tests statistiques permettent cependant de définir le seuil de manière plus objective. Parmi ces tests, l'on distingue l'analyse parallèle de Humphrey-Ilgén (1969) consistant à représenter sur une même figure les valeurs propres de données quasi-aléatoires et celles des données réelles. Ainsi, le point d'intersection des deux signaux (valeurs aléatoires et réelles) détermine le nombre de facteurs à extraire pour l'analyse factorielle. Le critère de North (North et al, 1982) quant à lui est basé sur la comparaison des écarts entre les valeurs propres les plus proches avec une estimation des erreurs d'échantillonnage. Dans cette étude, nous avons fait appel à la méthode dite du « Scree Test » proposée par Cattell (1966) qui permet d'extraire des informations redondantes entre deux composantes successives. Ici, les valeurs propres des données réelles sont graphées et le point d'inflexion de la courbe (scree), repéré par inspection visuelle, détermine le nombre de facteurs à extraire.

La difficulté à interpréter les axes factoriels étant la principale limite de cette méthode, l'on a souvent recours à un outil supplémentaire qui est la rotation des axes (rotation Varimax). Ainsi, la rotation des axes (en préservant leur orthogonalité) permet de maximiser la variance des corrélations afin de faciliter leur interprétation (Kaiser, 1958 ; Dyer, 1975 ; Richman, 1986).

II-1-3. Les classifications non supervisées ISODATA

La méthode de type *ISODATA* est utilisée en télédétection et traitement d'images, pour classer un ensemble (O) d'individus (objets) caractérisées par des variables quantitatives (Ball and Hall, 1965; Ball et al 1969; Tou and Gonzales, 1974). On note n le nombre d'objets à classer, possédant chacun p paramètres numériques notés $(x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^p)$ pour l'objet x_i . L'algorithme *ISODATA* exige que soit prédéfini: le nombre de classes souhaitées (c_{max}); le nombre minimum d'échantillon par classe (c_{min}); le nombre maximal de classes pouvant être regroupées (n_{max}); du seuil de divisions des classes (sd); du seuil de regroupement des classes (sr) et du nombre maximal d'itérations ($maxi$).

Les 11 étapes de l'algorithme sont :

- 1) Normaliser les données.
- 2) Affecter les n objets à c classes au hasard.
- 3) Calculer les centres des classes.
- 4) Affecter chaque objet à la classe dont le centre est le plus proche.
- 5) Eliminer les classes comportant moins de c_{min} objets, les individus non classés sont affectés aux classes dont les centres sont les plus proches.
- 6) Calculer les centres des classes.
- 7) Si deux classes sont suffisamment proches, les rassembler.
- 8) Si la dispersion des objets autour d'une classe est trop importante, partitionner la classe en deux.
- 9) Si une classe contient moins de n_{min} éléments, la supprimer ;
- 10) S'il y a eu des modifications ou si un certain nombre de T itérations n'a pas été atteint, alors
- 11) aller en en 4.

A chaque itération, les moyennes sont recalculées et les pixels sont reclassés en fonction des nouvelles moyennes. L'opération prend fin, soit lorsque le nombre d'itérations prédéfinies est atteint, soit lorsque le taux de pixels changeant dans chaque classe devient inférieur au seuil fixé.

II.2. Détection des changements du couvert végétal: le coefficient de Kappa

La détection de changements temporels dans les images aériennes et satellitales suppose pouvoir comparer des séquences d'images multi-dates en termes par exemple d'occupation ou d'utilisation du sol. Détecter ces modifications nécessite un prétraitement de normalisation radiométrique et géométrique afin de pouvoir superposer les images. Des chercheurs ont développé plusieurs techniques d'analyse: par exemple celle qui prend en compte l'image-rapport des deux images multi-dates plutôt que l'image-différence (Rignot, 1993) ; celle qui utilise les méthodes de filtrage sur l'image issue du rapport des

deux images multi-dates (Dekker, 1998). Toutefois, les méthodes de différenciation des images, les analyses en composante principale et les comparaisons post-classificatoires comme l'analyse du vecteur changement (Lambin *et al*, 1994) sont les plus couramment utilisées.

Il faut cependant noter qu'il n'existe pas d'approche unique mais différents algorithmes souvent comparés entre eux pour une application spécifique (Lu *et al.*, 2004). Le NDVI est signalé comme particulièrement performant pour détecter les changements d'occupation du sol dans les communautés végétales biologiquement complexes, vu sa résolution spatiale et profondeur temporelle (Eklundh *et al*, 2005 ; Townshend and Justice, 1986; Verhoef *et al* 1996).

Toutefois, au-dessous d'un lieu donné la complexité des écosystèmes peut limiter l'évaluation optimale (Lunetta *et al*, 2002). En effet, au cours de leurs phases de croissance et de développement, la structure physique et physiologique des plantes varie considérablement : des couverts végétaux similaires (différents) peuvent apparaître différemment (similaires). Pour s'assurer de la qualité et de la performance des classifications, on utilise donc des indices fondés sur cette « matrice de confusion ». Le plus communément utilisé est l'indice de Kappa (Cohen (1960), qui est le quotient du rapport entre le nombre de pixels bien classés et le total des pixels sondés. En d'autres termes, il représente le degré d'accord entre les données à classer (observés) et les données de référence (aléatoires).

$$Kappa = \left| N \sum_{i=1}^l x_{ii} - \sum_{i=1}^l (x_{i+} \times x_{+i}) \right| / \left[N^2 - \sum_{i=1}^l (x_{i+} \times x_{+i}) \right]$$

Où l = nombre de données à classer et N = nombre total d'observations (données de référence)

Le résultat est un nombre réel, sans dimension, compris entre -1 et +1. Il sera d'autant plus meilleur que la valeur de Kappa est proche de +1. En effet, le tableau suivant montre une classification référentielle (Landis et Koch, 1977), permettant d'évaluer la qualité de la valeur de Kappa (Tab.I-5):

Tableau I-5 : qualité des valeurs de Kappa

Valeur de Kappa	appréciation
0,81	Excellent
0,80 – 0,61	Bon
0,6 – 0,21	Modéré
0,20-0,0	Mauvais
<0,0	Très mauvais

II-3. Détection de changements dans une série statistique

Les ruptures dans une série statistique peuvent être inhérentes entre autres par un changement du matériel de mesure; un changement d'emplacement des stations ; la modification de l'environnement de la station (mauvais entretien) ; le changement du personnel de mesure ; des erreurs systématiques de transcriptions (lors des saisies) ; l'évolution de la méthode le calcul d'un paramètre, *etc.*

La liste des méthodes de détection de ces ruptures n'est pas exhaustive mais, nous décrivons dans cette section celles qui seront utilisées dans cette thèse.

II-3-1. La Split moving-Windows Dissimilarity Analysis (SMWDA)

La SMWDA ou analyse des dissemblances par fractionnement de fenêtres glissantes est une méthode multi-variée adaptée à la climatologie pour dater de manière précise, les changements climatiques de séries chronologiques. Dans une série, elle permet d'obtenir des fenêtres séquentielles d'une certaine longueur ainsi que la chronologie du changement et elle renseigne également sur la vitesse à laquelle ce changement s'effectue. La SMWDA a été utilisée dans cette thèse pour détecter l'existence d'une rupture dans les séries pluviométriques, et éventuellement pour chercher son origine (Bigot, 1997). Le mode de fonctionnement de cette méthode exige de positionner une fenêtre f de longueur L , sachant que la largeur de f doit être paire et inférieure à L . La fenêtre est fractionnée en 2 sous-parties, et la différence de leur moyenne est testée par le test en t de Student. Cette opération se répète jusqu'à la fin de la série (Reynold, 1991 ; Kemp et *al*, 1994). On peut alors visualiser les valeurs séquentielles des différences, ainsi que les pics témoignant de l'existence éventuelle de discontinuités dans la série.

Toutefois les résultats sont très sensibles à la taille de la fenêtre utilisée : plus la taille de la fenêtre est grande, plus le bruit associé est réduit, mais ceci diminue aussi la sensibilité du test, d'où l'intérêt de choisir une fenêtre adaptée aux objectifs visés. Par exemple, des fenêtres de 4 à 6 jours seront utilisées pour détecter plus précisément la localisation temporelle de l'évènement.

II-3-2. Les moyennes mobiles

Les moyennes mobiles (ou glissantes) sont utilisées pour analyser une série statistique temporelle en supprimant les fluctuations transitoires, afin de dégager les tendances à long terme. Il s'agit d'une méthode de lissage qui est calculée tour à tour sur chaque sous-ensemble de N valeurs consécutives ($N \leq n$). Il existe différentes moyennes mobiles (simple, arithmétique, exponentielle, triangulaire ou pondérée) qui diffèrent les unes des autres par le poids attribué aux données sur la période considérée. Pour des séries

journalières on distingue ainsi les moyennes mobiles de court terme qui ont une période (ou un pas) inférieur à 20 jours, de celles de moyen et long termes, respectivement de 20-100 jours et >100 jours. La Moyenne Mobile arithmétique est l'une des plus utilisées car étant la plus simple à calculer. Elle est utilisée dans cette thèse comme indicateur de tendance:

$$\bar{x}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_{n-k} \quad \text{ou} \quad \bar{x}_n = \bar{x}_{n-1} - \frac{x_{n-N}}{N} + \frac{x_n}{N}$$

La moyenne mobile simple est donc calculée en additionnant les valeurs d'un certain nombre de périodes et ensuite divisées par la somme du total des nombres de valeurs.

II-3-3. Le test de Pettitt

Il s'agit d'un test non paramétrique (qui nécessite peu d'hypothèses) qui permet d'identifier le temps auquel se produit un changement. Sa mise en œuvre suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques (X_i) $i=1$ à t et $t+1$ à N appartiennent à la même population (Pettitt, 1979). La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$ définie par :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N Dij$$

Avec $Dij = \text{sgn}(X_i - X_j)$ et sachant que :

$$\begin{aligned} \text{sgn}(X) &= 1 \text{ si } X > 0 ; \\ \text{sgn}(X) &= 0 \text{ si } X = 0 ; \\ \text{sgn}(X) &= -1 \text{ si } X < 0. \end{aligned}$$

L'hypothèse nulle est établie lorsque les X variables suivent une même distribution alors que l'hypothèse alternative suppose qu'à un temps t se produit un changement de distribution. L'absence d'une rupture dans la série (X_i) constitue l'hypothèse nulle. Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant t .

Toutefois, le test de Pettitt ne détecte que des changements de distribution qui sont accompagnés de changement de position, c'est-à-dire que si au temps $t-1$, les variables suivent une distribution normale $N(0, 1)$ le test de Pettitt ne détectera pas de changement à t pour la distribution $N(0,3)$ par exemple.

II-3-4. Le test de Mann-kendall

Il s'agit d'un test non paramétrique dérivant des travaux de Mann (1945) et Kendall (1976), et qui permet de repérer des tendances dans une série aléatoire. Le test de Mann-kendall (T) est appliqué dans une série préalablement délimitée par des dates de discontinuité de type SMWDA par exemple. Ce test se base sur l'hypothèse nulle (H_0) que l'on cherche à tester, et qui est l'hypothèse de stationnarité de la série, alors que l'hypothèse alternative (H_1) correspond à sa non stationnarité. Sur un échantillon (x_1, x_2, \dots, x_n) de N données indépendantes issues d'une variable aléatoire X dont on cherche à vérifier la stationnarité. Le test de Mann-kendall se calcule par :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}$$

où il est question d'étudier le signe de la différence entre la valeur de la variable j et en i . Sachant que ($i < j$), les différences

$$\begin{aligned} (x_j - x_i) &= 1 \text{ si } x_j - x_i > 0 \\ (x_j - x_i) &= 0 \text{ si } x_j - x_i = 0 \\ (x_j - x_i) &= -1 \text{ si } (x_j - x_i) < 0 \end{aligned}$$

Littéralement, si la différence du test est positive, les valeurs de la série auront tendance à croître, alors qu'elles décroîtront dans le cas contraire.

Cependant, il est nécessaire de calculer la probabilité associée à T et la taille de l'échantillon, afin de quantifier statistiquement l'importance de la tendance. La significativité du test représente la probabilité de détecter une tendance dans la série. Elle est considérée suivant un certain seuil (95% dans cette thèse) traduisant que le résultat est statistiquement acceptable avec une erreur inférieure ou égale à 5%.

II-4. Les tests de corrélation et de significativité statistiques

II-4-1. Le test en t de Student

Le test de Student est un test paramétrique qui peut être employé lors de la comparaison de deux moyennes ou pour tester la significativité d'un coefficient de régression. Ce test ne peut être utilisé qu'à deux conditions : les distributions des moyennes doivent obéir à une loi normale, c'est-à-dire décrire une courbe de Gauss, et leurs variances doivent être de même taille. Dans le cas de la comparaison de deux moyennes, il est question de savoir par exemple si la différence entre la moyenne observée et la moyenne de la population est significative ou non. Le test t est alors calculé en effectuant le rapport de la différence des moyennes sur l'erreur standard et on obtient alors une valeur appelée "Valeur de t " ou t observé. Après avoir effectué le test de

significativité globale du modèle de régression multiple (test de Fisher), il est intéressant d'effectuer un test de significativité partielle sur le même modèle à l'aide du test de Student. Ce test nous permettra de savoir si chaque coefficient est significativement différent de 0 ou non.

La valeur observée est donc comparée aux valeurs dans la table du t de Student qui détermine pour la valeur observée et en fonction du nombre de degrés de liberté correspondant, le seuil de probabilité. Si la valeur absolue du t calculé est supérieure à la valeur du t de la table de Student, on en conclura soit que la différence est significative, soit que le coefficient est significativement différent de 0, selon l'emploi du test. On considère communément qu'une valeur de t correspondant à un seuil $p < 0,05$ traduit une différence significative entre les moyennes. Si $p < 0,01$, alors la différence est très significative.

II-4-2. Le coefficient de corrélation linéaire (r)

Le très populaire coefficient de corrélation linéaire (r), permet de mesurer l'intensité d'une dépendance linéaire entre deux variables (Saporta, 2006). Soient D_y et D_x les droites de régressions (ou ajustement affine) de y en x et de x en y . ces deux droites sont confondues lorsque leurs coefficients directeurs a et a' sont non nul et que $aa' = 1$, c'est à dire lorsque le nombre r_{XY} défini par :

$$r_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad \text{tel que } r_{XY}^2 = 1, \text{ sachant que}$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{et } \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

Où σ_y , σ_x sont les écarts types de D_y et D_x , respectivement.

La significativité statistique de la liaison linéaire est obtenue en utilisant le test de Bravais-Pearson, compte tenu du nombre réel de degrés de liberté des séries. Toutefois, le coefficient de corrélation est souvent transformé en variance expliquée r^2 , mesurant ainsi la part de l'information totale de D_y prise en compte par D_x et exprimée en %.

Remarques : le coefficient de corrélation est un nombre entre -1 et 1 ; s'il est proche de 1 en valeur absolue, la corrélation est forte ; s'il n'est pas suffisamment proche de 1 en valeur absolue il est utile d'envisager d'autres types d'ajustements (non-linéaires).

II-4-3. Test de Monte -Carlo

Les méthodes de Monte-Carlo sont une classe d'algorithmes de calcul qui s'appuient sur des échantillonnages aléatoires. Elles sont particulièrement utiles pour simuler des systèmes présentant beaucoup de degrés de liberté et n'ont pas les contraintes des tests paramétriques. La justification théorique de la méthode de Monte-Carlo est la loi des grands nombres, qui permet d'évaluer la probabilité que les résultats statistiques obtenus à partir d'un échantillonnage très réduit dépassent un certain seuil. Dans cette étude, le test de Monte-Carlo est utilisé pour tester la significativité de dépendances statistique entre deux variables. En d'autres termes, il permet de vérifier que l'évolution des variables n'est pas uniquement due à l'échantillonnage. Ainsi, pour évaluer une corrélation entre 2 séries, on va permuer un grand nombre de fois ces séries (1000 ou 10 000) selon certains critères le test de Monte-Carlo renvoie la probabilité que cette corrélation a de passer le seuil, tout en tenant compte de l'autocorrélation de rang 1 dans chacune des séries.

La significativité de la corrélation linéaire entre les deux séries est déterminée par sa position par rapport à la distribution des corrélations (Ebisuzaki, 1997) et est représenté pour les seuils bilatéraux de 90% ; 95% ; 99%, *etc.*

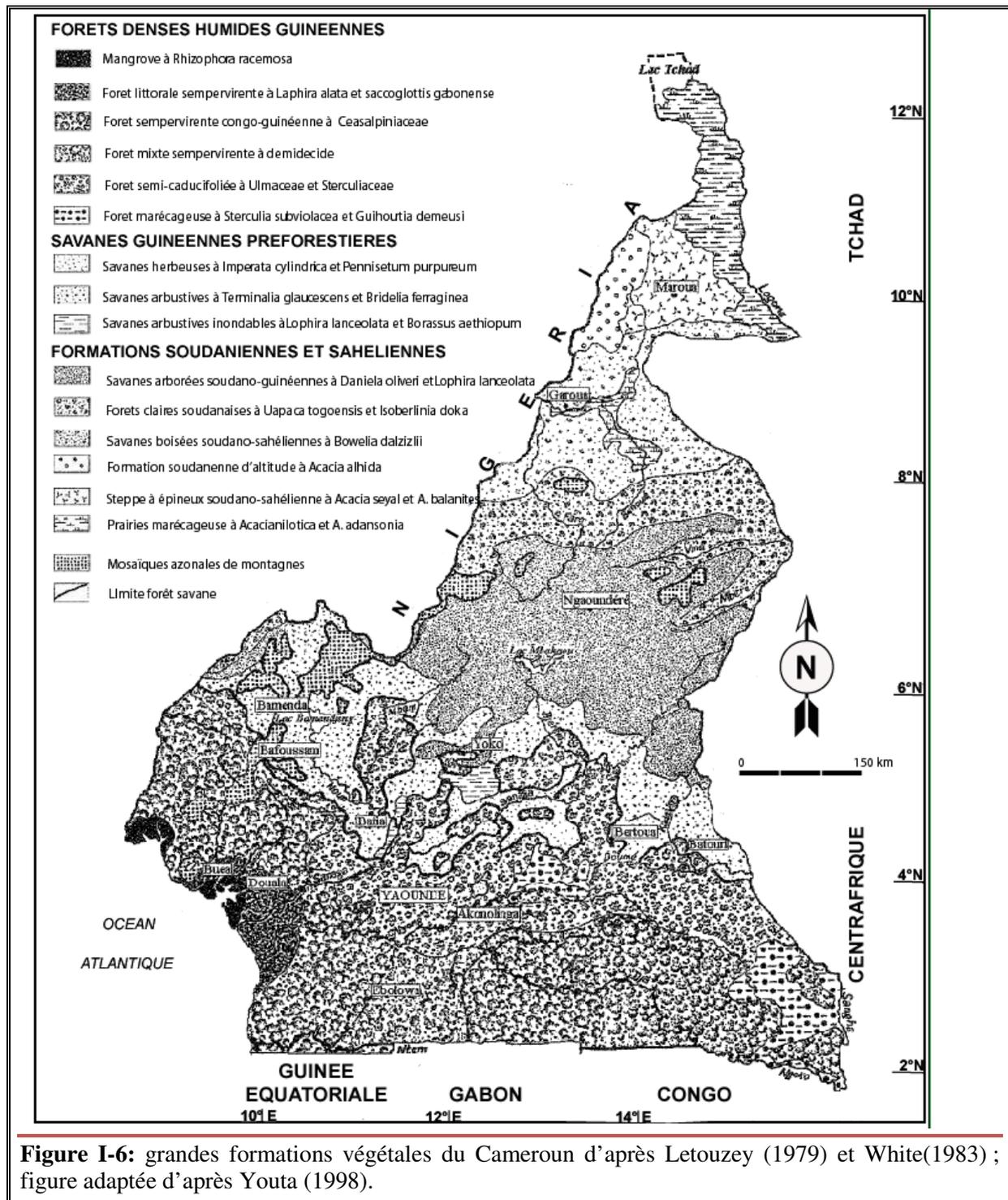
III- LE CAMEROUN : CADRES PHYSIQUE ET CLIMATIQUE

III-1. Le contexte physique

III-1-1. La végétation

La végétation camerounaise présente un condensé de celle de toute l'Afrique tropicale, soit un ensemble d'environ 8000 espèces, 1800 genres, et 230 familles de plantes angiospermes. Pour la cartographie des ensembles phytogéographiques du Cameroun, Letouzey (1985) a recensé six principaux domaines qui vont du congolais au sahélien, en passant par les formations Congo-guinéennes, côtières, soudaniennes et d'altitude (Fig.I-6).

Dans le Nord-Cameroun, au dessus du 8^e parallèle, la végétation sahélo-soudanienne est constituée de steppes à épineux que l'on retrouve dans la plaine de Maroua et des prairies saisonnièrement inondées (Yaéré) qui s'étendent plus généralement au pied des Monts Mandara, entre le bec de canard et le lac Tchad (Donfack, 1988). Ce sont les zones de riziculture industrielles (Yagoua). La sévérité des conditions climatiques annonce les climats sahéliens et désertiques de l'Afrique soudanaise (Letouzey, 1985).



Aux latitudes de l'Adamaoua en domaine soudanien, l'on rencontre de vastes savanes arbustives et arborées soudano-guinéennes à environ 900-1500m d'altitude. La forêt montagnarde et la prairie afro-subalpine se rencontre sur les monts Cameroun et Oku au-dessus de 2800m. Ces formations d'altitude sont les domaines de volcanisme et de pâturage.

L'ensemble des formations végétales du Sud-Cameroun appartient à la région Congo-guinéenne (Santoir et al, 1995). Ces formations végétales sont organisées en deux

groupes que sont : la forêt dense caducifoliée et le domaine de la forêt dense humide toujours verte :

La forêt dense humide est située dans la zone la plus septentrionale de la région congo-guinéenne, au contact avec la région soudano-zambienne. Elle se subdivise en savanes *periforestières* guinéo-soudaniennes et en forêt semi-caducifoliée guinéo-congolaise. Les premières sont situées de part et d'autre de la Sanaga, au nord des formations forestières. Elles sont à dominance herbacées ou parsemées d'arbres et d'arbustes plus ou moins denses. On trouve particulièrement la savane à *Pennisetum purperium* (sisongo) qui est une forme de graminées atteignant 2 à 3m et qui est le premier stade savanicole à apparaître à la suite des défrichements. On les trouve généralement dans les zones fortement urbanisées ou intensément cultivées dans la zone forestière.

Les forêts semi-caducifoliées quant à elles se composent de forêt dense humide semi-caducifoliée ou de forêt semi-décidue à *Sterculiacées-Ulmacées*. Elles ne sont pas faciles à délimiter car, elle gagne sur les autres types de végétation à l'occasion des défrichements agricoles.

Elles s'étendent vers le nord en gagnant du terrain sur les savanes péri-forestières non anthropisées et vers le sud et le sud-est, en s'imbriquant dans les trouées de forêt ombrophile. C'est justement vers le nord que la limite est plus nette, puisque l'on passe brutalement de la forêt (recrus forestiers) à la savane. Cette forêt typique semi-caducifoliée est une formation qui tend normalement à occuper l'espace laissé libre par la réduction des autres types forestiers denses et tend à gagner sur les savanes guinéo-soudaniennes (Youta, 1998). Ces formations forestières couvrent près du tiers de la superficie du pays et se développent dans des régions où la pluviosité moyenne annuelle est supérieure à 1500mm et le nombre de mois écologiquement sec inférieur à 4 ($P > 2T$).

Sur les rives de l'océan Atlantique l'on rencontre des paysages de mangroves (environ 2500km²) qui constituent un énorme potentiel d'évapotranspiration. L'humidité relative moyenne annuelle y dépasse presque partout 50% même au cœur de la saison sèche et les amplitudes thermiques annuelles sont inférieures à 2°C.

III-1-2.le relief

Le flux de mousson qui se balance sur le territoire camerounais cause de nombreuses pluies persistantes qui ont pour origine l'ascendance forcée due aux obstacles causés par le relief. Il en découle des pluies orographiques qui sévissent très localement sur les versants des régions exposées à l'ouest. Ces pluies expliquent l'influence des inégalités de la surface terrestre, notamment sur la frange côtière, très sensible à l'impact du flux Atlantique, surtout si celui-ci arrive perpendiculairement. Les paroxysmes estivaux qui en résultent, contrastent fortement avec les déficits enregistrés sur les versants sous le vent. Suivant l'importance de l'altitude, on distingue les plateaux de moyenne altitude et les dépressions qui sont constitués essentiellement du plateau sud

camerounais, des basses terres atlantiques et des plaines du nord. L'on distingue également des montagnes et les hauts plateaux qui représentent près du quart de la superficie du pays (Fig.7).

a) Les basses terres

Elles sont constituées essentiellement des basses terres atlantiques (plaines côtières) et des plaines du Nord-Cameroun : les basses terres Atlantiques épousent la courbe du golfe de Guinée en isolant le mont Cameroun dont la frontière sud est constituée par la cuvette de Campo (25m). Au centre, le bassin sédimentaire de Douala se prolonge jusqu'au Nigeria par la plaine de Ndian et du Rio del Rey. Ces plaines, très sensibles à l'activité de la mousson, sont le siège des précipitations abondantes, de la touffeur ou de la moiteur.

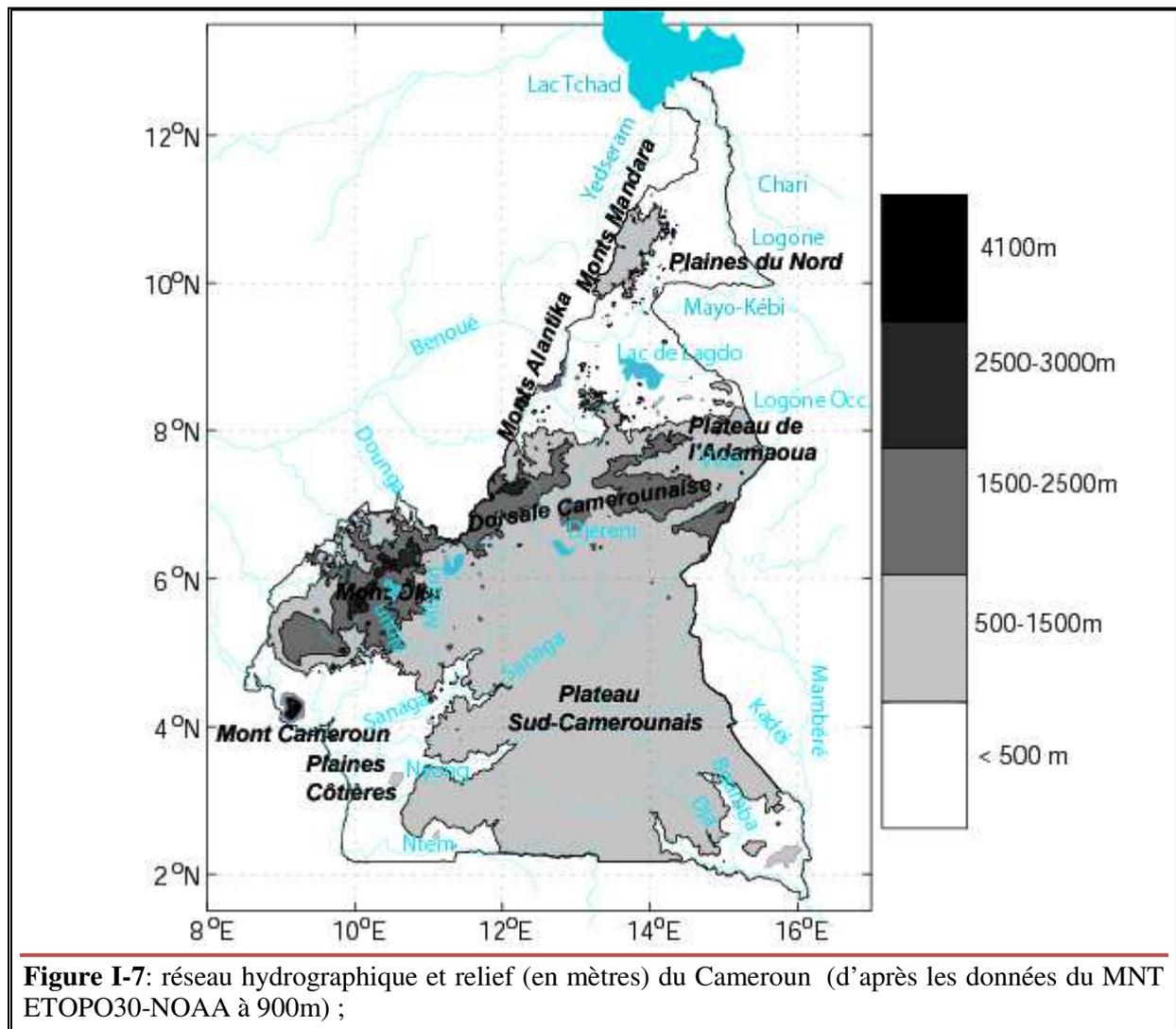
Les plaines et dépressions du Nord-Cameroun sont érigées contre l'Atlantique et sont par conséquent fréquemment exposées au souffle de l'harmattan. Ici, on retrouve une topographie de faibles altitudes qui évoque plus l'aridité que l'abondance des pluies rencontrée plus au sud. Elles sont formées principalement de 2 dépressions : le bassin supérieur de la Bénoué et la plaine du Lac Tchad. Dans le bassin de la Bénoué, l'on note au centre une série de ramifications de faible altitude correspondant à la vallée supérieure de la Bénoué dont les affluents sont le Mayo Kébi au nord-est ; le Mayo Rey au sud-est ; le Mayo Déo et le Faro au sud-ouest. La cuvette de la Bénoué est plus accidentée de la bordure vers l'intérieur. La plaine du Tchad quant à elle, est tournée vers le nord. La surface du lac est à 282m en moyenne et draine une région alluviale d'une grande platitude. La plaine du Diamaré s'étend entre le bassin du Tchad et la cuvette de la Bénoué avec une altitude de 500m.

c) Les hautes terres et les plateaux

Au Cameroun, l'on rencontre de massifs montagneux et de hauts plateaux qui se déploient du Mont Cameroun à la République Centrafricaine sur une longueur de près de 400km. Cet ensemble est communément appelé *Dorsale camerounaise* ou dorsale des hautes terres. Les altitudes culminent entre 2000-3000m dans sa partie centrale alors que le plateau Bamiléké au sud-ouest est constitué de sommets entre 1200-1600m. Les monts Bamboutos surplombent à 2700m. Au sud de la dorsale, dans les premiers escarpements de la région de Nkongsamba, l'on note tout d'abord quelques modestes sommets, puis les premiers dômes importants comme le mont Koupé et les monts Manegoumba qui culminent respectivement à 2064 et 2411m. La plaine de Mbô fait suite à ce dispositif de reliefs et établit le lien avec les hautes terres du pays Bamiléké (Tchawa, 1991 ; Valet, 1980; Dongmo, 1981 ; Morin, 1981 ; Fotsing, 1990).

Le plateau de l'Adamaoua prolonge le croissant des hautes terres vers l'Est, d'une largeur de 150-300km. Les altitudes y sont comprises entre 1000-1500m (Boutrais, 1996).

Il domine la cuvette de la Bénoué par une série de rebords abrupts désignés sur le nom de *falaises*. A l'arrière de ces *falaises*, le relief s'apaise en de grandes surfaces ondulées et de petits cônes volcaniques. L'Adamaoua se prolonge vers le sud par deux plates formes qui s'avancent de part et d'autre de la dépression du Djerem : la première plate forme a pour axe, la frontière centrafricaine et se rallie au plateau sud-camerounais. La seconde plate forme qui se trouve entre le Mbam et le Djerem, possède un relief compartimenté dont les altitudes oscillent autour de 1530m (Suchel, 1988).



Dans le plateau sud-camerounais, le relief comporte beaucoup de disparités suivant une trajectoire d'est en ouest, avec des altitudes qui culminent à environ 1585m dans le massif de Ngoro au nord. Au sud, le massif du Ntem atteint 1400m. Ces inégalités du relief ont des répercussions sur la pluviométrie car, leur grande rugosité située dans le champ de la mousson contribue à étendre la surface de fortes pluies loin vers l'intérieur, en introduisant les phénomènes d'opposition des versants. Ainsi, pendant la période de pleine activité de la mousson, la bordure du plateau fait écran entre le littoral et le domaine subéquatorial intérieur où règne alors la petite saison sèche.

En définitive, les grandes surfaces tabulaires de basse et moyenne altitude qui s'étendent du nord au sud sont représentatifs non seulement de la forte *marqueterie* du relief, mais également de sa nature contrastée et diversifiée. Les massifs montagneux et les hauts plateaux occupent plus du quart de la superficie du pays. Plus que les autres facteurs physiques, le relief participe fortement à la diversité climatique au Cameroun de part son ampleur, son volume, les oppositions suscitées par le voisinage des régions déprimées, les variations des formes, leur pente et leur orientation (Santiago, 1998). En effet, les surfaces élevées se comportent comme des sources de chaleur et sont responsables des dépressions thermiques quasi-permanentes à travers des déviations verticales (effet de foehn) et horizontales (opposition versants adret/ubac).

III-1-3. Le réseau hydrographique interne (figure I-7)

Le réseau hydrographique du Cameroun est vaste et en phase avec la diversité du relief (Olivry, 1986). Il est constitué de nombreux fleuves et est drainé par quatre bassins versants principaux : le bassin atlantique, le bassin du Congo, le bassin du Niger et le bassin du lac Tchad.

a) Le bassin Atlantique

Il est drainé par les fleuves Nyong, Ntem, Moungo Wouri et Sanaga (Sigha-Nkamdjou *et al*, 1998 ; Lienou *et al*, 2008). Ce dernier fleuve est le plus important du Cameroun avec 920km de longueur et un bassin de près de 140 000km². La Sanaga prend sa source au sud du plateau de l'Adamaoua où elle est grossie par le Djerem, le Meng, la Vina et le Lom. Elle collecte aussi de l'ouest, les eaux du Mbam et de ses affluents que sont le Noun et le Kim. Son débit moyen est de 2072m³/s, mais peut atteindre 7550m³ en période de crue et s'abaisser jusqu'à 473m³ en période d'étiage.

b) Le bassin du Niger

Il est drainé par la Bénoué qui collecte les eaux des Mandara et des Alantika, situés au nord de l'Adamaoua et est grossi essentiellement par la Faro et le Mayo Kébi (IRD, 1999).

c) Le bassin du Congo

Il comporte deux principaux fleuves : la Kadéï qui est grossi de la Doumé et de la Boumbé et qui rejoint la Mambéré pour former la Sangha en territoire centrafricain ; la Ngoko qui s'associe à la Boumba pour confluer avec la Sangha en territoire congolais.

d) Le bassin du Lac Tchad

Ce dernier bassin versant est le moins étendu (IRD, 1999). Le Logone en est le fleuve principal. Il prend sa source dans le nord-est de l'Adamaoua, du Mbéré et de la Vina. Alors qu'une partie de ces eaux se déverse dans la Bénoué, une autre submerge les

Yaérés dont la vidange est assurée par l'El Beid et le Serbewel. Dans ce dernier bassin, le fort pouvoir évaporant de la surface des eaux facilite la condensation et les ascendances génératrices de la pluie. L'exemple le plus illustratif est celui du Logone et du Chari qui drainent une dépression lacustre de plus de 20000km² en saison des pluies (Olivry et al, 1987, 1994, Mahé et al, 1991 ; L'hôte et al, 2002). Quand la saison humide fait place à la saison sèche, on assiste à une évaporation progressive de ces nappes d'eau jusqu'à leur assèchement complet (rapport WMO/GWP, 2003). Ainsi, les rives du lac reculent de façon spectaculaire et entraînent une baisse de l'apport hydrologique, ce qui implique une augmentation brusque de la pluviosité jusque sur la plaine du Diamaré.

Par ailleurs, on peut distinguer quatre principaux régimes hydrologiques :

- le régime équatorial classique (à quatre saisons), qui connaît des périodes de hautes et de basses eaux respectivement pendant les saisons humides et sèches ;
- le régime camerounais (à deux saisons), qui connaît une période d'étiage entre novembre-mars et une période de crues entre mars-octobre, avec un maximum en septembre.
- le régime tropical est caractérisé par un débit très contrasté entre les saisons. Il est constitué par des cours d'eaux saisonnier encore appelé Mayos, qui s'assèchent quasiment en saison sèche.
- le régime mixte, caractérise essentiellement le bassin Atlantique et particulièrement le bassin versant de la Sanaga, qui a un bassin versant à cheval entre les domaines tropical et équatorial.

III-1-4. Les sols

La diversité des sols au Cameroun tient la grande variété des roches-mères, aux facteurs topographiques, à l'âge mais, aussi aux différents milieux bioclimatiques où ils se forment. Ces sols comportent plusieurs faciès liés à leur représentativité spatiale, à l'état de dégradation et à l'utilisation qu'en font les hommes. Leur liste n'est pas exhaustive mais, parmi les principaux sols rencontrés au Cameroun, on peut citer:

a) Les sols ferrallitiques

Ils couvrent près des deux tiers de la superficie du pays et se rencontrent au sud du 8° parallèle (Muller, 1978, Onguene, 1993). Ce sont des sols rouges, profonds, meubles, argileux et poreux et propices à la végétation de type forêt. Ces sols sont pauvres en éléments nutritifs, acides et très vulnérables à l'érosion.

b) Les sols hydromorphes

Ils sont caractérisés par un excès d'eau et présentent un horizon gris et décolorés. On les retrouve dans la plaine du lac Tchad en saison des pluies (Pias, 1956 ; Vernier, 1988). Ils contiennent de l'argile gonflante (vertiques), mais la présence d'un excès d'eau n'étant pas permanente ceux-ci se transforment en sols à pseudogley en période d'étiage. Les sols hydromorphes se retrouvent aussi dans le sud du pays, dans les régions de mangroves de bordure des mers (sols hydromorphes à gley).

c) Les sols peu évolués

Ils se développent sur des matériaux d'apports récents comme les apports éoliens du cordon du lac Tchad ou des apports sur cendres volcaniques des massifs de l'ouest-Cameroun (Martin, 1961, Roose, 2007).

d) Les vertisols

Ils présentent un profil cohérent, argileux et de couleur foncé qui se fendillent profondément à l'état sec. On les retrouve dans les régions qui présentent une alternance de saison humide et sèche comme dans le Nord-Cameroun (Mahop et al, 1995). Leur variation en teneur d'eau s'accompagne de gonflement et de retrait saisonniers.

e) Les sols les andosols et les sols bruns eutrophes

Ils sont jeunes et présentent un profil homogène. Ils se développent sur des formations volcaniques basiques, associés à des minéraux bruts et peu évolués (FAO, 1995). Les andosols sont riches en eau et en matière organique mais, sont très sensibles aux processus érosifs. Les sols bruns eutrophes quant à eux, ont un humus abondant et sont riches en matière minérale. Ces deux sols sont favorables à l'agriculture mais, leur fertilité diminue avec l'augmentation du lessivage et de l'induration.

III-2. Le contexte climatique

III-2.1. Les masses d'air prépondérantes.

Au Cameroun, c'est essentiellement les caractéristiques hygrothermiques des masses d'air et leur évolution (en phase avec la ZCIT) au cours de l'année qui détermine les climats (Suchel, 1988, Santiago, 1998). Ainsi, la moitié sud du Cameroun est sous influence de **l'air équatorial** qui est permanemment humide et conditionnellement instable. Cette région est aussi saisonnièrement sous l'influence de **l'air tropical maritime** d'origine australe qui apporte de l'humidité vers le continent pendant l'été et dont l'efficacité pluviogène s'amenuise au fur et à mesure qu'il avance vers l'intérieur du pays. Il est le siège de grandes instabilités convectives induites par la forte évaporation et à la rugosité du substratum. D'après Suchel (1988), Cette masse d'air est souvent confondue à l'air équatorial surtout pendant l'été puisqu'il présente les propriétés

thermodynamiques quasi-similaires et intéressent particulièrement le Sud et le littoral du Cameroun.

La partie septentrionale du pays subit quant à elle les assauts de la masse d'air tropicale continentale d'origine saharienne qui est plus stable, sèche et subsidente. Elle est à l'origine des sécheresses rigoureuses dans cette partie du pays, même si son influence peut se faire sentir certaines années dans la partie méridionale. L'on note aussi dans une moindre mesure, l'influence de la *masse d'air australe sub-océanique* qui, tout comme la masse d'air tropical maritime, prend naissance dans l'Atlantique sud, mais diffère de celle-ci par son caractère plus stable et par une valeur hygrométrique plus faible. Cette stabilité est due à son séjour prolongé au-dessus des eaux froides du courant de Benguela, ce qui provoque une inversion thermique dans les basses couches qui stoppe les ascendances. Cette masse d'air intéresse périodiquement la région du sud-ouest du pays, où elle est à l'origine de la petite saison sèche (juillet-août). Mais, lorsqu'elle est suffisamment développée, la masse d'air tropical maritime vient annihiler cette inversion thermique en se fondant à l'air australe sub-océanique.

III-2-2. Les grandes unités géo-climatiques du Cameroun

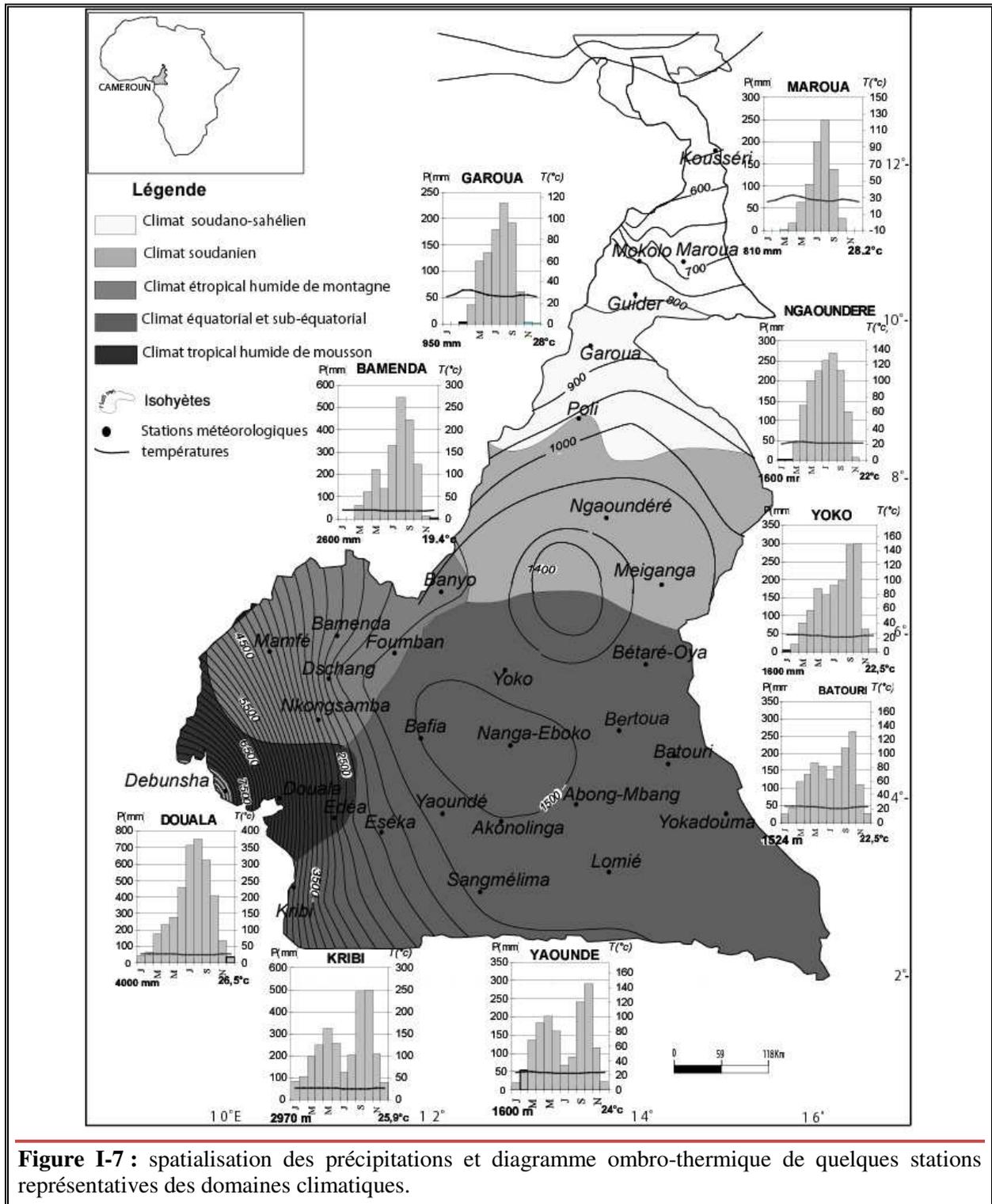
La délimitation des unités climatiques du Cameroun varie suivant les auteurs (Génieux, 1958, Suchel, 1988 ; Tchiadeu, 2000, Santiago, 1998). Elle dépend des paramètres pris en compte dans l'analyse ainsi que de l'échelle spatio-temporelle d'approche.

La présentation succincte des grands domaines climatiques du Cameroun qui suit, n'a pas pour objectif de donner un à priori sur les résultats du travail qui sera effectué mais, de s'en servir comme hypothèses pour discuter ces résultats.

Ainsi, au Cameroun, on distingue *grosso modo* 3 grands domaines climatiques qui comportent chacune des nuances introduites par des facteurs localisés comme le relief, la végétation la proximité de l'océan etc.

Le premier domaine est dit « équatorial ». Il s'étend entre 2°N-6°N et comporte deux nuances :

- la nuance équatoriale classique ou type « guinéen » à quatre saisons située grossièrement au sud du 4° parallèle. Les cumuls annuels sont supérieurs à 1500 mm. Les maxima se trouvent entre mars-avril et en septembre, et les minima entre décembre-janvier et entre juillet-août. Les températures moyennes oscillent autour de 25 °C avec des amplitudes de 2 °C.



- la nuance équatoriale de mousson ou type « camerounien » avec une variante maritime et une variante subtropicale de montagne : le climat de mousson est marqué par un régime pluviométrique unimodal où les hauteurs annuelles oscillent entre 2000mm et 11000mm sur le flanc sud-ouest du mont Cameroun. Les températures moyennes sont de 22 °C. Les hautes terres de l’ouest et du Nord-ouest présentent des nuances dues à

l'altitude, avec une saison sèche plus marquée, les températures plus basses et une insolation accrue.

Le second domaine est dit « tropical humide ou soudanien » : Il est situé entre 6°N-10°N et reçoit en moyenne 1500 à 900mm d'eau par an. La température moyenne est de 28°C et l'écart thermique de 6°C. Il comporte deux nuances : la nuance soudano-guinéenne d'altitude aux latitudes de Ngaoundéré, où la saison des pluies est plus importante en termes de durée (mars-novembre) et d'intensité (1500mm) et les températures moyennes plus fraîches (25°C). La deuxième variante est dite soudanienne classique et se rencontre dans la cuvette de la Bénoué. Les températures moyennes sont élevées (28°C), avec des maxima de 45°C en avril et des précipitations moyennes inférieures à 1000mm/an.

Le domaine « tropical sec (ou soudano-sahélien) » constitue le troisième domaine climatique du pays. Il se rencontre au nord du 10^e parallèle, sur les plaines du Mayo-Danay et du Diamaré. Il est fortement influencé par la continentalité et sa rudesse annoncent les climats sahélien et saharien : au moins 8 mois de saison sèche par an, des précipitations extrêmement variables et comprises en moyenne entre 800mm à Maroua à 400mm à Kousséri et dans la plaine du Tchad. Les températures moyennes quant à elles sont supérieures à 28 °C et les amplitudes thermiques fortes (707° c).

Toutefois, ce schéma est plus difficile à reproduire dans les latitudes équatoriales qui s'individualisent à l'échelle régionale comme une région humide ($P > 2000\text{mm}$), même sur des régions plus continentalisées. Cette forte pluviosité est en rapport avec la présence quasi permanente du flux Atlantique issu des actions conjuguées de la mousson et de l'alizé dévié. La couverture forestière et la forte activité convective sont également à l'origine de la constante humidification de cette région.

Par ailleurs, la grande différenciation des cumuls pluviométriques entre les deux saisons de pluies du Sud-Cameroun pourtant d'égale durée (3 mois) traduit l'importance saisonnière de la typologie, de la fréquence et de l'intensité des abats. Elle met aussi en évidence les contrastes des mécanismes présidant à la mise en place de ces deux saisons notamment, l'épaisseur renforcée de la mousson ($> 3000\text{m}$) et sa vigueur jusqu'à l'intérieur des terres.

III-2-3. Synthèse sur les ensembles géo-climatiques au Cameroun**Tableau I-5:** récapitulatif des caractéristiques géo-climatiques du Cameroun

Domaines climatiques	Nuances		Régimes pluviométriques	Type de végétation	Types de sols
Equatorial	Equatorial classique		1500mm/an (bimodal) 3 mois de saison sèche	Forêt dense humide guinéenne : Forêt sempervirente congo-guinéenne à Ceasalpinaceae ; Forêt mixte sempervirente et semi-décidue Forêt semi-caducifoliée ; Forêt montagnarde	ferrallitiques, acides, argileux et de couleur rouge ou jaune selon la durée de la saison humide avec une faible capacité de rétention des éléments nutritifs ; s'épuisent rapidement
	Equatorial de mousson	Subtropical de montagne	1500-2000mm/an (pseudo-unimodal) ~3 mois de saison sèche		pentcs volcaniques du Mont Cameroun, sédiments
		De mousson	>3000mm (unimodal) 0 – 3 mois de saison sèche	Mangroves ; forêts marécageuses Forêts littorales sempervirentes	d'origine rocheuse le long de la côte. sols très souvent des nitosols très fertiles
Tropical humide ou soudanien	Soudano-guinéen d'altitude		~1500mm/an (unimodal) 5 mois de saison sèche	Formations guinéennes pré-forestières : Formations soudaniennes d'altitude ; Forêts claires soudaniennes ;	Sols jeunes sur de fortes pentes ; sols fortement lessivés dans les vieux plateaux ; Plateaux enrichis en matériaux volcaniques très fertiles
	Soudanien classique		1000-1200mm/an (unimodal) 6 mois de saison sèche	Savanes arborées et arbustives soudano-guinéennes ; Savanes herbeuses à <i>Imperata cylindrica</i> et <i>Pennisetum purpureum</i>	Perméables à capacité de rétention d'eau moyenne ; sols ferrallitiques bruns ou rouges et sols hydromorphes
Tropical sec	Soudano-sahélien		400 -800mm/an (unimodal) 6 à 9 mois de saison sèche	Steppes à épineux soudano-sahéliennes Prairies marécageuses Savanes boisées soudano-sahéliennes	ferrugineux lessivés, sols hydromorphes, sols d'alluvions, lithosols, vertisols, etc....

NB : Appartiennent aux mois de saison sèche (saison des pluies), ceux où les cumuls sont inférieurs (supérieurs) à 50mm.

CHAPITRE II

RAPPELS SUR LA DYNAMIQUE ATMOSPHERIQUE, OCEANIQUE ET PLUVIOMETRIQUE REGIONALE

L'objectif de ce chapitre est de décrire les grandes lignes de la circulation atmosphérique et océanique sur la fenêtre ouest africaine et équatoriale au travers des « téléconnexions » susceptibles de moduler le climat dans la zone de l'étude. Les grands modes de variabilité des précipitations d'échelle régionale seront ensuite présentés, puisque les précipitations seront en quelque sorte le « fil rouge » de la thèse. Cet exercice permettra aussi de donner l'essentiel des pré-requis qui permettront de mieux comprendre et expliquer la variabilité du climat au Cameroun.

I-APERÇU DE LA DYNAMIQUE CLIMATIQUE REGIONALE

La circulation atmosphérique conjuguée à la circulation océanique regroupe des mécanismes fondamentaux par lesquels l'énergie provenant essentiellement du soleil est absorbée, transformée, redistribuée et transférée des zones excédentaires vers les régions déficitaires. Théoriquement, le bilan énergétique annuel entre la terre et l'atmosphère est nul. En effet, le soleil émet sous forme d'ondes courtes (0,2 μm à 4 μm), de l'énergie sous forme de rayonnement visible et dans le proche infrarouge (environ 342W/m²). L'atmosphère réfléchit une partie de ce rayonnement (environ 102W/m²) qui est compensé par le flux thermique émis par la Terre et l'atmosphère dans le domaine infrarouge (de 4 à 100 μm). Le flux solaire absorbé par l'atmosphère et la surface de la terre est ainsi transformé en chaleur. Ce bilan tient compte de la fraction d'énergie transportée de la surface vers l'atmosphère sous forme de flux non radiatifs de chaleur latente (évaporation) et de chaleur sensible (convection turbulente).

L'équation du bilan d'énergie en surface s'écrit (Monteny et al, 1986 ; Janicot, et al, 1993)

$$\text{RN} = \underline{\text{Rg} + \text{Ra} - (\text{Rr} + \text{Rt})} = \underline{\text{H} + \text{LE} + \text{G}}$$

Energie disponible Redistribution de l'énergie vers
l'atmosphère et en profondeur

Avec RN= Rayonnement net absorbée par la surface ; Rg = Radiation solaire incidente atteignant la surface ; Ra = Rayonnement infrarouge atmosphérique ; Rr= rayonnement réfléchi par la surface ou valeur d'albédo de cette surface : La quantité d'énergie réémise vers l'espace par la terre dépend des types d'occupation du sol (végétation, cours d'eau, sol nu etc.) ainsi que des caractéristiques de l'atmosphère (densité et type de nuage, leur altitude, leur composition etc.) ; Rt : Rayonnement infrarouge tellurique montant, déterminé suivant la température de la surface Ts et à l'émissivité de celle-ci. La redistribution de l'énergie vers l'atmosphère se fait quant à elle via les flux de chaleur latente (LE) et sensible (H) ; G =redistribution de l'énergie vers les couches superficielles du sol.

Les différences dans la répartition spatiale du bilan radiatif se traduisent par l'amplification des gradients méridiens de température aux latitudes moyennes et des gradients verticaux aux latitudes tropicales. Ces gradients thermiques provoquent la mise en mouvement de l'atmosphère dans le système, des régions sources équatoriales vers les régions puits subtropicales (Sadourny, 1994) et de la surface terrestre vers l'atmosphère.

I-1. La circulation méridienne de Hadley

C'est la cellule atmosphérique qui intéresse les régions tropicale car, entre l'équateur et les tropiques (environ 30° degré de latitude), dominant des vents appelés

alizés qui, au cours de leur trajet vers l'équateur, subissent la force de Coriolis qui les dévie vers la droite (gauche) dans l'hémisphère nord (sud). Ces alizés de nord-est et de sud-est, préalablement chauds et secs se chargent d'humidité au-dessus de l'océan, puis convergent vers l'équateur. Les masses d'air humide soulevées par la convergence génèrent des nuages convectifs (cumulonimbus) et des précipitations. Ayant perdu l'essentiel de leur humidité vers 15-18km d'altitude (tropopause), ces masses d'air divergent avec une composante méridienne en direction des pôles et alimentent les zones de subsidence autour de 30°N et 30°S. Au cours de sa descente, l'air se réchauffe adiabatiquement et son efficacité pluviogène diminue, d'où les déserts qui règnent à ces latitudes. Une fois dans les basses couches de l'atmosphère, ces masses d'air chaud et sec se dirigent vers l'équateur et ferment ainsi la boucle de la cellule de Hadley. Notons que dans son passage dans les latitudes du Nord-Cameroun, cette masse d'air chaude est à l'origine de la brume sèche et des tempêtes de sables.

Il existe également des gradients de températures et de pressions entre les états des surfaces océaniques et continentales (relief, végétation, albédo) aux latitudes tropicales, plus connue sous le nom des circulations de mousson.

I.2. La circulation de mousson

Cette section est justifiée par le fait que la dynamique des climats du Cameroun est régie en grande partie par la mousson africaine qui naît du gradient de pression entre continents (à faible capacité calorifique et donc plus chauds en été hémisphérique, et les masses océaniques plus froides et à forte inertie thermique).

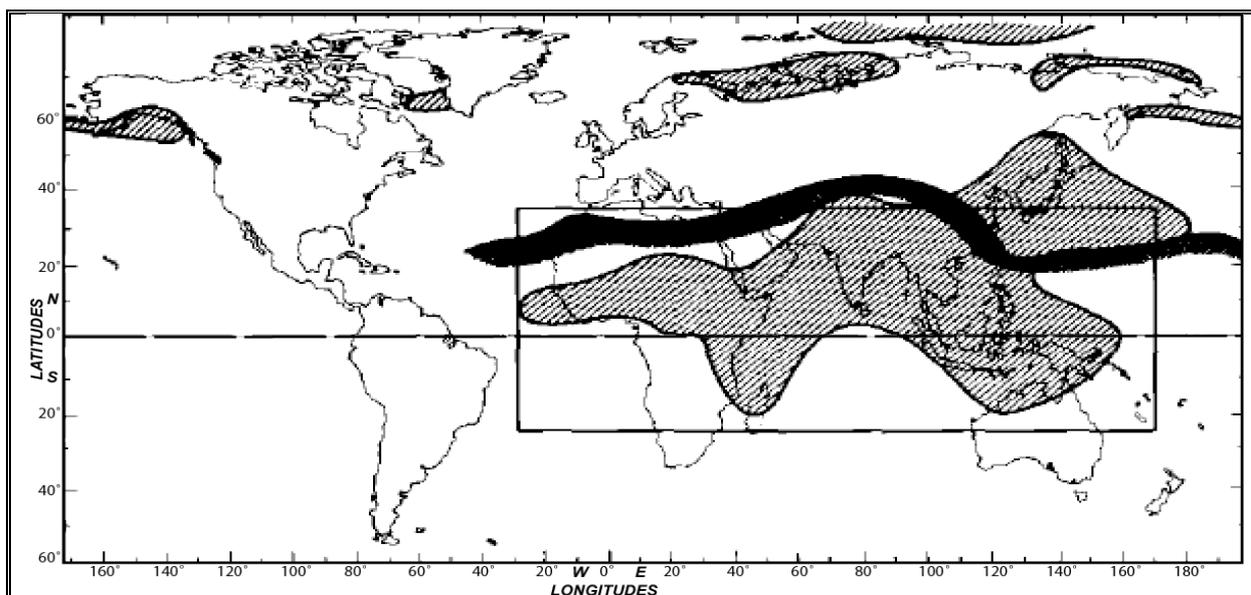


Figure II-1 : régions du monde soumises au régime de mousson : Adapté d'après Ramage, (1971) : le cadre englobe les domaines de mousson ; les zones en hachures sont celles qui répondent au critère (i), (ii) et (iii) ; la courbe foncée marque la limite septentrionale du critère (iv).

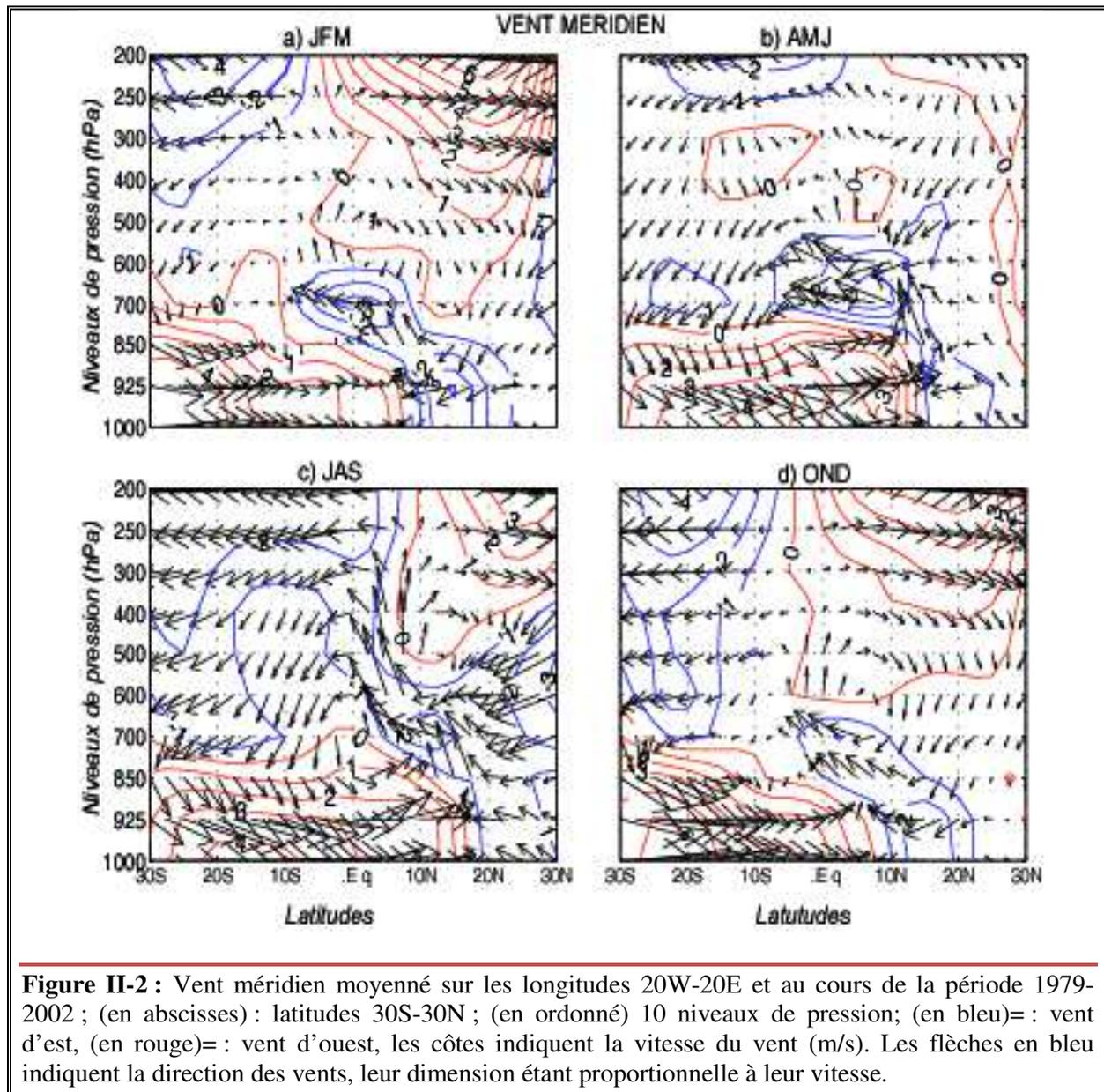
Elle résulte également de la forte asymétrie entre l'hémisphère nord, recouvert en grande partie de continents et l'hémisphère sud majoritairement océanique. La forte inertie thermique résultante induit de forts gradients de températures entre les deux entités, particulièrement en été. La figure II-1 présente les régions du globe soumises au système de mousson et qui d'après Ramage (1971), répondent à plusieurs critères. Il s'agit notamment des régions qui englobent des circulations de surface en janvier et en juillet au cours desquelles : (i) la direction du vent dominant au cours de l'année se décale à environ 120° entre les deux mois; (ii) la fréquence moyenne de la direction du vent dominant entre ces deux mois est au-delà de 40% ; (iii) la vitesse moyenne du vent au cours de l'un des deux mois est supérieure à 3m/s ; et enfin (iv) on relève l'occurrence d'au moins une alternance cyclone/anticyclone tous les 2 ans soit en janvier ou en juillet dans un rectangle de 5° de latitude/longitude.

La figure illustre ainsi plusieurs systèmes de mousson, dont la région de mousson ouest africaine (MOA), située entre zone sahélienne et zone bordière du golfe de Guinée, entre lesquelles s'étend le Cameroun. De manière générale, la mise en place de la mousson est une réponse dynamique au déplacement de la ZCIT ainsi qu'au gradient de température entre continents et océans, qui a pour but de rééquilibrer localement des bilans d'énergie.

I-3. Structure verticale de l'atmosphère sur la fenêtre ouest africaine

Les coupes verticales dans les plans méridien et zonal présentées ci-dessous permettent d'illustrer plusieurs spécificités de la circulation atmosphérique ouest-africaine au cours des 4 trimestres de l'année. Afin de limiter une description redondante, nous nous intéresserons particulièrement aux périodes juillet-septembre (JAS) et Janvier-mars (JFM).

Plan méridien. Les composantes méridiennes du vent entre 30°N - 30°S et moyennées sur la fenêtre 20W-20E, sont indiquées en figure II-2, sur les niveaux de pression standards. Dans ce fuseau, le flux de mousson issu de l'Atlantique sud et équatorial étant plus frais en JAS, l'on note une convergence de surface vers 20°N , entretenue par les flux de basses couches issus des deux hémisphères. La branche ascendante de la cellule qui surmonte cette zone est bien matérialisée : elle est affectée d'une composante de nord en moyenne troposphère en lien avec des intrusions sèches depuis le Sahara. La branche d'altitude en haute troposphère est dirigée vers le sud et alimente la subsidence au sud de l'équateur. Cette circulation correspond à la composante méridienne de la cellule de mousson. En JFM, les influences méridiennes sont essentiellement dominées par des subsidences subéquatoriales, puisque les gradients thermiques entre le continent et l'océan sont plus faibles. Au printemps (AMJ), la zone de convergence se situe autour de 10°N .



Plan zonal. Dans les basses couches, la circulation correspond à la composante d'ouest de la mousson africaine qui transporte l'humidité depuis l'Atlantique alors qu'en moyenne et haute troposphère elle est dominée essentiellement par des vents d'est. Il faut ici distinguer.

I-3-1. Le Jet d'Est Africain (JEA).

C'est un flux d'est d'origine thermique de moyenne troposphère (environ 600hPa) qui prend naissance sur le continent africain (Riehl, 1945) et plus précisément sur le Soudan occidental (Aspliden, et Adefolalu, 1976). Le JEA se forme est associé au gradient de méridien de température entre le Sahara et les eaux froides du Golfe de Guinée d'une part, et les basses latitudes continentales d'autre part (Thorncroft et

Blackburn, 1999). Ce flux d'est existe de manière intermittente entre avril et novembre et atteint sa position la plus nord en août vers 15°N où sa vitesse atteint 15m/s. Il est l'une des plus importantes composantes de la mousson africaine.

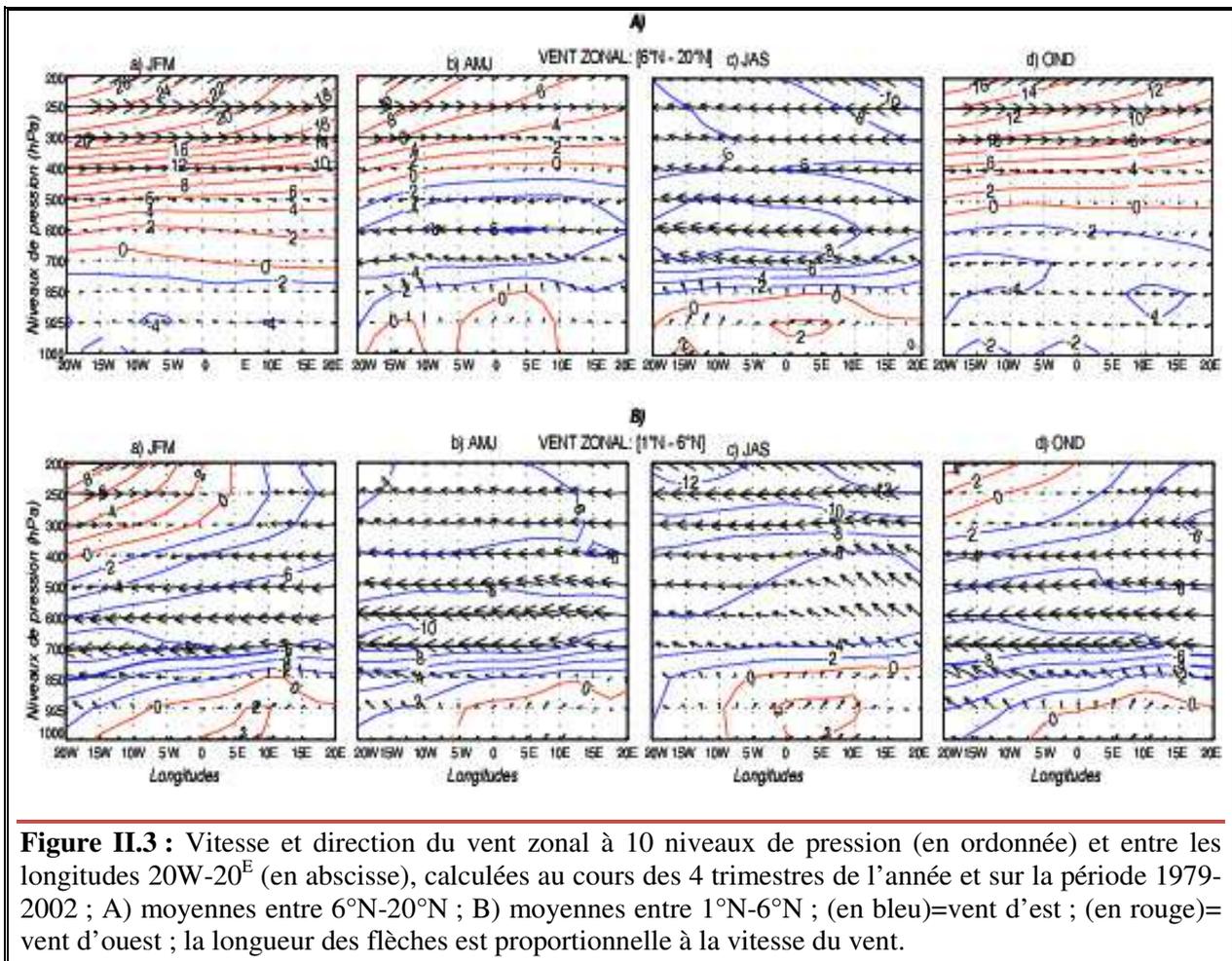


Figure II.3 : Vitesse et direction du vent zonal à 10 niveaux de pression (en ordonnée) et entre les longitudes 20W-20^E (en abscisse), calculées au cours des 4 trimestres de l'année et sur la période 1979-2002 ; A) moyennes entre 6°N-20°N ; B) moyennes entre 1°N-6°N ; (en bleu)=vent d'est ; (en rouge)=vent d'ouest ; la longueur des flèches est proportionnelle à la vitesse du vent.

En raison de sa position le JEA intéresse toute l'Afrique de l'ouest et le nord du Cameroun, où il y transporte plus de la moitié de la vapeur d'eau advectée (Suchel, 1988).

I-3-2.le jet tropical d'est (JTE).

Le JTE est un vent thermique de plus large échelle localisé sur l'Afrique vers 10°N à la limite de la troposphère, au niveau des branches supérieures des circulations divergentes (200hPa). Ce vent naît de la différence de température entre l'océan indien et les hauts plateaux asiatiques en été boréal et est couplé à la cellule de type Walker de l'océan indien. Il s'étend donc depuis l'est asiatique jusqu'à l'Atlantique nord.

La figure II-3 présente les champs trimestriels du vent zonal entre les longitudes 20°E-20°W et les latitudes 6°N-20°N d'une part et les latitudes de la bande équatoriale

(1°N-6°N) d'autre part, qui intéressent notre zone d'étude. Au nord du 6° parallèle et en hiver boréal, on distingue des vents d'ouest dans les hautes couches de l'atmosphère, avec des vitesses supérieures à 20m/s. Ces structures représentent les maxima associés au Jet subtropical d'ouest, qui domine la circulation en haute troposphère (Hastenrath, 1988). En moyenne troposphère, les vents faiblissent (<6m/s). Au printemps, le vent zonal s'affaiblit considérablement dans les hautes couches de l'atmosphère (6m/s-10m/s), et les vents d'est s'installent dans les moyennes couches avec des vitesses allant de 2 à 6m/s, le JEA se renforçant en été (10m/s). Ces ondes jouent un rôle important dans le développement des grands systèmes convectifs de mésoéchelle, responsables de la majeure partie des précipitations au-dessus de la zone sahélienne (Grist *et al*, 2001).

Observons qu'au sud du 6° parallèle (bande équatoriale) le vent est essentiellement d'est tout au long de l'année mais en été, il diminue d'intensité.

I-4 Circulation de basses couches et perturbations d'échelle régionale

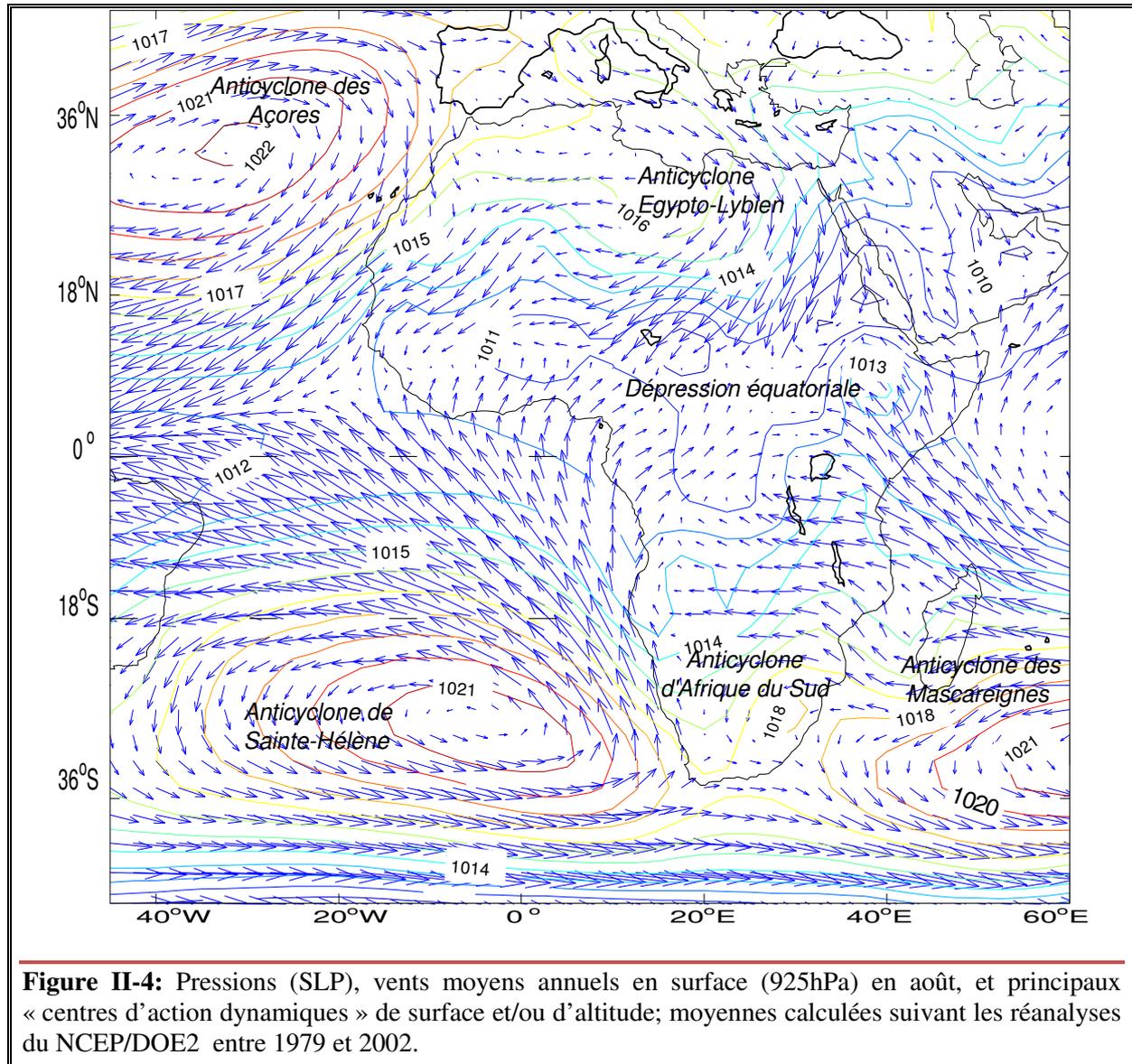
Sur la fenêtre ouest africaine, la répartition des centres d'action correspond à une circulation en surface, caractérisée par des vents de secteur est, qui sont de nord-est (harmattan) dans l'hémisphère nord et de sud-ouest dans l'hémisphère sud (alizés), et qui donnent naissance à la convergence intertropicale (ZCIT), près de l'équateur. En effet, la circulation méridienne advecte de l'air de mousson à partir du Golfe de Guinée alors que de l'air plus sec est simultanément advecté par les dépressions sahariennes. Le contact de ces deux masses d'air de propriétés thermodynamiques différentes dans les basses couches (près du front intertropical) crée des gradients méridiens et met en place des sources d'instabilité qui interagissent avec les systèmes convectifs de méso-échelle et des systèmes précipitants que l'on regroupe sous le terme de perturbations. Ce sont essentiellement :

I-4-1.les lignes de grains

En Afrique de l'ouest, ces perturbations sont souvent mobiles et prennent une configuration assez rectiligne. Elles sont perçues par satellite, comme un ensemble nuageux d'environ 250-1000km d'extension horizontale, de très faible température, se déplaçant d'est en ouest en lien avec le cisaillement du vent (Thompson, 1979 ; Duvel, 1990 ; Sall, 1997).

Ce cisaillement résulte de la présence d'un flux de nord-est (JEA) dans les couches moyennes, et d'un flux de sud-ouest dans les basses couches (mousson). La partie frontale de la ligne de grain est constituée de masses d'air sec et humide, favorables au développement de la convection profonde, qui génèrent des précipitations de forte intensité et de courte durée. Cette partie convective est alimentée par des courants ascendants et descendants résultant du soulèvement d'air instable à partir de la couche

limite. Elles ont une durée de vie de quelques heures à quelques jours et contribuent pour près de 75% aux pluies saisonnières de la bande soudano-sahélienne.



Les signes annonciateurs de ces phénomènes atmosphériques au sol sont : une brusque augmentation de l'humidité, et de la pression (2 à 3mb), une baisse de la température d'environ 4°C accompagné d'un ciel plus lourd et des vents violents. Le passage d'une ligne de grains entraîne une modification des structures atmosphériques et donc des échanges thermodynamiques entre les composantes du système. Il est donc susceptible de générer des pluies de turbulence géographique particulièrement sur les hautes terres de l'ouest-Cameroun (Tsalefac, 1994).

I-4-2. Les ondes d'est africaines.

Ce sont des perturbations synoptiques de moyenne troposphère, qui prennent naissance en amont des hauts plateaux d'Ethiopie. Ces ondes sont générées par des instabilités baroclines (cisaillement vertical) et barotropes (cisaillement horizontal) du jet d'est africain (JEA), se traduisant par l'inversion du gradient de température dans les basses couches de la troposphère au nord du continent africain (Burpee, 1972). Cette inversion est due au contraste thermique entre les régions sahariennes et les températures froides du long du golfe de Guinée. Des études ont montré que la plupart des ouragans et des tempêtes tropicales de l'Atlantique prennent naissance dans les ondes d'est (Avila et al, 1995). Les ondes d'est atteignent leur fréquence maximale entre juillet et septembre, et jouent un rôle important dans la modulation de la convection. Elles contribuent également à la formation et au déplacement des lignes de grains. Entre juin et octobre, les ondes de périodicité 3 - 5 jours sont fréquentes aux latitudes du JEA et en moyenne troposphère. Leur longueur d'onde est au nord du JEA d'environ 2500km et au sud de 4500km. Ces ondes 3-5 jours affectent surtout le vent méridien en moyenne troposphère, contrairement à celles de 6 - 9 jours qui affectent majoritairement le vent zonal entre 700 et 800 hPa et sont associée à une circulation anticyclonique: leur longueur d'onde varie entre 6000 et 7000km (de Felice, 1990 ; Diedhiou et al, 1999).

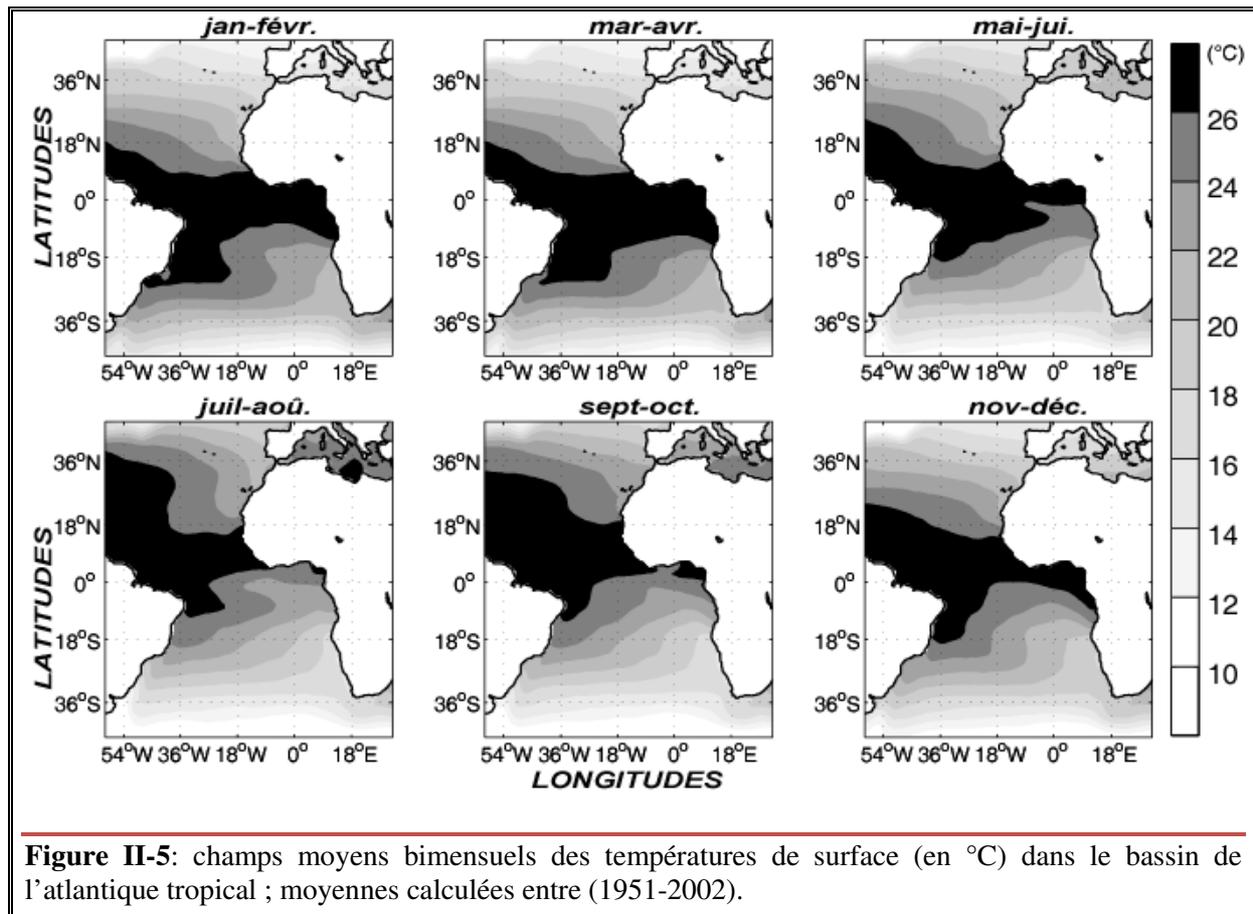
Après la description succincte des flux atmosphériques et océaniques qui régissent le mouvement des masses d'air au sein de l'atmosphère, nous allons maintenant nous intéresser aux cycles moyens annuel et interannuel des SST de l'atlantique tropical qui intéresse particulièrement le Cameroun en raison de son ouverture sur le golfe de Guinée sur près de 400km. On rappellera également la circulation des courants du Golfe de Guinée compte tenu de son importance sur les variations des précipitations dans le continent.

II- LES SST DE L'ATLANTIQUE TROPICAL

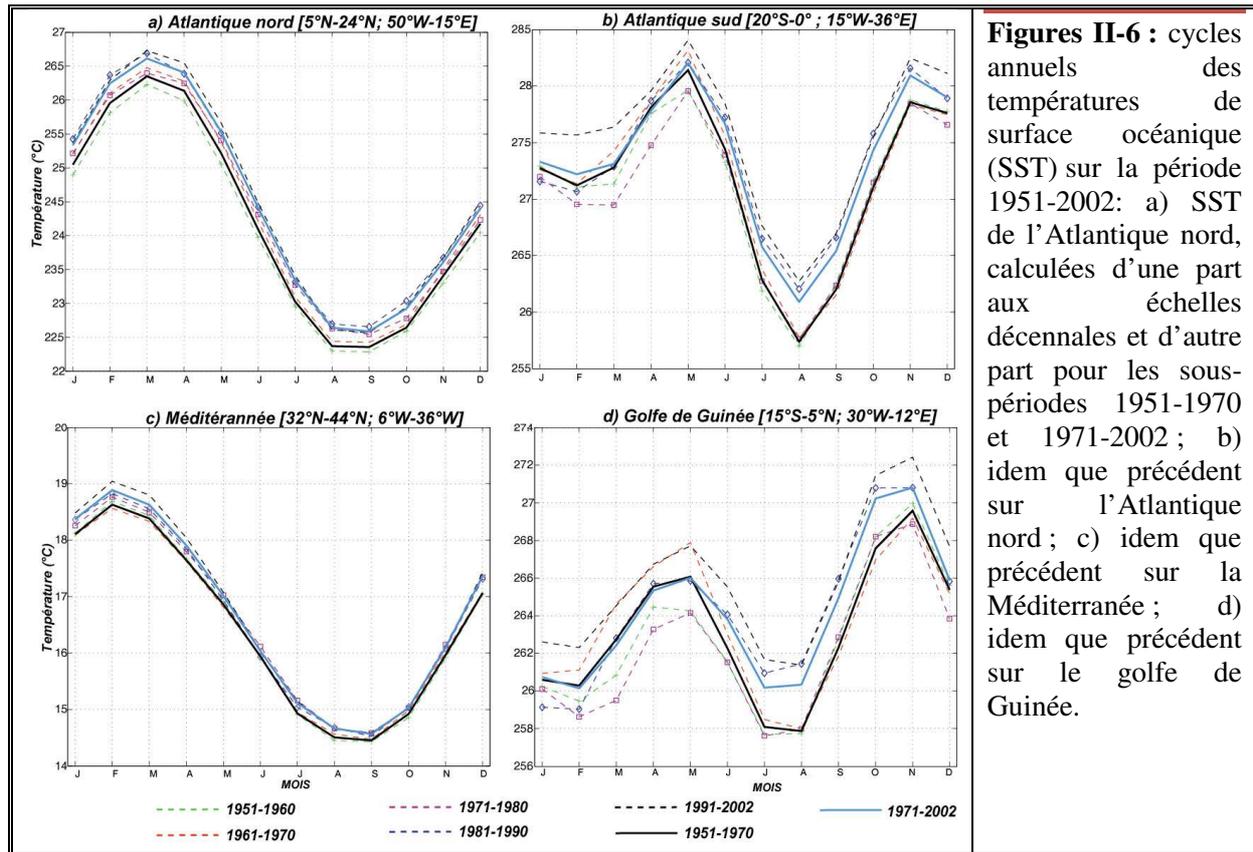
II-1. Cycle annuel moyen.

La figure II-5 présente le cycle annuel des champs moyens de température de l'Atlantique tropical, caractérisés par un gradient thermique latitudinal orienté nord-ouest/sud-est dans l'hémisphère nord et sud-ouest/nord-est dans l'hémisphère sud.

Une langue d'eau assez chaude ($>24^{\circ}\text{C}$) occupe l'Atlantique tropical tout au long de l'année mais, à partir du mois de mai, elle se déporte vers le nord-ouest *via* le courant froid du Benguela (Fig. II-5). Cette remontée d'eaux froides en surface le long des côtes fait suite à une divergence de surface après le renforcement du courant sud équatorial durant l'été boréal (nous y reviendrons dans les prochaines sections).



La figure II-6 présente les cycles annuels des SST dans l'Atlantique nord et sud, le golfe de Guinée et la Méditerranée (Rowell, 2003). On voit que l'Atlantique tropical nord et la Méditerranée (Fig. II-6a, c) présentent un maximum en mars ($26,5^{\circ}\text{C}$) et en février (19°C) respectivement, et un minimum en août ($22,5^{\circ}\text{C}$ et 14°C , respectivement). En revanche, l'Atlantique tropical sud et équatorial (Fig. II-6b, d) ont un rythme bimodal, avec des maxima en mai et novembre (respectivement 28°C et $26,5^{\circ}\text{C}$) et des minima en février et en août (entre $25,5$ et 26°C), ceci en lien avec le forçage radiatif lié aux deux « passages » du Soleil au zénith. Par ailleurs, la comparaison des moyennes décennales montre un réchauffement des SST au cours de la période post-1970.

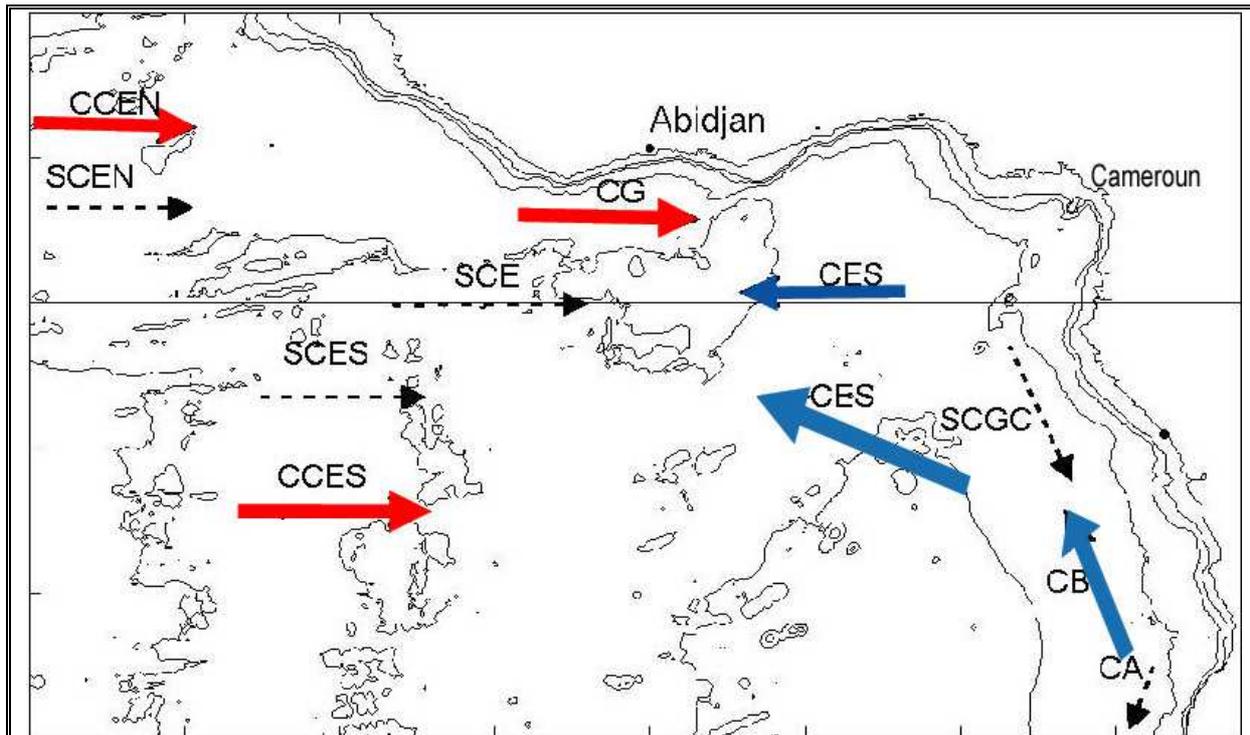


Figures II-6 : cycles annuels des températures de surface océanique (SST) sur la période 1951-2002: a) SST de l'Atlantique nord, calculées d'une part aux échelles décennales et d'autre part pour les sous-périodes 1951-1970 et 1971-2002 ; b) idem que précédent sur l'Atlantique nord ; c) idem que précédent sur la Méditerranée ; d) idem que précédent sur le golfe de Guinée.

II-2. L'importance climatique du Golfe de Guinée.

Le Golfe de Guinée est la région de l'Atlantique tropical où la variabilité saisonnière des SST est la plus importante (rapport EGEE3). Les anomalies de SST du golfe de Guinée ont aussi un impact important sur les précipitations de l'Afrique de l'ouest et guinéenne et plus encore du Cameroun. Nous décrivons ici, les courants (permanents ou saisonniers) dans cette région ainsi que les mécanismes dynamiques auxquels ils sont associés. Nous nous focalisons particulièrement sur les upwellings intéressant notre région d'étude: l'upwelling du Benguela et l'upwelling équatorial.

Les gradients thermiques naissent d'une part, des différences de température entre la surface de l'océan et les basses couches de l'atmosphère et d'autres part, de la dynamique des vents qui dans leur trajet, balayent la couche superficielle chaude vers l'ouest. Le courant froid du Benguela est situé sur la côte sud-ouest du continent africain (sud de l'Angola, Namibie et Afrique du sud) et associé aux vents parallèles à la ligne de côte favorables à l'upwelling côtier.



Source : rapport scientifique des travaux du programme EGEE/AMMA (2004-2006)

→ courant de surface adveçant des eaux plus chaudes

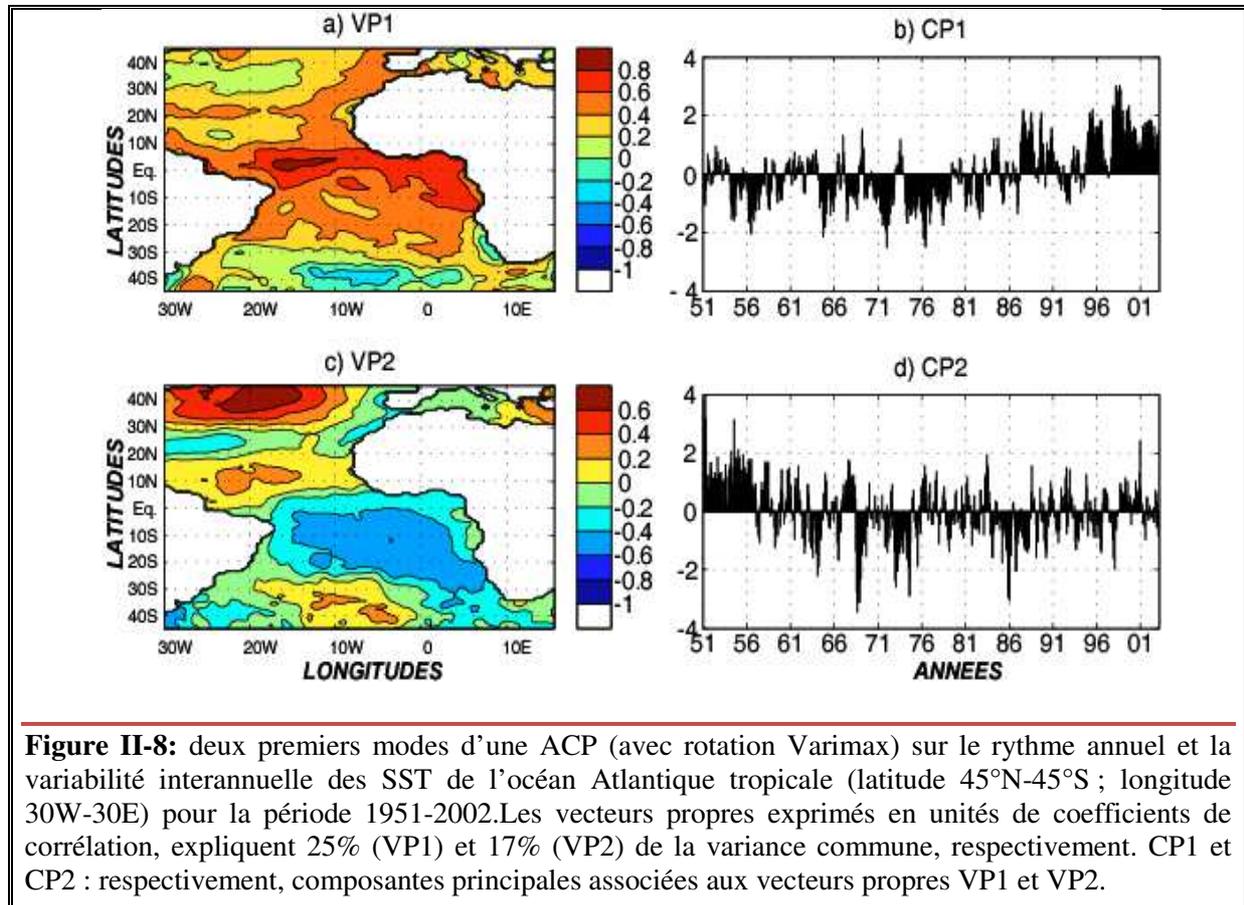
→ courant de surface adveçant des eaux plus froides

Figure II-7. Schéma de la circulation superficielle et sub-superficielle dans l'Atlantique tropicale et le Golfe de Guinée : (Flèches en trait continu) = courants de surface : Contre Courant Equatorial Nord (CCEN) ; Courant de Guinée (CG) ; Contre Courant Equatorial Sud (CCES) ; Courant Equatorial Sud (CES) ; Courant de Benguela (CB) ; (Flèches en traits pointillés) = Courants de sub-surface : Sous courant Equatorial Nord (SCEN) ; Sous Courant Equatorial (SCE) ; Sous Courant Equatorial Sud (SCES) ; Sous courant du Gabon-Congo ; Courant d'Angola (CA).

D'octobre à avril, les eaux du golfe de Guinée ne sont pas concernées par ce courant et restent plus chaudes que les basses couches de l'atmosphère, mais à partir du mois de mai, ces eaux subissent l'influence des remontées d'eaux froides du courant de Benguela au large de l'Angola et la langue d'eaux froides se décalent vers le nord et l'ouest. Ces eaux froides sont véhiculées vers les basses latitudes par un régime des vents locaux mais aussi par toute une dynamique du bassin via les ondes équatoriales d'est (ondes de Kelvin). En entraînant les eaux chaudes superficielles vers le large, les vents d'ouest suscitent des contre-courants équatoriaux (CCEN, CCES), qui s'opposent à eux (Fig. II-7). Le courant de Guinée (CG) est impulsé par le contre-courant équatorial nord (CCEN) et par une branche du courant des Canaries (CC) (Fig. II-7). A cette saison, la température des eaux du courant de Benguela est plus froide que l'air qui se refroidit et devient plus stable.

II-3. Les modes principaux de variabilité des SST dans l'Atlantique

Une ACP avec rotation Varimax est effectuée sur les SST du bassin de l'Atlantique, incluant rythme moyen annuel et variabilité interannuelle (Fig. II-8).



Nous présentons ici les deux premiers modes, cumulant 42% de la variance commune.

Bien que l'extension méridienne soit importante (45N-45S), le premier mode (25% de la variance commune) décrit le mode Atlantique équatorial, avec des valeurs de corrélations supérieures à 0,6. La chronique associée présente des anomalies majoritairement négatives de SST avant l'année 1985 et des anomalies positives en fin de période, quoique interrompues au début des années 90 par une courte période froide. Ce mode Atlantique a permis à certains auteurs d'émettre l'hypothèse d'une pseudo-oscillation El-Niño (Nino Atlantique) à forte variance interannuelle dans l'Atlantique équatorial et du sud Est. Cette hypothèse découle de la quasi-similarité de la dynamique des océans Pacifique et Atlantique dans les régions équatoriales (Hisard, 1980 ; Merle, 1980 ; Vauclair, et *al*, 2001). Si pour certains, l'évènement chaud de 1984 sur l'Atlantique tropical a eu pour origine l'évènement El-Niño des années 1982-1983, d'autres (Carton et

al, 1994 ; Ruiz-Barradas et *al*, 2000) suggèrent l'hypothèse d'une fluctuation océan/atmosphère propre à l'Atlantique et donc indépendante des événements climatiques du Pacifique.

Le second mode de l'ACP (17% de la variance commune) décrit une structure dipolaire dans l'Atlantique nord et sud avec des valeurs de corrélations de 0,6 en valeur absolue. Les corrélations positives/négatives sont associées à des anomalies chaudes au nord et froides au sud plutôt avant 1970 et l'inverse après. Ce mode n'est qu'en partie lié au dipôle Atlantique intertropical décrit dans la littérature (Servain et *al*, 2000) avec ses fluctuations quasi- décennales et son influence sur la migration de la ZCIT (Sultan et *al*, 2001) et donc les précipitations de mousson (Lamb, 1978,1983; Lough, 1986). L'existence de ce mode inter-hémisphérique ne fait toutefois pas l'unanimité au sein de la communauté scientifique. D'abord il n'est perceptible qu'après les années 50 et avant les années 90s. Il est aussi moins apparent lorsqu'on fait appel à une ACP avec rotation comme ici. C'est pourquoi certaines recherches émettent l'hypothèse d'un artéfact de la méthode (Houghton et *al*, 1992).

En fait, les variations thermiques de l'Atlantique génèrent des anomalies dans la circulation divergente de l'atmosphère qui induisent à leur tour, une variabilité d'amplitude et de positionnement des branches verticales des cellules de Hadley et de type Walker entre mars-avril au-dessus du Nordeste et entre juillet-septembre au Sahel (Fontaine et *al*, 1998). Ces circulations divergentes modulent donc significativement le flux de mousson. Ainsi, les anomalies chaudes océaniques forcent la convergence des flux d'humidité dans les basses couches où naissent les colonnes d'ascendance et donc favorisent une pluviométrie excédentaire dans la région affectée (et l'inverse pour les anomalies froides). L'évolution saisonnière de la ZCIT sur l'océan suit donc la zone des températures de surface maximales (Serraud, 2006).

III- LES CHAMPS DE PRECIPITATIONS A L'ECHELLE REGIONALE

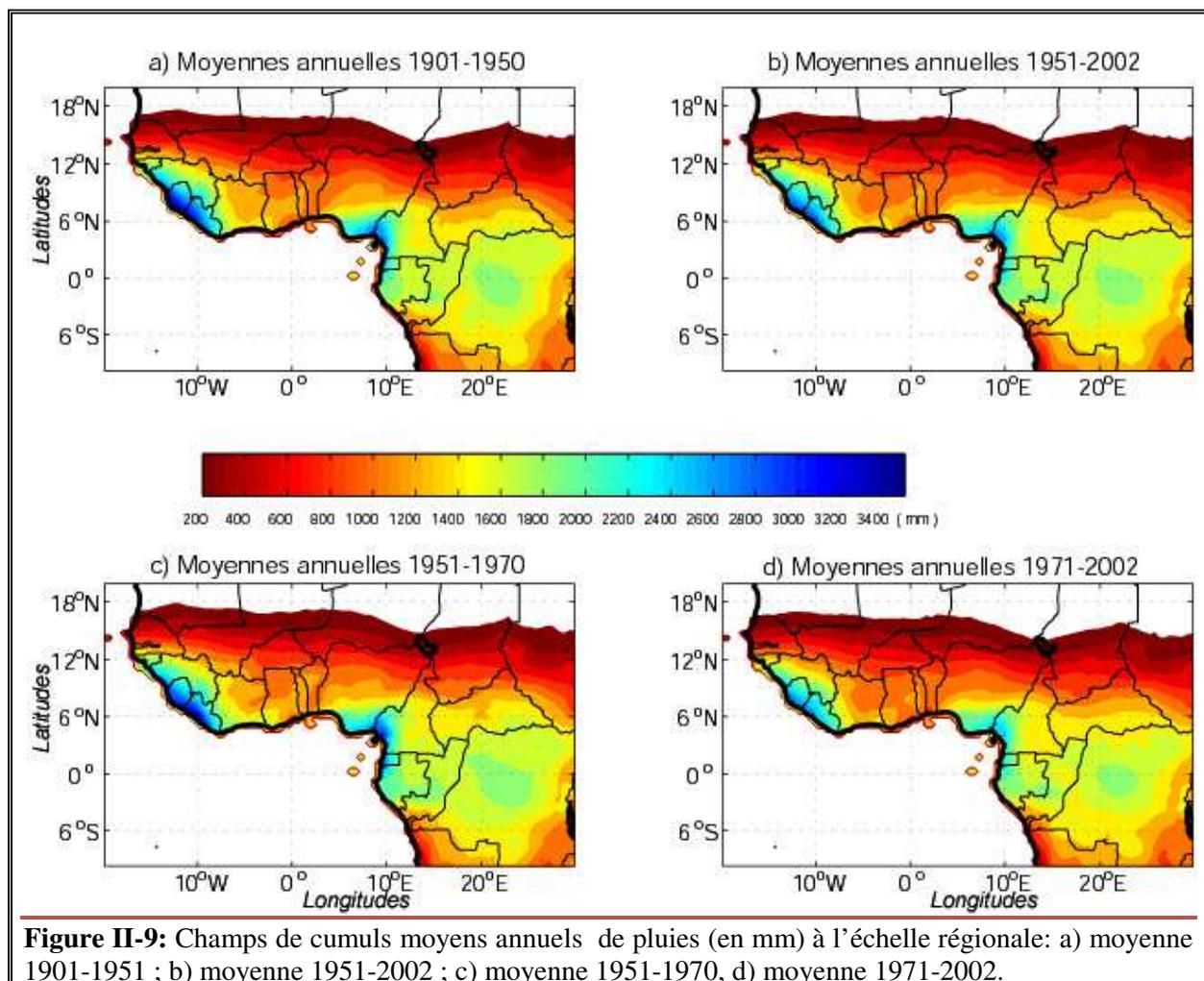
La variabilité pluviométrique à l'échelle de l'Afrique de l'ouest continue d'être la préoccupation de plusieurs programmes de recherche (CATCH puis AMMA). Aux échelles régionales on peut utiliser pour la décrire les bases en points de grille, en raison de leur dispersion spatiale régulière moins sensible à l'impact des facteurs locaux comme le relief ou la végétation. Ceci permet de déterminer les modes spatio-temporels de variabilité dominants nécessaires à l'analyse ou même à la prévision, (Philippon, 2002). Outre leur profondeur temporelle, les données d'observation du CRU (voir chapitre I), reproduisent bien les champs spatiaux d'échelle large. Dans cette section, on rappelle les grandes lignes de la variabilité pluviométrique à l'échelle de l'Afrique occidentale et

centrale avant d'étudier les champs de cumuls annuels en différentes sous-périodes entre 1901 et 2002, puis les grands modes de variabilité sur notre période d'intérêt (1951-2002).

III-1. Cumuls annuels et cycle saisonnier moyens des précipitations à l'échelle régionale

III-1-1. Cumuls annuels

La figure II-9 décrit les champs de cumuls annuels au cours de 4 sous-périodes: 1901-1950 (a); 1951-2002 (b); 1951-1970(c) et 1971-2002(d). Ces cumuls moyens annuels varient de moins de 200mm à près de 3500mm et isolent deux foyers ($P > 2500\text{mm}$) : la bande équatoriale, et les reliefs du Fouta-Djalon et connexes. La frange côtière enregistre les plus forts cumuls (littoral gabonais, côtes Sierra-Léonaises et Libériennes). Partout ailleurs, les précipitations annuelles ne dépassent pas 1500mm. Au nord du 15° parallèle, les hauteurs sont inférieures à 500mm par an.



La comparaison des champs pluviométriques moyennés au cours des deux premières sous-périodes ne montre pas de différence marquée. Cependant, dans le cadre du programme ICCARE, l'examen des données disponibles sur quelques pays de la zone a révélé une période déficitaire entre 1910-1922 et une autre entre 1936-1950. Cette dernière période serait déficitaire par rapport à la période de référence 1925 (+/- 5 ans)-1990, et concernerait essentiellement la région située entre les longitudes 0°- 4°E (Paturel, 1996).

En considérant avec plus de détail la période 1951-2002, on relève un déficit de près de 1000mm par rapport aux maximums au cours de la période 1971-2002 (Fig. II-9 b, c). Ce déficit est associé à la baisse marquée des précipitations au cours des années 70 et 80 en réponse à une plus forte occurrence d'années sèches (Le Lay et *al*, 2005). En Afrique de l'ouest, le déficit pluviométrique entre les périodes 1950-1969 et 1970-1989 est estimé à 190mm/an (Le Barbé, 2002). Sur le bassin du lac Tchad et entre 10°N et 14°N, le gradient méridien est passé de 1,5mm/Km dans les années 1950 à 1,2mm /Km au cours de la décennie 1980 (Niel et *al*, 2005). Les études ont également souligné que les zones les plus arides et les plus arrosées ont été très sensibles à cette sécheresse qui a affecté aussi bien l'Afrique sahélienne que centrale (Servat, 1999). Les ruptures les plus significatives ont été signalées entre les années 1960 et 1979 et apparaissent essentiellement à l'ouest du 5^e degré de longitude ouest et au nord du 8^e parallèle.

Les études de régionalisation des précipitations à partir d'analyses factorielles mettent en évidence à l'échelle interannuelle, un mode dipolaire entre la bande soudano-sahélienne et le sud de l'équateur, avec l'année 1970 comme point d'inflexion entre les périodes humide (1951-1969) et sèche et (1971-2002). Cette transition a été mise en évidence sur l'Afrique de l'ouest et centrale (Snijders, 1986, Hubert et Carbonel, 1989, Khodja et *al*, 1996 ; Janicot et *al*, 1993 ; Paturel et *al*, 1996 ; Gautier et *al*, 1998, Servat, 1999) et intervient plus précocement au Sahel en lien avec des modifications de structure des champs de températures de surface de l'océan mondial. Il est à noter toutefois que les taux de variance totale exprimée par les modes de variabilité interannuelle et la structuration des champs de corrélation traduisent la plus faible cohérence des structures de précipitations en Afrique centrale par rapport au Sahel. A l'échelle annuelle, l'on relève essentiellement une opposition entre les régimes à un seul mode au nord du 6^e parallèle et les régimes équatoriaux et guinéens deux intersaisons annuelles.

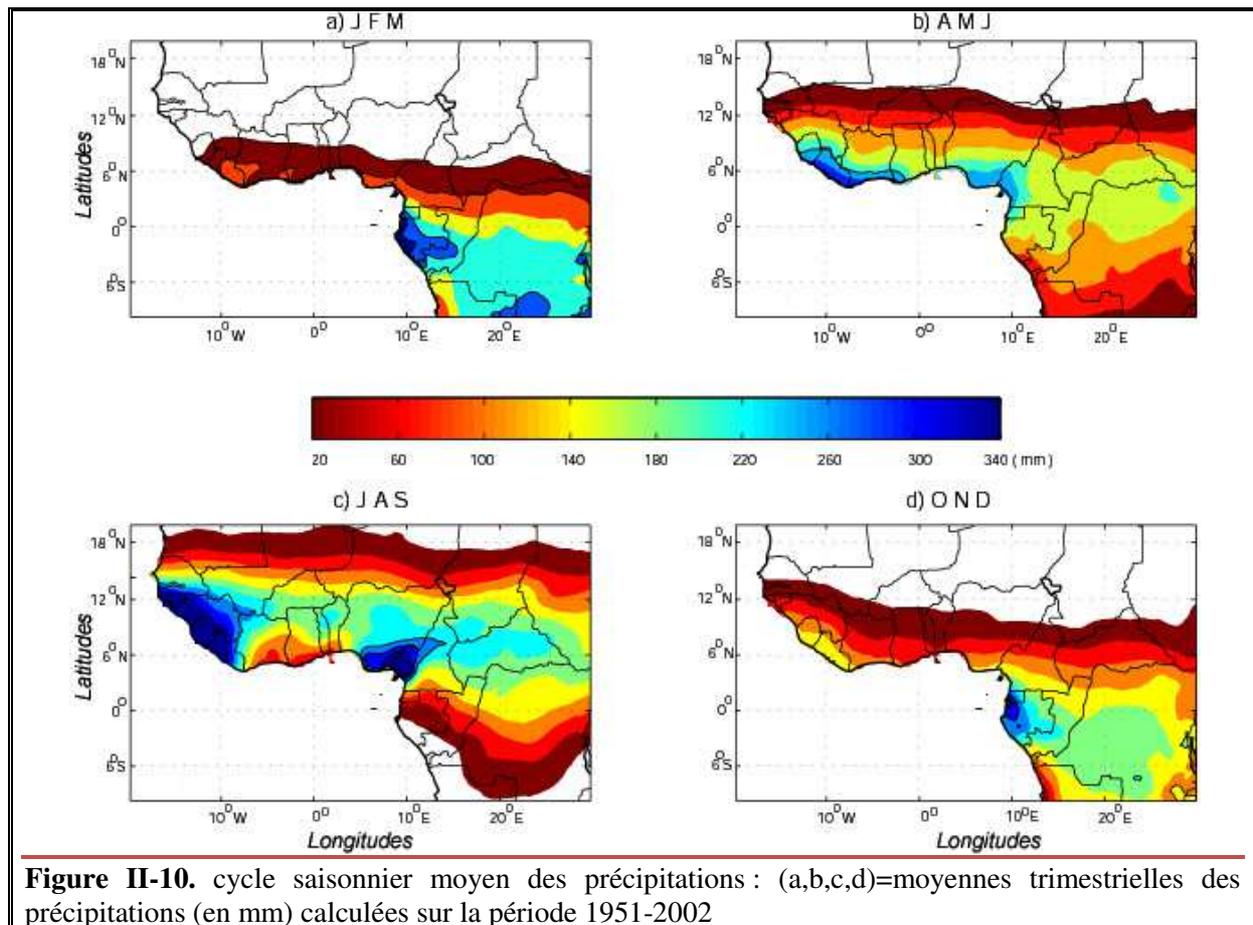
En somme, à l'échelle régionale, les précipitations sont organisées suivant un schéma grossièrement méridien. Les foyers de forte pluviométrie demeurent l'Afrique centrale et la pointe sud-ouest de l'Afrique de l'Ouest qui sont constamment alimentées par les flux de vapeur d'eau en provenance des latitudes tropicales (alizé austral). Cette influence océanique se combine parfois subtilement à d'autres influences des structures méso-échelles (relief, végétation, etc.) pour créer une diversité de climats locaux. Ainsi la

forte pluviosité sur les littoraux guinéen et camerounais (sud-ouest) est associée à la présence les grands massifs (Fouta-Djalon et Mont Cameroun, respectivement), témoignant d'une forte influence orographique sur la répartition des précipitations. Les gradients ouest/est quant à eux sont illustrés par le contraste pluviométrique entre les régions côtières et celles plus continentales situées à latitude égales.

b) Cycle saisonnier moyen des précipitations à l'échelle régionale

La translation méridienne de la ZCIT au cours de l'année, associée à la circulation régionale, est le facteur principal de la variabilité saisonnière des précipitations. Le cycle moyen ayant été souvent décrit, nous nous limiterons à l'essentiel.

En hiver boréal (JFM), la ZCIT est située sur l'Atlantique tropical vers 5°N, et induit des précipitations autour de 200mm au sud de l'équateur (Fig. II-10) : c'est la saison sèche au nord de l'équateur, l'Afrique de l'ouest étant à cette époque de l'année quasiment indemne de pluies. A partir du mois d'avril, la ZCIT se déplace en direction du nord, en phase avec la migration du maximum de rayonnement solaire, et apporte les pluies sur le continent.



Au cours du trimestre AMJ, l'on peut déjà identifier les grands foyers de fortes pluviométrie (côtes sud-ouest africaines et du Golfe de Guinée) alors que partout ailleurs, les moyennes trimestrielles ne dépassent pas 100mm. Au mois de juillet, la migration vers le nord de la ZCIT s'intensifie et atteint en août sa position la plus septentrionale (10°N-12°N): c'est la saison des pluies sur toute la bande sahélienne alors qu'au sud de l'équateur règne la saison sèche. C'est donc le déplacement de la ZCIT sur le continent (Afrique de l'ouest) entre 5°-6°N et 10°-15°N qui explique la première saison des pluies guinéenne et la saison des pluies au Sahel ; après le « saut de mousson » fin juin (Sultan et al, 2003 ; Lebel et al, 2002). Le trimestre OND est marqué par le mouvement de repli de la ZCIT : la ceinture pluvieuse redescend au sud 10°N alors que le sud de l'équateur connaît sa seconde saison pluvieuse.

Toutefois, comme déjà souligné précédemment, les mécanismes de la pluviogenèse sont également influencés par des processus de surface continentale, notamment le relief et la végétation. Dans cette thèse, l'accent sera particulièrement mis sur ce dernier facteur, d'où l'intérêt de rappeler les mécanismes actifs et rétroactif du climat sur le couvert végétal.

IV. LES CONDITIONS DE SURFACES CONTINENTALES

IV- 1. Les principales formations végétales

Un aperçu de la végétation dans la fenêtre Afrique de l'ouest et centrale montre un étagement latitudinal de la végétation qui s'étend du désert subtropical à la forêt équatoriale, en passant par les savanes guinéennes et les steppes sahéliennes. Trois facteurs essentiels sont responsables de cet étagement bioclimatique: les facteurs endogènes, liés à la nature aux propriétés physiologiques des végétaux ; les facteurs exogènes naturels liés aux conditions paléoclimatiques, édaphiques ainsi qu'à la variabilité 'naturelle' du climat, et les facteurs exogènes qui constituent des forçages anthropiques de la variabilité naturelle du climat (Bigot, 1997).

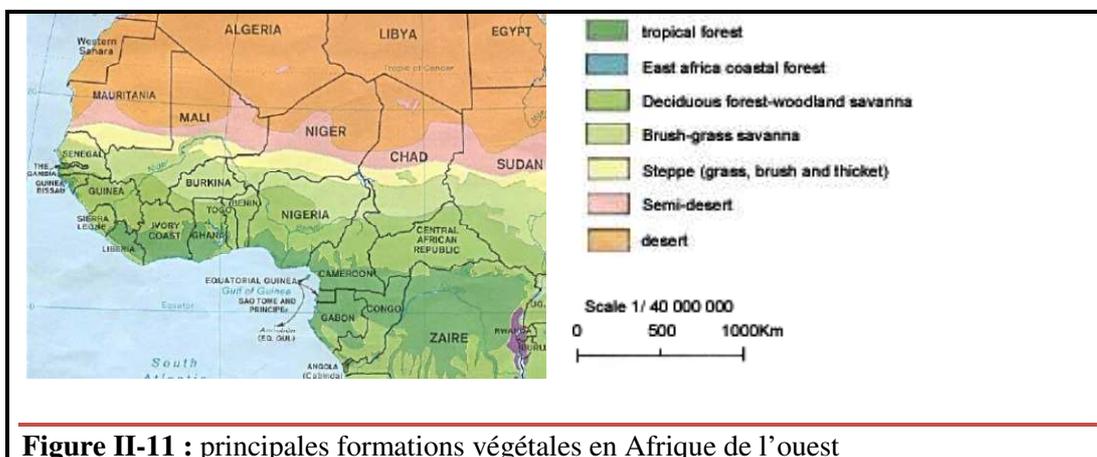


Figure II-11 : principales formations végétales en Afrique de l'ouest

La région de la forêt pluviale tropicale, où les précipitations annuelles moyennes dépassent 1 300 mm, est couverte par une végétation dense de fougères, dominée par de grands arbres à feuilles persistantes et de nombreuses espèces de bois dur tropical. Au sud de l'équateur, la forêt primaire occupe aussi de vastes zones, notamment dans l'est de la République démocratique du Congo (Zaïre), favorisée par des précipitations importantes (4 000 à 6 000 mm). Dans les hauts plateaux du Cameroun et en Angola, il existe une zone de forêts de montagnes, avec des précipitations annuelles moyennes moins importantes que celles de la forêt pluviale tropicale, où une étendue couverte de broussailles fait place à des arbres à bois dur et à des conifères primitifs.

IV-2. La dégradation du couvert végétal en Afrique centrale et ses conséquences

Le tableau II-1 présente les estimations des taux de dégradation de la couverture forestière en Afrique centrale d'après la FAO. Il ressort que la couverture végétale évolue rapidement au Cameroun (0,9% en 10 ans). Cette évolution n'affecte pas seulement les forêts au sens strict du terme tel qu'il est perçut par la FAO, mais aussi l'ensemble du couvert boisé, notamment les zones de savane ou de transition.

Tableau II-1 : évolution du couvert forestier en Afrique centrale (chiffres en 1000 ha)

PAYS	Superficie totale	Couvert forestier en 1990	Couvert forestier en 2000	Pertes entre 1990-2000	Pourcentage
Cameroun	46 540	26 076	23 858	-222	-0.9 %
Congo	34 150	22 235	22 060	-17	-0.1 %
Gabon	25 767	21 927	21 826	-10	n.s.%
Guinée-Equato.	2 805	1 858	1 752	-11	-0.6 %
RCA	62 298	23 207	22 907	-30	-0.1 %
RDC	226 705	140 531	135 207	-532	-0.4 %
TOTAL	398 265	235 834	227 610	-822	- 0,35 %

Source : FAO

En plus du Cameroun, la République Démocratique du Congo et la Guinée – Equatoriale montrent également des taux de déforestation supérieurs à la moyenne régionale. Les zones de recul de la végétation se situent autour des villes, le long des axes routiers ou des pistes d'exploitation. En effet, dans ces régions, la crise économique qui sévit depuis le début des années 1990 et à la forte croissance démographique (2,8% par an), ont entraîné une ruée massive de la population active vers

les campagnes. Ici, on remarque une diversification des stratégies individuelles ou collectives de survie, souvent liées à la nécessité d'affecter toujours plus de terres à l'agriculture vivrière et/ou aux besoins en bois de chauffe pour faire face à la population sans cesse croissante. Aujourd'hui, on estime qu'en une vingtaine d'années, plus de 8 millions d'hectares de forêts originelles ont été défrichées à des fins agricoles et d'habitation dans ces pays faiblement industrialisés. Cette situation est d'autant plus préoccupante que la valeur des services environnementaux rendus par ces « réservoirs de carbone » notamment dans le fonctionnement des cycles biogéochimiques et partant dans l'équilibre du climat, reste encore très mal évaluée dans cette région et commence tout juste à entrer dans la gestion à long terme de ces écosystèmes. Ainsi, la question de savoir comment gérer durablement les ressources végétales dans un contexte de forte croissance démographique et de faible pouvoir d'achat, afin de réduire la vulnérabilité aux changements climatiques, se pose avec acuité.

CONCLUSION

Le système de mousson ouest africain intègre une variabilité interne à l'atmosphère résultant de la dynamique atmosphérique et une variabilité forcée, régie essentiellement par le cycle de l'eau, les conditions de surface (continentale et océanique), ainsi que la chimie atmosphérique. Ce système n'est pas seulement composé d'un flux de sud-ouest dans les basses couches, mais d'un ensemble de conditions géographiques et thermiques générant des circulations spécifiques en surface et en altitude. Ainsi le Jet Tropical d'Est de haute troposphère (150-200 hPa) qui souffle d'est en ouest entre 5°N-10°N de juin à septembre et qui est associé en partie au réchauffement des hautes terres tibétaines et au dégagement de chaleur latente au sein de la mousson indienne illustre la connexion dynamique qui lie mousson indienne et mousson ouest africaine. Ainsi le Jet d'Est Africain des couches moyennes (600 hPa) résulte des gradients thermiques méridiens de surface, qui se renforcent en été boréal sur l'Afrique de l'ouest. Mais le système de mousson africain est aussi et surtout un système multi-échelles comme l'a bien montré le programme international AMMA. Ainsi les systèmes convectifs de méso-échelle conditionnés par les circulations en basse, moyenne et haute troposphère mentionnées ci-dessus, produisent au Sahel jusqu'à 90% des pluies annuelles recueillies dans le pluviomètre (D'Amato & Lebel 1998). Par ailleurs la réduction ou l'augmentation du nombre de ces événements au cours d'une saison des pluies influence fortement la variabilité interannuelle des cumuls saisonniers (LeBarbé & Lebel 1997). Cette variabilité est également influencée par divers facteurs extérieurs à la région, tels que les anomalies de températures de surface marines (Janicot *et al* 1998; Vizy & Cook 2001), ou encore des anomalies de surface continentales et de circulation atmosphérique (Fontaine *et al* 1995; Grist & Nicholson 2001).

Tout au long de cette thèse, nous chercherons à mieux appréhender la variabilité spatio-temporelle des précipitations l'échelle du Cameroun, ainsi que leur interaction avec le couvert végétal naturel et cultivé.

CHAPITRE III

VARIABILITÉ INTERANNUELLE ET SAISONNIÈRE DES PRÉCIPITATIONS AU CAMEROUN ENTRE 1951 ET 2002

Le présent chapitre comporte deux objectifs majeurs : il s'agit premièrement, d'étudier le cycle des précipitations au Cameroun aux échelles annuelles et interannuelles sur la période 1951-2002 et deuxièmement de déterminer les facteurs d'échelle saisonnière qui impriment la variabilité interannuelle des pluies. Pour ce faire, nous utiliserons conjointement des données pluviométriques en points de grille du CRU ainsi que les données aux stations (voir chapitre I). L'avantage des premières est qu'elles sont rendues spatialement continues par l'analyse, moins sensibles aux problèmes d'anisotropie (190 points de grilles sur le Cameroun) et qu'elles présentent une importante profondeur temporelle (données mensuelles sur la période 1901-2002). Les données stationnelles, quant à elles, ont une plus faible couverture temporelle (35 stations irrégulièrement réparties sur le pays) et, bien que potentiellement sujettes à des erreurs systématiques de saisie, elles sont néanmoins plus représentatives de la réalité locale du terrain. Ainsi, la comparaison des résultats issus de ces deux sources complémentaires de données permettra non seulement d'effectuer une analyse différentielle optimale, et donc également de juger de la pertinence d'utilisation de chacune d'elles pour l'étude de la pluviométrie au Cameroun.

Dans un premier temps, seront présentés les régimes moyens des pluies, ainsi que leur évolution spatiotemporelle suivant les principaux domaines pluviométriques du Cameroun établis à partir des données du CRU. Cette approche synthétique permettra d'envisager l'analyse des données aux stations pour :

(i) calculer les indices régionaux et éventuellement les comparer avec les classes identifiées à partir des données du CRU ;

(ii) analyser, pour chaque indice régional, les différentes tendances pluviométriques et éventuellement les ruptures d'homogénéité statistiques dans les séries ;

(iii) étudier la saisonnalité des précipitations afin de mesurer son impact sur la variabilité interannuelle des pluies. Ainsi, une meilleure connaissance du cycle annuel et de la variabilité interannuelle des pluies aidera mieux comprendre la relation entre pluviométrie et végétation dans les prochains chapitres.

I-APERÇU DE LA VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE AU CAMEROUN ENTRE 1901 ET 2002

I-1. Les deux principaux domaines climatiques

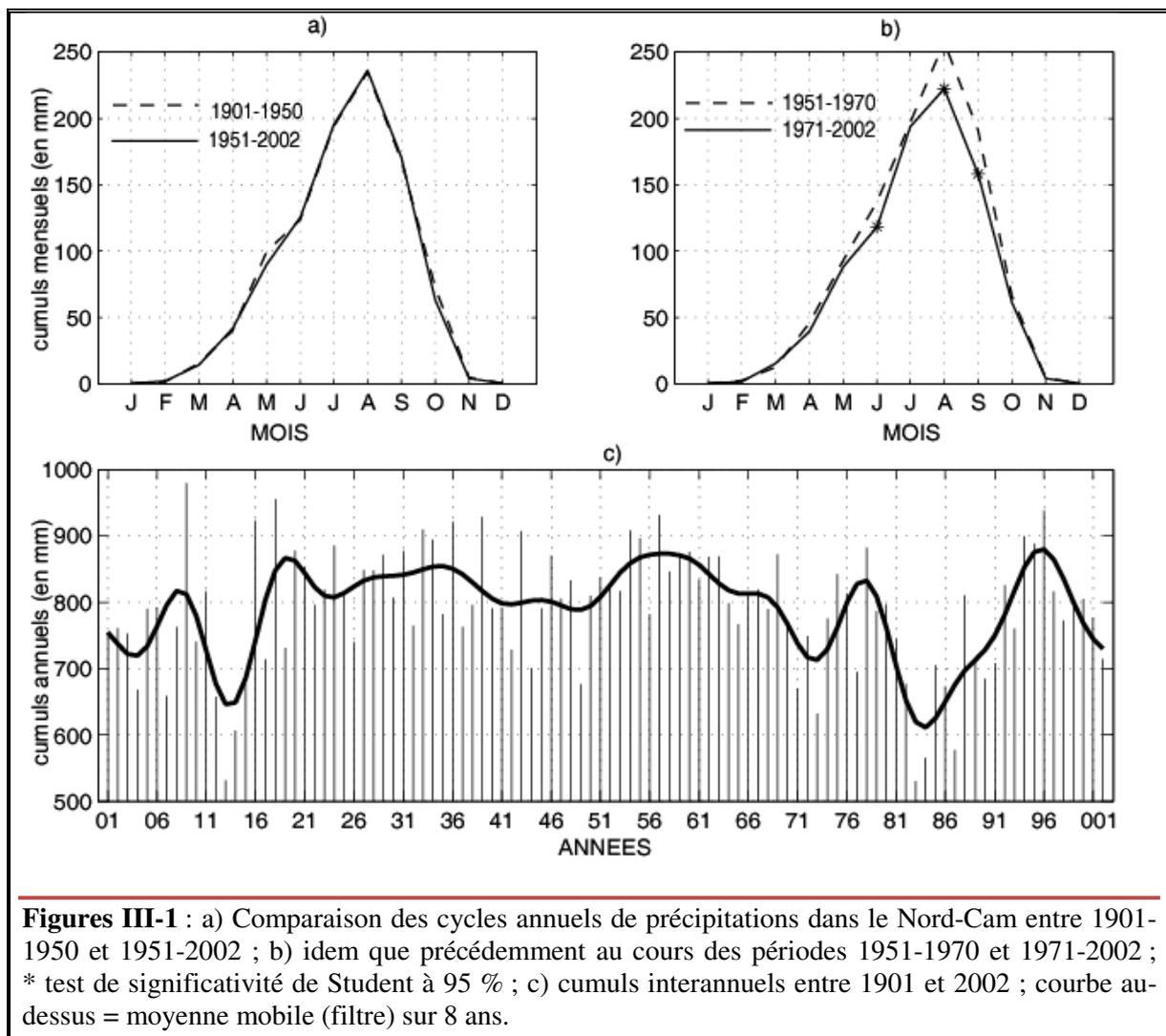
Une bonne connaissance de la structure des champs spatiotemporels de précipitations est un préalable à la compréhension des facteurs de leur variabilité. Pour ce faire, l'on a souvent recours aux indices pluviométriques qui représentent la moyenne arithmétique des précipitations observées dans une division climatique (Rossel *et al.*, 2000). L'on obtient ainsi un vecteur synthétique qui présente la tendance pluviométrique de la zone considérée sous forme compacte et facile à prendre en compte dans les applications.

Au Cameroun, la définition d'un indice pluviométrique s'appuie sur la cohérence spatiale des précipitations suivant la latitude (en relation avec le balancement saisonnier de la ZCIT), qui s'illustre comme le principal facteur discriminant de la répartition des pluies (Suchel, 1987 ; Santiago, 1997 ; Tchiadeu, 2000). La plupart des études font état du partitionnement du territoire en deux grands ensembles. Suivant les auteurs, la zone de transition se situe entre le 6° et le 7° degré de latitude nord. C'est dans ce contexte que le territoire a été préalablement divisé en deux grands ensembles climatiques situés de part et d'autre du 6° parallèle. Il s'agit notamment de la région que nous appellerons « Sud-Cameroun » (ou Sud-Cam dans les graphiques) qui s'étend entre 2°N et 6°N, et le « Nord-Cameroun » (ou Nord-Cam) qui s'étend entre 6°N et 13°N. Toutefois, nous sommes conscient du fait qu'une telle généralisation ne prend pas en compte l'influence des états de surface (gradients altimétriques, effets de crêtes, influence du site) qui sont susceptibles d'engendrer des processus pluviogènes de manière plus localisée. Toutefois, cette

approche nous permettra de nous munir des pré-requis sur la variabilité climatique méso-échelle afin de mieux envisager une régionalisation plus détaillée à partir des données *in situ*.

I-1.1 Premier domaine pluviométrique : le Nord-Cameroun

Les figures III-1 présentent d'une part la variabilité interannuelle des précipitations entre 1901 et 2002 et d'autre part les cycles annuels des pluies comparés au cours de quatre sous-périodes: 1901-1950 et 1951-2002 d'une part (Fig. III-1 a) et 1951-1970 et 1971-2002 d'autre part (Fig. III-1 b). Si la prise en compte des deux premières sous-périodes vise à partitionner l'échantillon en segments de plus ou moins égale longueur, le découpage des deux dernières sous-périodes permet quant à elle de discriminer les particularités pluviométriques de part et d'autre de la rupture climatologique qui est le plus souvent située autour de l'année 1970.



Figures III-1 : a) Comparaison des cycles annuels de précipitations dans le Nord-Cam entre 1901-1950 et 1951-2002 ; b) idem que précédemment au cours des périodes 1951-1970 et 1971-2002 ; * test de significativité de Student à 95 % ; c) cumuls interannuels entre 1901 et 2002 ; courbe au-dessus = moyenne mobile (filtre) sur 8 ans.

Dans le premier domaine climatique (Nord-Cameroun), les cycles annuels présentent un seul mode (Fig. III-1 a, b). La saison des pluies (en prenant en compte les cumuls mensuels supérieurs à 50 mm) s'échelonne *grosso modo* entre les mois de mai et de septembre avec un maximum d'août (~250 mm). En revanche, les mois de décembre, janvier et février présentent des précipitations quasiment nulles. La comparaison des cycles annuels (Fig. III-1 a) des sous-périodes 1901-1950 et 1951-2002 ne montre pas de différence significative au test de Student (95 %).

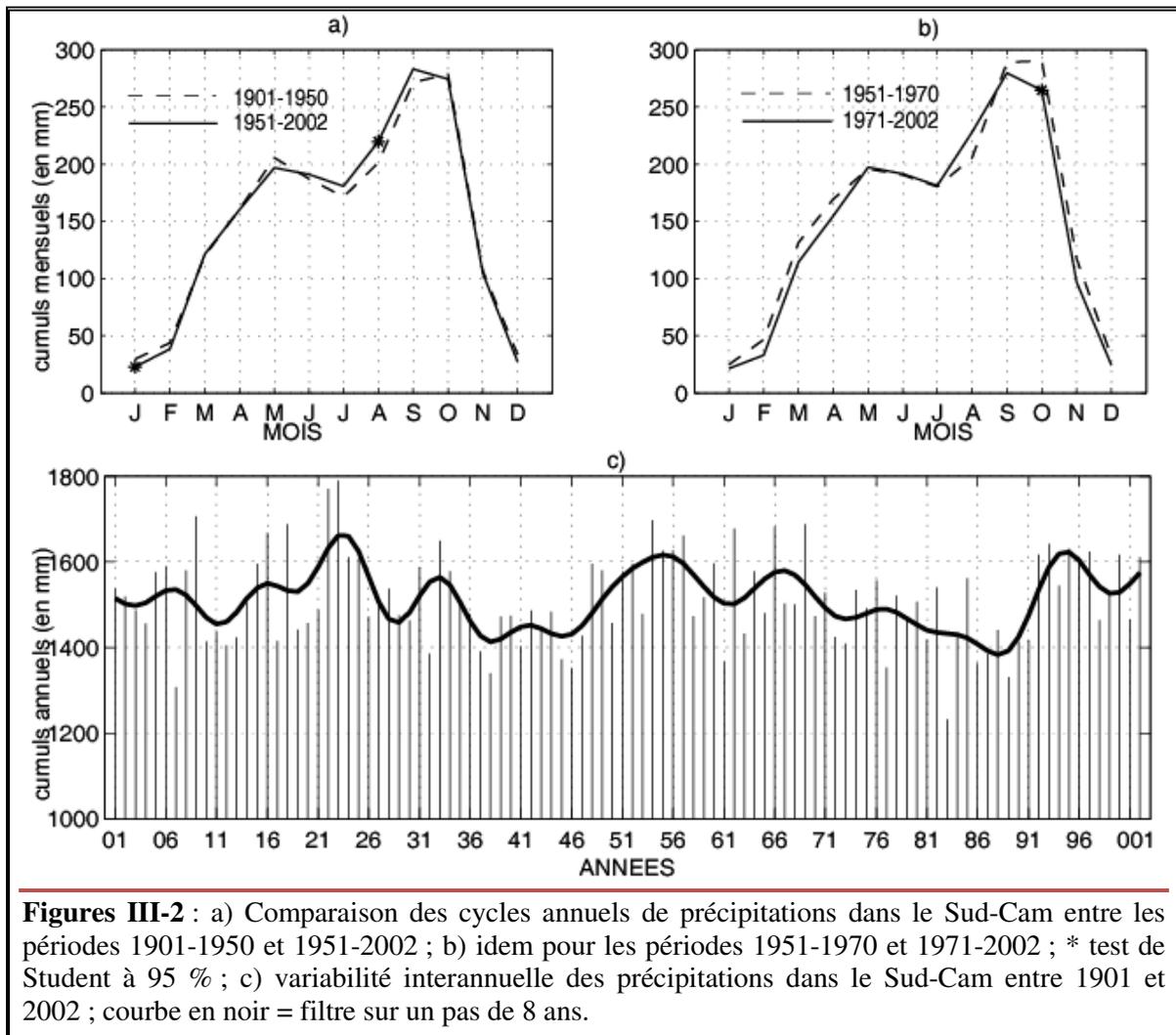
Par ailleurs, lorsque l'on prend en compte les deux dernières sous-périodes (1951-1970 et 1971-2002), il ressort — sans surprise — que c'est la première qui a été plus humide. Les différences significatives au test de Student (95 %) se retrouvent essentiellement aux cours des mois de saison des pluies (juin, août et septembre ; figure III-1 b).

Le cycle interannuel de ce domaine pluviométrique montre que les cumuls oscillent entre 700 et 900 mm (Fig. III-1 c). Les déficits pluviométriques les plus marqués se retrouvent entre les périodes 1912 et 1915 et, dans une moindre mesure, au cours des années 1940, ainsi qu'au début des années 1970 et 1980 comme en témoigne la courbe des moyennes mobiles sur huit ans. Toutefois, les déficits pluviométriques des années 1910 et 1940 sont très souvent associés à un manque de relevés *in situ* pendant la première et la seconde guerre mondiale. En revanche, les courbes des années 1970 et 1980 traduisent effectivement des sécheresses qui ont affecté la plupart des régions du monde et qui ont largement été mises en évidence dans de nombreuses études.

I-1.2. Deuxième domaine pluviométrique : le Sud-Cameroun

Dans le Sud-Cameroun (sud du 6° parallèle), le profil pluviométrique présente deux maxima, en mai (~200 mm) et en octobre (~300 mm). Les cycles annuels des périodes 1901-1950 et 1951-2002 montrent des différences significatives, essentiellement au mois d'août (Fig. III-2 a). De même, pour les sous périodes 1951-1970 et 1971-2002, le test de Student (95 %) signale une différence significative au mois d'octobre (Fig. III-2 b). Tout comme dans la précédente région, c'est la période 1951-1970 qui a été le plus humide, mais les différences significatives au test de Student sont restreintes au mois d'octobre.

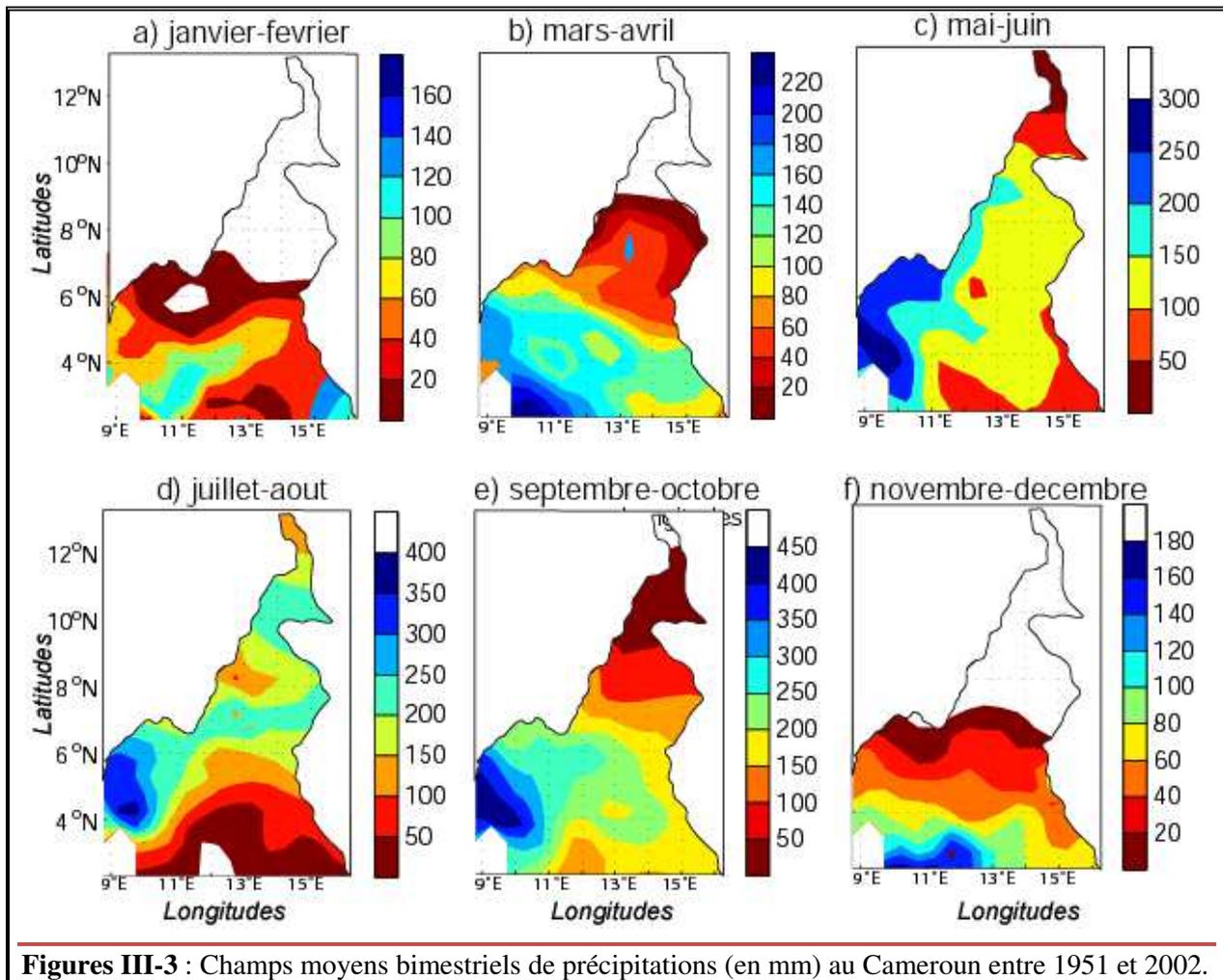
Les cumuls interannuels (Fig. III-2 c) oscillent essentiellement entre 1400 et 1 600 mm. La baisse anormale des années 1910 et 1940 est tout aussi apparente ici, même si elle est moins marquée par rapport à celle du Nord-Cameroun. La courbe des moyennes mobiles lissées sur huit ans montre également un fléchissement important des pluies au cours des années 1980, puisque c'est pendant cette période que les cumuls descendent pour la plupart en dessous de 1 400 mm.



Ces deux principaux régimes pluviométriques (unimodal et bimodal) en vigueur au Cameroun sont étroitement liés à la saisonnalité du climat, en relation avec le balancement de la ZCIT ainsi qu'avec les processus liés à la mousson africaine. Dans la prochaine section, nous décrivons la répartition spatiale de la pluviométrie à l'échelle saisonnière au Cameroun, à partir des données moyennées sur la période 1951-2002.

I-2. Cycle saisonnier des précipitations au Cameroun entre 1951 et 2002

Les figures III-3 présentent la répartition spatiale des pluies bimestrielles (cumulées tous les deux mois), calculée à partir des données du CRU sur la période 1951-2002. Ainsi, le bimestre janvier-février représente la période la moins pluvieuse sur l'ensemble du pays (Fig. III-3 a). Les précipitations sont quasiment nulles au nord du 7^e parallèle alors qu'elles sont inférieures à 60 mm au sud de cette latitude. Seule la pointe sud-ouest du pays reçoit des pluies supérieures à 60 mm.



Figures III-3 : Champs moyens bimestriels de précipitations (en mm) au Cameroun entre 1951 et 2002.

Au cours des mois de mars et avril (Fig. III-3 b), les pluies remontent jusqu'au 9^e parallèle mais restent faibles (< 50 mm). Les isohyètes 160, 180 et 200 mm balayent toute la frange littorale suivant une trajectoire nord-ouest/sud-est. Partout ailleurs dans le sud du pays, les moyennes restent supérieures à 80 mm. Au cours des mois de mai et juin, les pluies se généralisent sur l'ensemble du pays. Toutes les régions reçoivent au moins 50 mm de pluies mais la région côtière reste la plus humide, avec des moyennes pluviométriques qui atteignent 300 mm. Pendant ce temps, le nord du 10^e parallèle et le sud-est du pays sont les plus faiblement arrosés. C'est aussi au cours de ce bimestre que le gradient zonal de la répartition des pluies est le plus accentué.

Au cours des mois de juillet et août, tout le nord du pays reçoit au moins 200 mm de pluies, alors que la baisse des pluies s'accroît dans le sud du pays suivant une trajectoire sud-ouest/sud-est : les moyennes pluviométriques sont inférieures à 100 mm et certaines régions enregistrent moins de 50 mm. Toutefois, cette situation ne perdure pas, puisqu'entre les mois de septembre et d'octobre, la région reçoit ses plus forts cumuls annuels. La moyenne pluviométrique est alors supérieure à 200 mm mais reste en dessous des chiffres enregistrés sur la frange littorale (> 400 mm). À cette période de l'année, la pointe nord du pays reçoit moins de 50 mm alors que l'isohyète 100 mm est redescendue

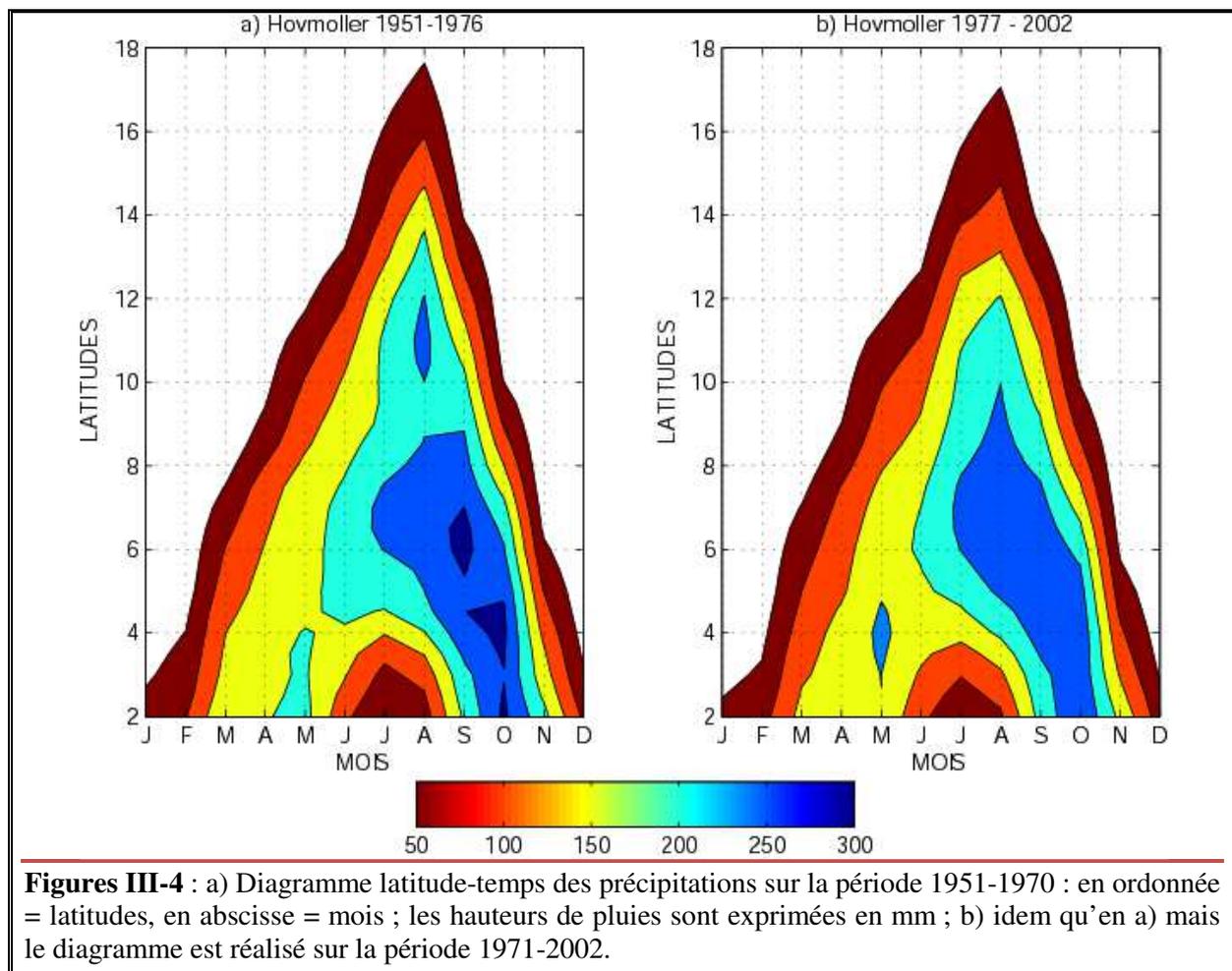
jusque vers 8°N. Cette baisse pluviométrique s'accroît au cours du dernier bimestre de l'année, où seul le sud de 4°N reçoit encore des moyennes supérieures à 100 mm.

1-2-1. Le diagramme latitudes/temps

Une autre approche pour appréhender l'organisation spatiotemporelle des précipitations consiste à étudier les diagrammes de Hovmöller, encore appelés diagrammes *latitudes-temps* ou *longitude-temps*. Ceux-ci permettent de visualiser la propagation de certains phénomènes périodiques dans le temps et l'espace. Ils sont utilisés ici dans le but d'apprécier l'organisation spatiale des précipitations sur la fenêtre du Cameroun à l'échelle mensuelle. Notre test est effectué sur les champs pluviométriques des périodes 1951-1970 et 1971-2002.

Les diagrammes latitudes-temps mettent en évidence :

- un régime pluviométrique bimodal entre 2°N et 4°N : ici sont bien individualisées la première saison des pluies entre les mois de mars à juin, où les moyennes mensuelles sont comprises entre 150 et 200 mm, et la deuxième saison des pluies qui s'échelonne entre les mois de septembre à novembre, avec des hauteurs mensuelles supérieures à 250 mm.



Entre ces deux intersaisons, l'on perçoit une petite trêve entre les mois de juillet-août que Suchel (1987) a dénommé *minimum d'été boréal* au cours de laquelle les précipitations fléchissent en intensité, mais restent toutefois supérieures à 50 mm. La durée de cette petite saison des pluies diminue au fur et à mesure que l'on va vers les latitudes plus septentrionales et s'efface dès que l'on franchit la latitude 5°N ;

- une seule saison sèche (novembre-mars) entre 4°N et 6°N, mais c'est effectivement entre décembre et février que les moyennes mensuelles sont inférieures à 50 mm. Le maximum pluviométrique (300 mm) se situe en septembre ;

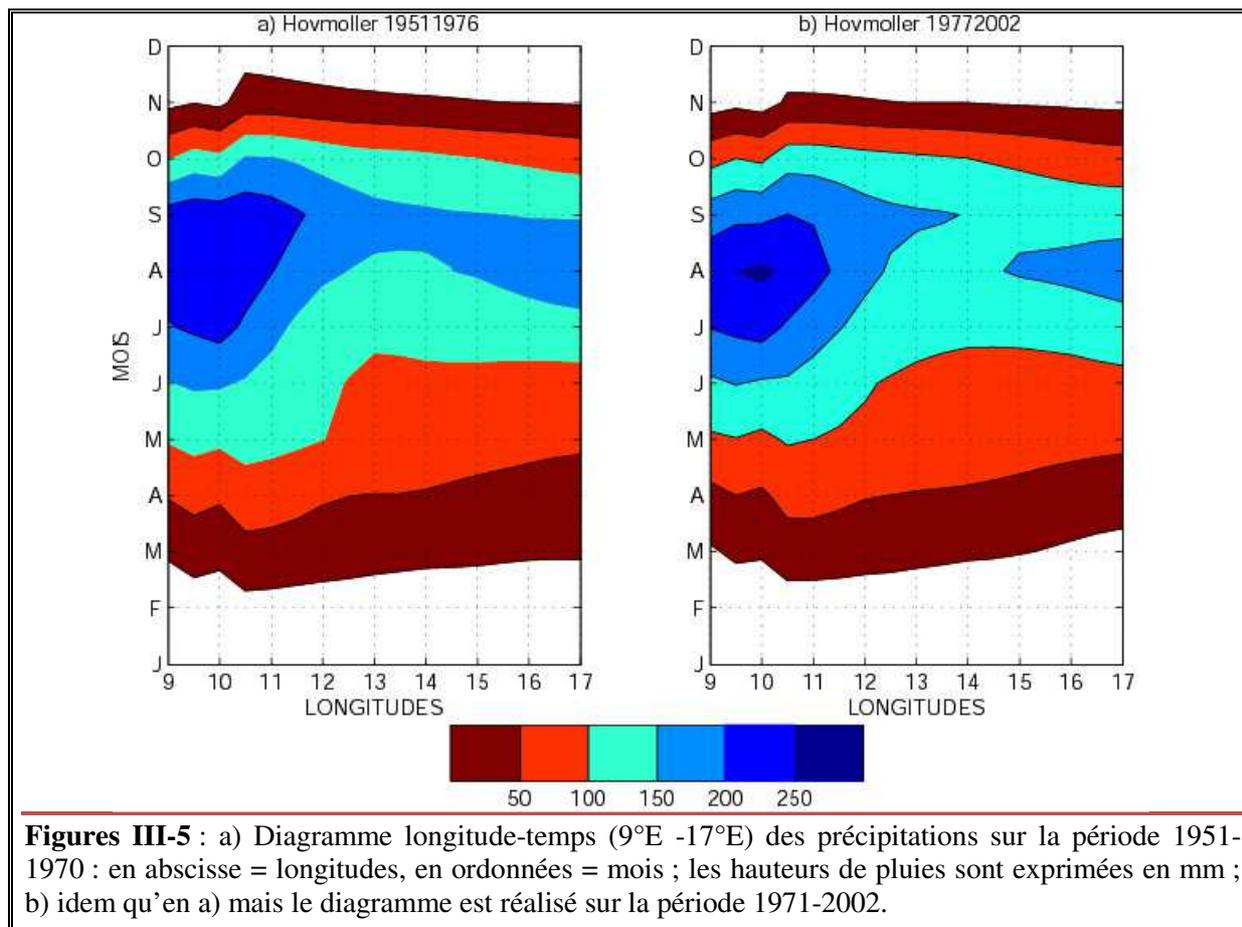
- Un régime unimodal bien affirmé au nord du 6° parallèle. Le nombre de mois avec $P > 100\text{mm}$ s'amenuise au fur et à mesure que l'on va vers les latitudes plus septentrionales mais, dans l'ensemble, le maximum pluviométrique se situe au mois d'août. À partir de 13°N, toutes les moyennes pluviométriques sont inférieures à 200 mm et la saison des pluies s'échelonne seulement entre juin et septembre.

Par ailleurs, la comparaison des deux périodes (Fig. III-4 a et b) confirme qu'au sud de 4°N, la petite saison des pluies a été plus humide au cours de la période 1971-2002 : les cumuls mensuels sont inférieurs à 250 mm au cours de la grande saison des pluies qui, elle, s'est déportée entre la mi-août et la mi-octobre, ce qui est en adéquation avec l'analyse précédente (Fig. III-2 b). Au nord de 11°N, l'on remarque que, si le déroulement des saisons n'a pas changé, les précipitations ont cependant baissé en intensité au cours de la deuxième période puisque, comparativement à la première période, aucun mois n'enregistre plus de 200 mm de pluie.

I-2-2. Le diagramme longitudes/temps

Le diagramme de Hovmöller (longitude/temps) met en relief, quant à lui, une organisation zonale du cycle annuel sur la fenêtre du Cameroun (Fig. III-5). Il en ressort une diminution des précipitations d'ouest en est qui se traduit par une baisse du nombre de mois avec $P < 100\text{ mm}$, au fur et à mesure que l'on va vers les régions plus continentalisées.

Ainsi, entre 9°E et environ 12°E, la saison des pluies ($P > 50\text{ mm}$) s'échelonne entre les mois d'avril et d'octobre. Les cumuls mensuels croissent d'environ 50 mm par mois et atteignent leur maximum entre juillet et septembre (250 mm). À l'est du 12° méridien, le maximum pluviométrique s'abaisse d'environ 50 mm, comparativement aux régions situées à l'ouest.



À ces longitudes, seul un mois (entre août-septembre) enregistre des hauteurs supérieures à 200 mm. Le nombre de mois où les hauteurs sont comprises entre 100 et 150mm est passé de six à l'ouest du 12^e méridien à quatre à l'est de cette longitude. Par ailleurs, la comparaison des deux périodes confirme le déficit pluviométrique de la période 1971-2002 par rapport à celle de 1951-1970, même si l'on note une recrudescence des pluies au cours du mois d'août vers 10°E.

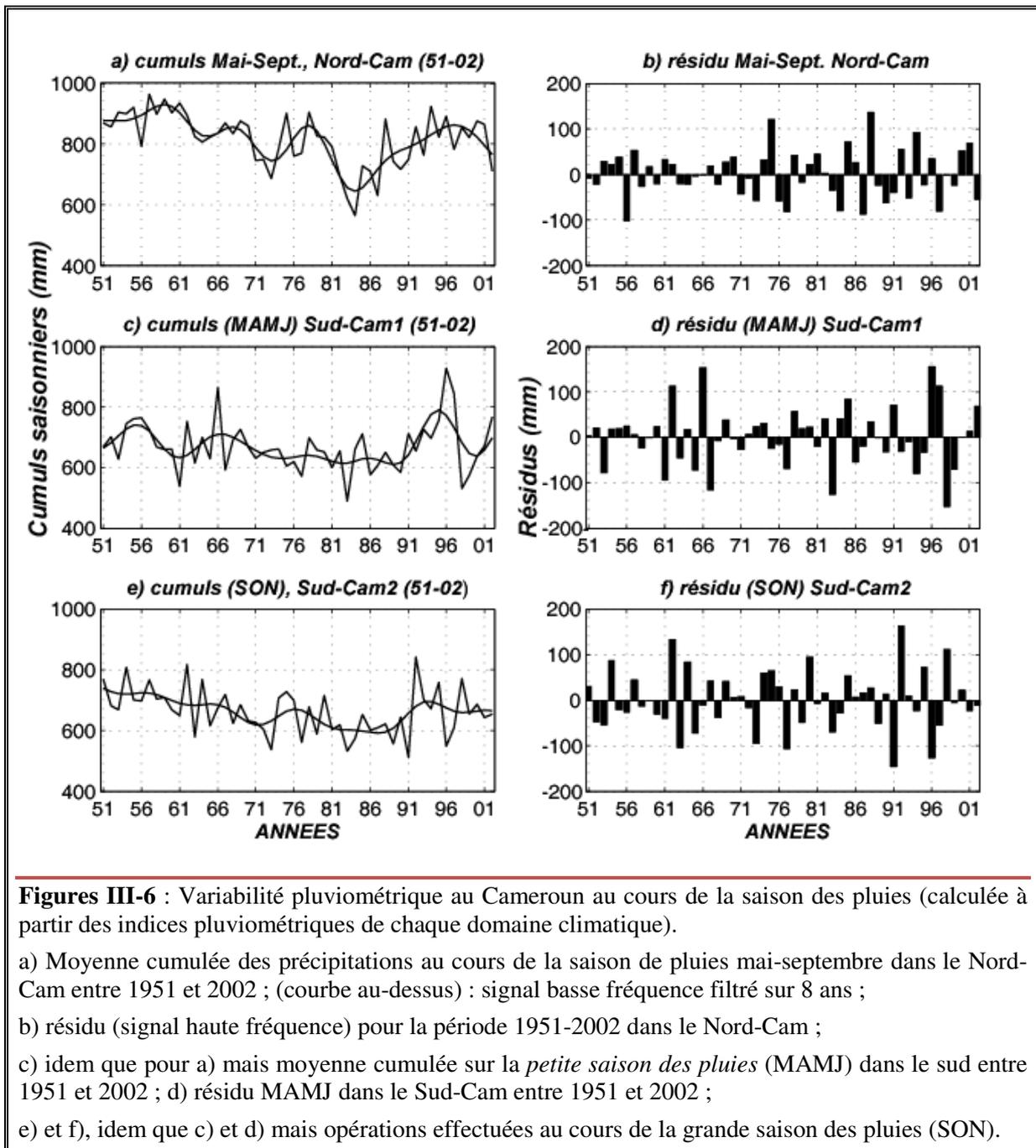
De manière générale, l'influence des gradients zonaux dans la répartition des pluies est faible au Cameroun et s'affirme essentiellement au sud de 4°N. Ce gradient ouest/est traduit essentiellement les contrastes entre régions côtières et régions continentales d'une part, et entre régions de plaine et régions au relief plus accusé (plateaux, cuvettes) d'autre part, par rapport aux flux océaniques. En revanche, un consensus est établi sur l'importance de la latitude dans la répartition des régimes pluviométriques en Afrique centrale et notamment au Cameroun. Maloba Makanga (1998) montre que sur la période 1951-1993, la latitude explique en Afrique équatoriale atlantique près de 60 % de la variance commune des pluies en juin, 36 % en juillet et 39 % en août. La variabilité du système de mousson (ZCIT, FIT, JEA, air de mousson) explique davantage le décalage pluviométrique entre les régions de hautes et de basses latitudes, et le double passage de la ZCIT impose à ces dernières régions un régime à quatre saisons (Fig. III-3).

I-3. Variabilité des précipitations au cours de la saison des pluies: observations, filtre et résidu

Si l'on souhaite comprendre les mécanismes qui sous-tendent les tendances observées au cours de la période 1951-2002, il est nécessaire d'accorder une attention particulière aux modulations d'amplitude saisonnière. En effet, les études précédentes ont montré que l'essentiel de la variabilité interannuelle en Afrique centrale s'effectue dans le domaine de très hautes fréquences d'échelle saisonnière, entre six et douze mois (Bigot *et al.*, 1997). Si les résultats précédents ne traduisent qu'une vision globale et synthétique de la répartition des pluies au Cameroun, elles montrent néanmoins que l'essentiel des changements entre différentes périodes s'est opéré au cours de la saison des pluies. Ainsi, nous avons effectué une analyse plus focalisée sur les saisons pluvieuses (qui enregistrent l'essentiel de la pluviométrie annuelle) suivant les deux ensembles climatiques décrits plus haut. La méthode de filtrage utilisée ici est de type Butterworth (1930) qui permet, mieux que les moyennes mobiles, de décomposer le signal saisonnier en récupérant les résidus, avec une atténuation de l'artefact aux extrémités. En effet, sachant que les données pluviométriques sont malheureusement entachées d'erreurs qui tiennent autant au caractère individuel de la mesure qu'aux défauts pouvant intervenir dans le système (site, erreurs systématiques de lecture, de transmission ou d'enregistrement, etc.), cette approche permet de s'affranchir des erreurs susceptibles d'induire des biais dans l'analyse et l'interprétation des données. Des corrections permettent de ce fait d'extraire le signal climatique en supprimant au mieux cet effet de poste. Le signal haute fréquence lié à l'effet de poste (ou résidu) présente des amplitudes proportionnelles à la cohérence entre le scénario et la mesure : plus (moins) la valeur du résidu est proche de zéro et plus (moins) il y a une bonne cohésion entre le scénario et la mesure.

Rappelons qu'en général le seuil minimum retenu pour différencier les mois de saison des pluies de ceux de saison sèche est 50 mm. Si ce seuil semble faible pour la partie méridionale du pays plus humide, elle permet d'équilibrer avec la partie septentrionale pour donner à la moyenne générale du pays un chiffre proche de la relation de Gaussen qui est égale à $P = 2 T$. Ainsi, dans le Nord-Cameroun, nous délimitons la saison des pluies entre les mois de mai et septembre alors que dans la partie méridionale à profil bimodal, la première saison des pluies (petite) va de mars à juin (MAMJ) et la seconde (grande) s'étend entre les mois de septembre et novembre (SON). Les planches a, c et e des figures III-6 présentent la variabilité des précipitations au cours de ces différentes saisons des pluies dans les deux domaines pluviométriques du Cameroun et les planches b, d et f des mêmes figures montrent les résidus filtrés des observations.

Il ressort que, dans le Nord-Cameroun, le profil saisonnier se calque à peu près sur la variabilité interannuelle (Fig. III-1 c), traduisant peut-être le fait que ce sont les mois de saison des pluies (mai-septembre) qui alimentent l'essentiel du cumul annuel (nous y reviendrons plus en détail dans les prochaines sections).



Les cumuls saisonniers s'échelonnent *grosso modo* entre 600 et 950 mm, mais le signal basse fréquence filtré sur huit ans matérialise trois périodes de baisse pluviométrique d'intensités croissantes : elles ont lieu respectivement au début des années 1960, 1970 et 1980. Les périodes humides se retrouvent quant à elles au cours des années 1950, à la fin des années 1960 et 1970 et pendant la période post-1985, bien que l'on signale une diminution des pluies à partir de l'année 1999. Toutefois, ce sont les cumuls enregistrés au cours des années 1950 qui restent les plus importants.

En domaine bimodal (Sud-Cameroun), les cumuls saisonniers de la saison mars-juin fluctuent autour de 700 mm : les pics les plus importants se situent en 1966 (870 mm)

et en 1996 (> 953 mm), alors que les plus grands déficits se trouvent en 1961, 1982 et 1998. Toutefois, la particularité de ces années extrêmes est leur caractère isolé. Le signal basse fréquence de cette saison présente une variabilité de moindre amplitude jusqu'au courant des années 1990 où l'on enregistre une hausse de plus de 200 mm.

La grande saison des pluies (septembre-novembre) dans le Sud-Cameroun est marquée par une variabilité dont les amplitudes oscillent entre 600 et 800 mm (Fig. III-6e). Tout comme lors de la petite saison des pluies, les cumuls saisonniers d'une année à une autre ne dépassent pas 100 mm sur la période d'avant 1990. En effet, c'est au cours des années 1990 que l'on note les amplitudes interannuelles les plus importantes mais la courbe lissée présente une tendance à la hausse.

Les signaux hautes fréquences (résidus) des saisons de pluies dans les différents domaines pluviométriques (Fig. III-6 b, d, f) présentent une alternance d'anomalies positives et négatives qui apparaît environ tous les deux ou trois ans. Ce signal a été retrouvé dans plusieurs régions du monde, notamment en Afrique de l'Ouest, de l'Est (Indeje *et al.*, 2000), en Inde (Frédolin *et al.*, 2001 ; Chattopadhyay *et al.*, 2002) et en Europe (Brazdil *et al.*, 1995). Il est très souvent associé à l'oscillation quasi biennale qui est une oscillation quasi périodique de la composante zonale des vents stratosphériques dans la ceinture équatoriale.

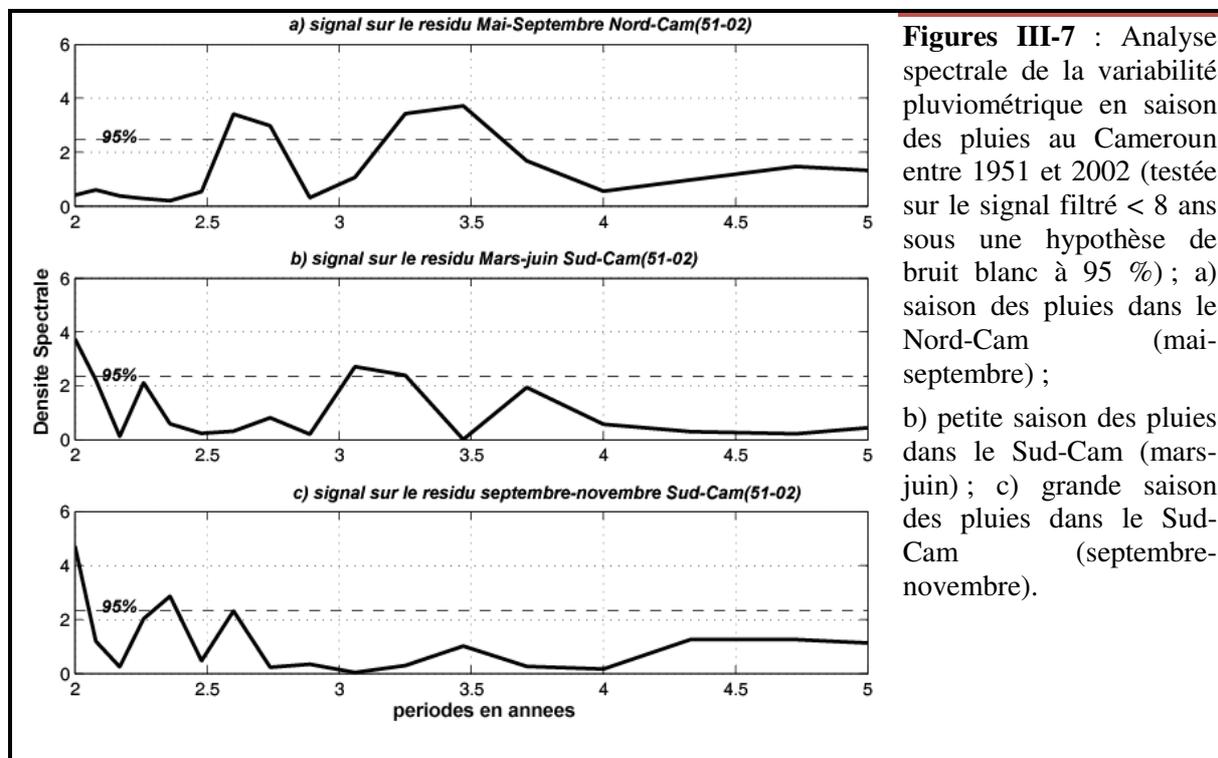
I-4) Analyse spectrale à l'échelle saisonnière

Dans le but de discriminer la variabilité basse fréquence (c'est-à-dire supérieure à huit ans donc quasi décennale et au-delà) de la variabilité inférieure à huit ans au cours de la saison des pluies dans le nord et le sud du Cameroun, nous avons extrait des observations, le signal haute fréquence pour effectuer l'analyse spectrale et juger de la significativité avec un test de bruit blanc à 95 %. Cette analyse nous a permis de rechercher les variations cycliques et de déterminer les caractéristiques du signal pluviométrique ainsi que de son intensité en fonction du temps.

Le signal saisonnier (mai-septembre) dans le Nord-Cameroun met en évidence deux pics significatifs : le premier cycle apparaît entre 2,5 ans et 3 ans et le second, tous les 3,5 ans environ (Fig. III-7 a). Dans le sud du pays, la première saison des pluies (mars-juin) affiche un cycle de 2 ans et un second cycle entre 3 ans et 3,5 ans (Fig. III-7 b).

La deuxième saison des pluies quant à elle (septembre-novembre) présente des pics significatifs à 2 ans et entre 2 ans et 2,5 ans environ (Fig. III-7 c). Les cycles d'environ deux ou trois ans suggèrent des modes oscillatoires à rapprocher avec des phénomènes quasi biennaux tels que perçus dans les résultats précédents. Ceux-ci sont associés à une inversion du régime des vents qui affectent les courants de la zone équatoriale de part et d'autre de l'équateur jusqu'au 12° parallèle, tous les vingt-quatre à trente mois environ.

Dans le nord du pays, on a des cycles plus longs allant de deux ans et demi à plus de trois ans. Ces résultats sont en adéquation avec ce qu'ont démontré d'autres études en Afrique équatoriale et australe où il a été signalé des périodicités significatives dans les bandes de 2,2-2,4 ans ; 2,6-2,8 ans ; 3,3-3,8 ans et 5-6,3 ans (Nicholson *et al.*, 1986).



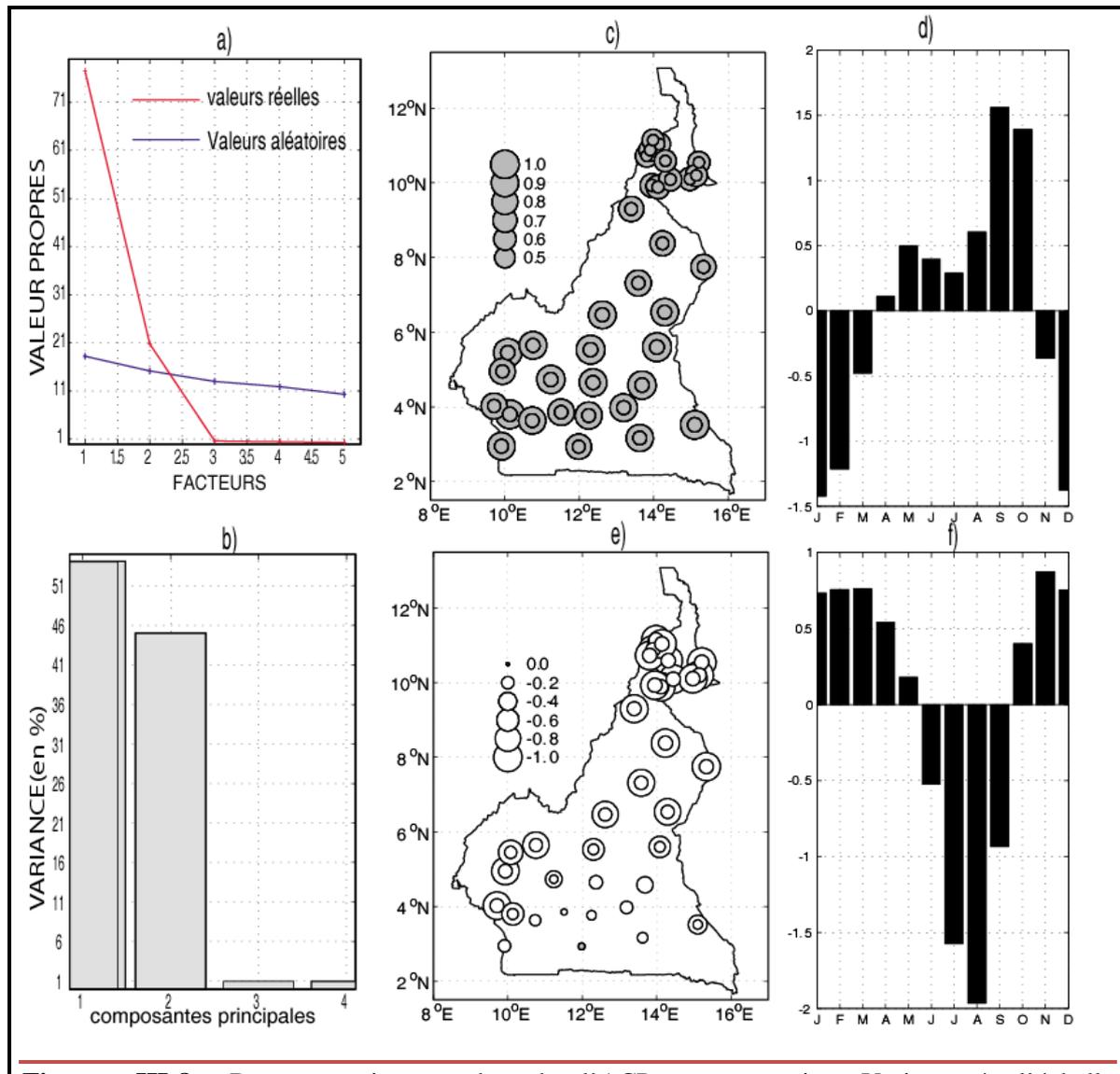
Si les cycles de 2,2 à 2,8 ans sont souvent associés à l'oscillation quasi biennale, il demeure que ses mécanismes ne sont pas encore parfaitement connus. En effet, les résultats peuvent être influencés par la longueur des séries utilisées et des caractéristiques physiques et dynamiques propres à chaque région (Nicholson, 1989). Ainsi, si cette approche nous a permis d'avoir une vision d'échelle large de l'organisation des précipitations sur le territoire camerounais, de leur tendance et de leur périodicité sur la période 1951-2002, il demeure qu'elle ne peut être conduite sans de grandes précautions. Il est donc nécessaire de désagréger l'espace *via* des techniques de régionalisation afin de prendre en compte l'influence des anomalies locales.

II- STRUCTURES SPATIO-TEMPORELLES DES PRÉCIPITATIONS DU CAMEROUN

II-1. A partir des méthodes factorielles (ACP)

Dans le but de déterminer les principaux modes de variabilité des précipitations au Cameroun et de mettre en relief les régions cohérentes en anomalies, une ACP avec rotation Varimax est effectuée sur les stations du Cameroun aux échelles annuelles et

interannuelles. Pour ce faire, il a été pris en compte exclusivement les trente-cinq stations qui présentaient les données complètes sur la période 1951-2002.



Figures III-8 : Deux premiers modes de l'ACP avec rotation Varimax à l'échelle annuelle représentant 54 % et 45 % de la variance commune respectivement : a) nombre de facteurs à extraire à partir de l'analyse parallèle de Humphrey-Ilgén ; b) scree-test ; (c, e) : deux premiers vecteurs propres de l'ACP (avec rotation Varimax) en unités de coefficient de corrélation, cercles proportionnels : en gris = corrélations positives, en blanc = corrélations négatives, doubles cercles = corrélations significatives au test de Pearson à 95 % ; (d, f) : deux premières composantes principales normalisées.

II-1-1. L'échelle annuelle

À l'échelle annuelle, l'analyse parallèle de Humphrey-Ilgén (Fig. III-8) nous autorise à retenir seulement deux ou trois facteurs pour effectuer l'ACP alors que le scree-test nous recommande essentiellement les deux premiers modes : le premier mode de l'ACP représente 54 % de la variance commune. Le premier vecteur propre

(Fig. III-8 c) présente de fortes corrélations ($> 0,5$) sur l'ensemble des stations du Cameroun. Les valeurs de corrélations sont d'ailleurs toutes significatives au test de Bravais Pearson à 95 %. La première composante associée, montre un régime annuel bimodal, caractéristique des régions équatoriales, avec les deux intersaisons de l'année qui sont bien matérialisées.

Le deuxième mode de l'ACP (45 % de la variance commune) oppose quelque peu les stations du domaine équatorial et les stations du nord du pays : les valeurs de corrélations sont inférieures à 0,41 dans les stations équatoriales alors qu'elles sont supérieures à 0,61 dans les autres stations du réseau ($> 0,81$ dans les stations du nord). Par ailleurs, ces dernières sont toutes significatives au test de Pearson (95 %), contrairement aux stations équatoriales (Fig. III-8 e). La composante principale associée à ce deuxième mode montre une opposition saisonnière entre les mois de juin à septembre (plus prononcée entre juillet et août) et les autres mois de l'année, mettant ainsi en relief d'une part, une opposition entre le minimum d'été boréal (petite saison des pluies) du domaine équatorial et d'autre part, le maximum pluviométrique des stations du nord au cours de ces mois (Fig. III-8 f).

II-1-2. L'échelle interannuelle

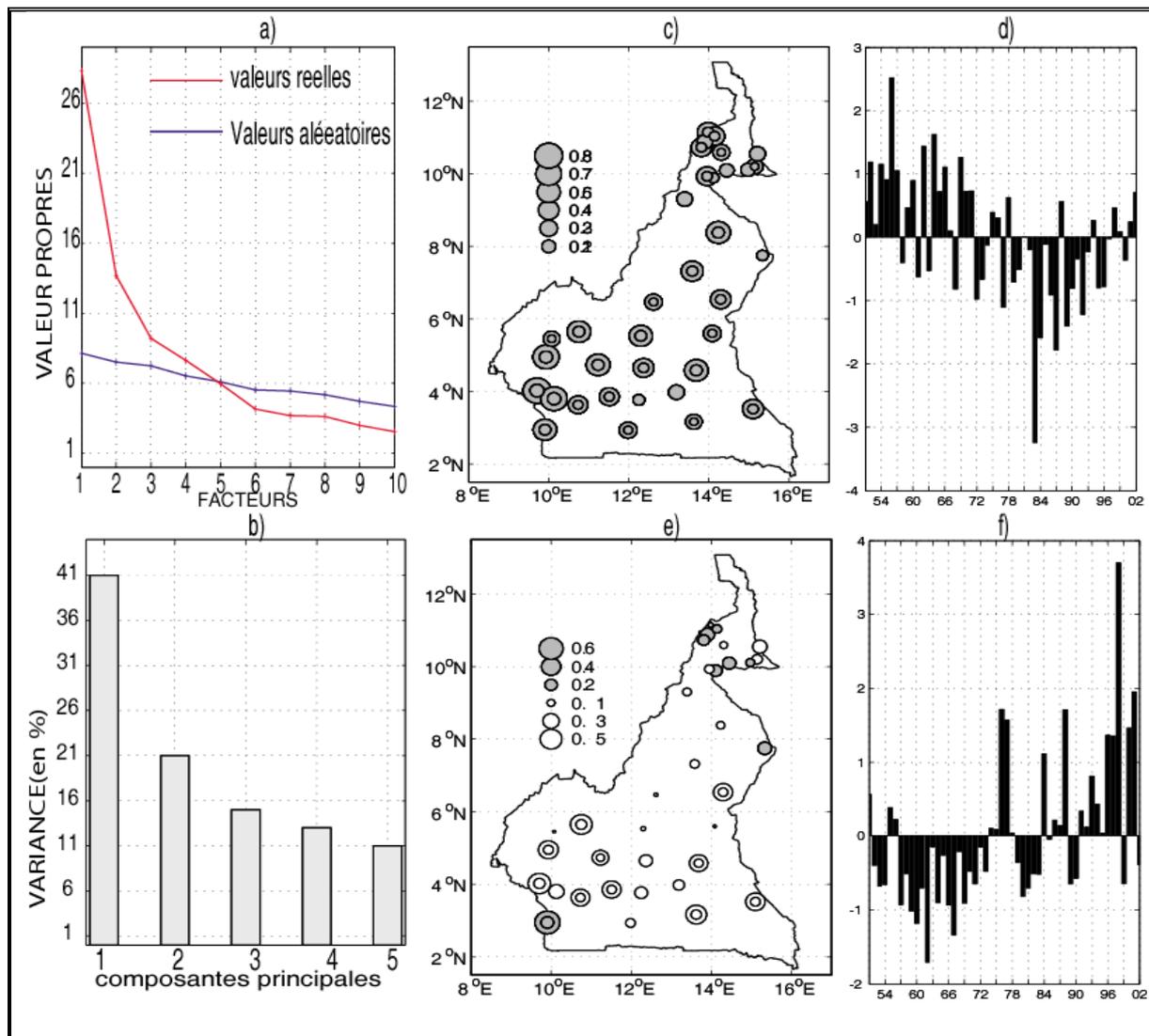
Il a été retenu cinq facteurs pertinents pour le calcul de l'ACP avec rotation Varimax à l'échelle interannuelle, tel que préconisé par l'analyse parallèle de Humphrey-Ilggen (Fig. III-9 a).

Le scree-test autorise en prendre en compte les trois premiers modes de l'ACP (Fig. III-9 b). Mais, afin de d'éviter des analyses redondantes, nous ne prendrons en compte que les deux premiers modes représentant 62 % de la variance commune.

Le premier vecteur propre de l'ACP (41 %) montre que toutes les stations du pays sont corrélées positivement (Fig. III-9 c). Cependant, les plus fortes valeurs de corrélations ($> 0,6$) se situent essentiellement dans les stations du sud et, notamment, celles du littoral. Le test de Pearson à 95 % est significatif, à quelques exceptions près, autant pour les stations du nord que pour celles du sud. La composante temporelle quant à elle (Fig. III-9 d) décrit des anomalies positives entre le début de la période et la fin des années 1960. Les anomalies négatives, quant à elles, se retrouvent essentiellement après l'année 1970, quoique plus renforcées au cours de l'année 1983.

Le deuxième mode de l'ACP avec rotation (21 % de la variance commune) présente des valeurs de corrélations moins fortes par rapport au premier mode (Fig. III-9e). Ici, les plus importantes valeurs de corrélations (en valeur absolue) se retrouvent dans le sud du pays alors que les plus faibles valeurs intéressent essentiellement les stations des hautes terres de l'ouest et de l'Adamaoua, ainsi que les stations du nord. Seule la station côtière de Kribi se détache par une valeur de corrélation

égale à 0,6. Par ailleurs, le test de Pearson est significatif essentiellement pour des stations australes. La chronique temporelle associée à ce mode (Fig. III-9f) est quelque peu opposée à la première composante principale. Elle décrit en effet des anomalies négatives en début de période jusqu'à la moitié des années 1980 avec, toutefois, les années 1975 à 1977 qui se distinguent par des anomalies positives. Le reste de la période est marqué essentiellement par des anomalies positives, avec l'année 1998 qui se distingue par un excédent pluviométrique marqué.



Figures III-9 : ACP sur les pluies interannuelles au Cameroun entre 1951 et 2002 : a) nombre de facteurs à extraire à partir de l'analyse parallèle de Humphrey-IIgen ; b) scree-test ; (c, e) : deux premiers vecteurs propres de l'ACP (avec rotation Varimax) en unités de coefficient de corrélation, cercles proportionnels : en gris = corrélations positives, en blanc = corrélations négatives, doubles cercles = corrélations significatives au test de Pearson à 95 % ; (d, f) : deux premières composantes principales normalisées représentant 41 % et 21 % de la variance commune respectivement.

En somme, la régionalisation des précipitations par l'ACP à l'échelle annuelle met en relief les régimes unimodal et bimodal du Nord et de Sud du Cameroun, ce qui permet

de confirmer que le cycle annuel est un facteur discriminant dans la répartition spatiale des pluies au Cameroun. L'échelle interannuelle ce sont les tendances excédentaires et déficitaires situées avant et après les années 60 qui prédominent, même si le deuxième mode signale une persistance d'anomalies négatives entre 1957 et 1972 (Fig. III-9f). Celle-ci est inversement corrélée à la plupart des stations situées au sud de l'Adamaoua, à l'exception de Kribi. Cette extension spatiale des anomalies négatives a d'ailleurs été retrouvée par Samba-Kimbata (1991) sur le bassin congolais.

Ces résultats devraient toutefois être relativisés dans la mesure où une corrélation spatiale est étroitement associée à la forme du domaine géographique. En effet, la distribution géographique des stations attribuées à une composante principale n'est pas aléatoire car celles-ci sont groupées ensemble géographiquement (proches voisins). Mais il peut arriver que certaines stations soient détectées soit parce qu'elles sont reliées par une composante différente de celle qui caractérise la région où elles se situent, soit parce que leur coefficient de corrélation avec une composante autre que celle qui caractérise la région est relativement important. Ainsi, l'inégale distribution du réseau de stations est susceptible d'engendrer des biais, surtout dans le nord du pays où les stations sont plus regroupées. De plus, notre objectif étant de travailler sur des structures spatiales fines, le partitionnement de la zone d'étude en deux sous-ensembles (unimodal/bimodal) nous semble insuffisant pour mieux saisir ses particularités pluviométriques. C'est ce qui justifie les sections suivantes dans lesquelles l'on expérimentera une autre méthode de régionalisation, qui sera appliquée simultanément sur des données de précipitations du CRU et celles aux stations. La prise en compte des données régulièrement distribuées (CRU) permettra de mieux saisir l'évolution spatiale des précipitations au cours de la période et de juger de leur pertinence pour la régionalisation des précipitations au Cameroun.

II-2. Régionalisation des précipitations au Cameroun à partir de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

La CAH diffère des autres méthodes d'agrégation par sa capacité à minimiser les variations de l'inertie intra-classe qui apparaissent lorsqu'on agrège deux éléments (voir chapitre I). De plus, par rapport aux analyses factorielles précédentes, il s'agit cette fois de comparer les résultats provenant de deux sources de données (observations CRU et pluies aux stations) afin d'analyser les structures spatiotemporelles synchrones de manière plus efficace. La classification par la CAH des précipitations provenant de ces deux types de données, s'est effectuée sur le cycle annuel et la variabilité interannuelle : chacune des 35 stations comporte 624 données, représentant le produit des douze mois annuels par les cinquante-deux années de l'étude (1951-2002), et idem pour chaque point de grilles du CRU (384 points répartis en 24 latitudes et 16 longitudes). Il est important de noter que ces données sont désaisonnalisées, c'est-à-dire que pour chaque jour/mois (selon la base

de données) l'on extrait la moyenne de ce jour calculée sur toute la période. Comme critère d'agrégation entre les classes, il a été retenu celui de *Ward* qui, comme l'ACP, est basé sur la notion d'inertie.

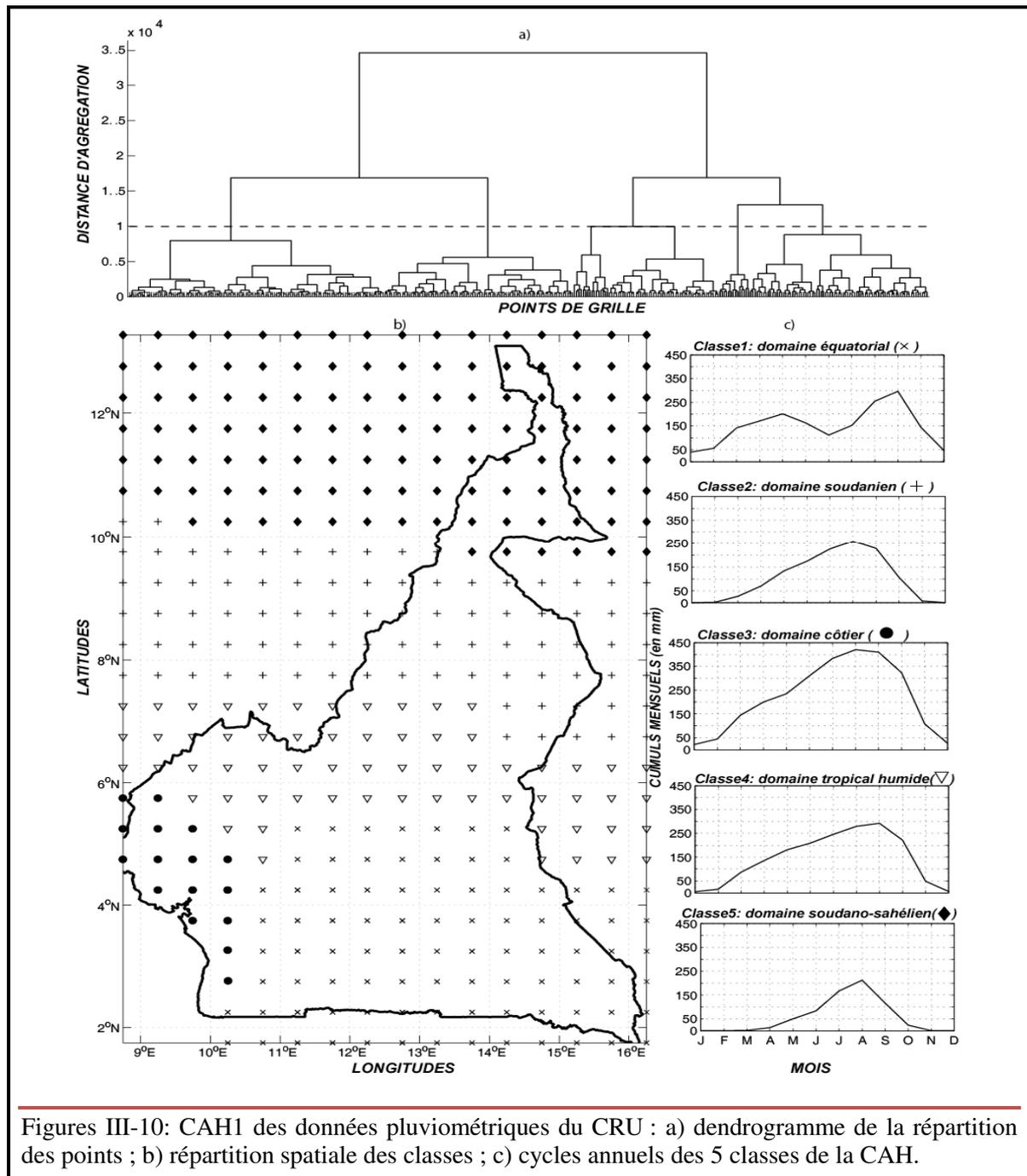
II-2-1. Le cycle saisonnier (les analyses des figures 10 et 11 seront effectuées concomitamment.)

Les dendrogrammes issus des classifications effectuées à partir des données du CRU d'une part (CAH1) et des données ponctuelles d'autre part (CAH2), sont des figures qui permettent de déterminer le nombre de classes à retenir pour la régionalisation de manière objective. Ceux-ci décrivent un saut important (distance d'agrégation) entre la partition en cinq classes et les autres partitions (Fig. III-10) et Fig. III-11), traduisant ainsi le nombre de partitions dans lesquelles les données sont regroupées.

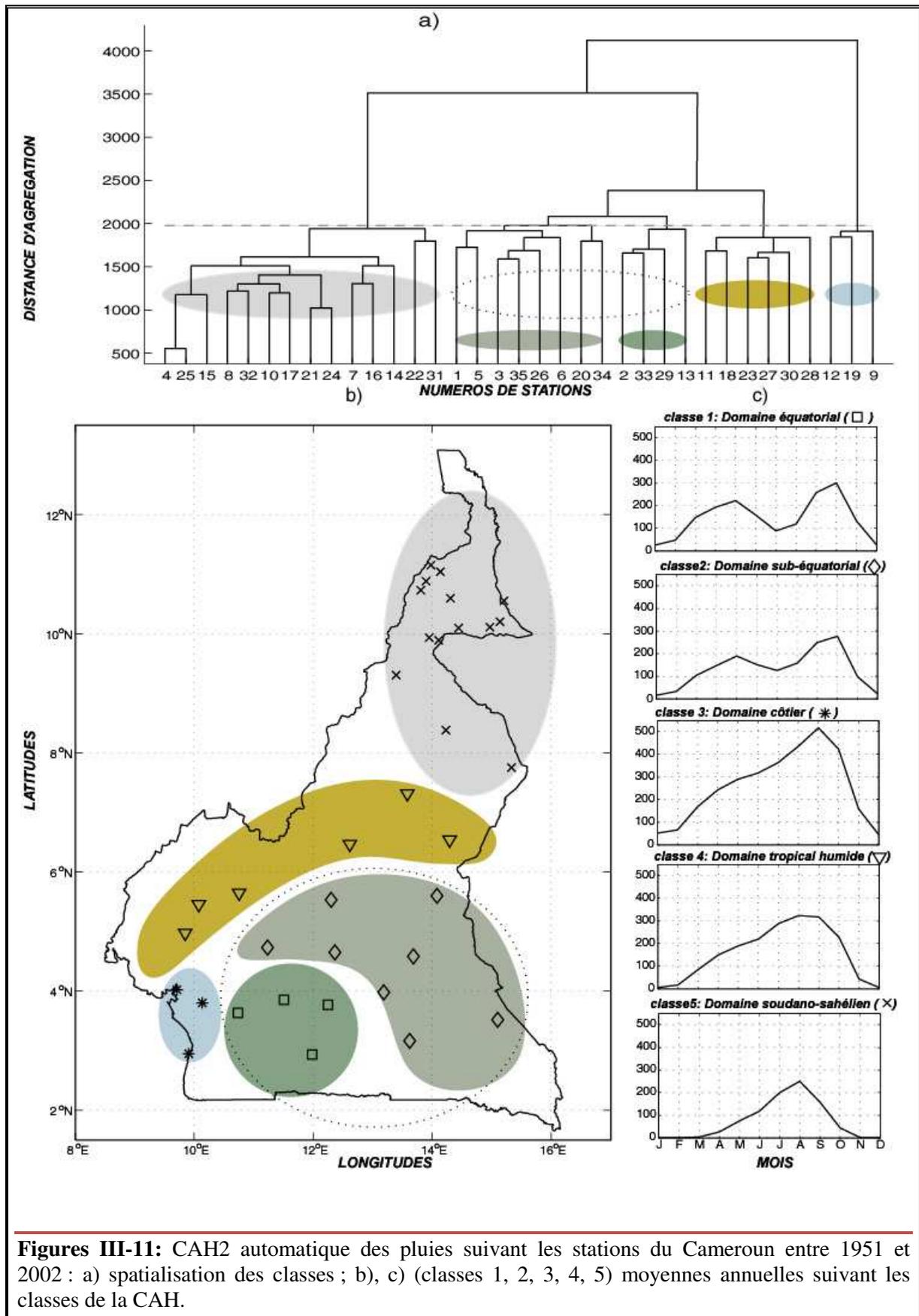
Pour la CAH2, la première partition est constituée de stations du nord du 8^e parallèle (Fig. III-11, 'x') ; la deuxième partition (Fig. III-11, '◇') regroupe les stations équatoriales les plus continentalisées; le troisième groupe (Fig. III-11, 'figuré carré') est constitué par les stations équatoriales les plus adjacentes à la région côtière ; la quatrième partition de la CAH2 (Fig. III-11, 'Δ') est formée par les stations des hautes terres de l'ouest et de l'Adamaoua, et la dernière classe (Fig. III-11, '*') regroupe les stations côtières. Afin de faciliter l'analyse, nous ferons correspondre la première classe de stations au domaine équatorial, la deuxième au domaine subéquatorial, la troisième au domaine côtier, la quatrième au domaine tropical humide et la cinquième classe au domaine soudano-sahélien (Fig. III-11, c). Sachant qu'il n'y a pas de consensus en matière de nomenclature suivant les critères pluviométriques, les noms attribués des différents domaines climatiques sont tout à fait relatives et peuvent varier d'un auteur à un autre et d'une région à une autre.

La comparaison des cartes de CAH2 et CAH1 montre une certaine analogie entre les classes mais, les limites des différents domaines pluviométriques sont plus nuancées : par exemple, la première partition s'étend dans la CAH2 jusqu'au 8^e parallèle, sans doute en raison de la lâcheté des points de mesure, alors que dans la CAH1, le domaine soudanien est bien individualisé du domaine sahélien. De même, le domaine équatorial constitue un seul ensemble dans la CAH1 alors que la CAH2 fait la distinction entre le domaine équatorial proprement dit et le domaine subéquatorial (ou équatorial continental). Enfin, la classe du domaine côtier occupe toute la frange littorale ainsi que le sud-ouest du pays dans la CAH1, alors qu'elle se limite à trois stations seulement dans la CAH2.

Toutefois, pour ce dernier domaine pluviométrique, les études précédentes ont montré que sa grande hétérogénéité spatiale (relief, proximité de l'océan) par rapport aux flux de mousson ne faciliterait pas toujours le choix des limites, même dans le cas d'un réseau dense (Suchel, 1987).



En somme, malgré leur plus large maille ($0,5^\circ$ de côté), la CAH1 permet de mieux circonscrire les limites des domaines pluviométriques que la CAH2 arrive difficilement à appréhender, en raison de la faible couverture des points de mesure, ainsi que leur irrégulière distribution.



Figures III-11: CAH2 automatique des pluies suivant les stations du Cameroun entre 1951 et 2002 : a) spatialisation des classes ; b), c) (classes 1, 2, 3, 4, 5) moyennes annuelles suivant les classes de la CAH.

Les cycles annuels de la première (équatoriale) et de la seconde (subéquatoriale) classe de la CAH2 ont un profil bimodal (Fig. III-11c), avec une période de récession entre les mois de juillet et d'août ($P < 110$ mm), qui semble toutefois plus accentuée en domaine équatorial strict. Cette particularité n'est pas apparente lorsqu'on prend en compte l'ensemble du domaine équatorial comme c'est le cas pour le premier cycle annuel de la CAH1 (Fig. III-10c).

Les autres classes identifiées par la CAH ont un profil à un seul mode, avec une longueur de saison des pluies ($P > 50$ mm) qui diminue du domaine côtier vers le domaine soudano-sahélien (Fig. III-11c) : dans les hautes terres de l'ouest et de l'Adamaoua (domaine tropical humide), neuf mois sur douze présentent des cumuls supérieurs à 50 mm alors qu'on compte seulement cinq mois humides en domaine soudano-sahélien ; par ailleurs, en domaine côtier, seuls les mois de décembre et janvier présentent des cumuls moyens inférieurs à 50 mm au cours de la période considérée.

La comparaison des cycles annuels des différentes classes permet de confirmer que l'intensité des pluies et l'allure du profil pluviométrique sont deux facteurs importants de différenciation des domaines pluviométriques au Cameroun (Fig. III-11c). Pour ce dernier paramètre, ce sont les caractéristiques de la saison de juillet-août qui imposent le type de profil pluviométrique. En effet, la récession de juillet-août est bien matérialisée en domaine équatorial (Fig. III-11c ; classe 1), alors que dans le domaine subéquatorial (Fig. III-11c ; classe 2), seul le mois de juillet semble assurer la transition entre les deux intersaisons pluvieuses. Lorsque l'on passe en domaine côtier (Fig. III-11c ; classe 3), la trêve de juillet disparaît complètement, mais le profil pluviométrique présente un *palier* entre les mois de mars à juin, en raison de la faible amplitude des cumuls pluviométriques entre mois consécutifs. En domaine tropical humide (Fig. III-11c ; classe 4), le profil pluviométrique est encore relativement étalé entre mars-juin, alors qu'une allure plus stricte (en cône) se dessine lorsqu'on passe en domaine soudano-sahélien (Fig. III-11c ; classe 5).

En résumé, la comparaison de la CAH1 et de la CAH2 permet de retenir deux principaux points à l'échelle annuelle :

(i) une sous-estimation du CRU par rapport aux données ponctuelles : celle-ci peut s'expliquer par la plus grande variabilité spatiale des données *in situ* (convection localisée, pluies de turbulence géographiques ou mobiles, etc.), comparativement aux données en points de grille qui sont plus lissées en raison de la prise en compte de la moyenne des stations dans chaque maille ;

(ii) des partitions non comparables dans certaines classes ; ce chevauchement des classes est probablement dû à la faible couverture des données stationnelles : c'est le cas des classes situées au nord de 8°N , ainsi que celle du domaine équatorial.

La comparaison des deux méthodes de régionalisation montre les avantages de la classification dans un espace entier par rapport à un plan factoriel. Cependant, une classification automatique issue d'un ensemble n'est jamais la classification de cet ensemble mais, une classification parmi tant d'autres. Il s'agit donc des méthodes heuristiques, établies à partir de variables prédéfinies.

II-2-2. Le cycle interannuel

a) Variabilité pluviométrique et rupture de stationnarité dans différents classe à partir de la SMWDA

Les figures III-12 et III-13 présentent, pour chacun des cinq domaines pluviométriques, la variabilité interannuelle sur la période 1951-2002. Les moyennes mobiles filtrées sur trois ans décrivent dans l'ensemble une grande variabilité interannuelle, avec des décalages souvent très importants pour des années consécutives. Les domaines tropical humide et soudano-sahélien présentent deux baisses importantes de pluies entre 1972-1973 et 1983-1984. Ce signal est également présent dans une moindre mesure en domaine littoral. En revanche, en région équatoriale, seul le domaine sub-équatorial présente un léger fléchissement de pluies au début des années 80s alors que les moyennes mobiles présentent une hausse des pluies entre 1961-1975 dans les deux domaines de cette région. Ce dernier résultat va à l'encontre de ceux trouvés par Bigot (1998), où l'auteur montre que la période 1965-1970 est marquée par une diminution des précipitations, sensible à l'échelle de toute l'Afrique centrale. Par ailleurs, en dehors du domaine équatorial, la décennie 50s est globalement pluvieuse dans tous les domaines pluviométriques du pays.

Toutefois, il est difficile de préciser si ces tendances s'inscrivent dans une logique de variabilité propre à chaque région ou si elles s'accompagnent de ruptures : le premier cas suppose que les séries pluviométriques suivent un processus stationnaire et évoluent dans un domaine de fluctuation donné, alors qu'une rupture dans une série statistique induit un changement caractérisé par des amplitudes qui vont au-delà du domaine de fluctuation habituel (Lubès-Niel et *al*, 1998).

Pour mettre en évidence de manière objective une évolution significative de la fréquence des cumuls annuels, les tests de rupture de stationnarité par fenêtres glissantes (SMWDA) sont appliqués sur le cycle interannuel de chaque domaine pluviométrique au cours de la période. Pour chaque cycle, la SMWDA est appliquée sur deux fenêtres : la première a une profondeur temporelle de vingt-six ans, correspondant à la moitié de la longueur de l'échantillon et la seconde fenêtre est considérée sur une normale climatique (trente ans).

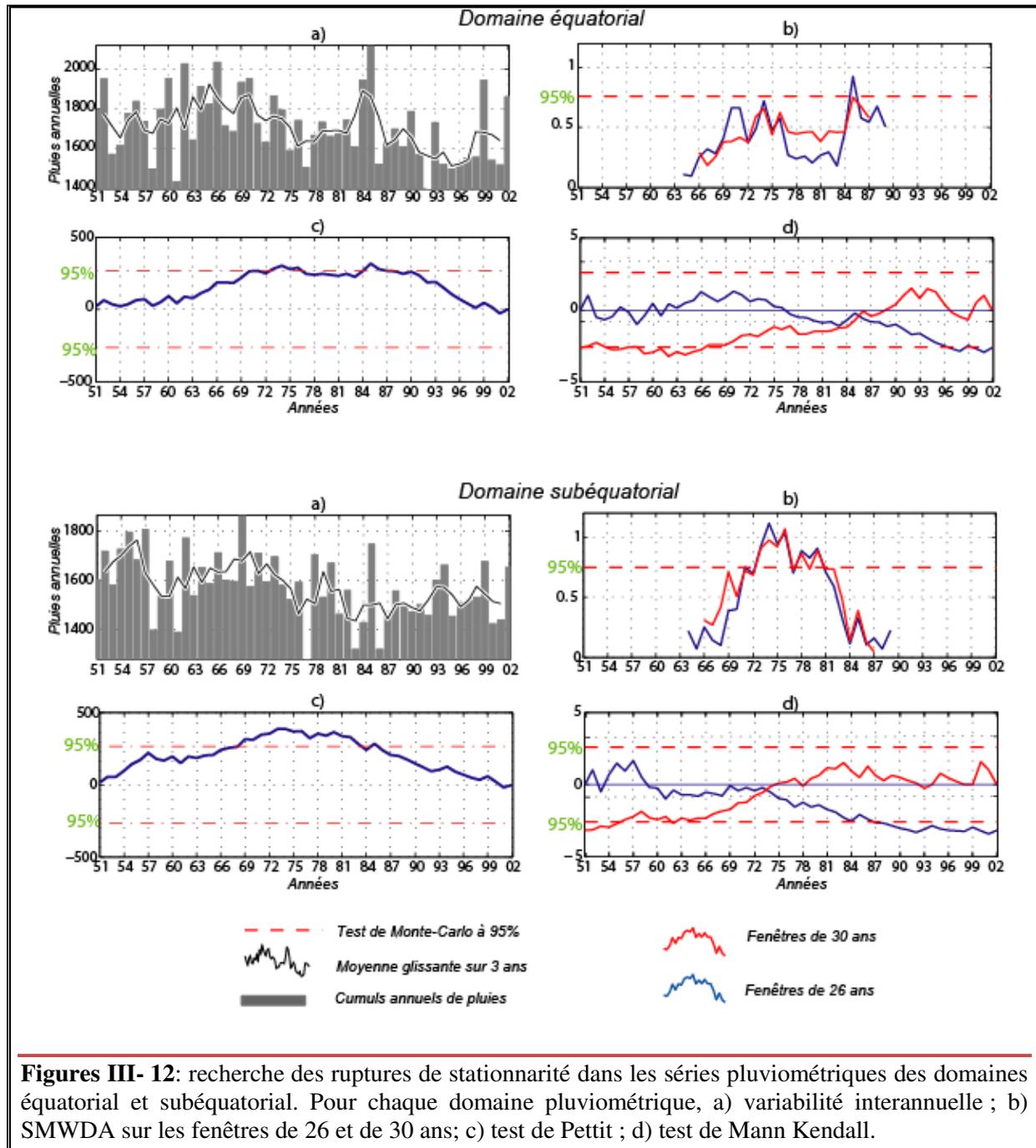
Selon les recommandations de l'OMM, une période de trente ans suffit à éliminer les variations interannuelles dans la plupart des variables climatiques. La différence d'une valeur en temps réel à la moyenne de cette période encore appelée *normale climatique* permet de déterminer si l'écart est important ou inhabituel. Cette période peut aller jusqu'à cinquante ans pour la variable précipitations. C'est dans cette logique que l'échantillon est testé sur des fenêtres assez larges. Mais l'on ne perd pas de vue que la longueur de ces fenêtres peut s'avérer insuffisante pour témoigner à proprement parler d'une rupture, puisque l'on ne dispose que de cinquante-deux ans. C'est en cela que les résultats issus de cette analyse recommandent une certaine prudence. A cet effet, les tests de Pettitt et de Mann-kendall rupture sont appliqués dans le but d'optimiser les analyses, et le test de Monte-Carlo à 95 % (voir chapitre I) permet de tester la significativité des résultats.

- En domaines bimodaux

Le domaine équatorial montre des années exceptionnellement humides en 1984 et 1985, qui sont atypiques par rapport aux années environnantes. Les moyennes glissantes de cette classe présentent essentiellement des anomalies positives entre 1951 et 1975 (Fig. III-12-a), même si on relève des déficits importants au cours des années 1958 et 1961 et 1974. Les années post-1975 se caractérisent par une baisse des pluies, malgré les cumuls exceptionnels des années 1984, 1985 et 1999. Est-ce à dire que ce domaine n'a pas été sensible aux sécheresses du début de la décennie 80s ? La SMWDA testée à 95% détecte une irrégularité au cours de l'année 1985 de la fenêtre de 30 ans (Fig. III-12-b). Cette année se distingue comme la plus pluvieuse avec un cumul de 2 118 mm par rapport à une moyenne annuelle de 1761 mm. Afin de juger de l'ampleur de cette anomalie, on applique le test de Pettitt (Fig. III-12-c), qui précise la rupture de 1985 mais également une autre au début de la décennie 70s, entre 1972 et 1976. En revanche, le test de Mann-Kendall (Fig. III-12-d) réfute une quelconque rupture significative à ces différentes dates, traduisant que ces anomalies s'inscrivent dans une logique de variabilité « normale » des précipitations.

En domaine subéquatorial (Fig. III-12-e), la moyenne pluviométrique entre 1951 et 2002 est d'environ 1 570 mm. Les cumuls annuels de la période 1951-1981 semblent au-dessus de cette moyenne, même si on recense ça et là quelques années déficitaires. Après cette période, l'on relève un déficit important des pluies qui contraste cependant avec le caractère exceptionnellement pluvieux des années 1984 et 1999. Cependant, la période post-1987 est marquée par une reprise pluviométriques dont les cumuls fluctuent autour de la moyenne du domaine (1570mm), c'est-à-dire encore en deçà de ceux des années d'avant 1981. Par rapport la SMWDA, les cumuls de pluies pour les années 1974 à 1980 semblent atypiques par rapport au reste de la période (test Monte-Carlo), avec l'année 1977 qui se présente comme la moins pluvieuse avec moins de 1 300 mm. Par ailleurs, la SMWDA ne détecte pas de rupture à la fin des années 1950 (1958) et au début des années

1960 (1961), contrairement à ce que laisserait supposer le trend interannuel, ceci étant sans doute lié aux grandes tailles des fenêtres utilisées. Le test de Pettitt à 95% confirme également une décennie 70s atypique mais, ce qui n'est pas le cas pour le test de Mann-kendall qui témoigne certes du caractère atypique des années 1984 et 1985 (le point d'inflexion des deux courbes de tendance côtoie la droite de significativité) mais, sans que celui-ci soit accompagné de rupture.



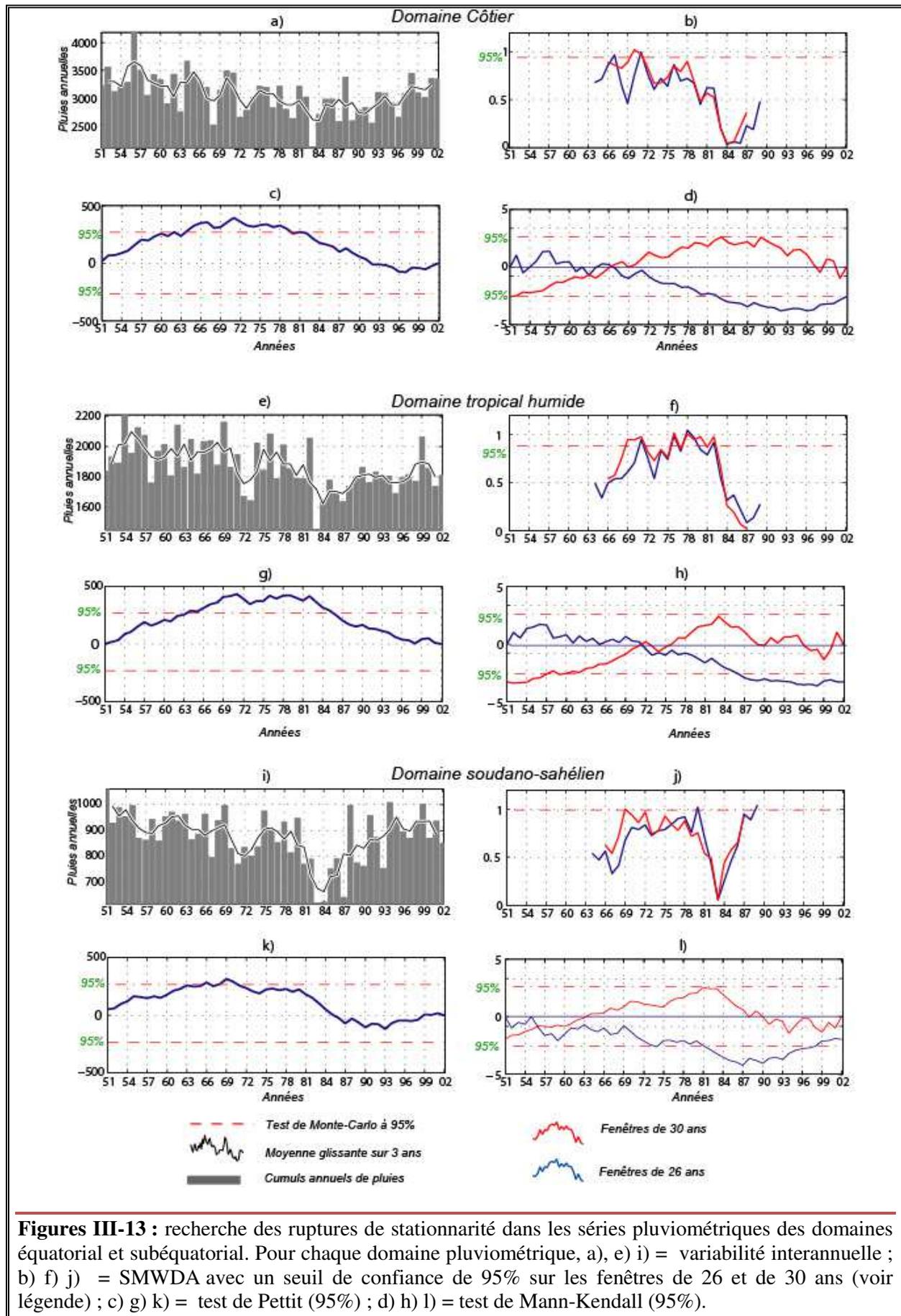
En somme, ces résultats témoignent d'une part, de la moindre sensibilité du domaine équatorial camerounais à la sécheresse du début des années 80s puisque les

précipitations de cette période se caractérisent par une pluviométrie excédentaire. Ce qui n'est pas une surprise puisque les études ont démontré qu'au cours de ces années, le système de mousson est resté bloqué au sud, entraînant de fortes précipitations dans la zone équatoriale. Il en est de même de la décennie 70s. Pr ailleurs, il demeure que c'est particulièrement les années 50s qui se détachent des autres par leurs cumuls exceptionnels, même si les tests de Pettitt et de Mann-kendall ne le précisent pas en raison des grandes tailles de fenêtres. Il est également important d'observer que suivant les différents tests, les points d'anomalies ne se signalent pas de manière synchrone ni suivant des intensités similaires sur les chroniques des domaines équatoriale, et subéquatorial, traduisant ainsi la grande variabilité spatiale et temporelle des précipitations, même pour des régions connexes.

- Domaines unimodaux

La chronique interannuelle des précipitations de la région côtière oscille en moyenne autour de 3 000 mm (Fig. III-13-a). L'année 1956 est la plus excédentaire (> 4000 mm) alors que la plus déficitaire se signale en 1983 (~2000 mm). En dehors de ces années extrêmes, les cumuls annuels présentent de faibles amplitudes (proches de la moyenne) sur le reste de la période. Cependant, une distribution anormale des pluies est détectée sur la fenêtre de 30 ans de la SMWDA (test de Monte-Carlo à 95 %) entre 1967 et 1972 et dans une moindre mesure entre 1976 et 1978 (Fig. III-13-b). Sur la fenêtre de 26 ans la SMWDA détecte des ruptures en 1967 et en 1971. Suivant le test de Pettitt appliqué au seuil de confiance de 95% (Fig. III-13c), les ruptures de stationnarité se situent effectivement avant les années 80s, et précisément entre 1965 et 1979. Toutefois, le test de Mann-kendall ne signale pas de rupture d'homogénéité statistique sur la chronique interannuelle de pluies dans le domaine côtier, puisque les anomalies repérées en 1963 et en 1967 ne sont pas significatives au seuil de 95%(Fig. III-13d). On signale cependant que 1984 assure la transition entre deux périodes humides la seconde étant moins pluvieuse que la précédente.

En domaine tropical humide, la moyenne pluviométrique annuelle de la période 1951-2002 est de 1 800 mm (Fig. III-13-e). L'année 1954 est la plus humide de la période avec 2 200 mm de pluie, alors que la moins humide se trouve en 1983 (1 400 mm). Les ruptures détectées par la SMWDA sur les fenêtres de 26 et 30 ans sont significatives au test de Monte-Carlo (95%), essentiellement à la fin des années 1960 et entre 1975 et 1984 (Fig. III-13-f). Le test de Pettitt confirme d'ailleurs une zone de rupture de 1967 à 1984 (Fig. III-13g). En effet, la chronique interannuelle de ce domaine pluviométrique présente 3 signaux, dont les années 1972 à 1973 d'une part et 1983 d'autre part, assurent la transition. Pourtant, suivant le test de Mann-kendall, l'année 1972 est la seule qui côtoie la ligne de significativité, traduisant sans doute l'année la plus atypique de la chronique.



Enfin, en domaine soudano-sahélien, la moyenne de la période est d'environ 850 mm par an. La courbe lissée sur trois ans montre que les déficits des années 1983 et 1984 sont supérieurs à 200 mm. Une seconde baisse, mais de moindre ampleur, est signalée au début des années 1970. Dans cette classe, la SMWDA présente des ruptures significatives au test de Monte-Carlo (95 %) sur la fenêtre de 26 ans. Une première rupture est signalée en 1969, une seconde en 1972, la troisième en 1980 et la dernière en 1989 (Fig. III-13-j).

Contrairement au domaine tropical humide, les ruptures signalées au début de la décennie 80s sont suivies par une hausse marquée des pluies d'intensités quasi-comparables à celles des années 50s. Est-ce à dire que la zone de ré-humidification signalée par certains auteurs au Sahel s'étendrait jusqu'au nord-Cameroun ? L'analyse des anomalies pluviométriques (section suivante) permettra de répondre à cette question.

D'après le test de Pettitt, les cumuls annuels de la deuxième moitié de la décennie 60s côtoient le seuil de significativité, mais seule l'année 1969 est au dessus d'elle. Celle-ci n'est cependant pas identifiée par le test de Mann-kendall, qui montre que les pluies évoluent entre les seuils de significativité, malgré les tendances décrites par les années de sécheresses exceptionnelles.

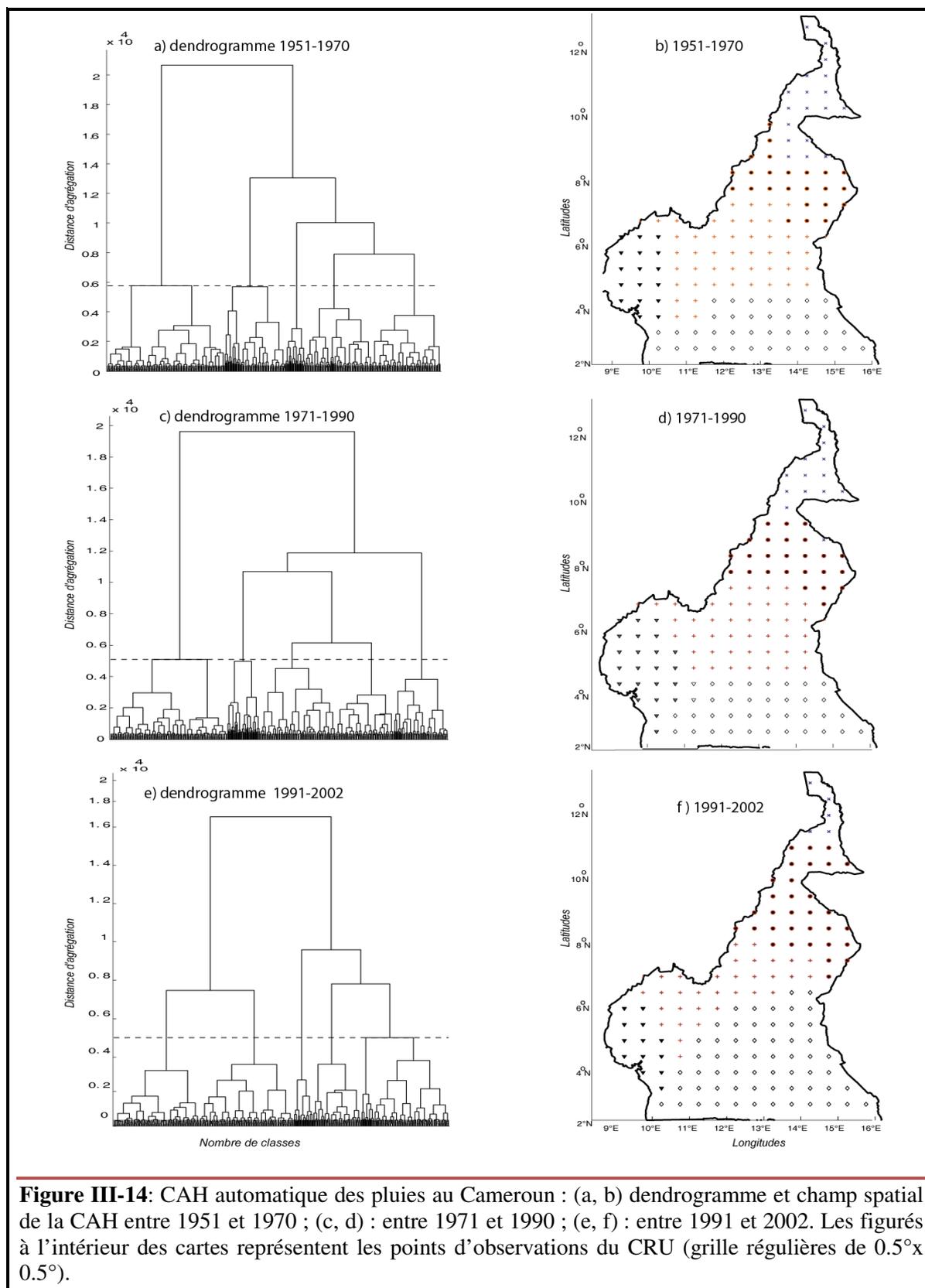
En somme, l'étude de la stationnarité des chroniques interannuelles par la SMWDA dans les 5 domaines pluviométriques du Cameroun présente plusieurs années atypiques consécutives ou non. Par ailleurs, il faut relativiser les résultats obtenus sur les deux périodes qui sont de longueur différente. En effet, les résultats sont sensibles à la taille des fenêtres ainsi qu'aux méthodes appliquées. Malgré ces limites, les différentes analyses permettent de conclure que certaines fluctuations décrites par différentes chroniques s'inscrivent dans une logique des tendances parfois marquées, mais sans qu'elles n'aillent au-delà du seuil de significativité.

Ce qui précède permet d'affirmer la stationnarité des chroniques pluviométriques, ce qui nous donne le droit de définir les indices pluviométriques.

II-2-3 Évolution des domaines pluviométriques du point de vue spatial

Les sections précédentes ont permis de mieux appréhender les structures spatiales de variabilité des pluies suivant les cycles annuels et la variabilité interannuelle entre 1951-2002. Dans cette section, il est question de regarder l'évolution de ces structures spatiales par rapport aux différentes tendances de précipitations. Pour ce faire, c'est la base de données pluviométrique du CRU qui est mise à profit compte tenu de l'insuffisance des points au sol. La période d'étude est partitionnée en trois sous-périodes, conformément aux différentes tendances décrites dans les résultats précédents. La première sous-période s'étend sur la période 1951-1970, la seconde va de 1971 à 1990 et la troisième de 1991 à 2002.

Pour chaque période, on effectue une CAH (critère de distance de Ward) sur ce signal moyen annuel et la variabilité interannuelle préalablement désaisonnalisé comme précédemment.



Il est toutefois à noter que sur le plan spatial, les limites climatiques établies par une classification ne peuvent être d'une netteté absolue car il existe toujours une zone de transition où les influences climatiques se chevauchent et varient dans le temps. Les partitions sont quasi-équivalentes à celles de la figure III-10, traduisant que l'ensemble des classes obéissent à une tendance régionale unique, chacune d'elles n'étant par conséquent qu'une représentation de cette tendance déformée à la fois par de possibles anomalies locales et/ou par d'éventuelles erreurs d'observation.

En effet, les champs spatiaux représentatifs des différentes sous-périodes (Fig. III-14b, d, f) montrent une classification cohérente de la répartition des pluies au Cameroun où sont bien matérialisés les domaines soudano-sahélien et soudanien au nord du 8^e parallèle (figurés en 'x' et en 'o', respectivement) et le domaine tropical humide, représentatif du climat des régions montagneuses de l'ouest et de l'Adamaoua (figuré en '+'). Le climat équatorial est représenté au sud du 4^e parallèle (figuré en '◇'), ainsi que les climats côtiers situés sur les bordures littorales (figuré en '▼').

La comparaison des classifications des deux premières sous périodes (1951-1970 et 1971-1990) montre un décalage méridien de la classe côtière vers le continent (sud de 6°N), alors que les grilles des autres classes restent quasi-stables (Fig. III-14 b et d). Ce phénomène peut être associé au changement thermique saisonnier de l'Atlantique tropical entre les deux hémisphères au début des années 70s, celui-ci ayant entraîné une anomalie de la ZCIT, et donc de faibles gradients méridiens. Ils s'en sont suivi, de forts gradients zonaux, caractérisés par une recrudescence des précipitations dans la bande équatoriale (Fontaine et al, 1999) au cours de la décennie 70s, et une situation contraire dans les hautes latitudes.

Au cours de la sous période 1991-2002, l'on observe une situation inverse, c'est-à-dire un glissement méridien des classes du sud vers le nord du pays : le domaine soudanien s'étend jusqu'au 11°N alors que seul le nord de 12°N demeure dans le domaine sahélien. Par contre, la zone couverte par le domaine côtier a retrouvé sa position des années 1951-1970.

Il faut noter que ce décalage méridien des classes est en faveur d'une humidification (L'hôte, 1998 ; L'hôte et al, 2003 ; Ali ans Lebel, 2009) de la région septentrionale du Cameroun qui retrouve quasiment un régime soudanien au cours de cette période. En effet, la latitude minimale de classe soudano-sahélienne (figurés en 'x') est située pendant la sous-période 1951-1970 autour du 9^e parallèle. Cette limite semble stable entre la période 1971-1990, mais se retrouve au-dessus du 11^e parallèle pendant la période 1991-2002. Toutefois, ce décalage sud/nord ne concerne par la classe côtière qui elle, se caractérise par une variation sur le plan méridien. À ce sujet, Suchel (1972) fait remarquer que la variabilité spatiale des pluies dans la région côtière est en relation avec les pluies paroxysmales provoquées par la mousson, essentiellement entre juin et

septembre, qui s'imbrique subtilement avec la multiplicité des sites et des expositions imposée par le relief.

Ainsi, les résultats de variabilité spatiale des différentes classes de la CAH confirment ceux du programme ICCARE (2000) qui ont montré que la répartition spatiale des précipitations en Afrique de l'Ouest non sahélienne avait subi des modifications en phase avec les différentes tendances auxquelles elle apparaissait liée (Paturel et al, 1998). Il ressort pour le Cameroun que c'est essentiellement la classe du domaine soudano-sahélien qui a subi un décalage méridien important et ce, au cours de la dernière décennie (Ozer et al, 2003).

b) Définition d'indices régionaux

Les CAH1 et CAH2 ont montré le caractère complémentaire des deux sources de données dans la régionalisation des régions pluviométriques du Cameroun : la CAH1 (à partir des données du CRU) a essentiellement permis de circonscrire les limites de chaque domaine pluviométrique, que la faible couverture des données ponctuelles appréhende difficilement. Afin de s'affranchir d'analyses redondantes, la définition des indices pluviométrique se base uniquement sur la classification de la CAH2 (Fig. III-11) mais, nous restons conscients des limites que celle-ci comporte. C'est le cas par exemple, du regroupement des stations située au nord de 8°N en une seule classe (Fig. III-11-c ; classe5) alors qu'une telle globalisation masque bien des particularités, comme le témoigne la CAH1 (Fig. III-10-c ; classe2 et 5).

Les indices pluviométriques sont définis pour chaque classe comme des anomalies centrées réduites (ou standardisées), qui témoignent d'un excédent ou d'un déficit pluviométrique pour l'année considérée, par rapport à la période de référence 1951-2002. Pour chaque année (i), l'indice pluviométrique est calculé suivant la formule de Lamb (1982) suivante :

$$\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

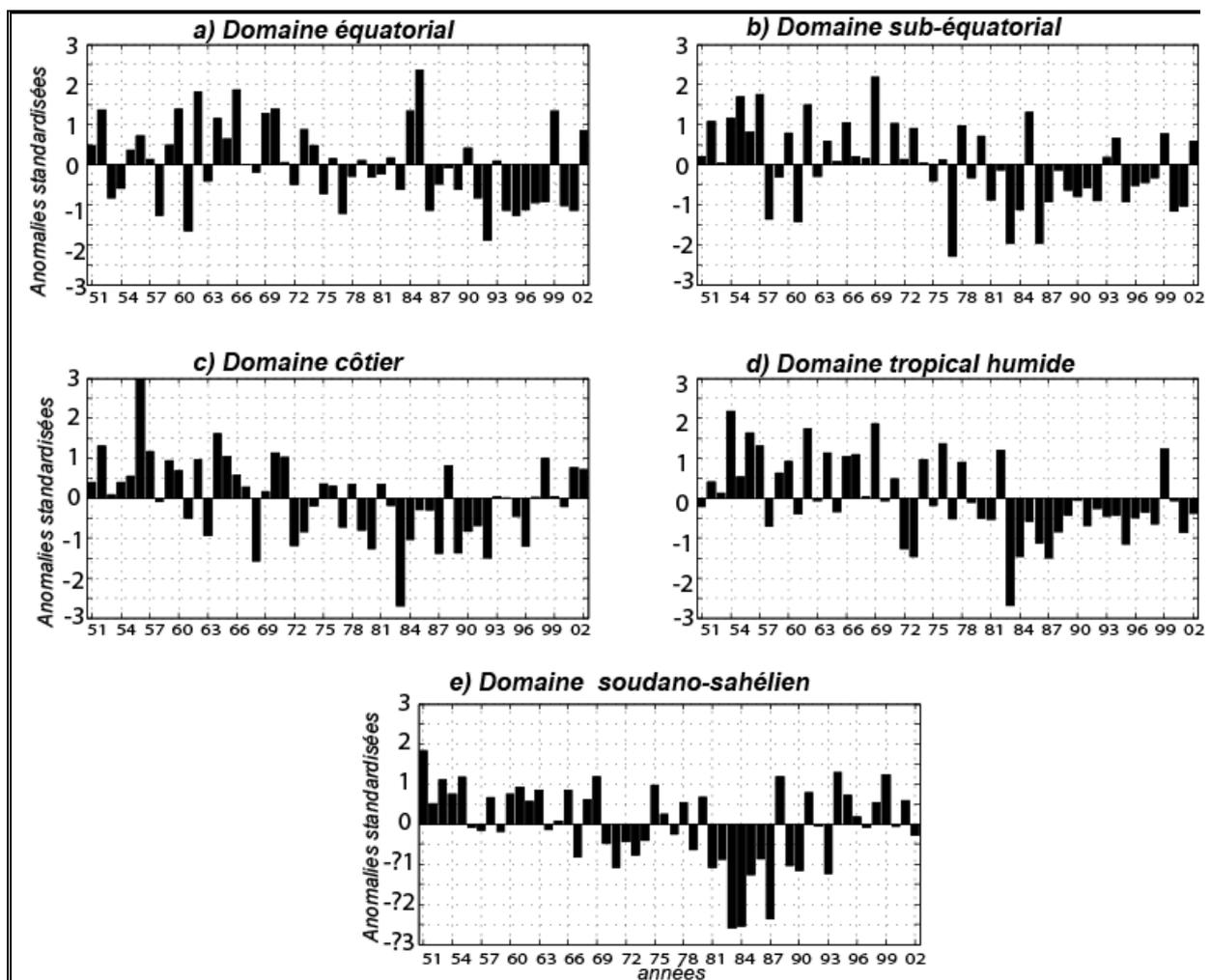
x_i = moyenne pluviométrique (des stations) de chaque classe pour l'année i ;
 \bar{x} = moyenne pluviométrique (des stations) de chaque classe sur la période 1951-2002 ;
 σ = écart-type de la période 1951-2002.

Il ressort dans l'ensemble que les anomalies pluviométriques fluctuent entre -2.5 et 2 (Fig. III-15).

En dehors de la classe équatoriale, tous les domaines pluviométriques du Cameroun présentent quasiment les mêmes tendances tout au long de la période : c'est-à-dire, d'une part, essentiellement des anomalies positives en début de période et d'autre

part des anomalies négatives après l'année 1970, et de manière plus marquée (> -2) au début de la décennie 1980 (Fig. III-15). Toutefois, ces tendances moyennes — qui sont d'ailleurs quasi généralisées sur l'ensemble de l'Afrique tropicale — présentent néanmoins quelques nuances : (i) il n'est pas rare de compter quelques années excédentaires au cours de la deuxième moitié de la décennie 1970, et ce essentiellement en domaine unimodal ; (ii) si le domaine soudano-sahélien est marqué essentiellement par des anomalies négatives dans la période post-1980, l'on y compte cependant six années excédentaires (bien que de faibles amplitudes) après 1994 (Fig. III-15-e). C'est donc dire que, contrairement aux autres domaines pluviométriques, cette région a connu une décennie 1990 plus humide, même si les chiffres restent inférieurs à ceux des années 1950 et 1960.

Le domaine équatorial (Fig. III-15-a) présente des anomalies atypiques, à l'image de la distribution interannuelle des précipitations, c'est-à-dire une succession d'anomalies positives et négatives au cours de la décennie 50s, les décennies 60s et 70s essentiellement excédentaire ($\sim 1,5$), le début des années 80s très excédentaire (> 2), et le reste de la période particulièrement déficitaire ($-1,5$).



Figures III-15 : Indices pluviométriques des 5 régions pluviométriques du Cameroun (1951-2002).

C'est suivant cette définition d'indices pluviométriques que s'appuieront les prochaines analyses de cette thèse.

SYNTHESE PARTIELLE

Le but de la régionalisation était de segmenter le territoire camerounais en régions homogènes du point de vue de la pluviométrie, suivant les rythmes annuels et interannuels. L'objectif n'était pas de reprendre les travaux précédents sur le Cameroun qui sont d'ailleurs particulièrement documentés, car prenant en compte des facteurs géographiques et d'autres paramètres plus localisées de la climatologie (Suchel, 1987 ; Santiago, 1998 ; Tchiadeu, 2000). Il était en effet question de décrire la variabilité annuelle et interannuelle des précipitations sur une période plus récente, en discriminant les particularités pluviométriques de chaque région. De ce point de vue, il est important de rappeler que la notion d'unicité d'ensemble invoquée par cette régionalisation est en réalité susceptible de masquer des diversités locales au sein d'un même domaine pluviométrique. Ainsi convient-il d'utiliser les indices régionaux avec prudence, bien que ceux-ci permettent d'appréhender les particularités pluviométriques des domaines climatiques sous influences océaniques, par opposition aux climats continentaux ou abrités de l'est et du nord du pays. Les résultats permettent de retenir plusieurs points :

i) à l'échelle annuelle, les critères de différenciation des classes (ou des stations) pluviométriques sont essentiellement :

a. **l'intensité des cumuls mensuels** qui induit de ce fait, la notion de *longueur de la saison des pluies* : celle-ci diminue essentiellement du sud vers le nord et des régions côtières vers celles plus continentalisées (en considérant un seuil de différenciation d'au moins 50 mm entre mois humides et mois secs) ;

b. **l'allure du profil pluviométrique** (saisonnalité): le facteur principal de différenciation des régimes pluviométriques camerounais réside dans les caractéristiques de la période juillet-août (petite saison des pluies) qui permettent de distinguer les régimes unimodaux et bimodaux. Cette saison est également considérée par Suchel (1987), comme le *facteur d'unité fondamentale du plateau sud-camerounais*. Mais seul le domaine équatorial *stricto sensu* semble plus concerné par cette récession pluviométrique, puisqu'elle n'affecte, à proprement parler, les stations de la zone subéquatoriale qu'au mois de juillet. L'étude des cartes de radiosondages et synoptiques a permis d'apporter des éléments explicatifs à cette situation : en effet, entre les mois de juillet et août, l'hémisphère sud étant plus déficitaire en énergie (du fait de l'inclinaison de la Terre dans l'hémisphère nord), la ZCIT migre vers le nord *via* les basses pressions des massifs sahariens et impose la saison sèche dans les régions équatoriales. Pendant ce temps, le plateau sud-camerounais n'enregistre plus que des pluies fines et de la bruine puisque d'une part la zone de turbulence à l'origine des précipitations orageuses s'est déportée

vers le nord et d'autre part en raison des remontées d'eaux froides (upwellings côtiers) qui contribuent à stabiliser les basses couches de l'atmosphère. L'on comprend donc pourquoi les stations du domaine subéquatorial plus continentalisées ne sont affectées que partiellement par cette récession pluviométrique.

c. **les caractéristiques pluviométriques de la période mars-juin** contribuent, quant à elles, à différencier d'une part les régimes unimodaux situés au sud du 9° parallèle (domaines tropical humide et côtier) et le régime soudano-sahélien d'autre part. En effet, dans les deux premiers domaines, la partie ascendante de la courbe présente une allure étalée en raison des moindres apports pluviométriques entre mois consécutifs (moins de 100 mm). On y distingue, suivant les années (non présenté ici), la présence d'un ou de deux paliers (entre mars-avril et avril-mai), avant l'apparition brusque du pic au mois d'août. Cette particularité contraste avec le profil unimodal plus strict (profil en cône) du domaine soudano-sahélien. D'après Suchel (1987), cette particularité saisonnière serait en relation avec l'irruption de la mousson dès le creusement des dépressions sahariennes, qui vient se surimposer au régime zonal classique.

ii) à l'échelle interannuelle, les moyennes mobiles présentent, suivant les domaines pluviométriques, une tendance à la baisse aux cours des années 1970 et 1980. C'est précisément au cours de cette dernière période que le phénomène se généralise sur l'ensemble du pays. Toutefois, les stations du domaine équatorial semblent faiblement affectées par les sécheresses du début des années 1980 : l'on signale des anomalies de très faibles amplitudes (< -1) entre 1980 et 1983, alors que les années 1984 et 1985 se distinguent par des anomalies positives marquées. De même, en domaine soudano-sahélien, la période post-1990 ne peut pas être considérée comme parfaitement déficitaire en raison d'un nombre important d'anomalies positives. Toutefois, si leurs amplitudes restent en dessous de celles des années 1950 et 1960, elles contrastent fortement avec le déficit des années 1980. Cette reprise pluviométrique post-1990 en domaine soudano-sahélien est marquée par un décalage des isohyètes vers le nord, en raison de la position plus septentrionale de la ZCIT.

Il ressort également que l'interprétation de la variabilité interannuelle nécessite une certaine prudence puisque les différents tests ont permis de conclure que les tendances décrites par les moyennes mobiles s'inscrivent plus dans la variabilité interannuelle des pluies (fluctuation normale) que ne décrivent des ruptures. C'est le cas, par exemple, de la tendance déficitaire marquée au début des années 1980 en domaine unimodal.

La question qui nous préoccupe suite à ces résultats est celle de savoir : **quels sont les mécanismes d'échelles saisonnières qui impriment la variabilité interannuelle observée ainsi que les différentes tendances ?** C'est à essayer de répondre à cette question que seront consacrées les prochaines sections.

II-3. Facteurs saisonniers de la variabilité interannuelle des pluies au Cameroun

En partant du fait que les anomalies pluviométriques sous-tendent une certaine variabilité intra-annuelle (mensuelle et saisonnière), il est maintenant question de caractériser les différentes saisons dans les cinq domaines pluviométriques identifiés précédemment, afin d'y rechercher les indices de la variabilité interannuelle au cours de la période 1951-2002. Afin de simplifier l'analyse, l'on regroupera les régions pluviométriques suivant des domaines unimodaux et bimodaux. Ainsi, pour chaque type de régime, nous nous intéresserons à deux paramètres essentiels: **la longueur de la saison des pluies (suivant l'intensité des cumuls annuels) et la contribution des pluies saisonnières au cumul annuel**. Ces différents paramètres seront mis en relation avec la variabilité interannuelle observée précédemment.

II-3.1. Relations entre longueur de la saison des pluies et variabilité interannuelle

La recherche de corrélations entre la longueur de la saison des pluies et la variabilité interannuelle s'appuie sur le fait qu'une saison écourtée ou allongée est susceptible d'influencer le total annuel des pluies. De plus, l'intensité des abats saisonniers est un paramètre tout aussi déterminant pour la *qualité* pluviométrique d'une année. Afin de discriminer les mois de saison des pluies par rapport à ceux de saison sèche, a été fixé le seuil de 50 mm qui est communément utilisé par les auteurs, sachant toutefois que celui-ci peut s'avérer relativement bas pour certains domaines pluviométriques. C'est pourquoi a également été prise en compte la variabilité interannuelle des cumuls saisonniers aux seuils de 100 mm, 150 mm et 200 mm.

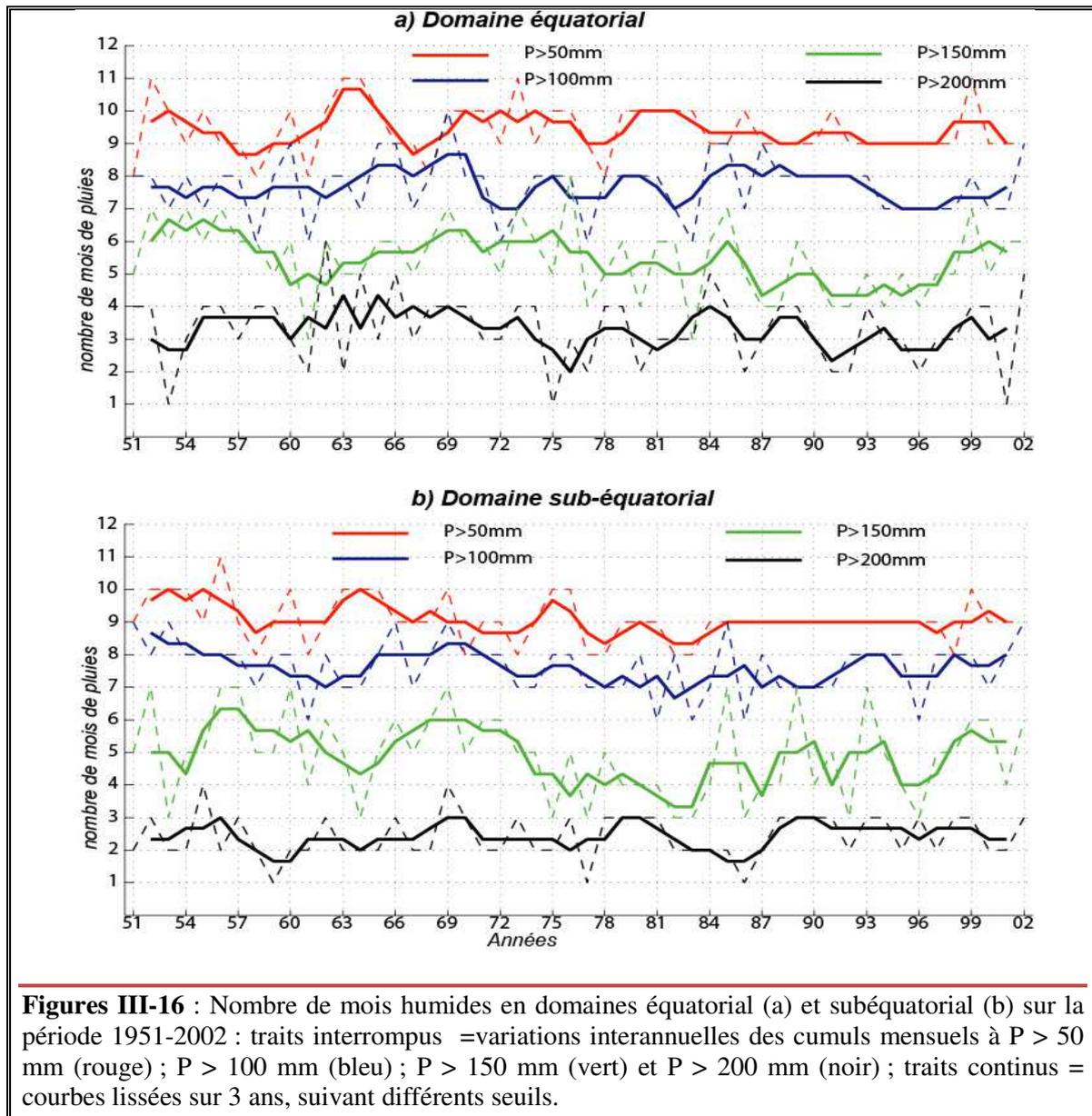
a) Le domaine bimodal

Les figures III-16 présentent les variations interannuelles (1951-2002) du nombre de mois humides ($P > 50$ mm), ainsi que l'intensité des pluies à différents seuils au cours de ces mois, dans les domaines équatorial et subéquatorial.

Il ressort qu'en domaine bimodal, le nombre de mois avec $P > 50$ mm oscille essentiellement entre huit et onze, témoignant ainsi de la quasi-permanence des influences océaniques dans cette région. Ces mois humides présentent cependant une variabilité interannuelle qui peut être analysée suivant deux sous-périodes : avant la période 1984, environ dix mois par an ont une pluviométrie supérieure à 50 mm, dont près de huit mois avec $P > 100$ mm, plus de six mois avec $P > 150$ mm (surtout au cours des années 1950) et près de quatre mois avec des cumuls supérieurs à 200 mm. Après l'année 1984, le nombre de mois humides descend à neuf : dans les deux domaines pluviométriques, seuls sept mois ont un cumul supérieur à 100 mm alors que le nombre de mois à plus forte pluviométrie est également en baisse (en moyenne quatre mois avec $P > 150$ mm et

seulement trois mois avec $P > 200$ mm). Il faut noter que cette description ne présente qu'une tendance moyenne puisqu'au demeurant, deux années consécutives peuvent avoir des cycles annuels différents, de même qu'on peut noter l'apparition d'une année particulière au sein d'une période présentant les mêmes caractéristiques saisonnières.

C'est ainsi qu'au cours de la période humide (avant 1970), les années présentant des anomalies négatives, à l'instar de 1958 et 1961, sont celles qui ont combiné une baisse du nombre de mois humides (8 mois) et une réduction de l'intensité pluviométrique (3 et 2 mois seulement avec $P > 150$ mm et $P > 200$ mm, respectivement).



En revanche, les années 1985 et 1999 se distinguent dans la période sèche (post-1970) par l'occurrence d'un nombre important de mois à forte intensité pluviométrique :

les neuf mois humides ont un cumul supérieur à 100 mm, dont sept mois avec $P > 150$ mm.

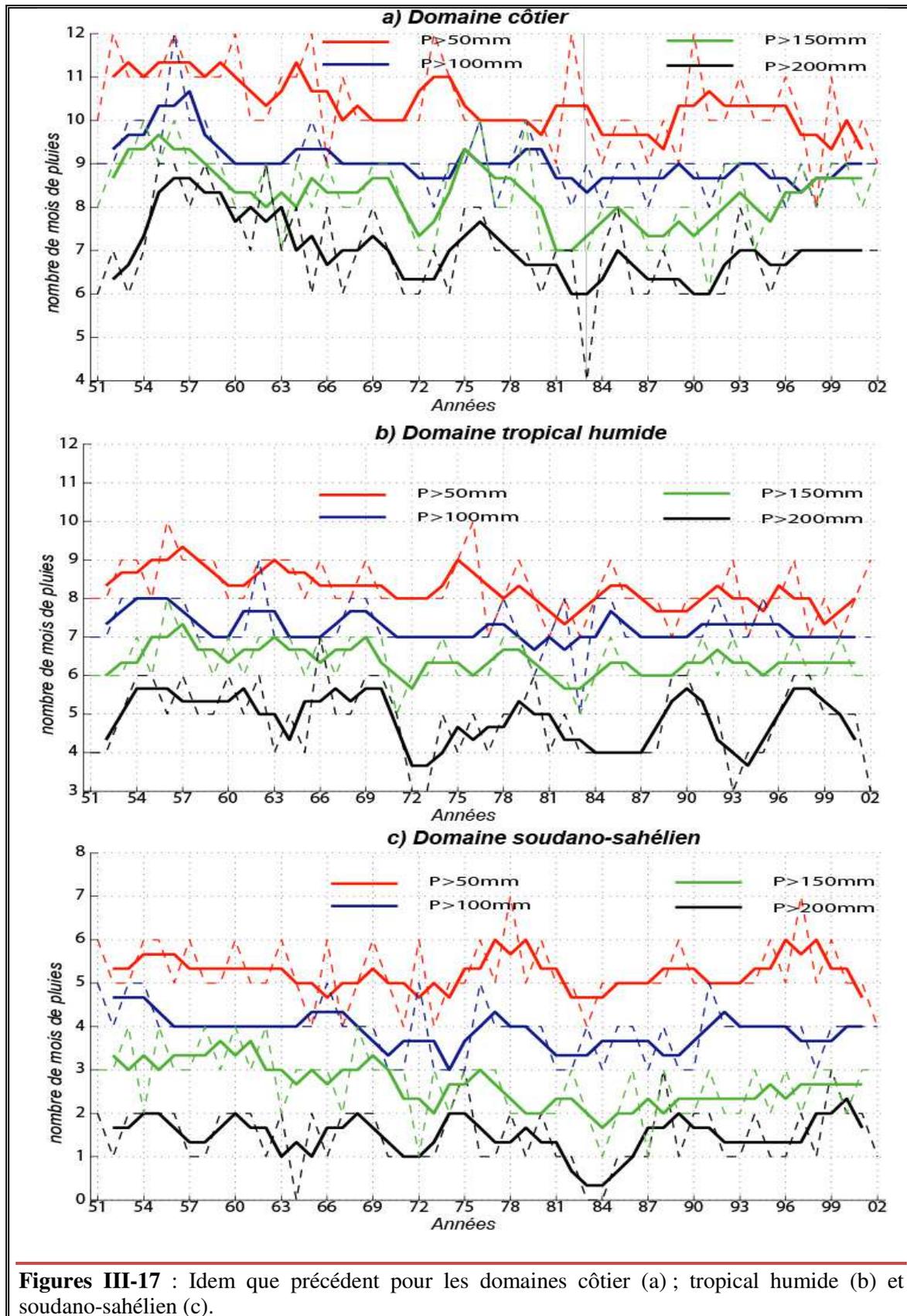
b) Le domaine unimodal

Les figures III-15 montrent la variabilité interannuelle des cumuls mensuels suivant différents seuils en domaine côtier (a), tropical humide (b) et soudano-sahélien (c). Dans le premier domaine, au moins quatre mois sur douze ont une pluviométrie supérieure à 200 mm tout au long de la période 1951-2002, confirmant ainsi son attribut d'*empire de la mousson*. Les moyennes mobiles calculées à différents seuils montrent une tendance marquée à la hausse au cours des années 1950, durant lesquelles au moins onze mois ont une pluviométrie supérieure à 50 mm et plus de huit mois des cumuls supérieurs à 200 mm. Au cours des années 1980 qui ont été très déficitaires, seuls neuf mois en moyenne ont des cumuls supérieurs à 50 mm et le nombre de mois avec $P > 200$ mm est réduit en moyenne à six. La période post-1990, qui est également déficitaire (mais avec des amplitudes moins marquées), présente néanmoins quelques années humides. Par rapport à la période précédente, on y compte un mois humide supplémentaire, et neuf ont plus de 100 mm. De même, le nombre de mois à forte pluviométrie ($P > 200$ mm) remonte à sept et reste constant tout le reste de la période.

En domaine tropical humide (Fig. III-17 b), la variabilité des cumuls mensuels est moins marqué : au seuil de $P > 50$ mm, le nombre de mois passe en moyenne de neuf, au cours des trois premières décennies, à huit au cours de la période post-1970. Les mêmes variations s'observent pour le seuil $P > 100$ mm, où le nombre de mois passe de huit à sept et de sept à six pour le seuil $P > 150$ mm. Lorsqu'on considère le seuil de $P > 200$ mm, l'on compte six mois avant la période 1970 et cinq mois au cours de la décennie 1970. Les années post-1980 sont, quant à elles, caractérisées par seulement huit mois humides ($P > 50$ mm), dont six avec $P > 150$ mm. Par ailleurs, le nombre de mois avec $P > 200$ mm présente deux pics : l'un en 1990 et l'autre en 1998, et deux minima, entre 1983 et 1987, et en 1994.

Enfin, en domaine soudano-sahélien (Fig. III-17 c), on compte en moyenne cinq mois humides ($P > 50$ mm) par an, mais ce chiffre présente des variations au cours de la période 1951-2002, comme le traduisent les moyennes mobiles. Ainsi, au cours de la première décennie essentiellement excédentaire, l'on compte cinq mois humides ($P > 50$ mm), dont au moins trois ont des cumuls supérieurs à 150 mm, et deux mois avec $P > 200$ mm. La décennie suivante, toujours excédentaire mais avec des amplitudes moins marquées, voit se réduire le nombre de mois humides à cinq. L'on compte toujours trois mois avec des cumuls supérieurs à 150 mm, mais le nombre de mois avec $P > 200$ mm se réduit à l'unité. La décennie 1970 est marquée par une première période essentiellement déficitaire, au cours de laquelle deux mois sur cinq ont des cumuls supérieurs à 150 mm.

En revanche, la deuxième moitié de cette décennie est marquée par une hausse en nombre de mois humides et en intensité.



Le déficit du début des années 1980 se caractérise quant à lui par une absence de mois avec $P > 200$ mm, alors que deux mois seulement ont des pluies supérieures à 150 mm. L'année 1983 se caractérise par quatre mois humides seulement. Le reste de la période, qui est marqué par une alternance d'années humides et déficitaires, se caractérise par un accroissement du nombre de mois humides (~6 mois), parmi lesquels on relève trois mois avec $P > 150$ mm, dont deux mois avec $P > 200$ mm. Ces différents résultats nous permettent d'affirmer qu'il existe *a priori* une adéquation entre le nombre de mois humides et les anomalies pluviométriques dans les domaines pluviométriques du Cameroun.

Cependant, pour les confirmer de manière plus objective, les corrélations entre le nombre de mois humides (à différents seuils) par année et les anomalies pluviométriques ont été calculées pour chaque domaine pluviométrique (Tab. III-1). Il ressort qu'en dehors du domaine subéquatorial, ce sont essentiellement les mois à cumuls supérieurs à 200 mm qui sont le plus corrélées aux anomalies pluviométriques ($R = \sim 0,6$). Par ailleurs, dans les domaines équatorial et côtier, le seuil de 50 mm s'avère inapproprié (sans doute trop faible) pour caractériser la qualité pluviométrique d'une année, comme le traduisent les résultats du test de Monte-Carlo à 99 % ($R = -0,35$ et $-0,24$, respectivement)

Tableau III-1 : Corrélations entre cumul mensuel de pluies à différents seuils et anomalies interannuelles dans les 5 domaines pluviométriques du Cameroun

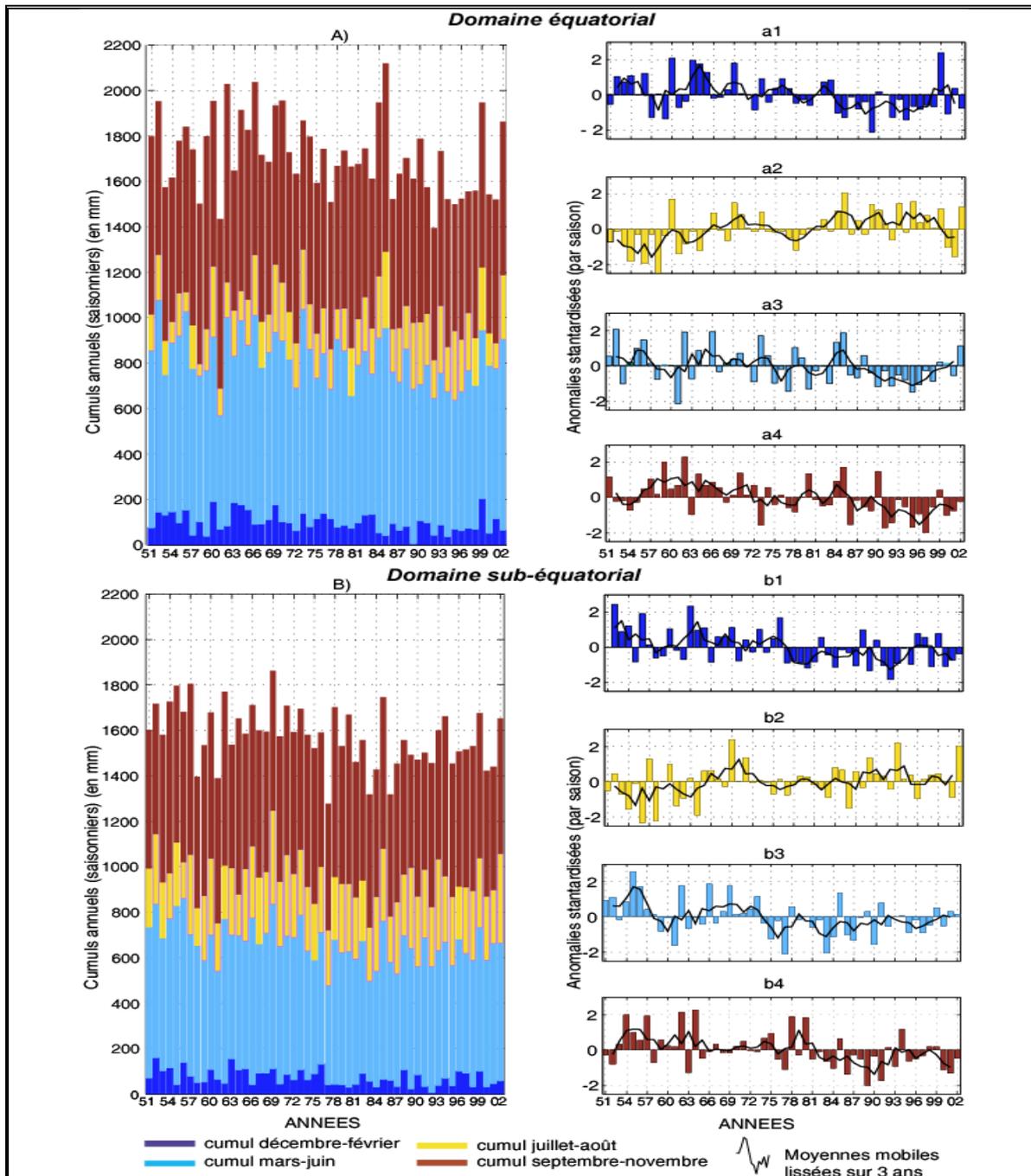
Seuils de Pluies Domaine pluvio.	P > 50 mm	P > 100 mm	P > 150 mm	P > 200 mm
équatorial	-0,3499*	0,6127	0,5945	0,6888
subéquatorial	0,3848	0,5945	0,6197	0,5433
côtier	-0,2388*	0,4682	0,4686	0,5737
tropical humide	0,4905	0,5009	0,4758	0,5591
soudano-sahélien	0,4202	0,5014	0,5780	0,6292

* corrélations non significatives au test de Monte Carlo à 99 %.

En somme, le nombre de mois humides est un paramètre important pour caractériser la qualité pluviométrique d'une année au Cameroun, mais il est important de déterminer le seuil adéquat pour chaque domaine pluviométrique. Il importe toutefois de signaler que les seuils ne sont pas définis ici du point de vue écologique, mais dans l'objectif de déterminer celui auquel la variabilité interannuelle est le plus sensible. Ainsi, en domaine subéquatorial, c'est essentiellement la variabilité des pluies au seuil de 150 mm par mois, qui est en phase avec les tendances pluviométriques, alors que pour les autres domaines du pays, c'est la variabilité des pluies au seuil mensuel de 200 mm qui imprime particulièrement les anomalies pluviométriques, du moins en ce qui concerne la période d'étude (1951-2002).

II-3.2. Contribution des pluies saisonnières au total annuel

Le second critère permettant de comprendre la variabilité interannuelle des pluies pour chaque domaine pluviométrique consiste d'une part à étudier la contribution de chaque saison au cumul pluviométrique annuel et d'autre part à mettre en relation la variabilité saisonnière avec la variabilité interannuelle des pluies.



Figures III-18 : Variabilité saisonnière des pluies en domaine bimodal camerounais entre 1951 et 2002 : A) en domaine équatorial ; B) en domaine subéquatorial ; a1 à a4 : anomalies standardisées des cumuls saisonniers en domaine équatorial ; b1 à b4 : idem que précédemment, mais en domaine subéquatorial.

a) Le domaine bimodal

Les figures III-18 présentent la contribution de chacune des quatre saisons de l'année au total pluviométrique annuel, ainsi que les anomalies pluviométriques saisonnières dans les domaines équatorial et subéquatorial, pour la période 1951-2002. Il en ressort, dans l'ensemble, que les cumuls saisonniers varient fortement d'une année à l'autre. En effet, des années ayant enregistré un même cumul de pluies peuvent présenter de grandes disparités à l'échelle saisonnière.

L'on peut citer en domaine subéquatorial l'exemple des années 2000 et 2001, et des années 1997 et 1998 en domaine équatorial. Dans ce dernier, les hauteurs pluviométriques des deux saisons sèches (décembre-février ; juillet-août) oscillent respectivement entre 50 et 200 mm et 100 et 300 mm (Fig. III-18 A), soit une contribution moyenne respective de 6 % et 12 % au total annuel (Tab. III-2). Les cumuls de saisons des pluies, quant à eux (mars-juin et septembre-novembre), fluctuent essentiellement entre 600 et 800 mm, ce qui représente une contribution moyenne d'environ 42 % et 41 %, respectivement, au total pluviométrique annuel. En termes de corrélations (entre cumuls saisonniers et cumuls annuels), l'on relève pour l'ensemble de la période une valeur de 0,30 pour la saison décembre-février, 0,81 pour la saison mars-juin, 0,40 pour la saison juillet-août et 0,63 pour la saison septembre-novembre. C'est donc dire que c'est la variabilité interannuelle des cumuls saisonniers de mars-juin qui détermine le plus les anomalies interannuelles de ce domaine pluviométrique. Par ailleurs, la non-significativité des corrélations de la saison décembre-février traduit leur moindre contribution au total annuel.

Tableau III-2 : Contribution saisonnière moyenne des pluies en domaine bimodal et corrélations avec les cumuls annuels (test de Monte-Carlo à 99 %).

Domaines pluviométriques	Domaine équatorial		Domaine subéquatorial	
	Contribution saisonnière (%)	Corrélations saisonnière/annuelle	Contribution saisonnière (%)	Corrélations saisonnière/annuelle
Saisons				
décembre-février	5,7949	0,3007*	4,5615	0,3701
mars-juin	42,3869	0,8084	37,9952	0,8068
juillet-août	12,1516	0,4096	18,1667	0,3459*
septembre-novembre	40,6295	0,6326	39,9748	0,6122

* corrélations non significatives au test de Monte Carlo à 99 %.

En domaine subéquatorial (Fig. III-18 B), les apports saisonniers moyens par rapport au total annuel sont de 5 % pour la saison décembre-février, 18 % pour la

récession de juillet-août, 38 % pour la petite saison des pluies (mars-juin) et, enfin, une contribution de 40 % pour la grande saison des pluies (septembre-novembre). Ces chiffres représentent respectivement des corrélations de 0,37, 0,35, 0,81 et 0,61 (tableau III-2). Seule la corrélation de la saison juillet-août n'est pas significative au test de Monte-Carlo (99 %), malgré sa relative importante contribution au total annuel. L'on remarquera que dans ce domaine, les cumuls de la saison juillet-août (Fig. III-18 ; a2 et b2) sont nettement plus importants, comparé à ceux du domaine équatorial car, en dehors des années 1956 et 1958, ils sont tous au-dessus de 200 mm et atteignent même 400 mm au cours des années 1969, 1993 et 2002. Ce contraste des cumuls de la saison juillet-août entre les deux domaines peut s'expliquer par la position plus septentrionale de la ZCIT (par rapport au domaine précédent), cette dernière étant en rapport avec la dynamique atmosphérique et océanique, parfois de grande échelle (nous y reviendrons dans les prochaines sections).

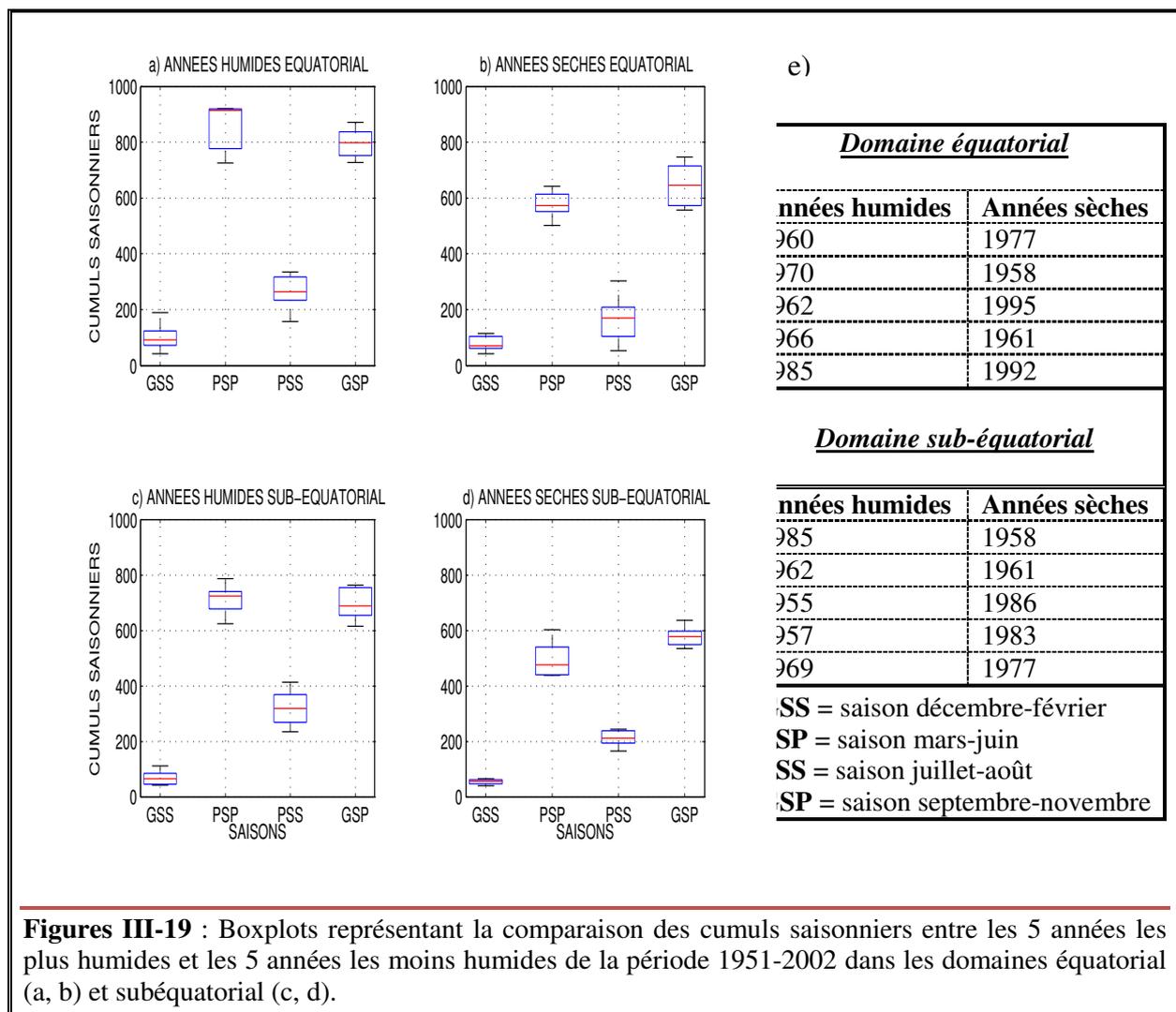
Les anomalies standardisées des cumuls saisonniers du domaine équatorial présentent une grande variabilité décennale (Fig. III-18 ; a1 à a4) : la première moitié de la décennie 1950 est excédentaire pour les saisons mars-juin et décembre-février, alors que la fin de la décennie est déficitaire. La tendance est tout à l'inverse de la précédente pour la saison septembre-novembre. Seule la saison juillet-août, présente des cumuls déficitaires *stricto sensu* tout au long de cette décennie. Au cours de la décennie suivante (1960), les moyennes mobiles présentent essentiellement une tendance excédentaire des cumuls saisonniers, mais cette tendance est moins nette pour la saison juillet-août où l'on observe une alternance d'années excédentaires et déficitaires. La décennie 1970 présente également une alternance d'années excédentaires et déficitaires durant quasiment toutes les saisons du domaine équatorial, mais de moindre amplitude pour les deux saisons sèches. Au cours de la décennie 1980, les moyennes mobiles sont, suivant les années, soit dans la zone excédentaire, soit dans la zone déficitaire, avec toutefois de faibles amplitudes (< -1). C'est donc dire que le domaine équatorial a été faiblement affecté par la sécheresse de ces années. De manière générale, la décennie 1990 est marquée par des anomalies négatives, excepté pour la saison juillet-août où les pluies sont majoritairement excédentaires.

En domaine subéquatorial, il ressort la même variabilité décennale mais, comparativement au domaine précédent, la décennie 1980 se caractérise par des anomalies négatives plus marquées (Fig. III-18 ; b1 à b4). Seule la saison juillet-août présente un signal plus intermittent après les années 1980, mais de faible amplitude. L'on note également qu'il n'y a pas de correspondance du point de vue statistique entre la variabilité pluviométrique régionale et celle d'une saison particulière, étant donné que les indices régionaux représentent une variable synthétique de l'ensemble des saisons. En revanche, pour les cinq domaines pluviométriques, il existe une relation entre les anomalies saisonnières et les indices régionaux, c'est-à-dire que les différents signaux présentent une phase excédentaire en début de période et des anomalies négatives essentiellement à partir

des années 1970. En revanche, seules les tendances décrites par la saison juillet-août dans les deux domaines (Fig. III-18 ; a2, b2) sont en opposition de phase avec les indices régionaux. En effet, l'on remarque que les années humides sont associées aux anomalies négatives au cours de cette saison, et inversement.

Comment expliquer que, malgré leur relative importante contribution au cumul annuel (12 % en domaine équatorial et 18 % en domaine subéquatorial), la variabilité pluviométrique de la saison juillet-août (Fig. III-18 b, d) ne soit pas en phase avec les anomalies interannuelles en domaine bimodal ? Les mécanismes saisonniers de la saison juillet-août sont-ils l'une des causes déterminantes de la variabilité annuelle des pluies ?

Nous avons étudié les variations pluviométriques de chacune des quatre saisons au cours des années les plus humides et celles les plus sèches de la période 1951-2002, afin d'évaluer la sensibilité saisonnière par rapport aux apports pluviométriques. Pour ce faire, nous avons pris comme échantillons les variations saisonnières des cinq années les plus humides (Fig. III-19 a, c) et celles des cinq années les moins humides (Fig. III-19 b, d). Ces années, classées par ordre croissant, sont répertoriées dans le tableau ci-dessous (Fig. III-19 e).



Figures III-19 : Boxplots représentant la comparaison des cumuls saisonniers entre les 5 années les plus humides et les 5 années les moins humides de la période 1951-2002 dans les domaines équatorial (a, b) et subéquatorial (c, d).

Il ressort qu'en domaine équatorial (Fig. III-19 a), les différences pluviométriques (en prenant en compte la médiane) entre les années les plus humides et les années les moins humides sont supérieures à 300 mm pour la saison mars-juin (PSP) et d'environ 120 mm pour celle de septembre-novembre (GSP), alors que la saison sèche d'été (juillet-août [PSS]) présente un écart d'environ 80 mm. En revanche, les cumuls pluviométriques semblent stables au cours de la saison sèche de décembre-février (GSP) quel que soit le type d'année, puisque les écarts sont inférieurs à 10 mm. L'on observe quasiment les mêmes tendances en domaine subéquatorial : environ 250 mm d'écart pour la PSP, 100 mm pour la GSP, 80 mm pour la PSS et moins de 10 mm pour la GSP.

C'est donc dire qu'en domaine bimodal, la sensibilité saisonnière par rapport aux années humides et sèches n'est pas strictement proportionnelle à l'importance des cumuls saisonniers. En effet, si les apports de la GSP sont plus importants de ceux de la PSP en ce qui concerne leur contribution au total annuel, c'est cette dernière saison qui est cependant la plus corrélée aux anomalies interannuelles et donc la plus contrastée pendant les années extrêmes. Cette différence peut s'expliquer à partir des mécanismes de mise en place de chacune d'elles. En effet, la première saison des pluies (mars-juin), encore appelée saison océanique, est alimentée par l'humidité provenant essentiellement du golfe de Guinée, et associée à la remontée vers le nord de la ZCIT. Elle intervient après une relativement longue période sèche et donc avec des conditions continentales relativement sèches (fort albédo, faible humidité, faible rugosité, etc.). Les mécanismes de sa mise en place sont plus saccadés et induisent des pluies parfois irrégulières et moins soutenues qui donnent au profil pluviométrique une allure étalée. En revanche, la grande saison des pluies (septembre-novembre) est sous l'emprise d'une dynamique continentale où prévalent des conditions plus humides, c'est-à-dire favorable au développement des systèmes convectifs méso-échelle. Cette saison se manifeste par le retrait de la ZCIT vers le sud et induit des pluies plus régulières et plus importantes, d'où son profil en cône. Toutefois, les plus fortes corrélations entre la PSP et les anomalies interannuelles traduisent le fait que **le régime bimodal camerounais est plus associé à la dynamique océanique, même si la saison continentale est celle qui apporte le plus de précipitations.**

Par ailleurs, les différences pluviométriques de la saison juillet-août entre années humides et années sèches traduisent sa sensibilité par rapport aux anomalies de pluies. Plusieurs études précédentes ont essayé de décrire les processus associés aux précipitations de cette saison dans le sud du Cameroun. Il ressort qu'à l'échelle interannuelle, les précipitations de la saison juillet-août sont principalement associées à des SST plus chaudes dans le golfe de Guinée (Bella-Medjo, 2008). Ainsi, les anomalies positives des eaux du golfe de Guinée entraînent une baisse du gradient océan/continent et donc une modification de la circulation en surface favorisant l'apport d'humidité dans cette région. À l'échelle décennale, les précipitations de cette saison sont en général corrélées aux processus océaniques de plus large échelle (Janicot *et al.*, 2001 ; Rowell,

2003). Ainsi, ces anomalies de SST induisent une combinaison parfois complexe des mécanismes de la dynamique atmosphérique (vent en surface et en altitude, convection, pression au niveau de la mer, etc.) qui déterminent à leur tour les anomalies de position de la ZCIT. Généralement, les années excédentaires dans le domaine bimodal sont associées à une position plus méridionale de la ZCIT qui est susceptible d'induire des pluies précoces ou tardives et donc une modification de la longueur des saisons. Ainsi, lorsque les deux intersaisons pluvieuses sont excédentaires, les pluies sont déficitaires en juillet-août, et inversement. Toutefois, ces mécanismes liés à l'empiètement d'une saison sur une autre sont difficilement perceptibles à cette échelle, étant donné que nous travaillons sur des saisons prédéfinies et fixes (nous y reviendrons plus en détail dans le chapitre suivant consacré à l'intrasaisonnier).

b) Le domaine unimodal

Rappelons que le domaine unimodal camerounais est constitué par les stations des domaines côtier, tropical humide et soudano-sahélien correspondant aux classes 3, 4 et 5 de la CAH2, respectivement (Cf. figure III-11 B).

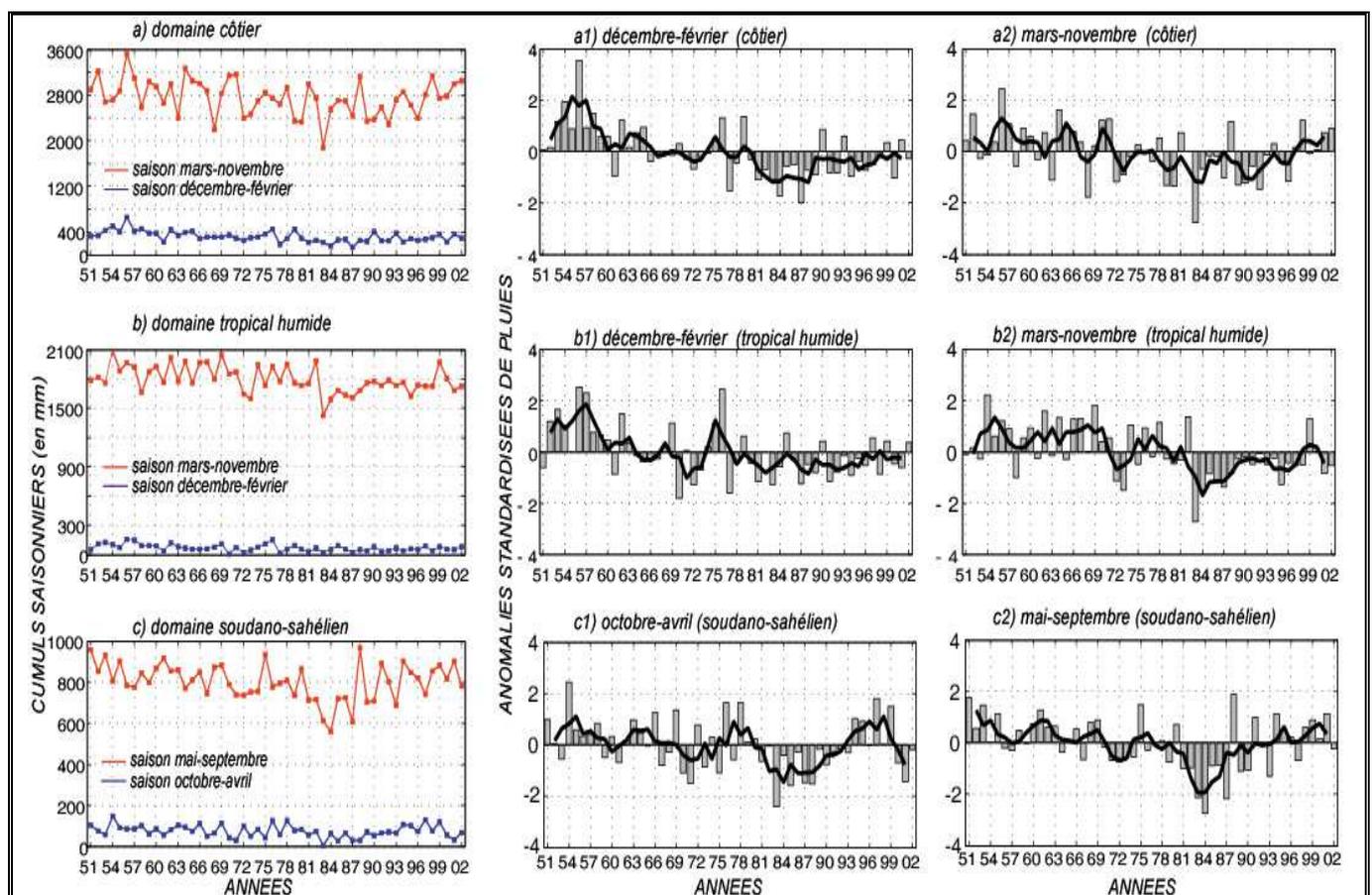


Figure III-20: Contribution moyenne saisonnière des pluies en domaine unimodal : a) domaine côtier ; b) domaine tropical humide ; c) domaine soudano-sahélien ; (a1 et a2) : anomalies saisonnières en domaine côtier ; (b1 et b2) : idem que précédemment en domaine tropical humide ; (c1 et c2) : idem que précédemment en domaine soudano-sahélien.

Les figures III-20 présentent d'une part la variabilité des cumuls de chacune des deux saisons annuelles au cours de la période 1951-2002 et d'autre part leurs anomalies standardisées pour la même période. Les cumuls saisonniers (saison des pluies) sont fortement contrastés entre les trois régions (Fig. III-20 a, b et c) : ils oscillent entre 2 000 mm et 3 500 mm en domaine côtier et entre 1 500 mm et 2 000 mm en domaine tropical humide. Lorsqu'on passe en domaine soudano-sahélien, les pluies de saisons humides fluctuent essentiellement entre 600 et 900 mm. Ainsi, dans ces différents domaines pluviométriques, la saison humide contribue pour plus de 90 % au total pluviométrique annuel (Tab.III-3). Toutefois, malgré leur faible contribution, les saisons sèches sont tout aussi significativement corrélées (test de Monte-Carlo à 99 %), témoignant ainsi de leur importance dans la variabilité des cumuls interannuels. En effet, les corrélations entre anomalies de saisons sèches et indices régionaux sont égales à 0,63, 0,52 et 0,59 pour les domaines tropical humide, soudano-sahélien et côtier, respectivement. Par ailleurs, les corrélations entre les saisons humides et les indices régionaux sont toutes supérieures à 0,9.

Toutefois, la distribution des anomalies saisonnières n'est pas toujours proportionnelle à la qualité pluviométrique d'une année. Par exemple, en domaine côtier, l'année 1983 qui est la plus déficitaire de la période (anomalie > -2,5 ; voir figure III-15 c) se caractérise à l'échelle saisonnière par une anomalie plus marquée en saison de pluies (> -2,5), alors que la saison sèche présente des amplitudes plus faibles (<-2 ; figures III-20 a1 et a2). Un constat similaire peut être fait pour la même année en domaine tropical humide (Fig. III-20 b1 et b2) et en 1984 en domaine soudano-sahélien (Fig. III-20 c1 et c2).

Tableau III-3 : Contribution saisonnière moyenne des pluies en domaine unimodal et corrélations entre anomalies saisonnières et indices régionaux (test de Monte-Carlo à 99 %).

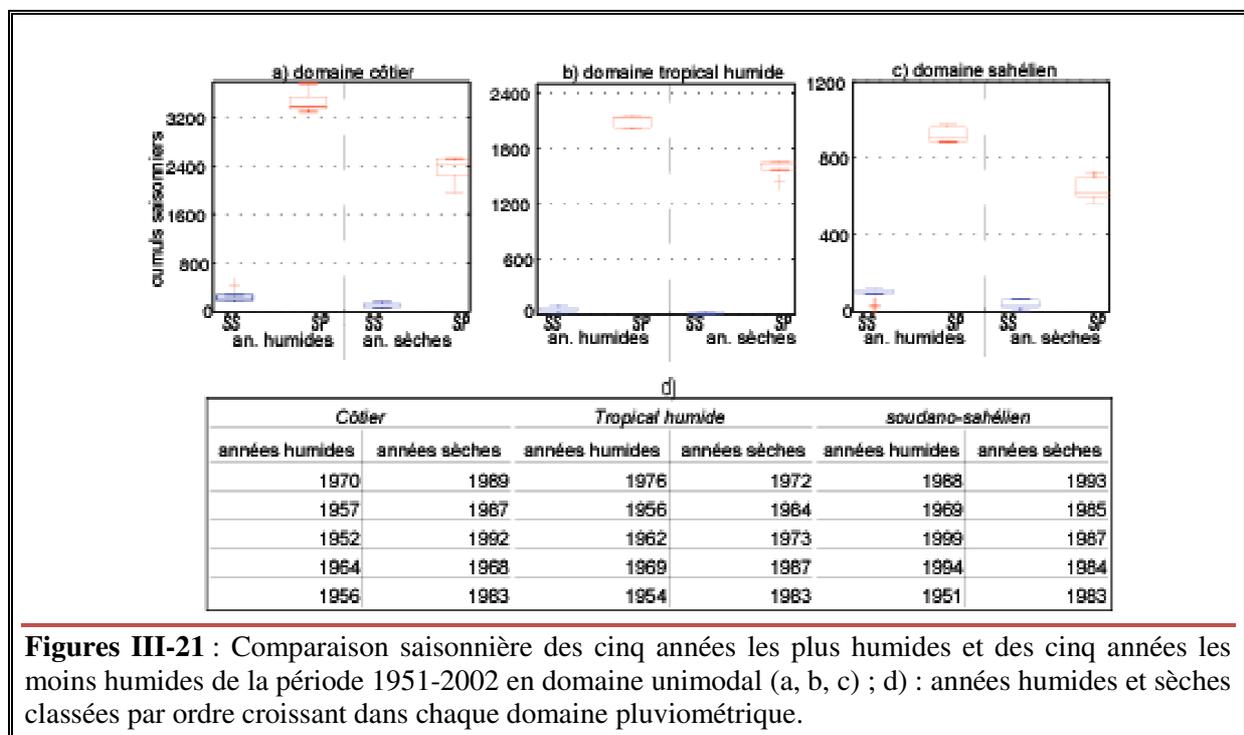
Régions	COTIER		TROPICAL HUMIDE		SOUDANO SAHELIEN	
	Contribution saisonnière	Corrélations	Contribution saisonnière	Corrélations	Contribution saisonnière	Corrélations
<i>saison sèche</i>	9, 11(%)	0,59*	3, 79(%)	0,63*	8, 19(%)	0,52*
<i>saison humide</i>	90, 88(%)	0,97*	96, 21(%)	0,98*	91, 80(%)	0,95*

*Test de Monte-Carlo significatifs à 99%

Par ailleurs, au cours des années excédentaires, s'il existe globalement une adéquation entre les anomalies de la saison des pluies et les indices régionaux de chaque domaine pluviométrique, on relève cependant des exceptions : en domaine côtier, par exemple, l'année la plus humide (1956) se caractérise par des anomalies positives de forte amplitude (~4) au cours de la saison sèche, alors qu'elles sont plus modérées (~2,5) au cours de la saison des pluies. En revanche, la deuxième année la plus humide de cette région (1964) se caractérise par une tendance inverse, c'est-à-dire par une anomalie

positive de faible amplitude en saison sèche (< 1) et une anomalie de plus forte amplitude au cours de la saison des pluies ($> 1,5$). On retrouve le même signal en domaine tropical humide au cours des années 1954 et 1969. Le probable retour aux conditions plus humides du domaine soudano-sahélien est mieux mis en évidence avec les moyennes mobiles qui sont dans la zone excédentaire tout au long de la période post-1990.

La comparaison saisonnière des cinq années les plus humides et des cinq années les moins humides de la période 1951-2002 dans chaque domaine pluviométrique unimodal confirme que, contrairement aux autres domaines pluviométriques, c'est dans celui du soudano-sahélien que l'on retrouve les années exceptionnellement humides au cours de la décennie 1990 (1994, 1999). Il ressort d'autre part que les décalages les plus importants se font au cours des saisons des pluies (Fig. III-21) : suivant la médiane, on a une différence d'environ 1 000 mm en domaine côtier, 400 mm en domaine tropical humide et 300 mm en domaine soudano-sahélien.



Figures III-21 : Comparaison saisonnière des cinq années les plus humides et des cinq années les moins humides de la période 1951-2002 en domaine unimodal (a, b, c) ; d) : années humides et sèches classées par ordre croissant dans chaque domaine pluviométrique.

En revanche, la différence moyenne des cumuls de saisons sèches entre années humides et sèches est relativement faible dans tous les domaines pluviométriques. En général, les années excédentaires en domaines côtier et tropical humide sont marquées essentiellement par une recrudescence des précipitations au sein de la saison des pluies alors que les cumuls de saisons sèches varient peu.

En domaine soudano-sahélien en revanche, l'on relève une nette augmentation des pluies de saisons sèches au cours des années excédentaires, conjointement avec le renforcement des pluies en saison humide.

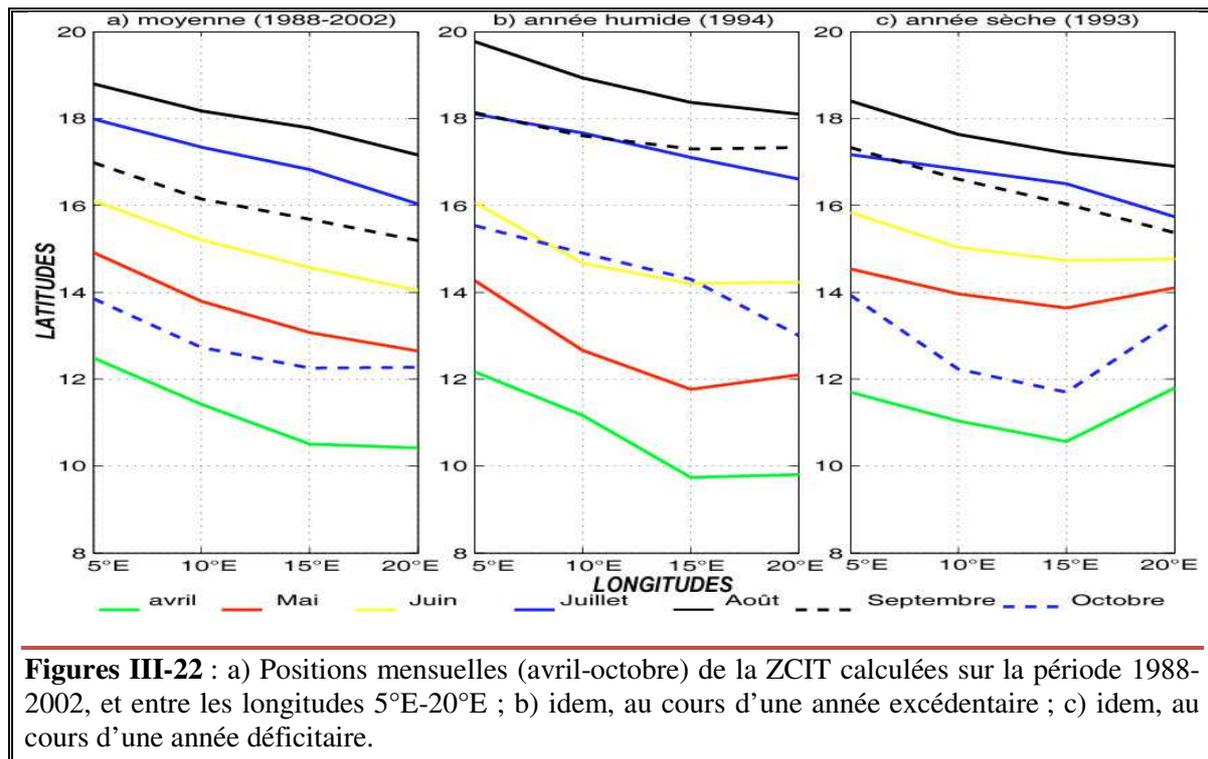
DISCUSSION

Il ressort de ce qui précède que la variabilité interannuelle des pluies au Cameroun est régie essentiellement par des modulations d'échelle saisonnières et donc est contrôlée par les mécanismes saisonniers du système climatique (terre-océan-atmosphère). Nous n'avons pas la prétention de faire une analyse exhaustive de la climatologie associée à la variabilité des précipitations au Cameroun puisque quelques études précédentes y sont contribuées, que ce soit en relation avec les états de surface continentale (Santiago, 1998) ou dans le but de rechercher les connexions atmosphérique et océanique (Bella-Medjo, 2008). Nous rappelons simplement quelques aspects de la climatologie régionale qui sont associés au système de mousson et qui sont donc susceptibles d'expliquer la variabilité spatiale ainsi que les contrastes saisonniers et interannuels décrits plus haut. En effet, le signal saisonnier qui a également été retrouvé à l'échelle régionale (Maloba Makanga, 1998 ; Bigot, 1997, 1998 ; Moron, 1995) est parfois associé à certains mécanismes convectifs anormaux au sein de la ZCIT. Les corrélations entre les variations des positions méridiennes et zonales du Centre de Convection Africain (CCA) détectées par l'OLR — qui représente le domaine le plus convectif au sein de la ZCIT — ainsi que son intensité moyenne et son extension d'une part et les principaux modes de variabilité des températures de surface océanique (SST) d'autre part, ont été calculées pour la période 1975-1991 (Moron, 1995). Il ressort que le premier mode des SST représentant la variabilité du Pacifique central et oriental (événement ENSO) est associé à l'extension et à l'intensité moyenne du CCA, essentiellement pendant l'été boréal, lorsque le CCA s'étend de l'océan Atlantique vers les hautes terres d'Afrique orientale. À l'échelle de l'Afrique centrale, les positions latitudinale et longitudinale du CCA ainsi que son intensité sont très instables. Dans l'ensemble, le CCA atteint sa position la plus méridionale en été austral, mais avec une amplitude plus marquée pendant l'été boréal de l'année 1984 qui a été marquée par un réchauffement plus important des SST (Bigot, 1997). Sur le plan zonal, les variations spatiales du CCA sont plus fortes vers l'est, avec des anomalies plus prononcées entre juin 1982 et décembre 1983. Il ressort également de cette étude que la forte convection côtière est due à un déplacement vers l'ouest du CCA, ainsi qu'à sa grande extension spatiale pendant les saisons humides. Après la période 1983, l'évolution de la pluviométrie en Afrique centrale est plus associée à la position de la ZCIT qu'à sa structure.

Ainsi, la variabilité annuelle ainsi que les contrastes saisonniers dans une même région ou entre différents domaines pluviométriques sont prioritairement contrôlés par la translation méridienne de la ZCIT ainsi que ses anomalies de position commandées essentiellement par le système de mousson. Ce propos est bien illustré par les figures III-22 qui présentent d'une part les positions moyennes de la ZCIT sur la fenêtre du Cameroun sur la période 1988-2002 et d'autre part ses différentes positions entre les mois d'avril et octobre (hémisphère nord) en années humides et sèches. Sachant que les années

excédentaires et déficitaires varient suivant les régions climatiques du Cameroun, nous avons pris en compte les composites (humide/sèche) de l'indice soudano-sahélien.

En moyenne (1988-2002), la ZCIT oscille entre 11°N et 18°N entre les mois d'avril et octobre et présente une direction nord-ouest/sud-est. Ainsi, sa position entre deux limites zonales (ici entre 5°E et 20°E) peut être décalée de près de 2° de latitude au cours de certains mois (Fig. III-22 a). Sa position la plus septentrionale se situe au mois d'août alors que sa position la plus méridionale (dans l'hémisphère nord) se situe en avril.



La comparaison des positions de la ZCIT au cours des années la plus humide et la moins humide de la région soudano-sahélienne du Cameroun montre un décalage allant de 1 à 2° de latitude. Si la ZCIT est située plus au sud en année sèche, sa structure est cependant plus méridienne qu'en année humide. Ainsi, comme l'ont montré des études précédentes, une position plus septentrionale de la ZCIT entraîne des pluies excédentaires au Sahel et des anomalies négatives sur les côtes guinéennes (Janicot, 1996), et inversement. Sur le plan zonal, la circulation atmosphérique tropicale est associée essentiellement au gradient thermique résultant du contraste continent/océan, et l'influence du régime de mousson à l'intérieur des terres est subordonnée aux processus continentaux (relief, végétation, etc.) ainsi qu'aux systèmes convectifs méso-échelles qui peuvent modifier localement la pluviométrie ainsi que son intensité (Beltrando *et al.*, 1990).

CONCLUSION

Dans ce chapitre, il était question d'étudier le cycle annuel et la variabilité interannuelle des précipitations au Cameroun au cours de la période 1951-2002, à partir des données d'observation du CRU et de données ponctuelles in situ. A l'échelle régionale, les isohyètes sont distribuées par bandes latitudinales essentiellement au nord de 5°N et en relation avec le balancement saisonnier de la ZCIT, même si certains éléments de la circulation atmosphérique (en particulier le Jet d'Est Africain et les ondes d'Est) ont aussi un cycle saisonnier prononcé qui influe fortement sur l'organisation des précipitations. Au sud de cette latitude, qui correspond à la basse-côte guinéenne et limite donc à peu de chose près le contact océan-continent sur une grande partie de l'Afrique de l'ouest, l'on relève essentiellement un gradient zonal, qui est en relation avec la proximité de l'océan, ainsi que l'influence des processus continentaux par rapport aux lignes de flux océaniques.

La régionalisation des précipitations issue de l'analyse factorielle montre principalement qu'à l'échelle annuelle, un mode bipolaire oppose les régimes unimodaux du nord et les régimes bimodaux caractérisant les stations du sud du Cameroun. À l'échelle interannuelle, la caractéristique principale des précipitations reste leur grande variabilité spatiale, mais les résultats de l'ACP relèvent des modulations en phase sur l'ensemble du pays, et qui séparent essentiellement, les périodes humides puis sèches situées de part et d'autre de l'année 1970. Cinq indices pluviométriques ont été définis pour le Cameroun, à partir de Classifications Ascendantes Hiérarchiques effectuées sur deux sources de données (CRU et stations). La comparaison des champs spatiaux des différentes classes au cours des sous-périodes 1951-1970, 1971-1990, présente sinon leur décalage vers le sud, du moins leur stabilité, surtout en ce qui concerne les classes des domaines équatorial et tropical humide. En revanche, la décennie 1991-2002 est marquée par un décalage important des classes du sud vers le nord. Ce décalage méridien, qui est probablement induit par une position plus septentrionale de la ZCIT au cours de la période, apporte des conditions plus humides en domaine soudano-sahélien.

L'analyse des cycles annuels et interannuels de chaque classe a permis d'appréhender plus en détail les particularités de chaque domaine pluviométrique : il ressort qu'à l'échelle annuelle, l'**intensité des cumuls mensuels** et l'**allure du profil pluviométrique** (caractéristiques des saisons juillet-août et mars-juin) sont les paramètres de différenciation des régimes pluviométriques au Cameroun. Ceci relève des processus qui régissent la pluviogenèse dans chaque région: influences maritime et continentale, mécanismes de systèmes convectifs de méso-échelles, perturbations, *etc.* À l'échelle interannuelle, l'étude de la stationnarité (SMWDA) des séries révèle des tendances parfois marquées, qui ne s'accompagnent toutefois pas de ruptures significatives aux tests de Mann-kendall à 95%. Par ailleurs, comparé à tous les autres domaines pluviométriques,

seul celui de la zone équatoriale est resté insensible à la sécheresse du début des années 80s.

Afin de rechercher les facteurs saisonniers qui déterminent les anomalies pluviométriques dans chaque domaine climatique, deux paramètres ont été testés :

- (i) la variabilité des cumuls mensuels suivant les seuils de 50, 100, 150 et 200 mm ;
- (ii) la contribution de chaque saison au total annuel.

Pour le premier paramètre, il ressort qu'en domaine subéquatorial, une diminution (augmentation) des cumuls annuels est associée à une réduction (accroissement) des mois à cumuls supérieurs à 150 mm, alors que pour les autres domaines du pays, c'est essentiellement la variabilité des pluies au seuil mensuel de 200 mm qui imprime les anomalies pluviométriques. Par ailleurs, dans les domaines côtier et équatorial, le seuil de 50 mm semble faible pour caractériser la qualité pluviométrique d'une année.

En ce qui concerne la contribution saisonnière aux cumuls annuels, les résultats montrent qu'en régime bimodal quasiment toutes les saisons sont significativement corrélées (test de Monte-Carlo à 99 %) au total annuel, excepté la grande saison sèche (décembre-février) en domaine équatorial et la petite saison des pluies (juillet-août) en domaine subéquatorial. Ce résultat explique l'importance des précipitations de la petite saison des pluies en domaine équatoriale, malgré leur plus faible contribution au total annuel (12%) par rapport au domaine sub-équatorial (18%).

En régime unimodal l'ensemble des saisons est significativement corrélé aux cumuls annuels, bien que la saison sèche n'y contribue en moyenne que pour 10 %. Par ailleurs, la comparaison des cumuls saisonniers au cours des années les plus humides et des plus sèches de la période 1951-2002, montre qu'en domaine soudano-sahélien les années excédentaires (déficitaires) sont caractérisées par une recrudescence (diminution) des précipitations aussi bien en saison humide que sèche. En revanche, les domaines tropical humide et côtier sont marquées en années excédentaires, par une recrudescence des précipitations au sein de la saison des pluies, alors que les cumuls des saisons sèches varient peu.

En définitive, il ressort de cette étude que la grande variabilité spatiotemporelle des pluies au Cameroun (illustré par cinq régimes distincts) est essentiellement contrôlée par des mécanismes d'échelles dans lesquels les modes saisonniers sont les plus importants. Cette approche a permis de caractériser les cycles moyens annuels et la variabilité interannuelle de la pluviométrie au Cameroun, en dégagant quelques tendances selon les domaines climatiques entre 1951 et 2002. Toutefois, il demeure que la problématique de la variabilité pluviométrique au Cameroun, et plus généralement en Afrique tropicale, ne se pose pas seulement en termes de cumuls annuels ou saisonniers puisque ceux-ci

masquent les configurations intrasaisonnères et ne nous renseignent pas davantage sur l'organisation et la distribution des pluies si chères aux populations vivant essentiellement de l'agriculture. Le chapitre suivant sera donc dévolu aux caractéristiques intrasaisonnères de la pluviométrie dans le but d'analyser leur lien avec la végétation.

CHAPITRE IV

VARIABILITE INTRASAISONNIERE DES PRECIPITATIONS AU CAMEROUN (1951-2002).

L'approche intra-saisonnière sera basée : (i) sur la recherche des facteurs qui modulent la variabilité des pluies pendant la saison humide. Seront étudiés, le nombre, la répartition et l'intensité des jours humides (resp.secs), et leurs liens avec la variabilité saisonnière ; (ii) seront également testés plusieurs critères de délimitation saisonnière (début/fin/longueur), afin de déceler le paramètre auquel les cumuls annuels et saisonniers sont le plus sensible; (iii) enfin, le nombre, la fréquence et la durée des épisodes secs intrasaisonnières (ou séquences sèches) seront analysés, afin d'évaluer (dans les prochains chapitres) leur influence sur le déroulement du cycle végétatif.

Dans le chapitre précédent, les données d'échelles larges du CRU ont permis de caractériser les cycles annuels et interannuels de la pluviométrie au Cameroun et de dégager les principales tendances dans différents domaines entre 1951 et 2002. Toutefois, la variabilité pluviométrique tropicale ne se réduit pas aux cumuls annuels ou saisonniers, qui masquent les configurations de plus courtes échelles de temps. Par exemple, des cumuls annuels identiques peuvent résulter de répartitions saisonnières et intrasaisonnières très différentes : on peut recenser un grand nombre d'évènements pluvieux de faible intensité ou des évènements pluvieux moins fréquents mais plus abondants. Il peut également survenir un démarrage précoce (tardif) ou une fin tardive (précoce) de la saison des pluies, entrecoupé -ou non- de périodes sèches plus ou moins longues. Tous ces cas de figures nécessitent une attention d'autant plus particulière que les états de surface - notamment le couvert végétal- y sont très sensibles.

La variabilité intra saisonnière des pluies a déjà fait l'objet de plusieurs études, que ce soit en Afrique de l'ouest (Le Barbé, 2002 ; L'Hôte et *al*, 2002 ; Sultan et *al*, 2004 ; Balme et *al*, 2006), en Afrique australe (Kijazi et *al*, 2004 ; Richard et *al*, 2002 ; Mapande et *al*, 2004) qu'en Afrique Orientale (Camberlin et *al*, 2002 ; Seleshi et *al*, 2006 ; Pohl, 2007 ; Camberlin et *al*, 2008). Dans la région équatoriale et centrale de l'Afrique – et comme cela a déjà été précisé- la principale contrainte des études aux échelles temporelles fines reste le caractère très lacunaire des données quand elles existent (Bigot, 1997 ; Maloba-Makanga, 1998 ; Tchiadeu, 2000). Au Cameroun, les conclusions des études envisagées dans le cadre du programme ICCARE restent souvent assez générales et lissées pour permettre des applications locales efficaces, qu'elles soient hydrologiques ou agronomiques. De plus, si la question de l'intrasaisonnier a déjà été abordée dans la région de l'étude, elle ne concerne que la période antérieure à 1993.

Dans ce chapitre, les données quotidiennes des 35 stations qui présentent des données complètes sur la période 1951-2002 seront utilisées, les analyses étant effectuées selon les 5 domaines pluviométriques définis précédemment par méthodes de régionalisation (voir chapitre III). Partant des liens qui existent entre climat et végétation, l'approche intrasaisonnière aura pour but, de rechercher les paramètres susceptibles de moduler la variabilité des pluies pendant la saison humide, et partant, d'influer sur le cycle végétatif.

Le chapitre est structuré en trois parties.

Dans un premier temps, nous étudierons les facteurs intrasaisonniers qui déterminent la qualité pluviométrique. Pour ce faire, nous nous intéresserons particulièrement : (i) au nombre, (ii) à la répartition et (iii) à l'intensité des jours humides (resp. des jours secs) ainsi qu'à leurs impacts sur les cumuls annuels et saisonniers.

La deuxième partie sera dévolue à l'étude de la variabilité de la période végétative selon les domaines pluviométriques du pays, afin de tester plusieurs méthodes de délimitation de saison des pluies (dates de démarrage et de fin, durées des saisons) en s'appuyant sur des critères qui ont été préalablement utilisés au Sahel et en régions guinéenne ou équatoriale.

Dans la troisième partie l'on qualifiera la variabilité des séquences sèches intrasaisonnières susceptibles d'influencer le déroulement des cycles végétatifs au travers de leurs nombres, fréquences et durées.

I-REPARTITION SPATIO-TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS QUOTIDIENNES AU CAMEROUN (1951-2002).

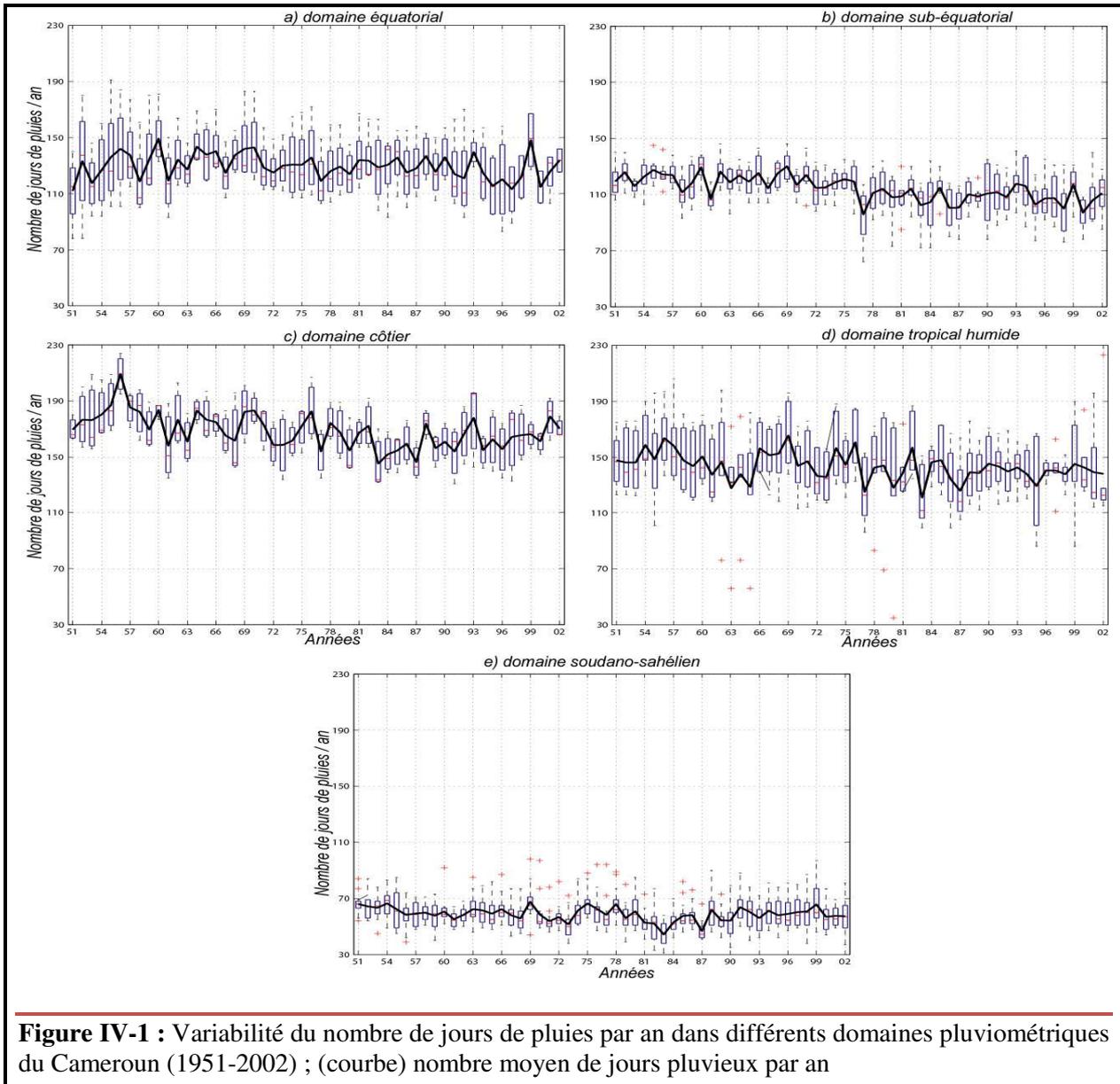
I-1.Variations interannuelles du nombre de jours humides et relations avec les cumuls annuels

Un jour humide (ou pluvieux) est défini ici comme celui ayant enregistré une hauteur de pluies supérieures ou égales à 1 mm. Ces jours pluvieux sont comptés pour chaque station au cours de la période 1951-2002 et les résultats sont classés suivant les 5 domaines pluviométriques du pays (Fig. IV-1). Le mode de représentation par boxplots (boîtes à moustaches) a l'avantage de renseigner aussi bien sur la variabilité temporelle du paramètre que sur leur dispersion spatiale (maximum, minimum, médiane, étendue et asymétrie des données *etc.* Le cycle interannuel moyen (courbe en noir) permet de synthétiser l'information entre les stations de chaque domaine.

I-1-1.En domaine bimodal

Il ressort qu'environ 110 à 140 jours sont pluvieux par an ($P \geq 1\text{mm}$) en domaine bimodal, avec cependant une plus grande dispersion spatiale en région équatoriale (Fig. IV-1a et b). Dans ce dernier domaine, on compte en moyenne 130 jours humides par an sur la période 1951-2002, avec un écart-type de ± 9 , alors qu'en années extrêmes, ce nombre peut varier de moins de 100 jours à plus de 150 jours. En domaine subéquatorial, la moyenne des jours humides sur l'ensemble de la période est de 114 jours (± 8), avec des valeurs extrêmes de 90 à 130 jours. L'avantage du nombre de jours pluvieux en domaine équatorial malgré le caractère plus accusé de la petite saison sèche (voir chapitre précédent) relève plus de sa situation plus méridionale. A l'échelle interannuelle, le nombre de jours humides présente une grande variabilité, sans doute à l'image de celle des cumuls annuels, avec une légère tendance déficitaire en fin de période. En effet, l'on relève des différences d'environ 10 à 20 jours de pluies entre périodes excédentaires (période avant 1970) et déficitaire (période post-1970). Les corrélations entre nombre de

jours humides/cumuls annuels montrent une forte dépendance entre les deux paramètres : respectivement 0,74 et 0,80 pour le domaine équatorial et subéquatorial.



I-1-2. En domaine unimodal

Dans la région côtière, 47% des jours en moyenne par an, reçoivent au moins 1mm de pluie, contre 39% en domaine tropical humide. Ces différences s'expliquent par la proximité océanique de la première région, qui est sous l'emprise de la mousson atlantique quasiment toute l'année. La dispersion spatiale (entre stations du même domaine pluviométrique) est également assez importante dans ces deux domaines pluviométriques, témoignant sans doute de l'influence des processus de surface continentale par rapport aux lignes de flux. Tout comme dans le domaine à régimes

bimodaux, le nombre de jours humide présente ici une grande variabilité interannuelle avec toujours cette adéquation avec les tendances annuelles. Les corrélations entre nombre de jours pluvieux et cumuls annuels sont de 0,73 pour le domaine côtier et de 0,87 pour le domaine tropical humide.

Evidemment, plus on va vers les latitudes septentrionales et plus le nombre de jours humides (secs) diminue (augmente). C'est le cas en région soudano-sahélienne qui ne recense qu'en moyenne 60 jours pluvieux par an. Ce nombre ne dépasse pas le cap de 100 jours en années exceptionnellement humides alors qu'en années sèches, il peut descendre sous la barre de 50 jours. Ce lien étroit entre les anomalies de pluies et le nombre de jours humides se traduit par une forte valeur de corrélation (0,81).

I-2. Cycles annuels du nombre de jours pluvieux et relations avec les cumuls annuels (1951-2002)

Les cycles annuels du nombre de jours pluvieux sont calculés suivant chaque domaine pluviométrique du Cameroun, en discriminant la période humide (1951-1970) et moins humide (1971-2002). Pour plus de lisibilité, les résultats sont présentés en moyennes lissées sur 10 jours, et le test de Student permet de déceler les différences significatives au seuil de 95% (Fig. IV-2).

Il ressort qu'en domaine bimodal, environ 50% de jours sont humides au cours du premier pic annuel, contre 70% lors du second (Fig. IV-2 a, b). C'est principalement au cours de ces deux maximums annuels que les différences entre années humides et moins humides sont significatives au test de Student. En revanche, lors de la petite saison sèche, seuls 30% des jours sont pluvieux, contre moins de 10% pour la grande saison sèche.

Dans les régimes en un seul mode et notamment en région côtière, ces taux sont supérieurs à 80% au cœur de la saison des pluies et se situent en-dessous de 20% au cours de la saison sèche (Fig. IV-2c). Comme dans les domaines précédents, on retrouve des différences significatives entre les deux types d'années, essentiellement sur le pic saisonnier, même si quelques jours isolés semblent également concernés en fin de saison. Un constat similaire peut être fait en domaine tropical humide mais, le pourcentage de jours humides reste en dessous de 80% au cœur de la saison des pluies et s'amenuise considérablement (<3%) au cours de la saison sèche (Fig. IV-2d). En domaine soudano-sahélien, le nombre moyen de jours humides se situe en dessous de 50% sur le pic saisonnier, alors qu'il est quasi-nul entre la fin du mois de novembre et le début du mois de mars (Fig. IV-2e). Ainsi, on perçoit la rudesse de la saison sèche au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur et de la côte.

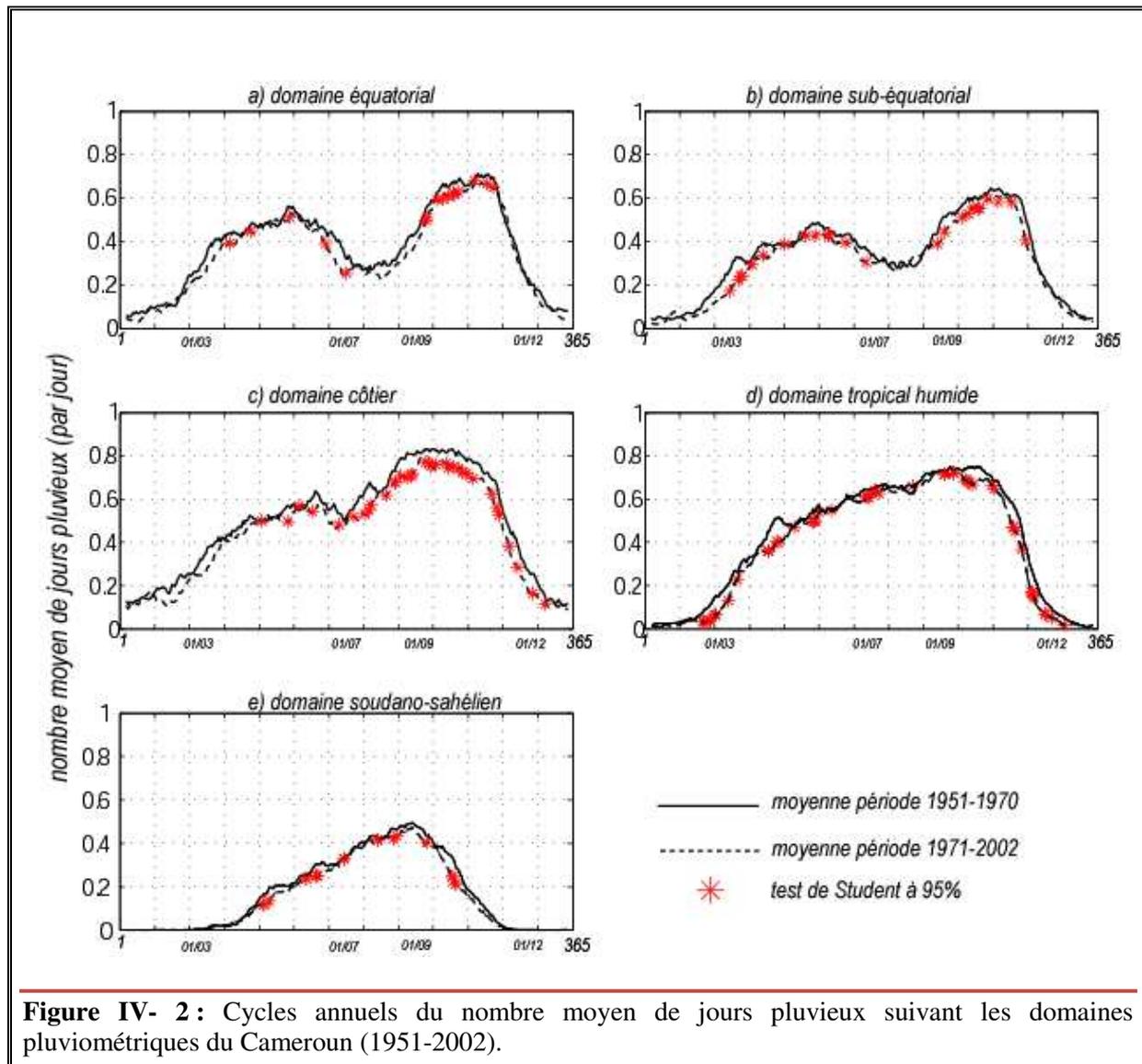


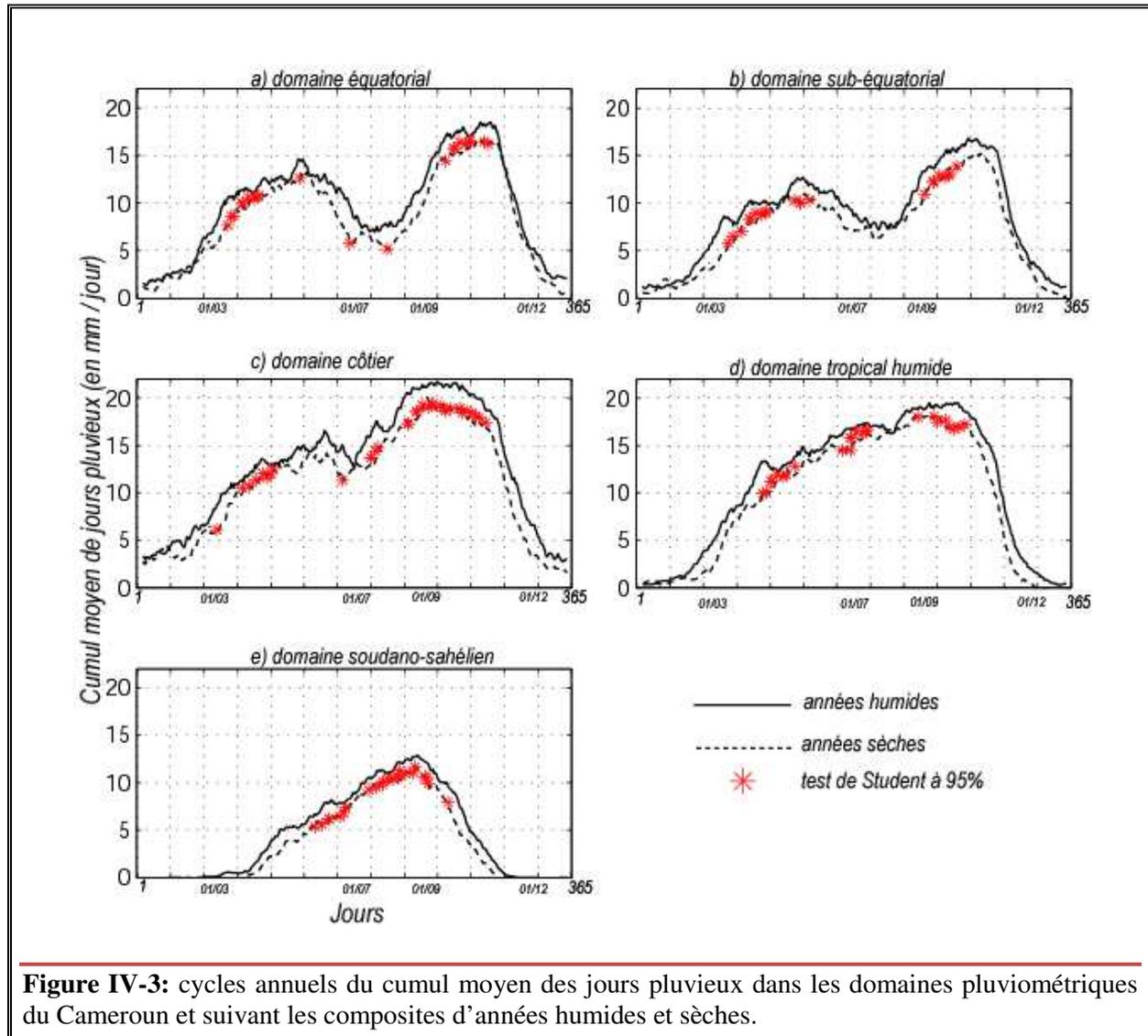
Figure IV- 2: Cycles annuels du nombre moyen de jours pluvieux suivant les domaines pluviométriques du Cameroun (1951-2002).

En résumé, la période post-1970 se caractérise par un déficit du nombre moyen de jours pluvieux par rapport à la première période et les différences significatives se retrouvent essentiellement pendant les saisons de pluies, et de façon plus marquée sur les modes de chaque cycle. La situation en domaine tropical humide semble assez particulière, puisque les différences significatives entre période humide et moins humide semblent persister toute l'année.

A l'échelle interannuelle, on relève une forte variabilité, en relation avec les tendances des cumuls annuels, puisque les corrélations entre les deux paramètres sont partout supérieures à 0,7. Toutefois, ces fortes corrélations doivent être considérées avec prudence, puisqu'elles englobent l'ensemble des jours pluvieux, sans tenir compte de l'intensité des cumuls qui est pourtant un facteur important de différenciation des domaines pluviométriques camerounais.

I-3. Cycles annuels de l'intensité des cumuls journaliers au Cameroun

Bien que régulières, les cumuls journaliers de faibles intensité n'ont pas la même importance bioclimatique que de fortes pluies intermittentes, d'où l'intérêt d'analyser la distribution annuelle de l'intensité des cumuls journaliers. Celle-ci est étudiée suivant les domaines pluviométriques, en discriminant deux sous-périodes d'égale longueur constituée d'une composite des 26 années les plus humides et des 26 années les moins humides de la période 1951-2002.



Les résultats montrent que le cumul moyen de pluies est supérieur à 15mm/jour sur près de 75% de la saison humide sur les domaines tropical humide (Fig. IV-3d) et côtier (Fig. IV-3c) alors qu'en domaine bimodal, seules les précipitations du mois d'octobre (pic de la 2^e saison de pluies) sont au dessus de ce seuil (Fig. IV-3a, b). Par ailleurs, en domaine soudano-sahélien c'est seulement au cœur de la saison des pluies que les cumuls dépassent la barre de 10mm/jour (Fig. IV-3e). Dans l'ensemble, les déficits journaliers en

années sèches (par rapport aux années humides) sont estimés à environ 20% ; ici encore – et de manière évidente- les différences significatives (test de Student à 95%) des hauteurs moyennes des pluies journalières au cours d'années humides et sèches se situent sur les pics saisonniers.

I-4. Typologie de pluies journalières selon différents seuils et relations avec les cumuls annuels

Afin d'étudier la répartition des cumuls journaliers suivant leur intensité, il est calculé pour chaque type d'année d'une part, le nombre de jours secs ($P < 1\text{mm}$) et d'autre part, le nombre de jours pluvieux suivant différents seuils. Ces choix s'appuient sur des études de typologie des pluies en Afrique soudano-sahélienne (Carbonnel, 1985 ; Olaniran, 1991, Ilesamni, 1972) et centrale (Samba-Kimbata, 1991 ; Tchiadeu, 2000 ; Suchel, 1972). Les auteurs ont classé les pluies journalières des plus faibles aux plus exceptionnelles. De manière générale, il est admis qu'en domaine sahélien et soudanien, les cumuls journaliers inférieurs à 20mm relèvent des *pluies fines et continues de mousson* et correspondent dans le schéma des types de temps, à la zone la plus septentrionale de la mousson. Les cumuls entre 20mm - 40mm seraient liés à la mousson proprement dite, alors que les plus forts relèvent des mécanismes de méso-échelle de type lignes de grains. Dans la bande équatoriale où les pluies sont généralement d'origine convective (Bigot, 1997 ; Santiago, 1998), les classes de pluies sont généralement constituées de cumuls plus importants. Quoiqu'il en soit, ces différentes approches de classification restent empiriques et assez subjectives. Par exemple, les pluies journalières fluctuant autour de 40mm sont qualifiées de « modestes » par Samba-Kimbata dans le bassin congolais alors qu'au Cameroun Suchel les classent dans la moyenne. Il en est de même des cumuls supérieurs à 40mm qui sont considérés comme fortes au Cameroun alors qu'elles restent modérées dans le bassin congolais. Notre objectif étant ici d'étudier le poids de différentes classes de pluies dans le cumul annuel, nous avons distingué essentiellement 3 classes de pluies en tenant compte des disparités pluviométriques entre nos domaines : pluies faibles ($P = [1\text{mm} - 5\text{mm}]$) ; pluies moyennes ($P = [5\text{mm} - 30\text{mm}]$) et pluies fortes ($P > 30\text{mm}$).

Le tableau IV-1 présente, la répartition du nombre de jours secs (1^{er} colonne) et du nombre de jours pluvieux suivant 3 classes d'intensité, au cours d'années humides et sèches. Suivant chaque type d'année, les cumuls de chaque seuil de pluies sont exprimés en pourcentage par rapport aux cumuls annuels.

Tableau IV-1 : Comparaison du nombre de jours secs ($P < 1\text{mm}$) et pluvieux ($P \geq 1\text{mm}$) suivant les composites humides et sèches de la période 1951-2002 dans les domaines pluviométriques du Cameroun : les jours pluvieux sont classés selon différents seuils (intensité) et les cumuls de chaque seuil de pluies sont estimés en pourcentage par rapport au cumul annuel.

SEUILS PLUIES	$P < 1\text{mm}$		$1\text{mm} \geq P < 5\text{mm}$		$5 \geq P < 30\text{mm}$		$P \geq 30\text{mm}$	
	humide	sèche	humide	sèche	humide	sèche	humide	sèche
<i>Equatorial</i>	230j	241j	47j/6%	44j/7%	73j/54%	67j/58%	16j/39%	12j/35%
<i>Subéquatorial</i>	245j	257j	39j/6%	36j/6%	66j/54%	60j/56%	15j/40%	12j/37%
<i>Côtier</i>	187j	205j	58j/4%	53j/5%	85j/36%	78j/39%	35j/59%	29j/56%
<i>Tropical humide</i>	215j	227j	48j/6%	46j/7%	85j/58%	78j/60%	16j/35%	13j/33%
<i>Soudano-sahélien</i>	303j	309j	17j/5%	17j/5%	35j/51%	32j/53%	9j/44%	7j/41%

On compte en moyenne 240 jours secs en domaine bimodal, 220 en domaine tropical humide, 190 en domaine côtier et jusqu'à plus de 300 jours secs par an en domaine soudano-sahélien. La comparaison du nombre de jours secs entre composites humides et sèches montre des écarts allant de 18 jours en domaine côtier, à 6 jours en domaine soudano-sahélien, alors qu'ils fluctuent autour de 11 jours dans les autres régions. La répartition des classes pluviométriques suivant leur intensité montre que dans l'ensemble, les pluies faibles représentent seulement 4 à 7% des cumuls moyens annuels, avec une différence d'environ 2 % entre années humides et sèches. Il en est de même du nombre de jours à cumuls faibles, où on note une différence de 2 à 5 jours suivant les deux types d'années. Les pluies moyennes quant à elles représentent plus de 50% du cumul annuel, sauf en domaine côtier où ce taux est d'environ 35%, avec une différence de 3% entre années humides et sèches. La classe supérieure à 30mm/jour quant à elle représente plus de 55% des cumuls annuels en domaine côtier, environ 35% en domaine unimodal et environ 40% en domaine soudano-sahélien.

En somme, plus de 70% de jours annuels reçoivent moins de 1mm de pluie en domaine soudano-sahélien camerounais, alors que ce taux est d'environ 60% en domaine bimodal et de 50% en domaine côtier. Les différences pour cette classe sont de l'ordre de 3% entre années humides et sèches. Ainsi, la qualité pluviométrique d'une année est relative à l'intensité des cumuls journaliers et au nombre de jours pluvieux. Dans la Haute vallée de l'Ouémé au Bénin, il a été montré que la baisse du nombre de jours de pluies contribuait à près de 75% du déficit pluviométrique annuel (Le Lay, 2005).

En ce qui concerne les jours pluvieux ($P \geq 1\text{mm}$), il ressort que près de 30% de leur effectif est constitué de faibles pluies en domaine bimodal, pour une contribution d'environ 6% au total annuel. Il en est de même des domaines tropical humide et côtier. C'est en domaine soudano-sahélien que la contribution des pluies faibles par au total annuel est la plus réduite (environ 25%). En fait, plus de 55% des cumuls annuels sont alimentés par des pluies moyennes ($P [5\text{mm}-30\text{mm}]$) dans quasiment tous les domaines

pluviométriques, sauf en domaine côtier où la plus forte contribution annuelle est assurée par des cumuls supérieurs à 30mm/jour. Ces résultats confirment que les précipitations comprises entre 5mm-30mm sont les plus récurrentes en domaine bimodal et dans la région tropicale humide, alors qu'en domaine soudano-sahélien, l'on peut relever d'importantes quantités de pluies sur une courte période (7 jours recueillent environ 41% des cumuls annuels). Cette dernière remarque traduit également l'influence des systèmes convectifs de méso-échelle de type lignes de grains dans la genèse des précipitations en région soudano-sahélienne, mais de façon moindre par rapport à la région ouest africaine où elles sont à l'origine de près de 90% du cumul annuel.

I-5. Corrélations entre intensité de jours pluvieux et cumuls annuels.

Les corrélations entre les différentes classes d'intensité de pluies et les cumuls annuels sont calculées afin de déterminer celles qui sont le plus associées aux anomalies de pluies. Les calculs sont effectués en tenant compte des composites humides/sèches précédentes, et les résultats sont testés par la méthode de Monte-Carlo à 95%.

Il ressort –sans surprise- que les corrélations entre la classe $P = [1\text{mm}-5\text{mm}]$ [et les cumuls annuels sont faibles dans l'ensemble, les deux paramètres évoluant même en opposition de phase en années humides (Tab. IV-2). Les précipitations moyennes (5mm-30mm) quant à elles, sont significativement corrélées avec les cumuls annuels dans l'ensemble des domaines pluviométrique et ce, aussi bien en années humides que sèches. Par ailleurs, les cumuls annuels de l'ensemble des domaines pluviométriques sont particulièrement sensibles à la classe d'intensité $P > 30\text{mm}$, et de façon plus marquée en domaine côtier.

Tableau IV-2 : Corrélations entre cumul annuel et hauteur moyenne des jours pluvieux suivant différents seuils et composites d'années humides et sèches de la période 1951-2002

SEUILS PLUIES	$1\text{mm} \geq P < 5\text{mm}$		$5 \geq P < 30\text{mm}$		$P \geq 30\text{mm}$	
	humide	sèche	humide	sèche	humide	sèche
<i>Equatorial</i>	-0,01	0,42	0,71*	0,59*	0,55*	0,41
<i>Subéquatorial</i>	-0,11	0,44	0,64*	0,63*	0,54*	0,44
<i>Côtier</i>	-0,35	0,05	0,85*	0,39*	0,74*	0,65*
<i>Tropical humide</i>	-0,22	0,01	0,60*	0,75*	0,58*	0,40
<i>Soudano-sahélien</i>	-0,14	0,37	0,85*	0,48*	0,54*	0,35

* corrélations significatives au seuil de Monte-Carlo à 95%.

Ainsi, contrairement aux résultats trouvés en domaine soudanien ouest-africain (Le Lay et al, 2005), la relation entre cumul annuel et hauteur moyenne des jours pluvieux est moins importante pour des seuils faibles et croît rapidement lorsque le seuil augmente.

Il faut ici faire un point de méthode en notant d'abord la difficulté qu'il y a à caractériser la pluviométrie journalière sur un espace considérable, même partitionné en régions homogènes. En effet, l'utilisation des cumuls journaliers, induit un biais lié à une addition d'événements pluviométriques d'origines différentes (par exemple, un système convectif de grande échelle et une ligne de grain). De plus, les résultats sont fortement dépendants de l'échelle temporelle choisie. Ainsi, le cumul journalier moyenné sur une période de 5, 10 ou 30 jours sera rarement nul. Dans les analyses ci-dessus par exemple, les résultats sont inversement proportionnels à la taille des composites : plus le nombre d'années considérées est important et plus les écarts sont réduits.

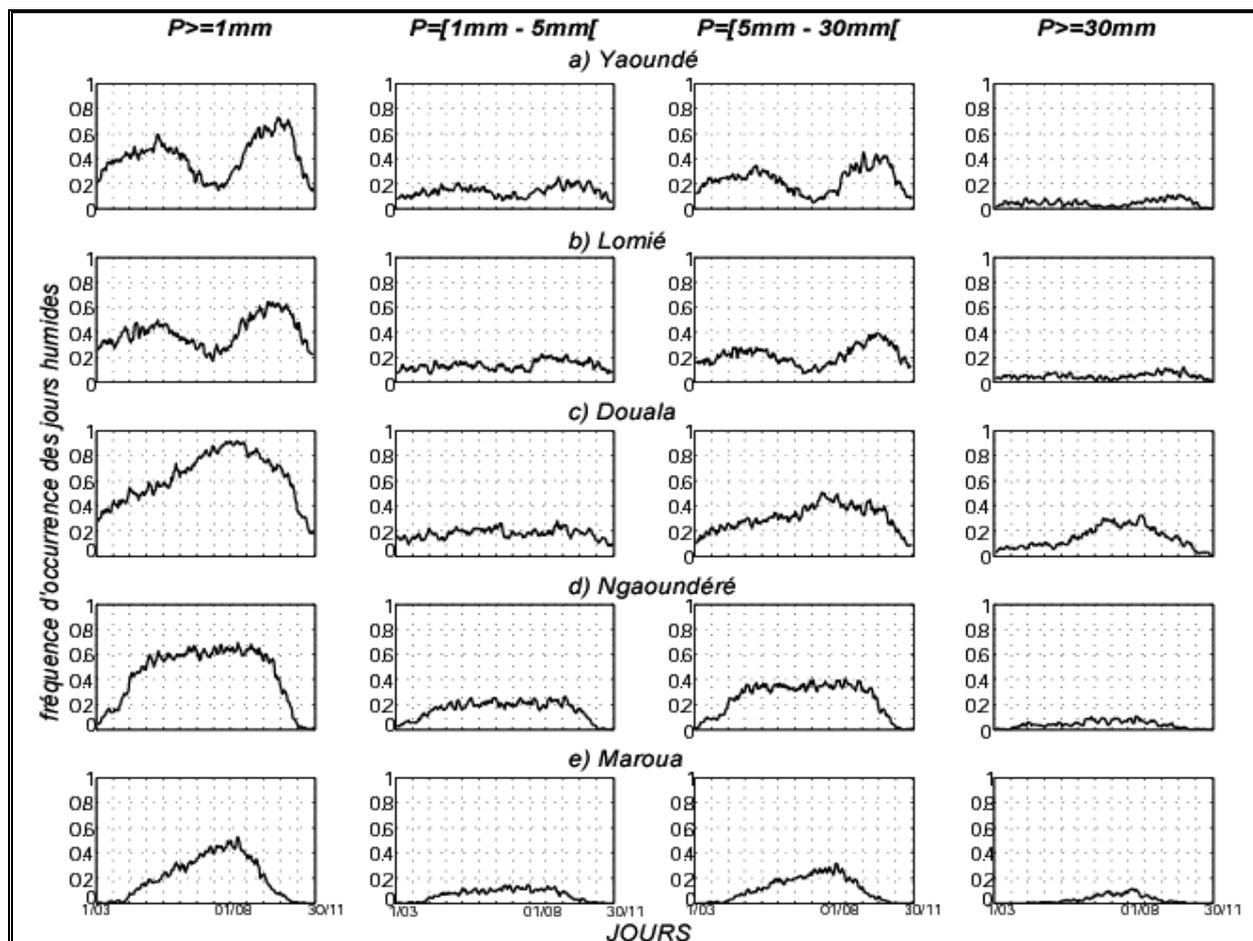


Figure IV -4: Fréquence d'occurrence des jours pluvieux entre le 1^{er} mars et le 30 novembre au cours des 52 années d'observation (1951-2002) et suivant différentes classes de cumuls journaliers ; les stations a) à e) représentent respectivement les domaines équatorial, subéquatorial, côtier, tropical humide et soudano-sahélien ; pour plus de lisibilité, les résultats sont présentés en moyennes lissées sur 5 jours.

Sur le plan spatial, l'utilisation d'indices sur plusieurs stations et sur un espace considérable est à même de générer des biais induits par un lissage important des données. De plus, Le Lay (2005) a montré que le seuillage des précipitations - qui permet de ne

considérer que les évènements significatifs dans le cumul annuel- doit tenir compte de la surface d'intégration des pluies. Ainsi, un seuil donné est considéré comme un évènement pluvieux important s'il est moyenné sur une grande surface. Par exemple, dans la Haute Vallée de l'Ouémé, la part de variance du cumul annuel expliquée par le nombre de jours pluvieux atteint son maximum (0,8) pour des seuils faibles (5mm-10mm) sur des grandes surfaces (586Km² - 14400Km²), alors qu'inversement à l'échelle stationnelle, la variance du cumul annuel est essentiellement expliquée par le nombre de jours pluvieux. Ainsi, le faible décalage entre années humides et sèches est la conséquence de la prise en compte d'indices qui représentent la moyenne de plusieurs stations aux caractéristiques intrasaisonniers variées. Pour illustrer ce propos, la même analyse est effectuée sur les stations représentatives de chaque domaine pluviométrique tout en discriminant les mêmes seuils de pluies (Fig. IV-4).

La période retenue s'étend entre le 1^{er} mars et le 30 novembre. Ainsi, pour chacun des 275 jours des 52 années de chaque station, l'on compte le nombre de fois où le cumul de pluies appartient à chacun des seuils fixé (Fig. IV-4). En d'autres termes, le nombre de jours pluvieux (Fig. IV-4 ; planches de gauche) est décomposé suivant différents seuils.

Il en ressort que les cumuls journaliers faibles (<5mm) sont rares au cours de la saison humide dans toutes les stations pluviométriques, puisque leur nombre ne dépasse pas le seuil de 20% et leur distribution semble constante tout au long de la période (Fig. IV-4 ; colonne 2). Ce constat permet de dire que les cumuls inférieurs à 5mm/jour expliquent faiblement la répartition des cycles annuels. En revanche, dans tous les domaines pluviométriques, c'est essentiellement des cumuls journaliers moyens (P= [5mm- 30mm]) qui sont les plus récurrents au cours de la saison des pluies : cette classe de pluie représente près de 40% de jours pluvieux sur les maximums (pics) pluviométriques, contre moins de 20% pour les fortes pluies (P>=30mm). Pour cette dernière classe, le seuil de 30% n'est atteint qu'en domaine côtier (station de Douala) et au mois d'août. Il ressort également que dans les stations choisies, les corrélations entre classes de pluies et cumuls annuels (non présentés) présentent des tendances similaires qu'à l'échelle régionale (Tab. IV-2), mais avec des valeurs plus importantes. Ainsi, la prise en compte de données ponctuelles réduit considérablement la variance, d'où l'importance de préciser le seuillage et la surface d'intégration des pluies lors de la présentation des résultats.

Synthèse partielle

Trois principaux points se dégagent des analyses ci-dessus :

- En domaine bimodal, 30% à 35% de jours sont pluvieux ($P \geq 1\text{mm}$) par an, contre 47%, 41% et 17% respectivement pour les régions côtière, tropical humide et soudano-sahélien ; la différence du nombre de jours humides entre années humides et sèches est d'environ 5% et se situent particulièrement aux cœurs de saisons humides.
- Les cumuls journaliers les plus fréquents en saison des pluies se situent dans la classe [5mm-30mm] et représentent en moyenne 40% des jours pluvieux, d'où la forte corrélation de cette classe de pluies avec les cumuls annuels.
- La sensibilité du cumul annuel par rapport à la diminution du nombre de jours pluvieux et de la baisse de leur cumul moyen traduit l'importance de ces deux paramètres sur la qualité pluviométrique d'une année. De ce fait, un cumul pluviométrique observé sur une période donnée est égale au produit du nombre d'évènements pluvieux et de la somme des cumuls par évènement pluvieux.
Pan=CJ x NJP. (Pan pour Pluies annuelles ; NJP pour Nombre de Jours de Pluies ; CJ pour Cumul Journalier).

II- DEMARRAGE DE LA SAISON DES PLUIES AU CAMEROUN SUIVANT DIFFÉRENTES APPROCHES

Malgré de multiples travaux conduits jusqu'ici, la délimitation optimale de la saison des pluies en Afrique tropicale reste préoccupante en raison de sa variabilité dans l'espace et le temps. La différenciation des saisons s'appuyant sur des cumuls mensuels et suivant un seuil fixé de manière empirique - comme effectué dans le chapitre précédent, où le seuil de 50mm permettait différencier les mois de saisons humides ($P > 50$) et de saison sèche ($P < 50\text{mm}$) - s'avère trop globale, tant on sait leur grande variabilité dans l'espace et le temps.

En effet, les critères de différenciation des mois ou des saisons humides et sèches dépendent de la dynamique climatique de chaque région et doivent être définis en tenant compte du domaine de leur application. En partant des méthodes traditionnelles les plus irrationnelles comme l'apparition de certains insectes jusqu'aux techniques les plus complexes, les différentes approches utilisées jusqu'ici pour délimiter la saison des pluies ont un but essentiellement agronomique, hydrologique ou climatique. Selon Steward (1991), la date de début de la saison des pluies est la variable essentielle à partir de laquelle les autres attributs de la saison sont identifiés, et de cette date dépendra la qualité estimée de la saison des pluies.

Suivant les critères agronomiques, le démarrage de la saison des pluies prend en compte non seulement la notion de seuil de pluies, mais intègre aussi les conditions aérologiques qui précèdent ou suivent un épisode pluvieux ou sec. Cette dernière précaution permet de s'affranchir des faux départs qui sont la principale préoccupation des

agriculteurs. Ainsi, le début de la saison humide (sèche) n'est défini que si la succession des jours pluvieux (secs) est suivie par des conditions atmosphériques instables (stables). Le critère hydrologique prend en compte la première pluie générant du ruissellement (Balme et *al*, 2005) alors que le démarrage climatique est lié à l'observation du premier système convectif de méso-échelle organisé. Pour ce dernier critère, Sultan et Janicot (2003) ont déterminé la période précédant le début de la mousson comme étant celle qui se produit à la fin du printemps, lorsque la zone de convergence intertropicale (ZCIT) atteint 5°N, tandis que le début réel se produit à la fin du mois de Juin, lorsque la ZCIT se déplace vers le nord (10°N), c'est-à-dire autour du 24 juin (± 8 jours). Ce changement se produit avec une forte diminution des précipitations dans la région guinéenne, suivie par une forte augmentation dans la région soudano-sahélienne. Les 3 critères obéissent aussi à des différences d'échelles : parcelle, bassin versant et zone climatique.

En zone tropical, la délimitation de la saison de pluies prend en compte plusieurs paramètres climatiques considérés séparément ou en association : variations des vents dominants (Omotosho, 1992 ; Beer et *al*, 1977) ; moyennes journalières des pressions de surface ; humidité relative ; température ; équivalent du potentiel de température (Omotosho et *al* ; 2000, 2002) ; évapotranspiration ; précipitations (Cocheme et *al*, 1967 ; Thornthwaite et *al*, 1955 ; Benoît et *al*, 1977 ; Kowal et *al*, 1972 ; Sivakumar, 1988 ; Marteau et *al*, 2008, *etc.* Quels que soit le(s) paramètre(s) pris en compte, l'enjeu consiste à déterminer pour différentes régions, le début, la fin et éventuellement la longueur de la saison des pluies avec une marge d'erreur minimum.

Dans les prochaines sections, nous présentons (i) un bref historique des études sur la délimitation de la saison des pluies en région tropicale ; (ii) quelques critères de délimitation de la saison des pluies testés sur Cameroun ; (iii) leur pertinence pour l'estimation des dates de début et de fin de saison de pluies.

II-1. Rappels sur la délimitation de la saison des pluies en région tropicale

La problématique de la délimitation de la saison des pluies en région tropicale s'est dans un premier temps posée en termes de définition des mois humides et secs. Les approches adoptées étaient essentiellement basées sur le calcul du bilan énergétique mettant en relation la pluviosité annuelle et l'énergie solaire disponible pour assurer l'évaporation. Ainsi, pour déterminer un mois sec, les indices comme ceux de Bagnouls et Gaussen (1957) intègrent la combinaison de deux indicateurs résumant au mieux le climat à savoir la température et les précipitations : un mois est sec lorsque ses précipitations moyennes sont inférieures au double de la température moyenne. Il en est de même de l'indice de sécheresse d'Emberger qui permet de délimiter les étages climatiques suivant leur rigueur:

$$Q = \frac{P}{\frac{(M+m)}{2}(M-m)} \times 1000 = \frac{2000P}{M^2 - m^2}$$

où P= précipitation où P= précipitation moyennes annuelles en mm ; M et m, respectivement la moyenne des maxima du mois le plus chaud et la moyenne des minima du mois les plus froids, exprimées en degré kelvin.

Ces définitions relèvent toutefois plus des moyennes que des fréquences, or la variabilité saisonnière est d'autant plus importante qu'un mois supposé sec peut présenter de périodes humides. Aussi, un mois sec selon le diagramme de Gaussen peut s'avérer humide certaines années. De plus, ce dernier s'est avéré plus adapté aux climats des latitudes moyennes (méditerranéennes) et surtout aux exigences de la végétation (Charre, 1997). Aussi a-t-elle subit au fil du temps, des ajustements en fonction des régions et des problématiques développées. Ainsi, LAMBERT (1979) a par exemple testé les formules P/4T (indice de Birot), P/3T et P/2T pour distinguer respectivement les sécheresses atmosphérique, pédologique et hydrologique. Au Cameroun, Suchel (1988) intègre lors de la différenciation des mois humides et secs, outre les températures et les précipitations, le déficit d'humidité relative. Ce dernier paramètre encore appelé déficit de saturation (exprimé en gramme de vapeur d'eau par m³ d'air) représente la quantité de vapeur d'eau que l'air peut encore absorber à une température donnée avant d'atteindre une humidité saturante (100%). C'est une donnée importante pour avoir une idée du stress hydrique d'origine climatique subit par la plante, puisque lorsque le déficit de saturation est faible (est fort), la plante transpire peu (plus) (Berninger, 1993). Les approches aux échelles fines ont ensuite motivé l'intérêt des études aux pas de temps décadaire, pentadaire, journalier ou même événementiel. Toutefois, les différentes approches testées sont discutables suivant les régions. Par exemple, les modèles comme ceux de Thornthwaite et al (1955) qui utilisent concomitamment les pluies et les températures pour estimer le bilan climatique de l'eau pour l'agriculture n'ont pas donné de bons résultats en Afrique de l'ouest pour les trois raisons suivantes: (i) en comparaison de la radiation solaire, la température n'est pas un bon indicateur de l'énergie disponible pour l'évaporation ou du potentiel d'évapotranspiration ; (ii) les cultures sont généralement adaptées aux conditions de température étant donné leurs faibles variations saisonnières; (iii) enfin, le modèle ne prend pas en compte les effets d'advection des masses d'air(Ojo, 1977).

De ce fait, dans la littérature, l'on relève un plus grand nombre de critères de définition associé au seul paramètre « précipitation », puisque qu'il est l'élément principal dont dépend l'agriculture tropicale. Deux approches de délimitation de la saison des pluies sont associées à ce paramètre : une définition relative, fondée sur une certaine proportion de pluies à une date donnée (par rapport au cumul annuel) et une définition absolue, fondée sur une valeur seuil définie de manière empirique. Suivant cette dernière approche, Walter(1967) a défini au Nigéria, la date de début des pluies suivant la formule:

$$OD=D (50,8 - F)/R$$

où D est le nombre de jours du premier mois (Mois avec Pluies Efficientes ; MPE) ayant enregistré un cumul $\geq 50,8\text{mm}$; F est la pluie cumulée du mois précédent le MPE ; R est le cumul pluviométrique du MPE. Toutefois, ce modèle ne peut être accepté que si le mois suivant présente un cumul supérieur à 50,8mm de pluies (Olaniran, 1983).

Dans l'ensemble, les méthodes basées sur des seuils restent assez sensibles et donnent de moins bons résultats que celles basées sur les approches plus rationnelles, considérant la proportion au regard du cumul annuel par exemple. En effet, celles-ci s'appuient sur l'hypothèse qu'après l'occurrence d'une certaine quantité de pluies, la probabilité que survienne une longue séquence sèche susceptible d'entraîner un stress de la végétation est relativement réduite.

II-2. Les approches basées sur les méthodes de probabilité

La théorie des probabilités, est la branche des mathématiques qui s'attache à mesurer ou à déterminer quantitativement la crédibilité qu'a un événement ou une expérience d'aboutir à un résultat donné. Cette théorie utilise les résultats de l'analyse combinatoire et notamment les dénombrements appelés permutations, arrangements ou combinaisons. Avec la théorie analytique des probabilités publiée en 1814, Laplace applique la théorie des probabilités à la mécanique et aux statistiques. Plus tard, les travaux de Maxwell sur la théorie cinétique des gaz ainsi que ceux de Boltzmann sur la mécanique statistique affirment encore davantage la vision probabiliste du monde, en englobant tous les domaines de la science. Dans le domaine de la climatologie, les probabilités sont utilisées dans l'analyse fréquentielles des données pour évaluer la variabilité des composantes climatiques à but de prévision. Les approches probabilistes de délimitation de la saison des pluies s'appuient sur l'hypothèse suivant laquelle, « *quelque soit le niveau de variation de la distribution des dates de début et de fin de pluies dans une région donnée, il existe toujours une période de l'année qui est propice à la germination, la croissance et le développement des plantes, quelque soit l'année considérée, et cette période est peu variable d'une année à l'autre* » (Odejuwon, 1988 ; Ilesamni, 1972) : C'est donc cette période critique que les méthodes probabilistes cherchent à prévoir.

La théorie discrète des probabilités classique se définit comme le rapport entre un nombre de cas favorables pour un événement par le nombre d'issues possibles à l'expérience aléatoire. Une distribution de probabilité suit une loi uniforme lorsque toutes les valeurs prises par la variable aléatoire sont équiprobables. La théorie discrète des probabilités classique se définit comme le rapport entre un nombre de cas favorables pour un événement par le nombre d'issues possibles à l'expérience aléatoire. L'ensemble $\Omega = \{x_1, x_2, x_3, \dots\}$ définit l'univers de l'ensemble des issues possibles à l'expérience.

Ainsi, la fonction f définie sur Ω associe à chaque élément de Ω sa probabilité suivant les propriétés suivantes :

$$1- f(x) \in [0,1], \forall x \in \Omega$$

$$2- \sum f(x) = 1$$

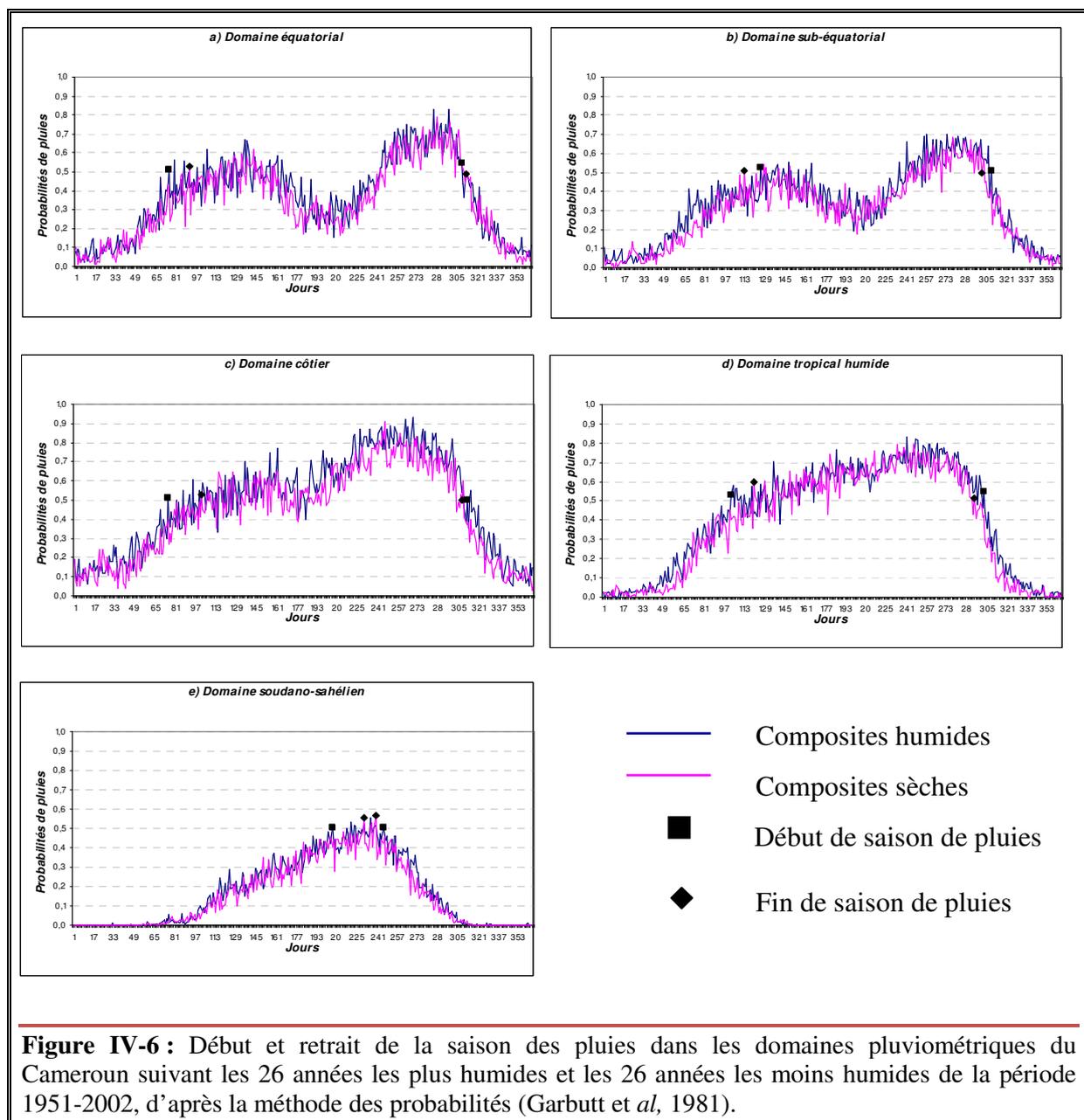
Suivant Garbutt et *al*, (1981), la probabilité d'avoir un jour pluvieux à une date donnée peut être déterminée par la proportion des jours de pluie à cette date. Sachant que les valeurs de probabilité s'échelonnent entre 0 et 1, la valeur 0,5 représente le point d'inflexion entre événements probables et peu probables. Ainsi, on peut prédire qu'un jour sera humide avec un degré de confiance élevé lorsque ce jour présente une valeur de probabilité d'être humide supérieure ou égale à 0,5. Cette méthode est testée dans les 5 domaines pluviométriques au Cameroun, tout en discriminant les composites constitués des 26 années les plus pluvieuses et des 26 années les moins pluvieuses de la période 1951-2002. Pour ce faire, on calcule pour chaque région et pour chaque jour de l'année, leur probabilité d'être pluvieux ($P \geq 1\text{mm}$) : par exemple, pour un jour-j de l'année, on compte le nombre de fois n où il a été pluvieux ($P \geq 1\text{mm}$) en N années d'observation. Le quotient n/N permet de déterminer la probabilité de ce jour-j d'être humide.

Le début de la saison des pluies suivant la méthode de probabilité est définie dès le premier jour de l'année qui présente une probabilité d'être pluvieux à au moins 50% (0,5), et la fin de la saison des pluies représente le dernier jour de l'année avec une probabilité d'être pluvieux supérieure ou égale à 0,5. La longueur de la saison des pluies est déterminée en effectuant la différence entre le dernier et le premier jour de la saison de pluies, précédemment calculés.

Particularité du domaine bimodal : *Dans les régions tropicales à deux saisons humides, les risques pour le cycle végétatif sont liés à la variabilité des dates de début de saison mais surtout, à la durée et à l'intensité de la petite saison sèche. En effet, en dépit de l'épaisse couverture nuageuse qui limite l'ensoleillement et de ce fait l'évapotranspiration, une intersaison particulièrement sèche peut entraîner un stress hydrique important pour les plantes. Face à ce risque, les paysans optent soit pour des espèces à cycles courts, calées sur la première saison de pluies – c'est le cas de certaines espèces de maïs, ou d'arachides - soit, ils adoptent des espèces à cycle long, conduites en cycle unique. Il s'agit notamment des tubercules (manioc, ignames etc.) qui sont des variétés capables de résister à la petite saison sèche. Dans certaines régions guinéennes situées au-dessus de l'isohyète 1300mm, les cultures arbustives telles que le cacao, le café ou le palmier à huile sont associées aux cultures annuelles. Ainsi en région tropical à régime bimodal, c'est davantage les risques de fin précoce de la première saison des pluies (due à un début précoce de la saison juillet-août) qui présente un risque pour le cycle végétatif, puisqu'au demeurant, l'enjeu des fluctuations des dates de début de la grande saison des pluies reste faible. C'est fort de ce constat que l'étude de la*

délimitation de la saison des pluies en région bimodale se fera suivant une fenêtre « faussement » unimodale mais, on ne perdra pas de vue, l'existence de la petite saison sèche qui est susceptible de connaître des fluctuations tant en durée qu'en intensité (voir figure III-16).

La figure IV-6 présente les cycles annuels des probabilités d'occurrence des jours humides par rapport aux années d'observation. Il ressort que dans quasiment tous les domaines pluviométriques, la première apparition d'un jour pluvieux est presque toujours suivie de jours à probabilité humides plus faibles ($p < 0,5$), traduisant ainsi le caractère intermittent de la mise en place la saison des pluies. C'est sans surprise que le constat est le plus patent en domaine bimodal, en raison de la trêve pluviométrique de juillet-août, où les probabilités 'pluvieuses' sont quasiment toutes inférieures à 0,5.



En domaine unimodal et notamment dans les régions côtière et tropical humide, le caractère irrégulier de l'occurrence des jours humides est plus atténué. C'est principalement au cours d'années sèches que l'on peut avoir plusieurs jours, voire plusieurs épisodes consécutifs présentant de faibles probabilités d'être pluvieuses. Les conditions sont plus sévères en domaine soudano-sahélien où seuls les mois de juillet et d'août ont une probabilité d'être pluvieux à au moins 50% : en années pluvieuses, moins de 40% des jours de ce mois sont concernées alors qu'en années sèches, on compte moins de 10% de jours avec une probabilité d'être pluvieux à 50%. En fait, la méthode des probabilités réduit considérablement la longueur de la saison des pluies en domaine soudano-sahélien, où elle ne dure qu'environ un à deux mois.

Tableau IV-3 : Délimitation de la longueur de la saison des pluies dans quelques stations du Cameroun, à partir de la méthode des probabilités Garbutt et al, (1981)

	STATIONS	Latitudes(°N)	Longitudes(°E)	composites humides		composites sèches		diff.LSP*
				début	fin	début	fin	
domaine équatorial	Akonolinga	3,8	12,3	26-mars	08-nov	01-avr	12-nov	4
	Eseka	3,6	10,7	10-mars	13-nov	21-mars	18-nov	8
	Sangmelima	2,9	12,0	17-mars	11-nov	17-mars	11-nov	2
	Yaounde	3,9	11,5	10-mars	13-nov	27-juin	05-nov	27
domaine sub-équatorial	AbongMbang	4,0	13,2	16-mars	10-nov	01-avr	12-nov	16
	Bafia	4,7	11,2	25-mars	08-nov	12-avr	01-nov	27
	Bertoua	4,6	13,7	02-avr	05-nov	01-avr	12-nov	-6
	Betare	5,6	14,1	10-avr	02-nov	09-avr	01-nov	2
	Lomie	3,2	13,6	10-mars	16-nov	08-avr	18-nov	29
	Nanga-Eboko	4,7	12,4	09-avr	05-nov	02-avr	01-nov	-1
	Yokadouma	3,5	15,1	23-mars	09-nov	11-avr	10-nov	20
	Yoko	5,5	12,3	05-avr	05-nov	14-avr	31-oct	26
côtière	Edea	3,8	10,1	23-mars	11-nov	05-avr	04-nov	22
	Kribi	2,9	9,9	19-févr	20-nov	16-mars	11-nov	36
	Douala	4,0	9,7	07-mars	08-nov	28-févr	05-nov	-2
tropical humide	Dschang	5,5	10,1	09-mars	03-nov	18-mars	28-oct	17
	Koundja	5,6	10,8	22-mars	07-nov	26-mars	30-oct	14
	Meiganga	6,5	14,3	30-mars	02-nov	04-avr	02-nov	26
	Ngaoundere	7,3	13,6	13-avr	16-oct	20-avr	11-oct	14
	Nkongsamba	5,0	9,9	17-mars	08-nov	14-mars	03-nov	4
	Tibati	6,5	12,6	13-avr	30-oct	15-avr	28-oct	6
domaine soudano-sahélien	Bame	11,2	14,0	16-juin	05-sept	05-juin	09-sept	-13
	Bidzar	9,9	14,1	21-juil	21-sept	26-juin	07-sept	-9
	Billiam	10,6	15,2	16-juin	22-sept	17-juil	10-sept	45
	NDoukoula	10,1	15,0	08-juil	22-sept	10-juil	29-août	-2
	Garoua	9,3	13,4	30-juin	30-sept	31-mai	17-sept	-15
	Guétalé	10,9	13,9	16-juin	15-sept	09-juil	17-sept	23
	Guider	9,9	14,0	30-juin	10-sept	26-juin	07-sept	2
	Kaele	10,1	14,4	12-juil	28-sept	31-mai	13-sept	-25
	Maroua	10,6	14,3	10-juil	20-sept	09-juil	28-août	24
	Mayo-Ngalké	8,4	14,2	23-juin	06-oct	16-mai	26-sept	-26
	Mokolo	10,7	13,8	07-juin	17-sept	14-juin	09-sept	17
	Mora	11,0	14,1	11-juil	28-août	05-juil	09-sept	-16
	Touboro	7,8	15,3	21-avr	15-oct	22-mai	01-oct	41
Yagoua	10,2	15,1	10-juil	15-sept	15-juil	03-sept	19	

diff.LSP= différence de la longueur de la saison des pluies entre composites humides et sèches

Il faut cependant noter que ces résultats sont obtenus à partir d'une moyenne de stations de chaque domaine pluviométrique du Cameroun et peuvent par conséquent être biaisés, compte tenu de la variabilité inter-stations. C'est pourquoi l'analyse suivante cherche à discriminer la variabilité des dates de début et de fin de saison en tenant compte de chaque station, ainsi que des composites humides et sèches (Tab. IV-3).

Il ressort qu'en raison de la permanence de la mousson, la saison de pluies suivant la méthode des probabilités commence plus précocement dans la région côtière du pays, entre la 2^e moitié du mois de février et la fin du mois de mars (Tab. IV-3). En effet, les différences entre dates de début et de fin de saison de pluies dans les 3 stations du domaine côtier sont associées à leur situation géographique : Kribi bénéficie de sa situation plus équatoriale par rapport à Edéa plus continentale et à Douala sous l'emprise de l'alizé maritime.

En domaine tropical humide, le début de la saison des pluies varie en moyenne entre la première moitié du mois de mars à Dschang, située à 5,5° de latitude nord, à la deuxième moitié du mois d'avril à Ngaoundéré, autour du 7^e parallèle. La fin de la saison des pluies varie de fin octobre à début novembre. Les contrastes entre années pluvieuses et sèches se traduisent ici par des décalages des dates de début et de longueur des saisons (>25 jours à Meiganga).

En domaine soudano-sahélien, les débuts de la saison des pluies s'échelonnent entre la fin du mois de mai et la première moitié de juillet, et s'organisent selon un transect nord/sud : exemple de Mora sur le 11^e parallèle, où la saison des pluies commence en moyenne le 8 juillet, et de la station de Touboro autour du 7^e parallèle, où elle commence beaucoup plus tôt (le 21 avril en années humides et 22 mai en années moins humides).

En somme, si les débuts de saison sont variables d'une année à l'autre et d'une station à une autre (décalages parfois supérieurs à 1 mois), les dates de fin de saison sont plus stables et ont lieu essentiellement au cours du mois de septembre. Ainsi, les différences de longueur de saison des pluies entre années humides et sèches (parfois supérieures à 20 jours) dépendent surtout de la variabilité des dates de début de saison.

II-3. Les approches basées sur les méthodes de fréquences cumulées

En Afrique de l'Est, Camberlin *et al* (2003) ont calculé les dates de début et de fin de la saison des pluies à partir des anomalies des scores de la première composante principale issue d'une ACP des précipitations journalières (1^{er} février au 30 juin de la période 1958-1987) de 34 stations réparties entre le Kenya et la Tanzanie. Pour chaque année, la date du début de saison des pluies correspond au point minimum du cycle annuel des scores cumulatifs alors que la valeur la plus élevée de la courbe marque la fin de la

saison des pluies. Au Nigéria, – région qui s'étend entre domaines sub-équatorial et soudano-sahélien- Odekunle (2003) a identifié les dates de début et de retrait de la mousson à partir des critères définis par Ilesanmi (1972), qui stipule que le début de saison se produit lorsque les précipitations cumulées sur une période de 5 jours (pentades) atteignent 7 à 8% du total annuel, et le retrait lorsque ce seuil atteint 90% du total. La longueur de la saison des pluies est calculée quant à elle par la différence entre la fin et le début de la saison des pluies. Ce critère a été testé dans les différents domaines pluviométriques du Cameroun.

La figure IV-7 représente les cycles annuels des pourcentages cumulés de pluies de chacune des 73 pentades au cumul annuel. Il ressort que les précipitations atteignent une moyenne cumulée de 8% vers la 15^e pentade (3^e pentade de mars) en domaine bimodal, alors que la moyenne cumulée de 90% n'est atteinte que peu avant le mois de novembre (entre la 59^e et la 60^e pentade; figure IV-7a, b).

Dans les domaines côtier et tropical humide, les débuts de saison correspondent à la 5^e pentade de mars et à la 2^e pentade d'avril respectivement, et la fin de saison intervient à la 4^e pentade d'octobre pour le premier domaine et deux pentades plus tôt dans le second. Enfin, en domaine soudano-sahélien, la saison des pluies suivant cette méthode commence à la 4^e pentade de mai et se termine à la 3^e pentade de septembre.

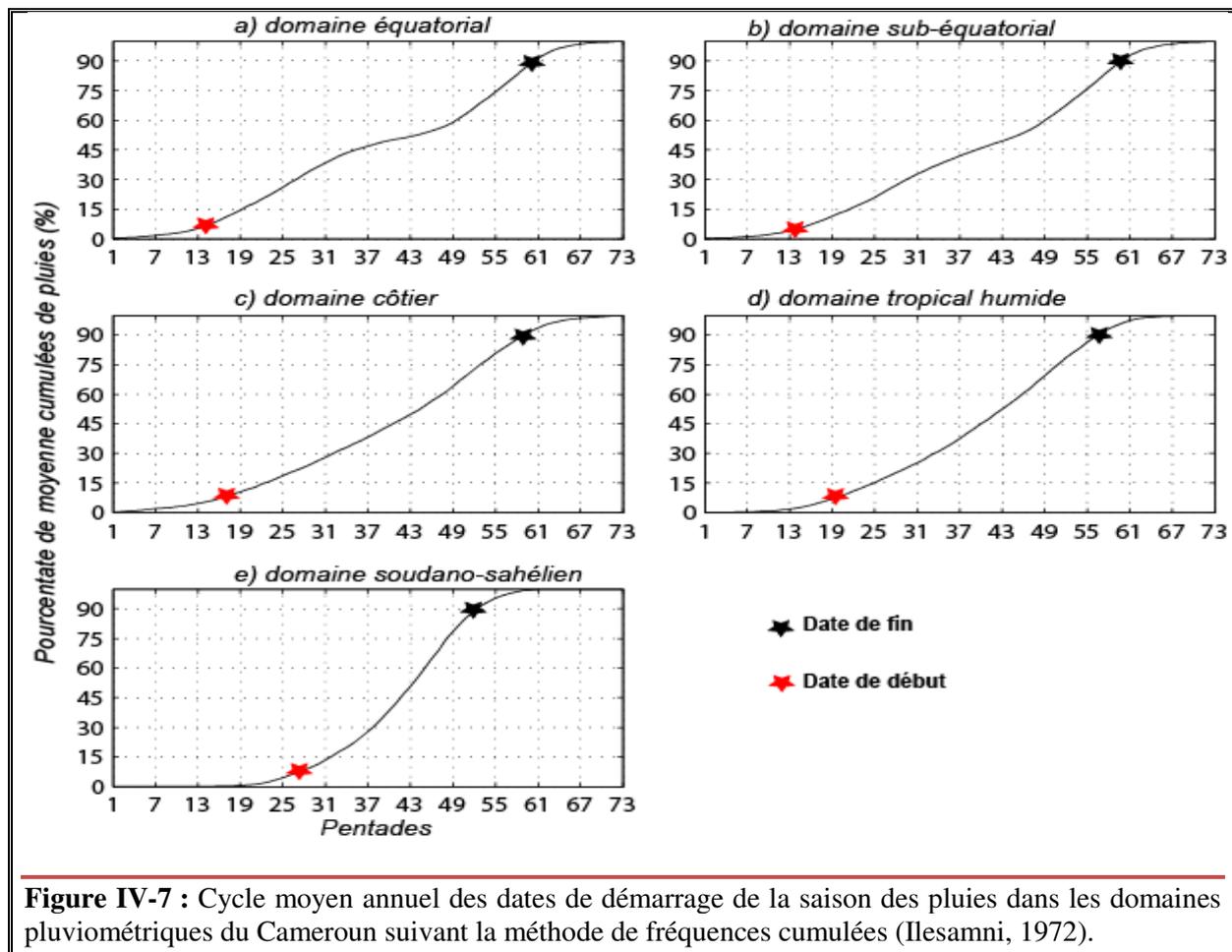


Figure IV-7 : Cycle moyen annuel des dates de démarrage de la saison des pluies dans les domaines pluviométriques du Cameroun suivant la méthode de fréquences cumulées (Ilesanmi, 1972).

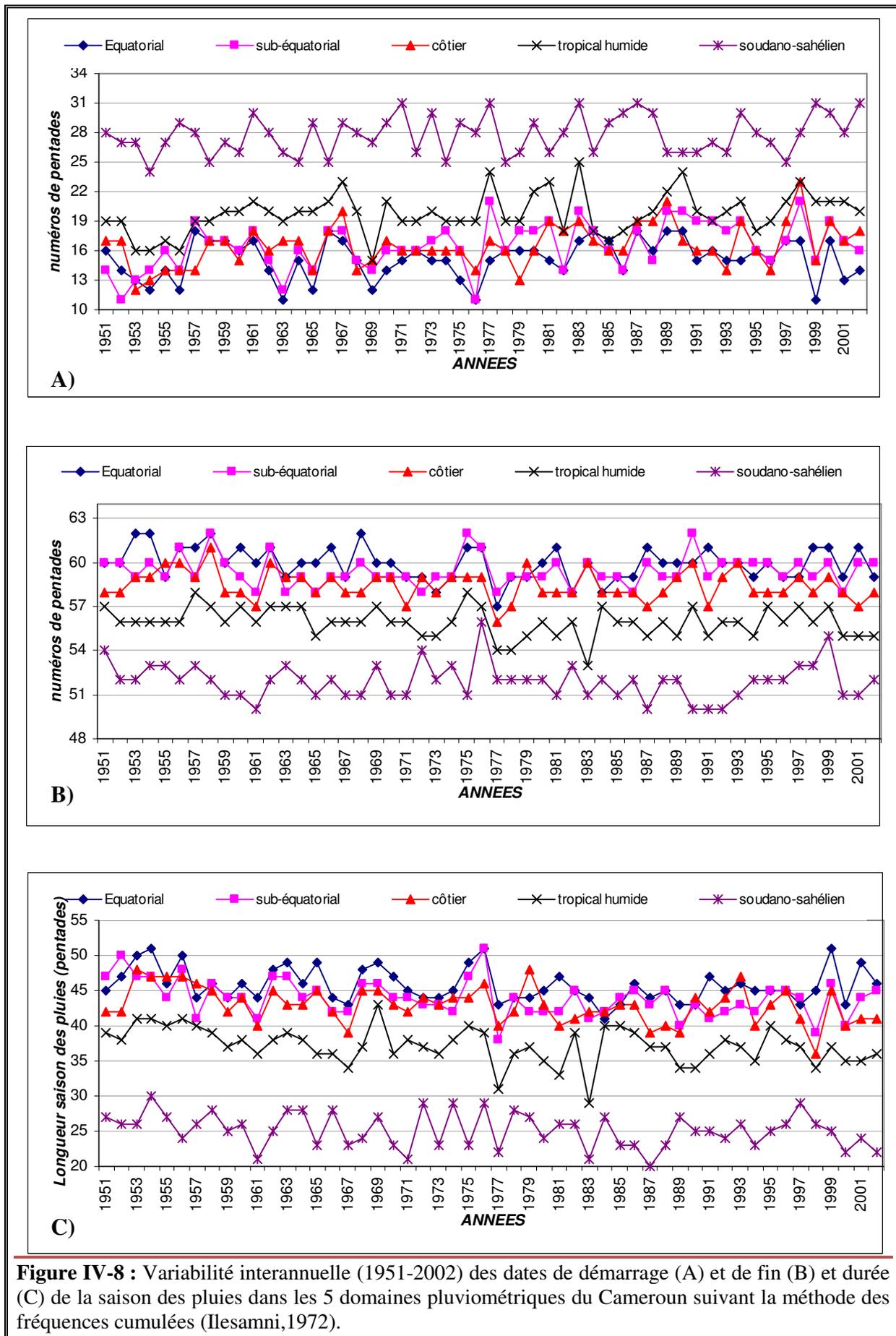


Figure IV-8 : Variabilité interannuelle (1951-2002) des dates de démarrage (A) et de fin (B) et durée (C) de la saison des pluies dans les 5 domaines pluviométriques du Cameroun suivant la méthode des fréquences cumulées (Ilesamni,1972).

Ces différentes dates, calculées à partir de la moyenne de la période 1951-2002 présentent cependant de grandes variations interannuelles, conformément à celles des précipitations, comme le montre la figure IV-8.

En effet, les droites d'ajustement (non présentée pour plus de lisibilité) des variations interannuelles des dates de début de la saison des pluies sont ascendantes pour tous les domaines pluviométriques, malgré une pente (coefficient directeur) assez faible. Ainsi, les dates de début sont de plus en plus tardives depuis les années 50 (Fig.IV-8A) avec un écart-type de 2 jours. Toutefois, on relève parfois un décalage des dates de démarrage de la saison de pluies de près de 6 pentades au cours d'années consécutives, comme c'est le cas au cours des années 1975 à 1977 (Pacific jump) ou encore entre 1982-1983 (années ENSO). Les dates de fin de la saison des pluies quant à elles, sont de plus en plus précoces, (Fig. IV-8B) mais, on relève une dispersion moins importante, l'écart-type étant de seulement de 1 pentade dans l'ensemble des domaines pluviométriques.

La longueur de la saison des pluies est en moyenne (1951-2002) de 46 pentades ± 2 (229 jours) en domaine équatorial ; 44 pentades ± 3 (220 jours) en domaines subéquatorial ; 43 pentades ± 3 jours (215 jours) en domaine côtier ; 37 pentades ± 2 (186 jours) en domaine tropical humide et 25 pentades ± 2 (126 jours) en domaine soudano-sahélien (Fig. IV-8C).

Afin de déterminer si un début précoce ou tardif des pluies influe d'une part, sur la longueur de la saison des pluies et d'autre part sur les dates de fin de saison, les corrélations entre les 3 paramètres ont été calculées pour chaque domaine pluviométrique et sur la période 1951-2002 (Tab. IV-4). Dans l'ensemble, on relève de fortes valeurs de corrélations ($>|0,8|$) entre le début et la longueur de la saison des pluies, valeurs traduisant le fait que les débuts tardifs (précoces) de pluies entraînent un raccourcissement (allongement) de la durée de saison. En revanche, les faibles corrélations entre début/fin de saison des pluies traduisent l'indépendance des deux paramètres.

Tableau IV-4: Corrélations entre début/longueur et début/fin de la saison des pluies dans les domaines pluviométriques du Cameroun à partir de la méthode des pourcentages cumulés ; Ilesamni, 1972)

Corrélations	Equatorial	subéquatorial	côtier	tropical humide	Soudano-sahélien
<i>début/longueur</i>	-0,89*	-0,92*	-0,93*	-0,93*	-0,87*
<i>début/fin</i>	-0,15	-0,03	-0,26	-0,36	-0,13

*test de significativité de Monte-Carlo à 95%

Qu'en est-il à l'échelle des stations pluviométrique ?

Il ressort qu'en domaine bimodal, la durée de la saison des pluies s'allonge d'environ 2 à 4 pentades au cours d'années humides (Tab. IV-5).

Tableau IV-5 : Longueur de la saison des pluies dans quelques stations du Cameroun, à partir de la méthode des pourcentages cumulés (Ilesamni, 1972) : dates en numéros de pentades

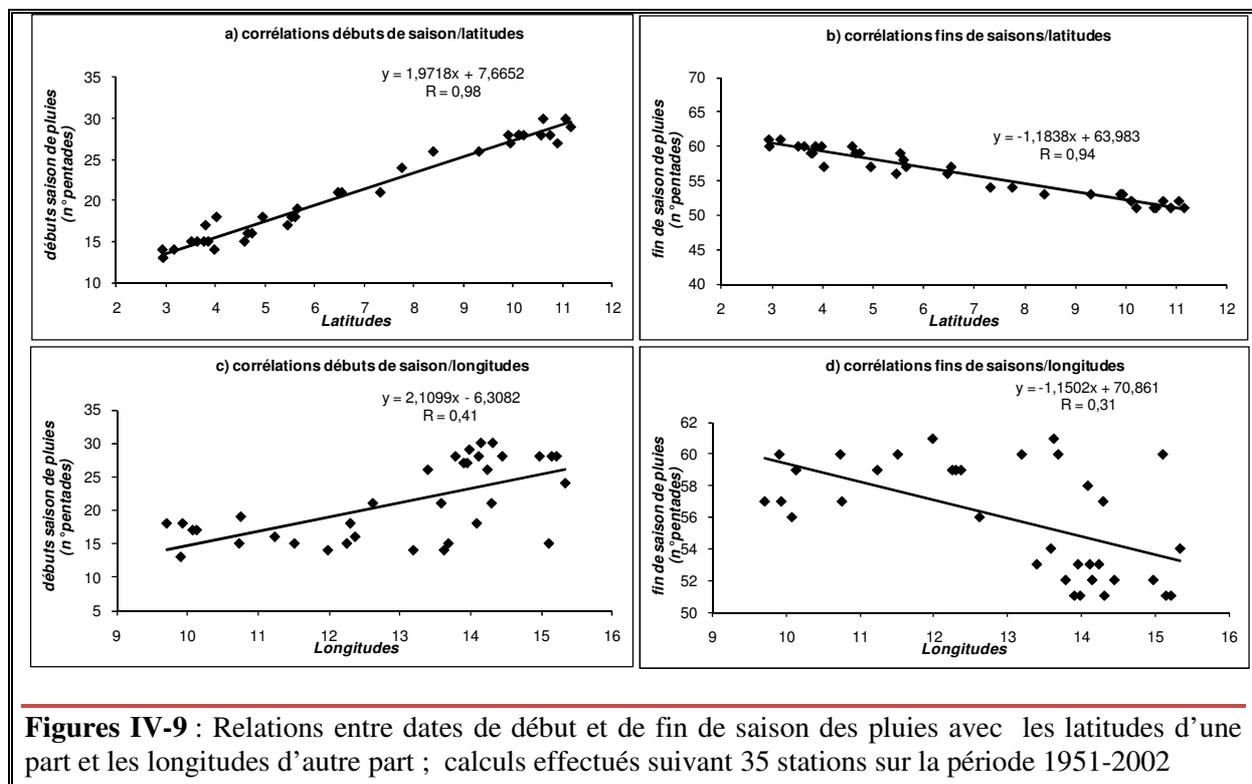
	STATIONS	Latitudes(°N)	Longitudes(°E)	composites humides		composites sèches		diff.LSP*
				début	fin	début	fin	
domaine équatorial	Akonolinga	3,8	12,3	15	59	16	60	0
	Eseka	3,6	10,7	15	60	16	60	-1
	Sangmelima	2,9	12,0	14	61	14	61	0
	Yaounde	3,9	11,5	15	60	15	59	-1
domaine sub-équatorial	AbongMbang	4,0	13,2	14	60	18	60	-4
	Bafia	4,7	11,2	16	59	18	59	-2
	Bertoua	4,6	13,7	15	60	17	60	-2
	Betare	5,6	14,1	18	58	20	58	-2
	Lomie	3,2	13,6	14	61	15	60	-2
	Nanga-Eboko	4,7	12,4	16	59	18	59	-2
	Yokadouma	3,5	15,1	15	60	15	60	0
	Yoko	5,5	12,3	18	59	20	58	-3
côtier	Edea	3,8	10,1	17	59	17	58	-1
	Kribi	2,9	9,9	13	60	14	60	-1
	Douala	4,0	9,7	18	57	18	57	0
tropical humide	Dschang	5,5	10,1	17	56	18	56	-1
	Koundja	5,6	10,8	19	57	19	56	-1
	Meiganga	6,5	14,3	21	57	22	56	-2
	Ngaoundere	7,3	13,6	21	54	22	54	-1
	Nkongsamba	5,0	9,9	18	57	19	57	-1
	Tibati	6,5	12,6	21	56	22	56	-1
domaine soudano-sahélien	Bame	11,2	14,0	29	51	30	51	-1
	Bidzar	9,9	14,1	28	53	28	52	-1
	Billiam	10,6	15,2	28	51	29	51	-1
	NDoukoula	10,1	15,0	28	52	28	52	0
	Garoua	9,3	13,4	26	53	26	53	0
	Guétalé	10,9	13,9	27	51	29	50	-3
	Guider	9,9	14,0	27	53	27	52	-1
	Kaele	10,1	14,4	28	52	28	51	-1
	Maroua	10,6	14,3	30	51	29	50	0
	Mayo-Ngalké	8,4	14,2	26	53	27	53	-1
	Mokolo	10,7	13,8	28	52	29	51	-2
	Mora	11,0	14,1	30	52	30	51	-1
	Toubooro	7,8	15,3	24	54	25	54	-1
Yagoua	10,2	15,1	28	51	29	50	-2	

diff.LSP= différence de la longueur de la saison des pluies entre composites humides et sèches (en pentades)

Cette différence provient essentiellement des fluctuations des dates de démarrage de saison de pluies (en moyenne de 2 à 3 pentades) puisqu'au demeurant, les dates de fin de saison présentent un décalage de seulement ± 1 pentade (comme pour la méthode précédente). L'analyse des longueurs de saison de pluies en domaine bimodal souligne également des particularités entre domaine équatorial et domaine subéquatorial : dans le premier, la saison de pluies dure environ 45 pentades (230jours), contre 43 pentades (220jours) en domaine subéquatorial. En domaine côtier, la durée de la saison des pluies entre années humides et sèches est stable à Douala mais s'allonge d'une pentade en années humides à Edéa et Kribi. Dans cette dernière station, la saison des pluies commence à la 13e pentade, c'est-à-dire 4 et 5 pentades plus tôt, par rapport aux deux autres, sans doute en lien avec sa position plus équatoriale.

En domaine tropical humide, on relève un décalage des dates de démarrage de la saison des pluies d'environ 1 pentade, entre années humides et sèches. Les débuts de saison de pluies se répartissent *grosso modo* suivant un transect nord/sud : elles commencent entre la 17^e et la 18^e pentade à Dschang et Nkongsamba, autour du 5^e parallèle alors qu'à Meiganga, 7^e parallèle, la saison des pluies commence avec un retard d'environ 3 pentades. Les dates de fin de saison se situent dans l'ensemble entre la 56^e et la 57^e pentade, excepté dans la station de Ngaoundéré où la fin de saison survient avec une avance de 2 pentades. Dans les stations du domaine soudano-sahélien, la saison des pluies survient entre la 24^e et la 25^e pentade de l'année dans la station de Touboro, située autour du 7^e degré de latitude, alors que dans les stations de Bame et de Mora situées vers le 11^e parallèle, la saison des pluies a lieu vers la 30^e pentade de l'année. Ces deux exemples illustrent le rôle de la latitude dans l'installation des précipitations. Le début des pluies accusent un retard d'environ 1 pentade au cours d'années sèches. Toutefois, dans les stations de Bidzar, Ndoukoula, Garoua, Guider, Mora et Maroua, les précipitations commencent à la même date, indépendamment d'années humides et sèches. En revanche, c'est dans la station de Guétalé que l'on relève le décalage du début de saison le plus important entre les deux types d'années (environ 3 pentades).

Afin de déterminer la cohérence spatiale des dates de début et de fin de saison de pluies au Cameroun suivant la méthode des fréquences cumulées, les corrélations entre ces dates avec les latitudes d'une part et les longitudes d'autre part ont été calculées pour les 35 stations de l'étude (Fig.IV-9).



Figures IV-9 : Relations entre dates de début et de fin de saison des pluies avec les latitudes d'une part et les longitudes d'autre part ; calculs effectués suivant 35 stations sur la période 1951-2002

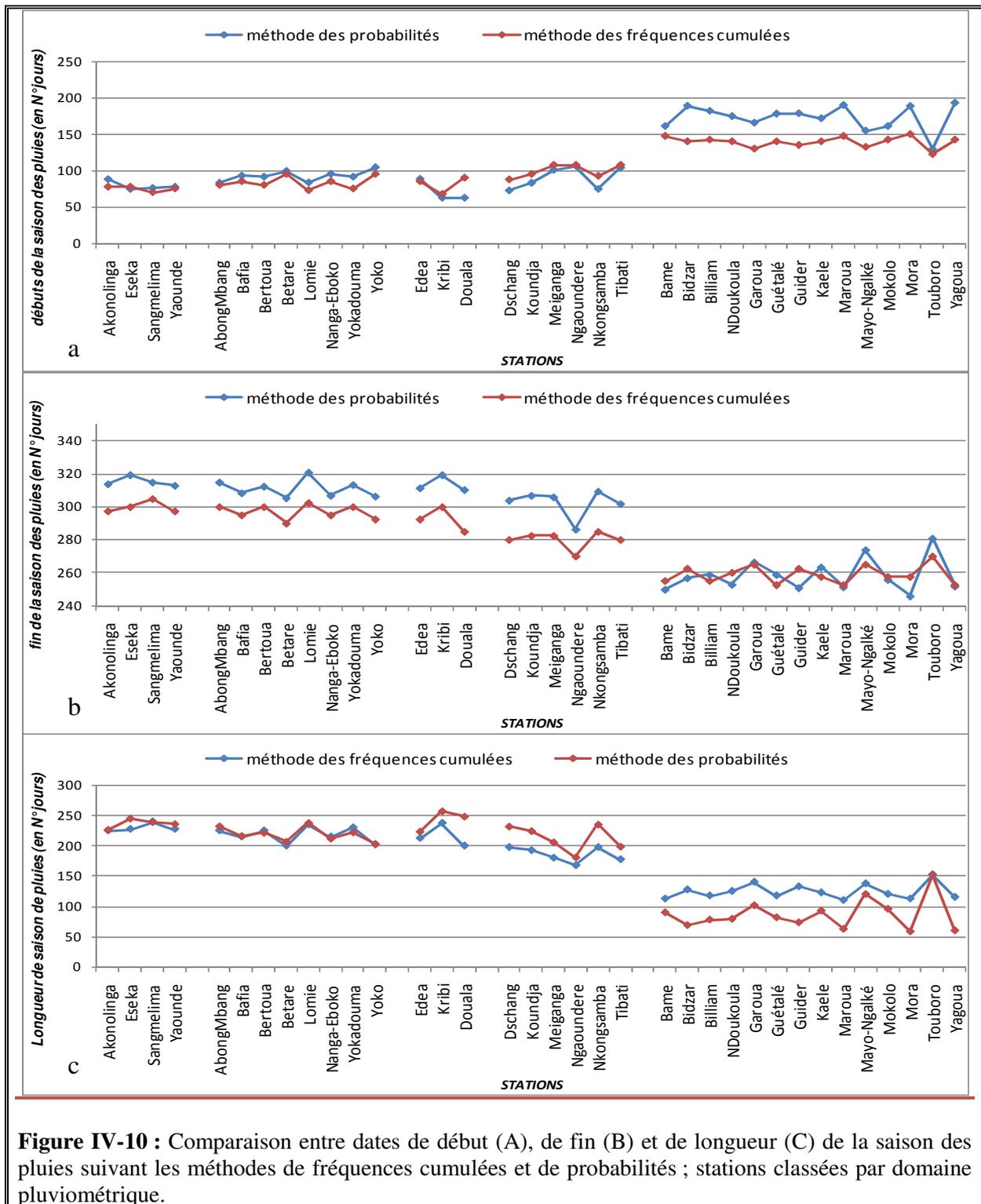
Les résultats confirment de plus fortes corrélations avec les latitudes (Fig. IV-9 a, b ; $>0,90$) : le début de saison est plus précoce du sud vers les latitudes septentrionales (retard d'environ 2 pentades par latitude) alors que la fin de saison intervient avec un retard d'environ 1 pentade/latitude suivant un gradient nord/sud. Les valeurs de pentes des droites d'ajustement confirment la forte variabilité de dates de début par rapport à celles de fin de saison. En ce qui concerne des corrélations entre la répartition des dates de début et de fin de saison et la situation zonale des stations, les deux paramètres semblent indépendants comme le traduisent les plus faibles valeurs de corrélations ($\sim 0,3$; figure IV-9 c, d).

En somme, suivant la méthode des fréquences cumulées, la latitude est le paramètre le plus déterminant de la répartition des dates de démarrage de la saison des pluies au Cameroun. L'exemple des stations de Sangmélina, Lomié et Kribi situées à latitudes quasi-égales et de longitude de 12°E , 13°E et $9,9^\circ\text{E}$ respectivement, est à ce titre illustratif. Toutefois, il faut noter que l'échelle pentadaire reste assez grossière pour situer le début et la fin de la saison des pluies pour une application agronomique, principalement en régions arides et semi-arides.

II-4. Pertinence comparée des méthodes de fréquences cumulées et des probabilités pour la délimitation de la saison des pluies au Cameroun

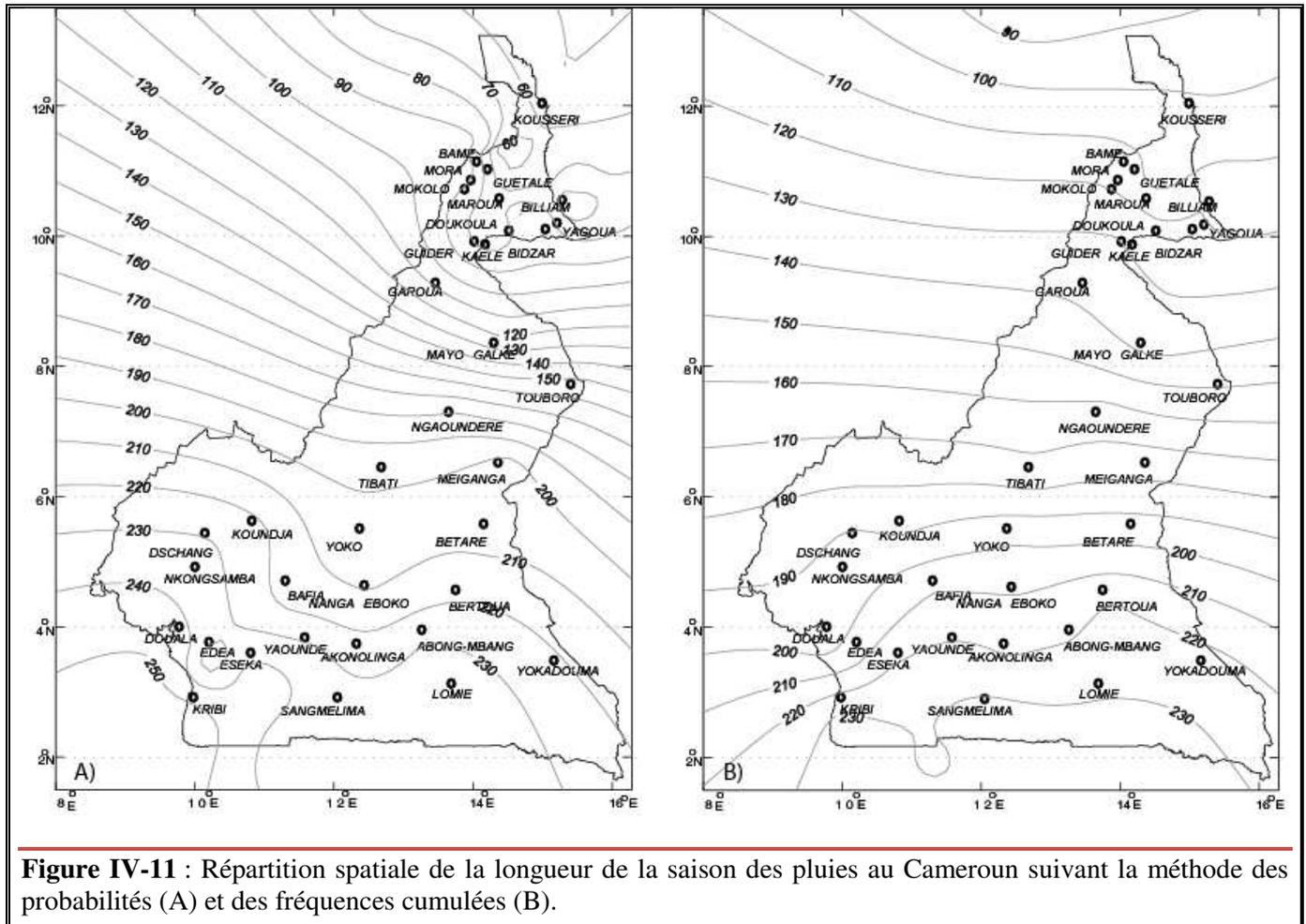
La figure IV-10 présente la comparaison des dates moyennes de démarrage, de fin, ainsi que la longueur de la saison des pluies suivant les méthodes de probabilité et de fréquences cumulées. Il ressort qu'en domaine bimodal et soudano-sahélien, le début de la saison des pluies est plus précoce si on prend en compte la méthode des fréquences cumulées.

Cependant, c'est dans ce dernier domaine pluviométrique que les différences sont plus marquées : l'on relève par exemple un décalage de 45 à 50 jours dans les stations de Bidzar, Guider et Yagoua alors qu'en domaine bimodal, ces différences sont d'environ 10 jours seulement. Inversement, dans les domaines côtier et tropical humide, le début de la saison des pluies survient plus tardivement suivant la méthode des pourcentages cumulés, avec une différence par rapport à la méthode de probabilité de 28, 15 et 18 jours, respectivement dans les stations de Douala, de Dschang et de Nkongsamba.



Par ailleurs, en dehors du domaine soudano-sahélien toutes les autres stations du Cameroun présentent une fin de saison plus précoce lorsqu'on prend en compte la méthode des fréquences cumulées. Les différences sont de l'ordre de 15 (± 3) jours en domaine bimodal et de 22 (± 3) jours pour les domaines côtier et tropical humide. Il faut également noter qu'au cours de la période de l'étude, on peut observer des variations de

dates de débuts de saison supérieures à 50 jours entre années consécutives dans une même station.



La comparaison des longueurs moyennes (1951-2002) de la saison des pluies, calculées à partir des deux méthodes montre un décalage plus important avec la méthode des fréquences cumulées, essentiellement dans le domaine soudano-soudanien et dans une moindre mesure dans quelques stations du domaine subéquatorial (Fig. IV-10C). Les différences de longueur de saison de pluies entre les deux méthodes varient de 50 à 60 jours à Bidzar, Guider, Yagoua et Mora, alors qu'elles sont inférieures à 10 jours en domaine subéquatorial. A contrario, dans les autres domaines pluviométriques, la durée de la saison des pluies est plus longue lorsqu'on prend en compte la méthode des probabilités: l'on relève des différences de 40 jours à Douala, 39 jours à Nkongsamba, 22 jours à Tibati et Kribi et 35 jours à Dschang. La comparaison des cartes de répartition spatiale des longueurs de saison suivant les deux méthodes (Fig. IV-11A, B) est encore plus illustrative : suivant la méthode des probabilités, on a un allongement de la saison de pluies d'environ 30 jours dans les stations de la moitié sud du pays et un raccourcissement d'environ 10 jours dans le nord.

Au Nigéria, Odekunle (2003) a montré que la méthode des probabilités journalières est plus pertinente que celle des pourcentages cumulés, puisque les différentes dates déterminées suivant cette dernière méthode sont avancées de 1 mois et par conséquent, présentent des risques de faux départs pour la germination des plantes.

En résumé, les disparités sont plus importantes avec les dates de début de saison de pluies, en lien avec le caractère plus erratique du déplacement de la ZCIT lors de son avancée sur le continent, par rapport à son retrait qui se fait plus régulièrement et rapidement. Par exemple, entre Kribi et Bame situées respectivement à 2,9°N et à 11,2°N, le début de saison des pluies enregistre une différence moyenne de 70 à 80 jours suivant les deux méthodes alors que le retrait s'effectue entre 45 et 50 jours. Si la méthode des probabilités a l'avantage de délimiter la saison des pluies au jour-près, elle n'est pas efficiente en région soudano-sahélienne du pays. La méthode des fréquences cumulées qui semble mieux adaptée malgré son pas temporel (tous les 5 jours), mais nous avons montré que cette méthode ne préservait pas toujours des faux départs. Sachant que la délimitation à l'échelle fine de la période de mousson est une opération chère aux populations d'Afrique tropicale, il serait opportun de tester d'autres méthodes plus ciblées sur leurs activités essentiellement agronomiques et pastorales.

III- DELIMITATION DE LA SAISON DES PLUIES A PARTIR DES CRITERES AGRONOMIQUES

L'étude de la délimitation de la saison végétative à partir des critères agronomiques peut apparaître mal à propos dans cette thèse, étant donné qu'elle s'intéresse à l'ensemble du couvert végétal et non à des cultivars bien définis. Cependant, sachant que tous les semis sont susceptibles de subir un stress hydrique qui affecte leur potentiel végétatif et leur rendement qualitatif et quantitatif, nous avons conduit cette étude dans le but de régionaliser le Cameroun en zones bioclimatiques et suivant la longueur de la période culturale.

En Afrique tropicale, plusieurs auteurs considèrent les débuts de saison de pluies comme celles des périodes végétatives. Pourtant, le déroulement efficient du cycle des cultures suppose que certaines conditions soient remplies. Ce qui intéresse les agriculteurs c'est de savoir à partir de quelle date les précipitations deviendront fréquentes, régulières et suffisantes pour assurer l'humidité du sol pour les semences et si ces conditions se maintiendront tout au long de la période végétative pour permettre la croissance et le développement des cultures. Plusieurs critères agronomiques ont été testés dans différentes régions d'Afrique mais ceux-ci subissent des ajustements permanents, suivant la modification des conditions bioclimatiques de chaque région ou suivant les exigences de chaque cultivar. De manière générale, les critères agronomiques comportent 3 principales composantes.

- (i) **La condition d'humidité** : l'humidité du sol doit être suffisante pour assurer la germination ou la levée de dormance. Après une longue saison sèche, la réserve utile du sol - qui est le volume d'eau que le sol est susceptible d'absorber et qui est utilisable par les végétaux- ne peut être assurée que si les précipitations sont persistantes. Cette persistance se mesure généralement à travers un seuil de cumuls de pluies prédéfini, au bout d'une période relativement courte. La fixation de ce seuil est assez subjective et selon Chaourche (2005), guidé par des enjeux économiques visant à sous-estimer la date de démarrage ou à la surestimer: dans le premier cas, les graines semées très tôt et peu arrosées ne lèvent pas ; dans le second cas (semis tardifs), le recouvrement des cycles végétatifs par la saison des pluies est insuffisant.
- (ii) **La prévision des faux départs** : les conditions humides doivent se maintenir au cours d'une période relativement longue pour garantir la demande en eau des plantes, indispensable pour assurer leur croissance et leur développement. Pour cela, les critères agronomiques recommandent une continuité de longue durée des précipitations, après le début supposé de la saison végétative.
- (iii) **Le respect de la durée de la période végétative** : cette dernière condition doit être prise en compte lors de la détermination de la fin de saison, sachant que la longueur du cycle végétatif doit être suffisante pour que les cultures arrivent à maturation.

III-1. Exemple de définitions des critères agronomiques dans quelques régions d'Afrique tropicale.

III-1-1. La question du début de période végétative

Observons d'abord l'extrême disparité des définitions utilisées. En région sahélienne, Sivakumar (1988) a défini la date de début de saison des pluies après le 1^{er} mai, lorsque le cumul pluviométrique atteint au cours de 3 jours consécutifs est supérieur ou égale à 20 mm et si au cours des 30 jours suivant, l'on n'enregistre pas de séquences sèches de plus de 7 jours. Ces critères ont été modifiés par Marteau et al (2008), qui prennent en compte la première séquence humide de 1 à 2 jours recevant au moins 20mm de pluies sans interruption d'une séquence sèche de plus de 7 jours recevant au moins 5mm lors des 20 jours suivant.

Pour Jolliffe et al (1994), la saison des pluies est définie lorsque les cumuls enregistrés sur 5 jours sont supérieurs ou égaux à 25mm et lorsque cette période humide n'est pas suivie d'un épisode sec de plus de 7 jours au cours des 30 jours suivant. Kasei et al, (1991) recommandent pour la culture du maïs dans les savanes du nord-Ghana, le premier jour d'une période de 10 jours recevant au moins 30mm de pluies, à condition que

cette séquence humide ne soit suivie d'une séquence sèche de plus de 7 jours au cours des 30 jours suivants.

Les critères définis par Omotosho et *al*, (2000) et Ati et *al* (2001) requièrent en plus, une connaissance des propriétés pédologiques et atmosphérique de la région: pour le premier, le démarrage de la saison de pluies commence le premier des deux premiers ayant totalisé un cumul supérieur ou égal à 20mm sur une période de 7 jours, à condition que les 2 à 3 semaines suivants aient recueilli chacune au moins 50% de la demande hebdomadaire en eau des plantes, c'est-à-dire environ 4mm (au sahel). Pour le second auteur, la date de démarrage au nord du Nigéria correspond aux 10 premiers jours ayant enregistré un cumul d'au moins 25mm et lorsque le cumul des 10 jours suivant est supérieur à 0,5 du potentiel d'évapotranspiration. Enfin, cette date ne doit pas être suivie d'une séquence sèche de plus de 7 jours au cours des 30 jours suivants. Observons que les seuils sont modifiés selon les conditions bioclimatiques de chaque région : de manière générale, les valeurs de seuils croissent au fur et à mesure que les conditions climatiques sont plus humides (par exemple entre régions sahélienne et guinéennes).

En domaine équatorial, il y a peu d'études sur la définition des dates de démarrage de la saison végétative parce qu'il est admis qu'il s'agit d'une région humide et que l'enjeu est *a priori* faible, comparé aux régions soudano-sahéliennes. Pourtant, à plus petite échelle, les problématiques restent les mêmes, étant donné que l'on y pratique des cultures à cycles plus long qui ne sont pas, elles aussi, à l'abri des faux départs ou des raccourcissements de période végétative. Pour pratiquer la culture de l'arachide par exemple, les paysans des hautes terres de l'ouest-Cameroun situées en domaine tropical humide, attendent que la saison des pluies soit avérée pour semer, étant donné qu'ils ne disposent pas assez de semences pour renouveler l'expérience en cas de faux départ (souvent récurrents malheureusement). Ces incessants renouvellements des semences est un manque à gagner pour l'alimentation en période de soudure, d'où l'intérêt de développer des études de prévision de la période végétative dans ces régions. Dans ce contexte et afin de tenir compte des contrastes pluviométriques entre le nord et le sud, Tchiadeu (2000) a défini pour le Cameroun, le début de la saison des pluies à partir du moment où la pluviométrie cumulée sur deux jours consécutifs est supérieure ou égale à 20mm, suivie d'une période de contrôle de 30 jours, durant laquelle on ne relève pas une séquence sèche de plus de 7 jours consécutifs.

III-1-2. Définition de la fin de période végétative

L'intérêt des études pour la définition des dates de démarrage de saison des pluies traduit l'enjeu que celles-ci représentent pour le cycle végétatif. En revanche, moins d'études s'attardent sur la délimitation des dates de fin de saison végétative sans doute parce qu'on suppose que c'est la qualité des conditions de la période de départ qui prime, puisque les risques sur la phase de maturation sont moindres lorsque germination et croissance se déroulent dans les conditions optimales. Il est souvent admis que près de

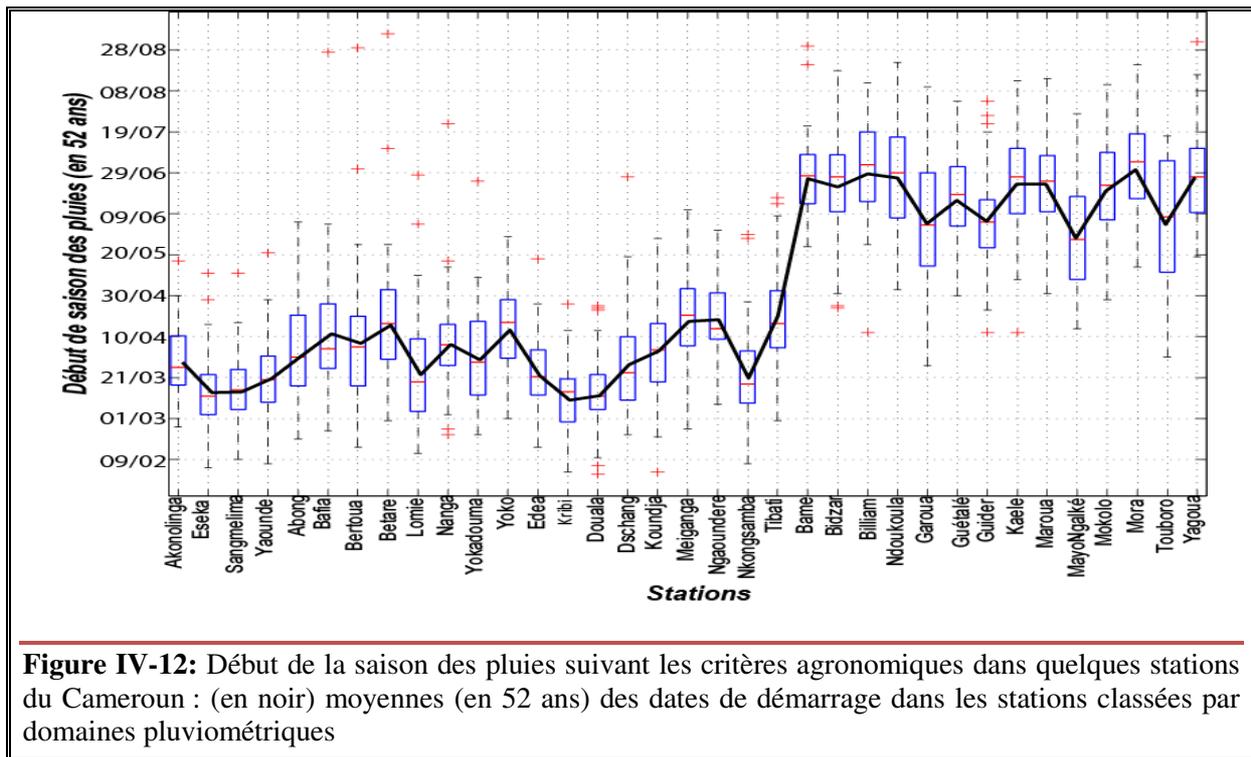
90% des cumuls annuels interviennent au cours de la saison agronomique (Odekundle, 2003 ; Balme et *al*, 2005), un seuil qui marque par conséquent la fin de saison. Toutefois, pour respecter la durée de la période végétative, les auteurs fixent généralement la fin de saison après le 1^{er} septembre au sahel. Pour s'assurer de l'effectivité de la mise en place de la saison sèche, la date qui marque la fin de la saison végétative doit être suivie d'une période de sécheresse relativement longue : 20 jours consécutifs secs pour Stern et *al* (1981) et 30 jours pour Sivakumar et *al*, (1988). Pour Kasei et *al* (1991), l'on ne doit totaliser un cumul de plus de 10mm sur 10 jours consécutifs au cours des 30 jours qui suivent la fin de la saison des pluies.

III-2. Application des critères agronomiques au Cameroun

Afin de déterminer les critères *ad hoc* pour le Cameroun, nous avons croisé les études précédentes en y apportant quelques ajustements, en fonction de la diversité bioclimatique du pays ainsi que des tendances pluviométriques sur la période de l'étude. A propos de la définition de la saison des pluies au Cameroun sur la période 1951-1993, Tchiadeu (2000) a retenu le seuil de 20mm au cours de 2 jours consécutifs. Compte tenu des tendances pluvieuses de la décennie 1990-2000 relevées dans la présente étude, les critères ont été modifiés. Ainsi, la saison des pluies commence au premier jour de la première séquence humide de 3 jours consécutifs qui présente un cumul d'au moins 30mm, et qui n'est pas suivi d'une séquence de 7 jours consécutifs secs au cours des 30 jours suivant. Ici on admet que quelle que soit la région du pays, un cumul de 30mm en 3 jours (10m/jour) suffit à faire démarrer la végétation. La fin de saison quant à elle intervient le premier jour sec après le 1^{er} septembre qui précède une période de sécheresse d'au moins 15 jours consécutifs.

III-2-1. Début de la saison des pluies à partir des critères agronomiques

La figure IV-12 présente la variabilité des dates de début de saison des pluies dans 35 stations du Cameroun au cours de la période 1951-2002 (52 ans). Les stations sont classées par domaine pluviométrique (voir tableaux IV-3,5) et le mode de représentation en boîtes à moustaches (boxplots) rend compte de la dispersion des dates de démarrage de la saison des pluies dans chaque station au cours de la période d'observation.



Il ressort que les débuts de saisons de pluies ont lieu entre la deuxième moitié du mois de mai et la première moitié du mois de juillet pour les stations du domaine soudano-sahélien. Ces différences sont associées - comme déjà signalé précédemment - à la situation latitudinale des stations : exemples de Mayo-Ngalké, Garoua et Mora respectivement autour du 8^e du 9^e et du 11^e parallèle qui présentent des écarts d'environ 15 jours. Dans tous les autres domaines, le début de saison survient avant fin avril, ceci peut aller jusqu'au début de février pour Kribi situées en région côtière. Il est important de noter que la variabilité des dates de début de pluies en domaine côtier (différence entre Douala et Edéa par exemple est due à l'inertie thermique de l'océan qui prolonge la saison sèche, celle-ci étant par ailleurs compensée par les pluies paroxysmiques de saison de pluies.

La courbe moyenne des dates de démarrage met en évidence la très forte disparité entre le domaine soudano-sahélien et les autres domaines pluviométriques du pays. Signalons aussi la grande variabilité temporelle de ces dates au sein de chaque station pluviométrique. En effet, avec 52 années d'observation, le décalage entre dates extrêmes est d'environ 20 jours en domaines équatorial et côtier, alors qu'il peut atteindre près de 30 jours dans d'autres stations, et de façon plus marquée dans celles du domaine soudano-sahélien (plus de 40 jours à Garoua et Touboro). Ceci confirme les résultats obtenus précédemment avec les méthodes de probabilité et de fréquences cumulées.

Tableau IV-6 : Nombre d'occurrence des dates de début de la saison des pluies (critères agronomiques) classé par mois dans quelques stations du Cameroun (1951-2002).

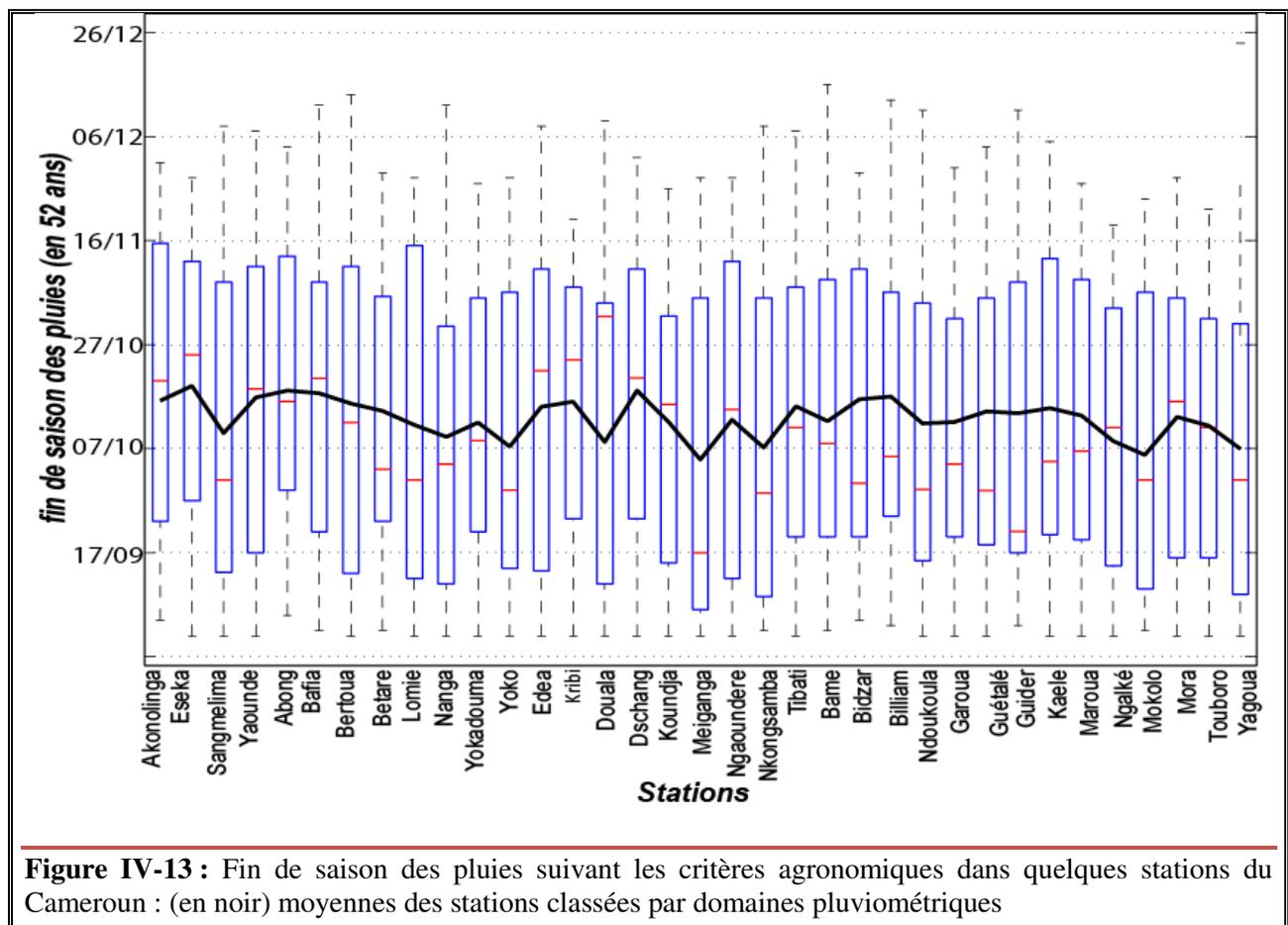
STATIONS		février	mars	avril	mai	juin	juillet	août
<i>domaine équatorial</i>	Akonolinga	1	32	18	1	0	0	0
	Eseka	12	34	10	1	0	0	0
	Sangmelima	11	39	4	1	0	0	0
	Yaounde	7	32	12	1	0	0	0
<i>domaine sub-équatorial</i>	AbongMbang	6	22	18	5	2	0	0
	Bafia	3	15	22	9	1	0	2
	Bertoua	3	18	22	7	0	1	1
	Betare	3	11	24	13	0	1	0
	Lomie	9	28	11	3	2	0	0
	Nanga-Eboko	2	17	25	7	0	1	0
	Yokadouma	5	25	18	3	1	0	0
	Yoko	1	13	28	11	0	0	0
<i>côtier</i>	Edea	5	32	15	1	0	0	0
	Kribi	15	30	8	0	0	0	0
	Douala	11	34	8	0	0	0	0
<i>tropical humide</i>	Dschang	5	25	18	2	2	0	0
	Koundja	2	22	19	9	0	0	0
	Meiganga	1	8	28	13	2	0	0
	Ngaoundere	0	5	33	12	1	0	0
	Nkongsamba	7	32	12	2	0	0	0
	Tibati	1	9	28	10	4	0	0
<i>domaine soudano-sahélien</i>	Bame	0	0	0	5	26	19	2
	Bidzar	0	0	2	10	16	20	3
	Billiam	0	0	1	2	22	24	2
	Ndoukoula	0	0	0	11	16	21	4
	Garoua	0	1	6	18	17	7	3
	Guétalé	0	0	1	10	26	14	1
	Guider	0	0	3	19	22	7	1
	Kaele	0	0	1	8	19	22	2
	Maroua	0	0	0	5	26	18	2
	Mayo-Ngalké	0	0	9	19	17	7	0
	Mokolo	0	0	1	9	22	19	1
	Mora	0	0	0	6	16	27	3
	Touboro	0	1	9	13	14	15	0
	Yagoua	0	0	0	4	23	22	1

Les dates de début de saison de pluies calculées à l'échelle mensuelle, permettent de mieux appréhender leur fréquence d'occurrence au cours de la période d'étude (Tab. IV-6). Elle peut par ailleurs être une méthode assez efficace pour situer le mois le plus probable de début des pluies dans une région donnée. En domaine bimodal, celle-ci est

d'environ 6 fois sur les 52 ans d'observation pour le mois de février, de 51% en mars et 31% en avril. En domaine côtier toutes les dates de début de saison de pluies surviennent au cours des mois de février à avril, avec un taux de 62% en mars. En domaine soudano-sahélien le taux passe à 71% en juin (dont les $\frac{3}{4}$ au cours de la première dizaine) et en juillet contre 19% en mai.

III-1-2. Fin de saison des pluies suivant les critères agronomiques

Comme signalé précédemment, les dates de fin de saison devant tenir compte de la durée de la période végétative ont été calculées après le premier septembre.



Les résultats montrent une grande dispersion interannuelle mais avec une plus faible variabilité spatiale (Fig. IV-13) : de mi-septembre à mi-novembre, soit plus de 40 jours. Toutefois les valeurs médianes montrent que les fins de saison surviennent avant début octobre pour la plupart des stations du domaine soudano-sahélien. La courbe moyenne inter-station quant à elle est assez constante et oscille sur la première moitié du mois d'octobre.

III-1-3. Longueur de la saison des pluies suivant les critères agronomiques

La figure IV-14 présente pour chaque station, les dates moyennes (en 52 ans) de début et de fin de saison des pluies, données qui permettent d'induire la longueur de la période végétative.

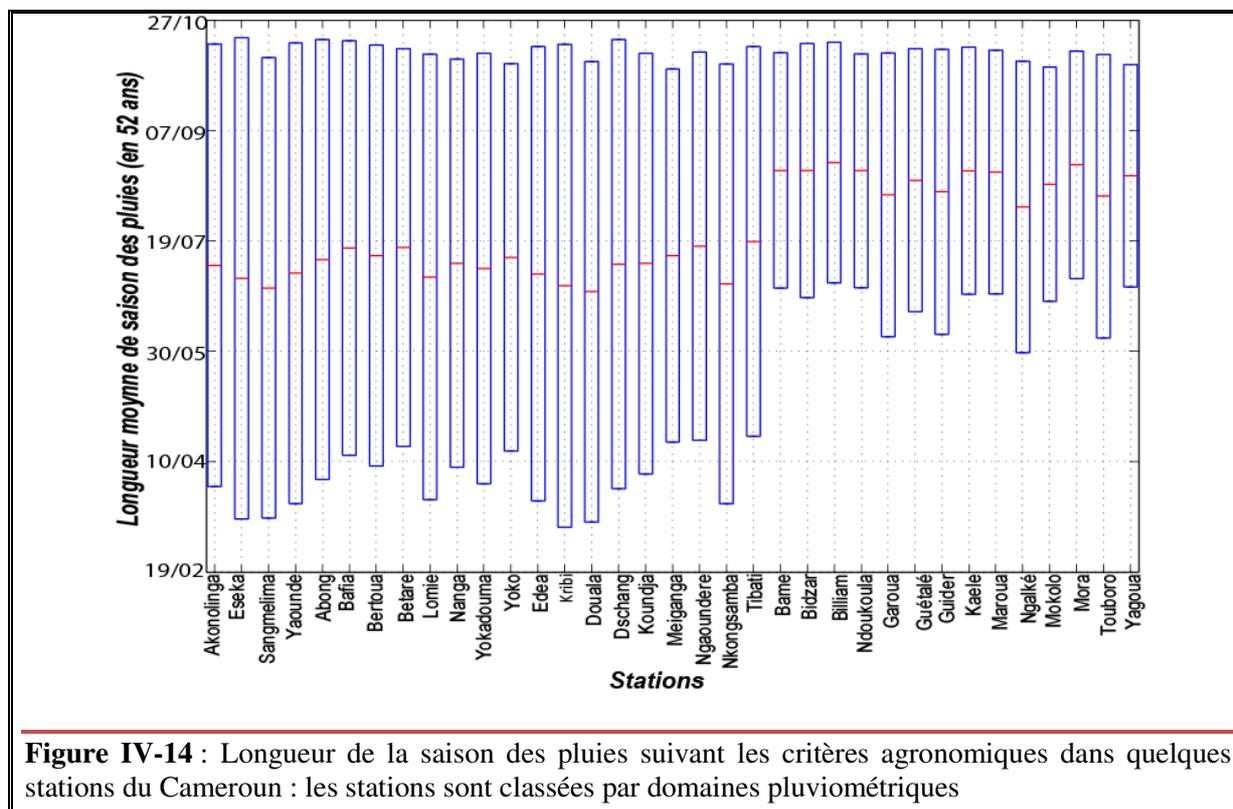


Figure IV-14 : Longueur de la saison des pluies suivant les critères agronomiques dans quelques stations du Cameroun : les stations sont classées par domaines pluviométriques

Observons la grande variabilité des dates de début par rapport à celles qui marquent la fin de saison (Fig. IV-14). En effet, les dates de début de saison de pluies semblent survenir à la même période (fin du mois d'octobre), dans tous les domaines pluviométriques du pays, puisqu'on ne relève pas de différence de plus de 10 jours entre stations. La longueur de la saison des pluies dans les stations des domaines soudanien et sahélien se distinguent aisément. Au Sahel, la zone agropastorale correspond approximativement à l'espace où la longueur de la saison des pluies varie entre 50 et 110 jours,

L'intérêt de la délimitation de la saison des pluies suivant les critères agronomiques est indispensable pour la prévision saisonnière. A grande portée, celle-ci n'a de sens que si elle peut orienter les agriculteurs vers un choix de culture et à une date de semis avec une marge d'erreur minimale. Il s'agit par exemple de voir s'il existe une relation entre les dates de démarrage ou de fin de saison et leur longueur.

III-2. Relations entre dates de début, dates de fin et longueur de la période végétative au Cameroun suivant les critères agronomiques

Il est question maintenant de regarder les liens entre les 3 paramètres. Le tableau IV-7 présente des corrélations entre, d'une part, les dates de début et la longueur de la saison végétative et, d'autre part, entre le début et la fin de saison de pluies sur les 5 domaines pluviométriques du Cameroun. Les corrélations $|\geq 0,80|$ montrent qu'un début tardif (précoce) de saison induit un raccourcissement (allongement) de la saison des pluies. Les dates de début de saison sont des prédicteurs qualitatifs de la période végétative dans tous les domaines pluviométriques du Cameroun. Les résultats confirment que les corrélations entre dates de débuts et de fin de saison de pluies sont faibles.

Tableau IV-7 : corrélations entre début/longueur et début/fin de la saison des pluies dans les domaines pluviométriques du Cameroun suivant les critères agronomiques.

Corrélations (critères agro)	Equatorial	subéquatorial	côtier	tropical humide	soudano- sahélien
<i>début/longueur</i>	-0,85*	-0,90*	-0,81*	-0,94*	-0,95*
<i>début/fin</i>	0,21	-0,007	0,21	-0,03	0,22

*corrélations significatives au test de Monte Carlo à 95%

III-3. Corrélations entre cumuls saisonniers et dates de démarrage et de fin de période végétative au Cameroun par la méthode agronomique.

Cette analyse consiste à vérifier si une année excédentaire ou déficitaire présage d'un début tardif ou précoce de la saison des pluies. Cette analyse part du fait que les années sèches ou humides sont souvent caractérisées par une modification des structures d'anomalies atmosphériques et de SST jouant sur la position de la ZCIT. Celles-ci modifient les types de temps susceptibles d'entraîner un début tardif ou précoce. Ainsi, des corrélations entre ces descripteurs ont été calculées dans chaque domaine pluviométrique (Fig. IV-15).

Les corrélations entre cumuls saisonniers et début de saison sont en moyenne très faibles ($< |0,3|$), malgré une tendance à la baisse tout au long de la période (Fig. IV-15 ; planches de gauche), avec des valeurs significatives (test de Monte-Carlo à 95%) en domaine côtier souvent de manière opposée après 1970. Les mêmes tendances s'observent pour la relation entre cumuls saisonniers et fins de saison (Fig. IV-15 ; planches de droite) et à l'échelle des stations (résultats non présentés). La variabilité des dates de début et de fin de saison végétative est donc sans rapport avec le cumul pluviométrique saisonnier.

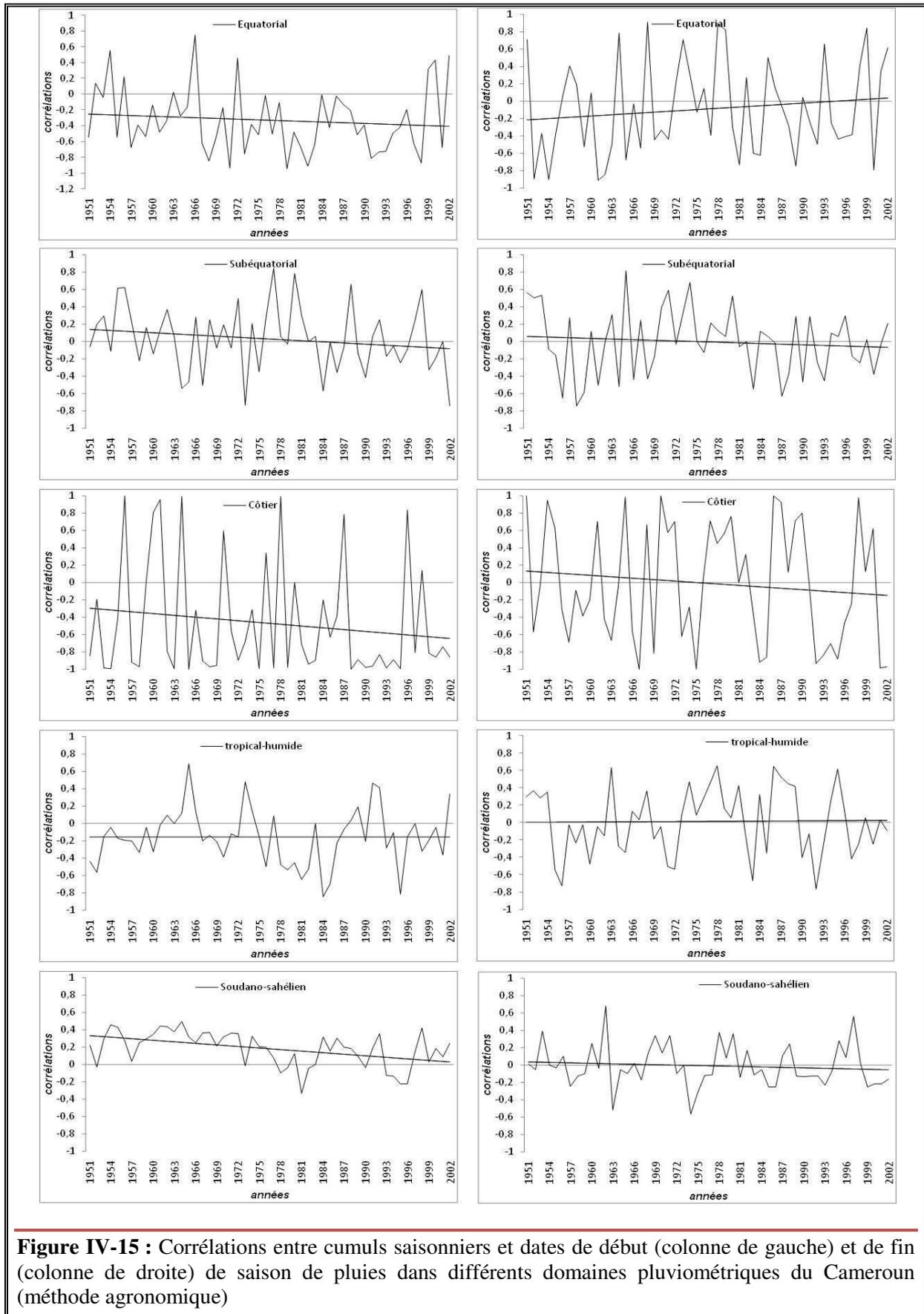
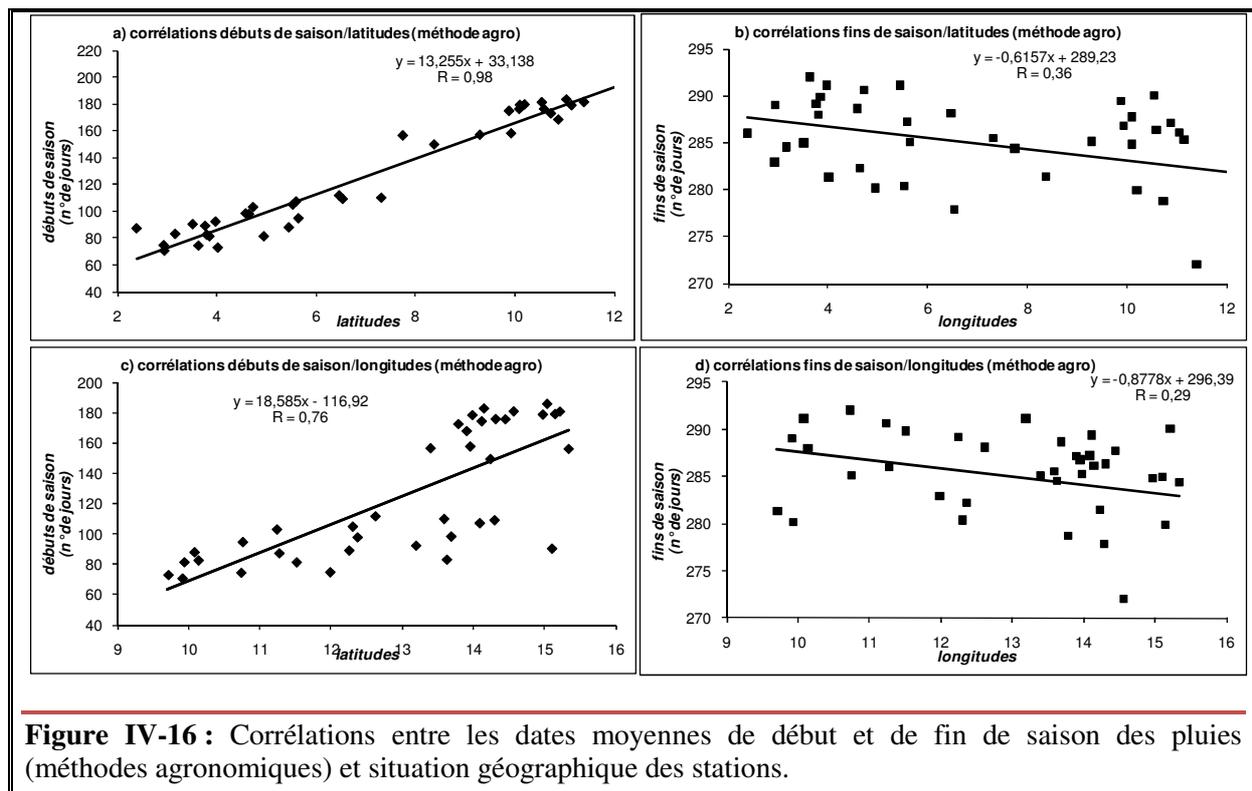


Figure IV-15 : Corrélations entre cumuls saisonniers et dates de début (colonne de gauche) et de fin (colonne de droite) de saison de pluies dans différents domaines pluviométriques du Cameroun (méthode agronomique)

III-4-Cohérence spatiale des dates de début et de fin de saison des pluies à partir des critères agronomiques

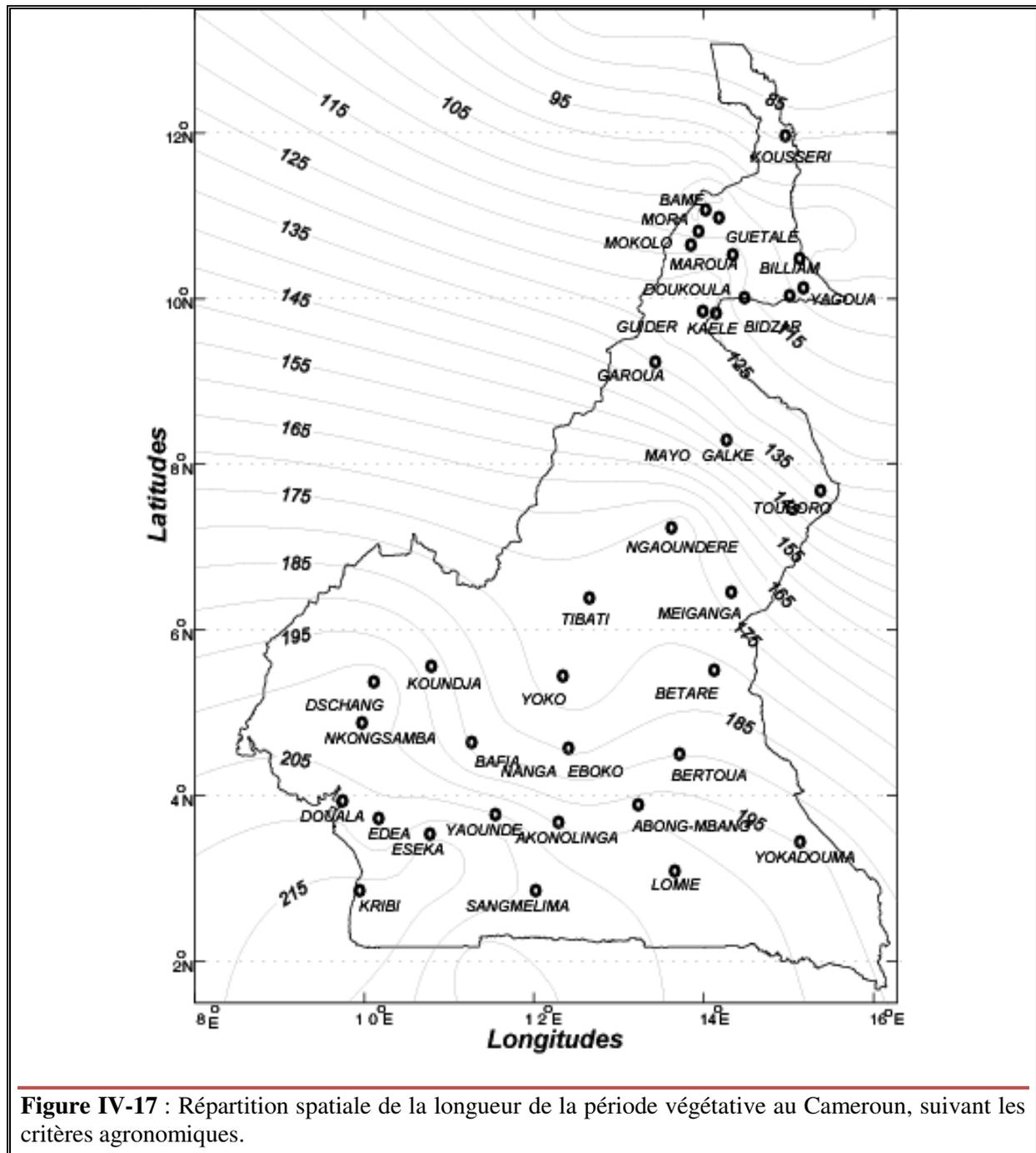
La cohérence spatiale des dates de début et de fin de saison déterminées à partir des critères agronomiques est estimée au travers des latitudes et longitudes. Les résultats montrent l'existence de gradients surtout méridiens (Fig. IV-16 a, c). La plus faible valeur de corrélation au plan zonal (0,76) confirme la mise la place méridienne des précipitations au Cameroun et en Afrique tropicale en général : l'on relève une différence d'environ 13 jours par degré de latitude.



Il y a une grande dispersion des points entre fin de saison et situation géographique des stations (Fig. IV-16 b, d), bien que les pentes des droites d'ajustement sont négatives: la fin de saison survient plus tardivement (précocement) au fur et à mesure que l'on se dirige vers l'est (l'ouest), mais les corrélations sont faibles (0,36 et 0,29 pour les latitudes et les longitudes respectivement).

La figure IV-17 illustre la répartition spatiale de la longueur de la saison des pluies au Cameroun à partir des critères agronomiques : la longueur de la saison des pluies varie de 215 jours dans le sud-ouest à 85 jours dans l'Extrême-nord du pays. En effet, si la région littorale s'individualise avec une longueur de saison supérieure à 200 jours, c'est dans les autres régions du pays que le gradient méridien est effectivement respecté, avec toutefois

une légère orientation nord-ouest/sud-est (en adéquation avec les isohyètes ; voir chapitre III).



On remarque également que la longueur de la saison des pluies, estimée par les critères agronomiques est sous-estimée par la méthode des probabilités d'environ 30 jours (surtout dans la partie méridionale) et par la méthode des fréquences cumulées d'environ 20 jours. Cette différence est sans doute due au fait que les critères définies par ces deux dernières méthodes sont moins stricts par exemple en ce qui concerne la condition des faux départs, pourtant essentielle en agronomie.

Conclusion partielle

L'étude de la délimitation de la saison des pluies à partir des critères agronomiques avait pour objectif principal de caractériser la variabilité des dates de démarrage, de fin et de longueur de saison des pluies dans différents régions du Cameroun au cours d'une période d'observation conséquente (52 ans) et ce, à but de prévision. Plusieurs points sont à retenir:

- Au cours de la période d'étude (1951-2002), les débuts de saison des pluies sur critères agronomiques ont eu lieu pour 62% en mars en domaines équatorial et côtier ; pour 42% et 53% en avril en domaines subéquatorial et tropical humide respectivement, et 40% en juin en domaine soudano-sahélien. Dans cette dernière région, les différences de dates de début de saison entre années extrêmes sont d'environ 30 jours alors qu'elles restent en dessous de 20% dans les autres domaines pluviométriques ;
- Les dates de fin de saison présentent une grande variabilité interannuelle (environ 40 jours entre années extrêmes) alors que leur variabilité du point de vue spatiale reste faible (différences <15 jours entre stations) ;
- La longueur de la saison des pluies quant à elle varie de 85 jours dans la pointe nord du pays à 215 jours dans l'extrême-sud et est subordonnée essentiellement au début de la saison ;
- Les dates de démarrage et de longueur des saisons s'organisent dans le plan méridien ; les influences zonales sont visibles seulement au sud du 6° parallèle, ceci en adéquation avec le tracé des isohyètes.
- un début précoce présage un allongement de la période végétative. En revanche, les débuts, fins et cumuls saisonniers sont statistiquement indépendants.

Il faut cependant noter que la saison culturale est susceptible d'être entravée par les séquences sèches au sein de la saison des pluies vu le risque qu'elles représentent pour la germination, la croissance et le développement de la végétation au sens large (naturelle et/ou cultivée).

IV-REPARTITION DES SEQUENCES SECHES INTRA-SAISONNIERES AU CAMEROUN

IV-1. Nombre et longueur de séquences sèches intra-saisonnières dans différents domaines pluviométriques

Les séquences sèches sont définies dans cette étude, comme une période d'au moins deux jours secs consécutifs ($P < 1\text{mm}$) au cours de la saison des pluies. Pour chaque station, la délimitation de la saison des pluies est choisie selon des critères agronomiques. Toutefois, afin de s'affranchir d'éventuels chevauchements de séquences sèches entre saisons humides et sèches, l'analyse est effectuée sur une fenêtre assez large : du 1^{er} mars au 31 mai et du 1^{er} septembre au 30 novembre, respectivement pour les deux saisons du domaine bimodal, du 1^{er} mars au 31 novembre pour le domaine tropical humide; du 1^{er} février au 31 novembre pour le domaine côtier et du 1^{er} mai au 31 septembre pour les stations du domaine soudano-sahélien.

Sachant que la problématique de l'étude de séquences sèches est axée sur l'impact qu'elles peuvent avoir sur le déroulement du cycle végétatif, on considère que les séquences sèches de durée inférieures ou égales à 5 jours n'auront pas de conséquences majeures sur le développement de la végétation. De ce fait, ne sont exclusivement prises en compte que des séquences sèches de durée supérieures à 5 jours. Pour chaque année et pour chacune des stations de chaque domaine pluviométrique, on compte le nombre de jours secs consécutifs de longueurs égales à 6, 7, 8, 9, 10 et >10 jours, respectivement. Les résultats présentent pour chaque classe de durée, la moyenne, le maximum, et l'écart-type sur l'ensemble de la période 1951-2002 (Tab. IV-x).

L'on remarque dans l'ensemble que le nombre moyen de séquences sèches est inversement proportionnel à leur durée (Tab. IV-x), la dernière classe (>10 jours) n'étant pas comparable avec toutes les autres, puisque étant susceptible de regrouper plusieurs classes de durées. Les comparaisons saisonnières en domaine bimodal montrent un nombre plus important de séquences sèches d'une part, au cours de la petite saison de pluies et d'autre part, en domaine subéquatorial. Les différences se signalent aussi-bien au niveau des moyennes que des écarts-types et les maximums. Ces résultats sont tout à fait évidents quand on sait les mécanismes climatiques qui président à la mise en place de chacune des deux saisons (voir chapitre III).

Par ailleurs, il a été montré qu'en domaine bimodal, le nombre de jours humides ($\geq 1\text{mm}$) était plus important au cours de la grande saison des pluies (Fig. IV-2), ce qui induit un nombre plus réduit de jours secs, qu'ils soient consécutifs ou non. De plus, les positions méridiennes des domaines équatorial et subéquatorial peuvent expliquer le plus grand nombre de séquences sèches dans cette dernière région. En domaine unimodal, on

compte en moyenne 2 séquences sèches de 6 jours par saison de pluies en régions côtière et tropical humide, contre 3 en domaine soudano-sahélien. En revanche, dans les 3 domaines, le nombre de séquences sèches de 10 est réduit à l'unité. Cependant, les différences se situent au niveau des maximums qui sont de 5 en domaine soudano-sahélien, contre 3 seulement dans les autres régions. Il est également important de signaler que c'est principalement en domaine soudano-sahélien que l'on retrouve un plus grand nombre de séquences sèches supérieures à 10 jours, puisqu'elles se situent en moyenne autour de 5 et peuvent même atteindre 8 au cours d'années extrêmes.

Tableau IV-8 : Répartition des séquences sèches intrasaisonniers de différentes longueurs et dans les 5 domaines pluviométriques du Cameroun

	SAISONS	statistiques	SS=6jours	SS=7jours	SS=8jours	SS=9jours	SS=10jours	SS>10jours
<i>domaine équatorial</i>	mars-juin	moyenne	1,7	1,5	1,2	1,2	1,1	1,7
		maximum	6,0	3,0	3,0	3,0	3,0	5,0
		écart-type	1,9	1,7	1,4	1,4	1,3	1,9
	septembre-novembre	moyenne	1,5	1,3	1,3	1,1	1,1	1,1
		maximum	4,0	3,0	3,0	3,0	2,0	3,0
		écart-type	1,6	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3
<i>domaine sub-équatorial</i>	mars-juin	moyenne	2,4	1,8	1,5	1,4	1,3	1,2
		maximum	8,0	5,0	5,0	4,0	4,0	3,0
		écart-type	2,2	1,9	1,7	1,6	1,6	1,4
	septembre-novembre	moyenne	1,6	1,3	1,2	1,1	1,1	1,5
		maximum	4,0	5,0	3,0	3,0	3,0	3,0
		écart-type	1,7	1,5	1,4	1,4	1,3	1,6
<i>côtier</i>	mars-novembre	moyenne	1,9	1,6	1,4	1,3	1,1	1,6
		maximum	5,0	5,0	4,0	3,0	3,0	3,0
		écart-type	1,9	1,8	1,7	1,6	1,3	1,6
<i>tropical humide</i>	mars-octobre	moyenne	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2	2,4
		maximum	5,0	5,0	5,0	4,0	3,0	7,0
		écart-type	1,9	1,8	1,7	1,5	1,4	2,1
<i>soudano-sahélien</i>	mai-septembre	moyenne	2,5	2,0	1,7	1,5	1,3	4,7
		maximum	8,0	5,0	5,0	5,0	5,0	8,0
		écart-type	2,2	1,9	1,8	1,7	1,6	2,1

De manière générale, les séquences sèches de durées supérieures à 5 jours surviennent principalement en débuts de saisons et dans une moindre mesure à la fin de celles-ci, puisqu'au cœur des saisons humides, l'occurrence des jours secs est d'environ 1 à 2 jours seulement. De plus, les corrélations entre les différentes classes de durées de séquences sèches et les anomalies saisonnières de pluies (résultats non présentés ici) ont montré que les deux paramètres évoluent en opposition de phase dans tous les domaines pluviométriques : Cependant, pour des durées inférieures à 10 jours, les résultats étaient significatifs (test de Monte-Carlo) pour un grand nombre de stations alors pour des durées

supérieures à 10 jours, seules quelques stations disparates étaient concernées. Ceci confirme le fait que, plus les séquences sèches sont de longues durées, plus leur nombre est réduit et moins elles concernent un grand nombre de stations et d'années.

IV-2. Evolution temporelle (1951-2002) du nombre de séquences sèches dans les domaines pluviométriques du Cameroun

On étudie l'évolution des séquences sèches intrasaisonniers de durées égales à 6, 7, 8, 9 et 10 jours au cours des sous-périodes 1951-1970, 1971-1990 et 1991-2002, compte tenu des tendances pluviométriques. Afin de faciliter l'analyse, les domaines équatorial et subéquatorial sont regroupés en une seule classe (Fig. IV-18-1) pour laquelle sont discriminées les deux saisons humides annuelles.

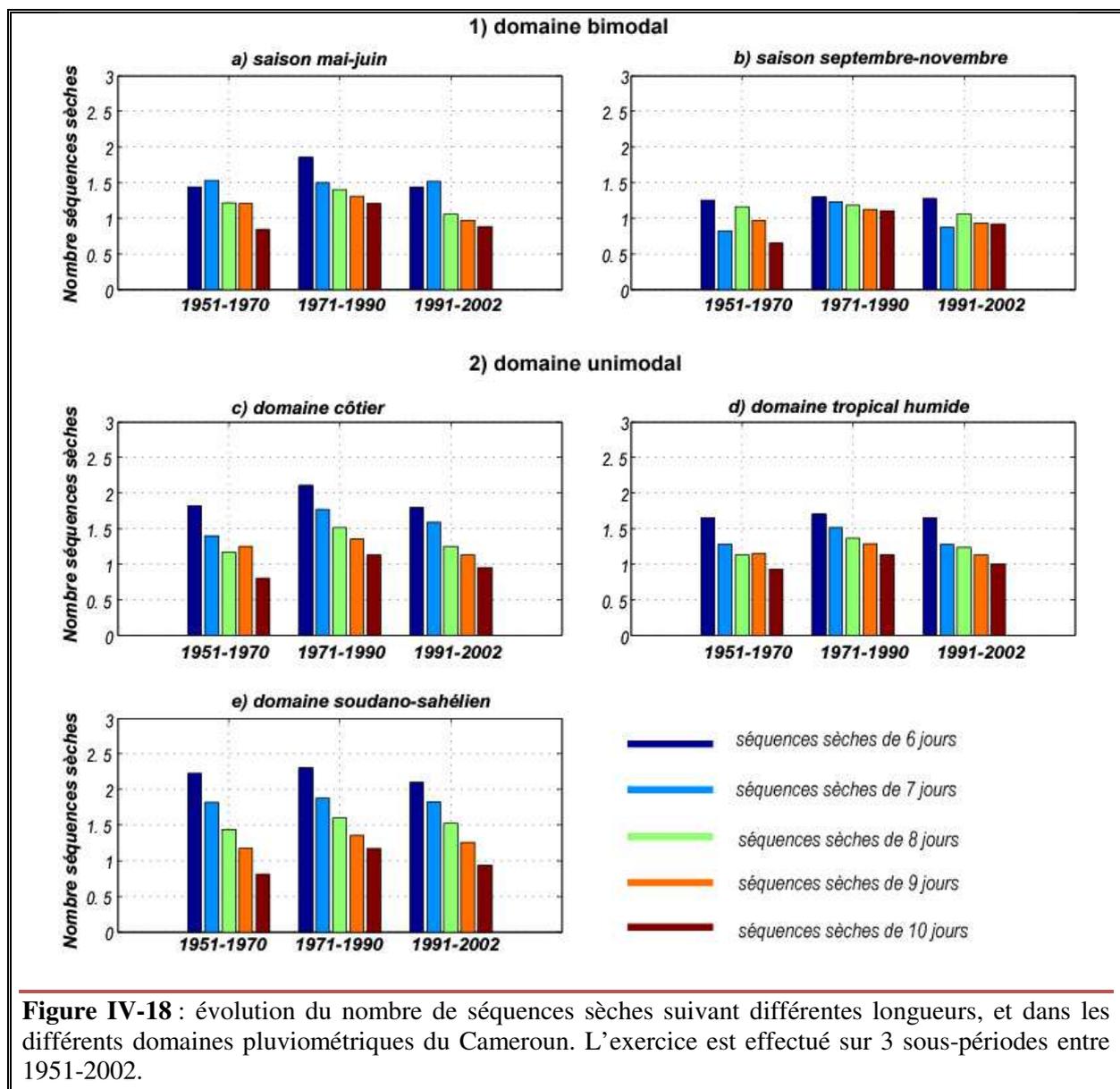


Figure IV-18 : évolution du nombre de séquences sèches suivant différentes longueurs, et dans les différents domaines pluviométriques du Cameroun. L'exercice est effectué sur 3 sous-périodes entre 1951-2002.

Les résultats montrent pour chaque sous-période, une hiérarchisation (décroissante) du nombre de séquences sèches au fur et à mesure que leur durée augmente. Pour chaque sous-période, les différences entre deux classes de durées successives varient en moyenne de 0,25 à 0,5. Par ailleurs, c'est au cours de la sous-période 1971-1990 que le nombre de séquences sèches est le plus important dans l'ensemble, sans doute en adéquation avec les anomalies de pluies, et les différences les plus importantes se retrouvent dans les classes de durée supérieures à 8 jours.

Ainsi, comme on pouvait s'y attendre, le nombre et la longueur des séquences sèches ont évolué en phase avec les tendances pluviométriques et en cela, représentent des facteurs déterminants de différenciation d'années (ou de période) humides et sèches. Il ressort également qu'aucun domaine pluviométrique du Cameroun n'est à l'abri des séquences sèches intrasaisonniers même si au demeurant, leurs occurrences ne présentent pas les mêmes conséquences pour le déroulement du cycle végétatif.

Conclusion

Ce chapitre avait un triple objectif: (i) spécifier les caractéristiques intra-saisonnières qui impriment les années humides ou sèches; (ii) préciser en moyenne et variabilité les dates de démarrage et fin de saisons des pluies ainsi que leurs durées ; (iii) analyser la variabilité spatio-temporelle des séquences sèches intra-saisonnières. L'analyse a été menée sur les 5 domaines pluviométriques du pays, issues des méthodes de régionalisation.

Il a été démontré que le nombre de jours pluvieux et l'intensité des cumuls journaliers sont les premiers facteurs qui déterminent la qualité pluviométrique d'une année donnée. Cependant, tout comme en Afrique de l'ouest (Tapsoba, 1997 ; La Lay et al, 2005 ; Balme, 2006), le déficit pluviométrique des années sèches dépend plus de la baisse du nombre de jours pluvieux au cœur de la saison des pluies que de la diminution des volumes précipités par jour pluvieux. Dans tous les domaines pluviométriques, les cumuls journaliers les plus fréquemment rencontrés en saison des pluies appartiennent à la classe [5mm-30mm [et représentent en moyenne 40% des jours pluvieux.

L'étude des dates de démarrage de saison montre une répartition essentiellement méridienne, en relation avec le déplacement de la ZCIT : l'on compte environ 13 jours d'écart par degré de latitude, soit une différence d'environ 150 jours pour parcourir deux points extrêmes du pays. La fin de saison est une période de transition d'environ 40 jours. Suivant les critères agronomiques, 62% des débuts de saison se font en mars dans les domaines équatorial et côtier ; 42% et 53% en avril, en domaines subéquatorial et tropical humide, et 40% en juin en domaine soudano-sahélien. La longueur de la saison des pluies dépend surtout des dates de démarrage et de ce fait, une saison précoce présage à l'allongement de la période végétative, et inversement.

Dans cette étude, les séquences sèches ont été définies comme des périodes d'au moins 2 jours consécutifs secs ($P < 1\text{mm}$) au sein de la saison des pluies. Ce seuil certes discutable suivant les domaines pluviométriques, ont permis toutefois de prendre en compte les conséquences dommageables qui se produisent surtout au début du cycle végétatif. Dans l'ensemble, les précipitations sont interrompues en moyenne tous les 4 jours par des séquences sèches ≤ 5 jours alors que tous les 30 à 50 jours surviennent des séquences sèches de plus longues durées. En fait ce sont les séquences sèches de durées > 5 jours qui influencent particulièrement les cumuls saisonniers dans les différentes régions pluviométriques.

Nous retrouverons dans le chapitre suivant, un article dont l'un des objectifs est de regarder l'impact du nombre, de la longueur et des dates d'occurrence des séquences sèches intra-saisonnière sur le développement du couvert végétal. Mais avant, la première section sera consacrée à dresser l'état des lieux de la couverture végétale au Cameroun et à étudier leur variabilité spatiale et temporelle à partir du Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

CHAPITRE V

ÉTAT DES LIEUX, ÉVOLUTION SPATIO- TEMPORELLE DU COUVERT VÉGÉTAL (1982-2006) ET ANALYSE DES PRINCIPAUX DETERMINANTS

Ce chapitre sera subdivisé en cinq volets.

- Le premier est une étude diagnostique du couvert végétal du Cameroun à partir de l'indice de végétation normalisé (NDVI) : variabilités spatiales, latitude/temps, longitude/temps.
- Le second est dévolu à la typologie de la végétation à partir de la régionalisation du NDVI, ainsi que leurs variations sur les pas de temps annuel et interannuel.
- Le troisième évalue le rôle de la pluviométrie intra-saisonnière sur le développement du couvert végétal dans le Nord-Cameroun au travers d'un article à paraître dans la revue *Sécheresse* et reproduit en annexe A.
- Le quatrième discute de l'importance combinée des facteurs naturels (pluviométrie) et anthropiques (sociodémographiques) sur l'évolution du couvert végétal, au travers d'un article accepté dans la revue *International Journal of Remote Sensing* et reproduit en annexe B.
- Le dernier volet est consacré à l'étude des principaux types d'occupation du sol associés au NDVI, et propose une étude de cas sur les changements du couvert végétal dans le Nord-Cameroun.

I- ETAT DES LIEUX DU COUVERT VEGETAL

Les indices de végétation à l'instar du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) sont largement utilisés aujourd'hui pour suivre les caractéristiques biophysiques des couverts végétaux à différents stades phénologiques (phase active, sèche ou sénescence) et à différentes échelles spatiales (Pouchin *et al.*, 2002 ; Bigot *et al.*, 2005 ; Hermann *et al.*, 2005 ; Martiny *et al.*, 2005 ; Tucker *et al.*, 2005 ; Camberlin *et al.*, 2007). Ils permettent également d'estimer les rendements de la biomasse végétale (Lambin *et al.*, 1994 ; Bucini et Lambin, 2002) ainsi que ceux des cultures (Bartholomé, 1990 ; Hochheim *et al.*, 1998 ; Arvor *et al.*, 2006 ; Odekunle *et al.*, 2007). Cependant, les résultats de ces recherches, réalisées pour la plupart aux échelles régionale ou continentale, sont encore trop globalisants et lissés pour permettre des applications à l'échelle des hommes et de leurs activités.

Au Cameroun, les études de couverture végétale sont, pour l'essentiel, axées sur des inventaires botaniques ou génétiques (Fondoun, 2001). Les politiques forestières sont conduites principalement sur les zones de forêt dense humide, car les actions menées sur les autres parties du territoire ne font pas l'objet d'une politique très explicite. Enfin, la phénologie végétale y est encore peu connue et a fait l'objet de très peu d'études.

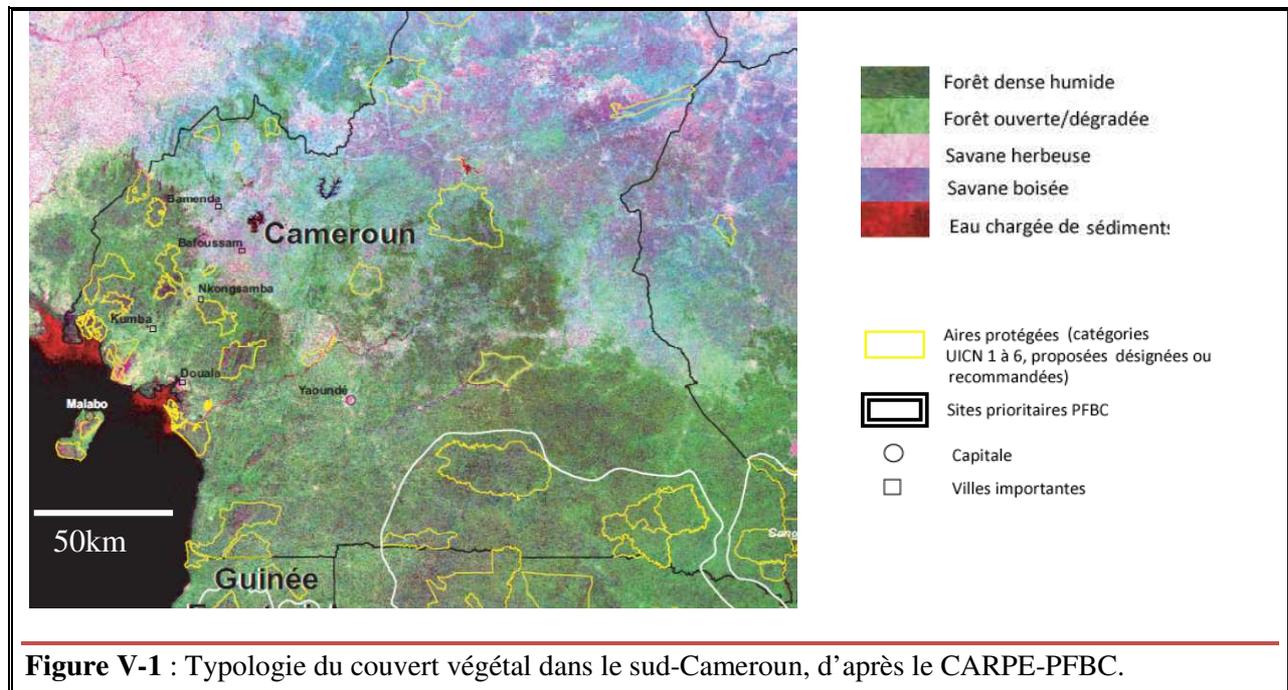
Ce chapitre présente d'abord succinctement la couverture végétale dans le sud et le nord du Cameroun — situés de part et d'autre du 6^e parallèle — à partir de résultats d'études précédentes. Il présente ensuite la typologie du couvert végétal ainsi que ses variations annuelle et interannuelle, à partir d'indices de végétation, pour mieux appréhender dans le prochain chapitre les facteurs à l'origine de cette variabilité.

I-1. Dans le sud-Cameroun

Le sud-Cameroun inclut le deuxième plus grand massif forestier du monde, dont la superficie est estimée à plus de cent quatre-vingts millions d'hectares et d'où plus de treize millions d'habitants tirent leurs ressources économiques. Au Cameroun, le suivi de l'évolution du couvert végétal est plus développé en raison des enjeux économiques, écologiques et environnementaux. Toutefois, l'évolution de la couverture végétale n'affecte pas seulement les forêts *stricto sensu* comme le perçoit la FAO, mais également l'ensemble du couvert boisé, notamment les zones de savane et de transition (Bessat, 1999).

Les connaissances actuelles dérivent des nombreux programmes engagés dans la sous-région (CARPE, WWF, WRI, GTZ, FAO, PNUE, PFBC, CIFOR, etc.) et d'études plus localisées sur des zones d'intérêt : mosaïques forêts/savanes (Youta Happi 1996 Kana *et al.*, 2007) ou régions de mangroves (Wanzie, 1993 ; Zoning, 1993 ; Din *et al.*, 2001). La figure V-1 est issue d'une carte réalisée par le programme régional

environnemental pour l'Afrique centrale (CARPE), dans le cadre du Partenariat pour les Forêts du Bassin du Congo (PFBC), avec l'appui d'un grand nombre d'organisations gouvernementales et non-gouvernementales.



Elle a été effectuée à partir d'images MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) entre 1999 et 2002, qui sont moins dépendantes des conditions atmosphériques. On y distingue bien l'étendue des savanes et des forêts denses ou dégradées, ainsi que des zones d'agriculture et les villes les plus peuplées (voir légende). Les sites prioritaires sont sélectionnés en fonction des particularités qu'ils présentent en termes de biodiversité, afin de constituer des zones-tests de conservation et de gestion durable incluant l'exploitation forestière, l'utilisation des sols, les aires protégées et les zones de gestion communautaire des ressources naturelles.

I-2. Dans le nord-Cameroun : quelques rappels

Bien que le recul de la végétation soit encore relativement limité avec de faibles conséquences en certains endroits, il est en nette progression ailleurs et notamment dans la partie septentrionale qui semble plus vulnérable pour plusieurs raisons. Du point de vue climatique, les précipitations sont moins abondantes et la saison des pluies écourtée. De plus, c'est une région très sensible aux processus de surface, l'humidité atmosphérique étant en majorité d'origine continentale. Du point de vue économique et social, le nord-Cameroun est une zone de rencontre, avec coexistence d'activités agricoles, pastorales et piscicoles exercées par des peuples différents et issues de modes d'utilisation du sol, de coutumes, de cultures différentes, aussi vis-à-vis des ressources naturelles, d'autant que la

forte croissance démographique y accentue les pressions sur les ressources végétales. Il en résulte un milieu fragile et plus exposé à l'érosion (notamment éolienne) et aux agressions comme les feux de brousses ou la transformation des terres en cuirasses ferrugineuses par l'effet d'un ensoleillement sans protection végétale. Si l'on dispose de statistiques de l'évolution de la couverture végétale dans la partie méridionale, la partie septentrionale a fait l'objet de peu d'études : l'on n'y dispose que d'indications qualitatives plus limitées dans l'espace. Quelques-unes montrent néanmoins que les savanes arborées qui occupent moins de 15 % de la superficie du nord-Cameroun régressent considérablement d'année en année, de même que les savanes arbustives dont le rendement diminue entre 0,1 à 1 m³ par hectare et par an. Pour de multiples raisons, cette progression est modulée en fonction de la pression démographique et du degré d'urbanisation de chaque zone (Bessat, 1996).

Le nord-Cameroun peut être réparti en trois principales régions écologiques (Donfack *et al.*, 1997) : la région soudano-guinéenne entre 6° et 9°30', domaine de savanes soudanaises arborées et boisées, de forêts claires sèches soudanaises, ainsi que de formations d'altitude ; la région soudano-sahélienne entre 9°30' et 10°30', avec ses formations d'altitude sur les monts Mandara, de steppes à épineux, ainsi que de prairies périodiquement inondées (yaérés) dans la plaine du Logone ; enfin, au nord de 10°30', les formations sahélo-soudanaises constituées pour l'essentiel de steppes qui annoncent déjà la rudesse des conditions bioclimatiques des régions sahéliennes.

Sous l'angle de l'utilisation du sol, le couvert végétal du nord-Cameroun est constitué de cultures (environ 29 % de la superficie totale), de jachères récentes et de friches anciennes plus ou moins pâturées (Brabant et Gavaud, 1985 ; Donfack, 1998). Ce sont ces deux dernières classes de végétation qui subissent particulièrement les assauts anthropiques : surpâturage, prélèvement du bois de chauffe et d'œuvre, cueillette des feuilles et des fruits pour utilisation alimentaire ou médicinale. Au final, ce qui reste de la végétation de jachère après exploitation est très souvent brûlé chaque année pendant la saison sèche (Donfack, 1998). Les zones humides du nord-Cameroun sont localisées dans les plaines d'inondation de la Bénoué et du Logone, ainsi que dans certaines vallées du domaine soudano-sahélien et sahélo-soudanien. Ce sont les régions le plus exploitées du point de vue de l'agriculture et de la pêche. Mais elles sont fortement tributaires de la ressource en eau et donc extrêmement sensibles aux variations du climat (Onana *et al.*, 2002). La strate ligneuse qui se développe sur ces sols essentiellement hydrophiles est constituée d'espèces éphémères qui pourrissent lors de la décrue.

I-3. Évolution du couvert végétal au Cameroun dans l'espace et le temps (1982-2006)

Nous proposons ici une première approche de la variabilité du couvert au travers de la base de données NDVI. Celle-ci est utilisée comme un indicateur indirect du couvert

végétal (voir chapitre II). Le cycle annuel de l'évolution sur les plans méridien et zonal est analysé. La période d'étude est partitionnée en trois sous-périodes, afin de tenir compte des problèmes d'échantillonnage en rapport avec les changements de capteurs. En effet, si les études ont montré une relative stabilité des données du NDVI pour les capteurs NOAA-9 et NOAA-11 (Rahman *et al.*, 2006), d'autres, réalisées notamment en Afrique de l'Ouest, montrent un changement important dans la valeur NDVI après l'année 1999, probablement en raison du passage plus tardif de NOAA-14 dans l'après-midi (Eklundh *et al.*, 2003). En Afrique centrale, Bigot (1997) distingue pour la période d'étude 1983-1992, les sous-périodes 1983-1988 et 1989-1992, la première étant relative aux capteurs NOAA-7 et NOAA-9. Compte tenu de la profondeur temporelle plus importante dans cette étude (25 ans), les analyses se feront suivant les sous-périodes 1982-1988, 1989-1999 et 2000-2006, correspondant respectivement aux capteurs NOAA-7 et 9, NOAA-10, 11, 12, 13 et NOAA-14.

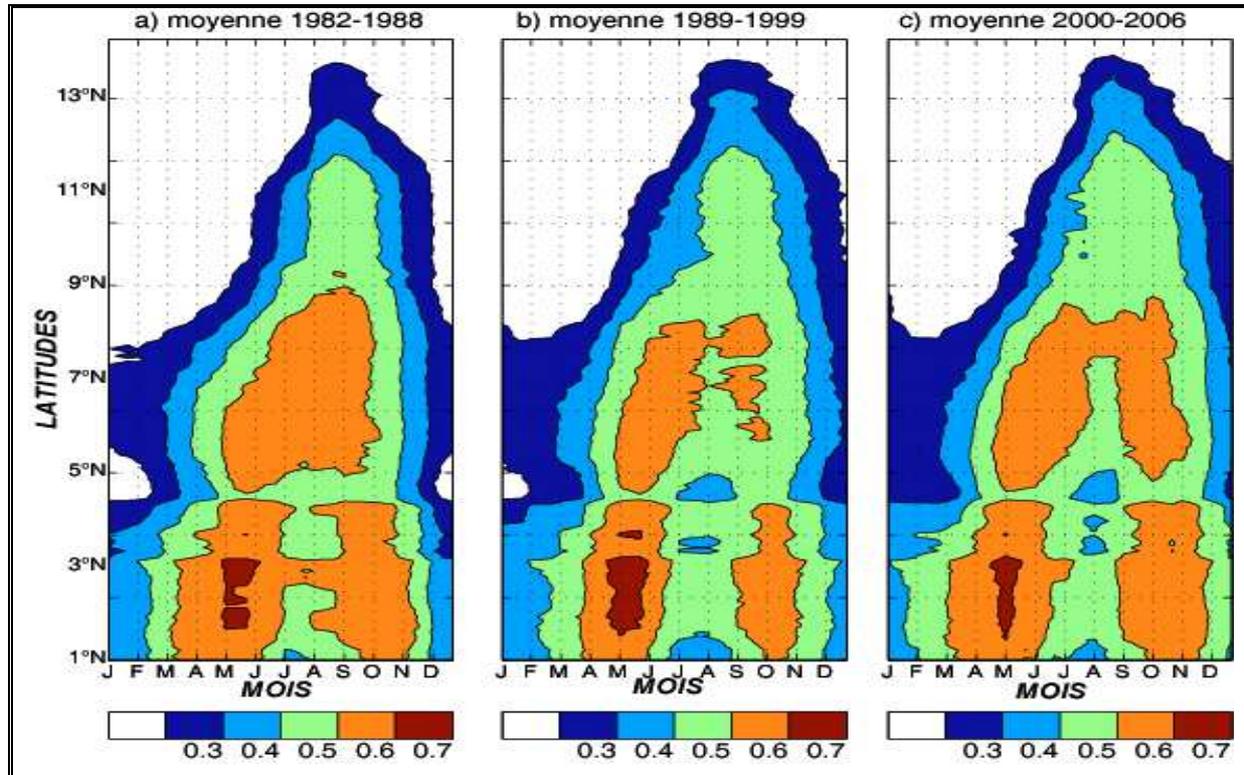
I-3-1. Cycle annuel de la variabilité spatiale du NDVI au Cameroun

a) Variabilité du NDVI dans le plan méridien

Le diagramme latitude/temps permet de distinguer trois zones de végétation présentant des particularités à l'échelle annuelle (Fig. V-2). La rupture observée par 4,5°N est due à des données lacunaires au fond du Golfe de Guinée (présence des mangroves). La première région située au sud de 5°N présente deux modes au cours desquels les valeurs de NDVI sont supérieures à 0,6. À ces latitudes, et contrairement au cycle annuel des précipitations où la grande saison des pluies se situe entre septembre et novembre, la végétation montre une plus forte activité végétative (> 0,6) au cours de la saison mars-juin (saison océanique). Les deux saisons sont bien individualisées au cours des deux dernières sous-périodes, en raison d'une baisse marquée de l'activité végétative à l'occasion de la saison juillet-août (Fig. V-2 b, c). Dans cette région, les valeurs de NDVI sont supérieures ou égales à 0,4 quasiment toute l'année, surtout au sud du 4^e parallèle.

La deuxième région qui s'individualise est située entre le 5^e et le 9^e parallèles : les valeurs de NDVI sont supérieures ou égales à 0,3 pendant toute l'année entre 5°N et 7°N ; elles ne dépassent ce seuil qu'au cours des mois de mai à novembre entre 7°N et 9°N. À ces latitudes, le profil annuel du NDVI, essentiellement unimodal, présente une allure plus étalée dans la partie méridionale (la période de forte activité végétative [0,6] se situe entre mai et octobre) alors qu'il revêt un caractère unimodal plus strict autour de 9°N (seul le mois d'août présente une valeur de NDVI égale à 0,6). La comparaison des champs de NDVI sur les sous-périodes montre, pour les deux dernières, un fléchissement de l'activité végétative sur la saison mai-octobre et particulièrement en juillet-août. Ceci laisse supposer que la limite bimodale serait remontée au-delà du 7^e parallèle après 1989 (Fig. V-2 b, c). Des analyses plus approfondies dans le chapitre suivant nous permettront

de dire si cette situation est inhérente aux conditions bioclimatiques ou s'il agit simplement d'un biais instrumental.



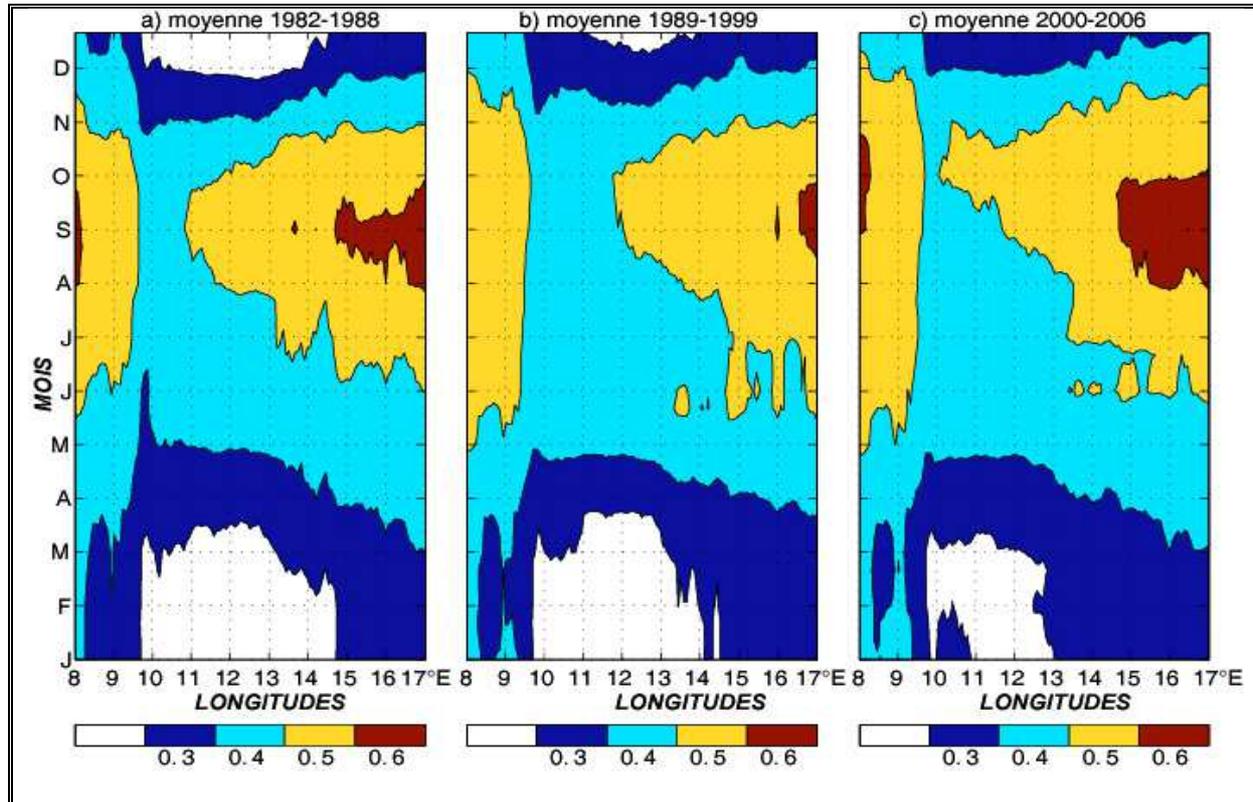
Figures V-2 : Diagrammes latitude/temps du champ de NDVI sur la fenêtre du Cameroun au cours des sous-périodes 1982-1988 (a), 1989-1999 (b) et 2000-2006 (c).

La dernière région, au nord du 9° parallèle, se caractérise par un cycle strictement unimodal, avec des valeurs maximales de NDVI qui ne dépassent pas 0,5. Ici, la période de forte activité végétale (0,5) est écourtée (août-octobre), alors qu'en décembre-mai l'indice est très faible (< 0,3). En comparant les trois sous-périodes, on voit que la durée de la période végétative est plus importante au cours des années 2000, puisqu'elle s'étend de juin jusqu'au-delà du mois d'octobre (Fig. V-2 c).

b) Variabilité du NDVI dans le plan zonal

Sur la fenêtre du Cameroun, les plus faibles valeurs annuelles du NDVI se situent entre les longitudes 10°E et 12°E : elles sont inférieures à 0,3 entre décembre et mars, alors que les maxima annuels ne dépassent pas le seuil 0,4 (Fig. V-3). Dans cette bande, la période d'activité végétale s'étend *grosso modo* de mai à novembre, période au cours de laquelle la valeur du NDVI est constante. De part et d'autre de cette bande zonale, l'indice de végétation est supérieur à 0,3 toute l'année, avec de plus fortes valeurs en mai-novembre (0,5) et des maxima entre août et octobre (0,6). Ainsi, le gradient zonal de végétation est évidemment moins régulier que celui des précipitations, puisque c'est à

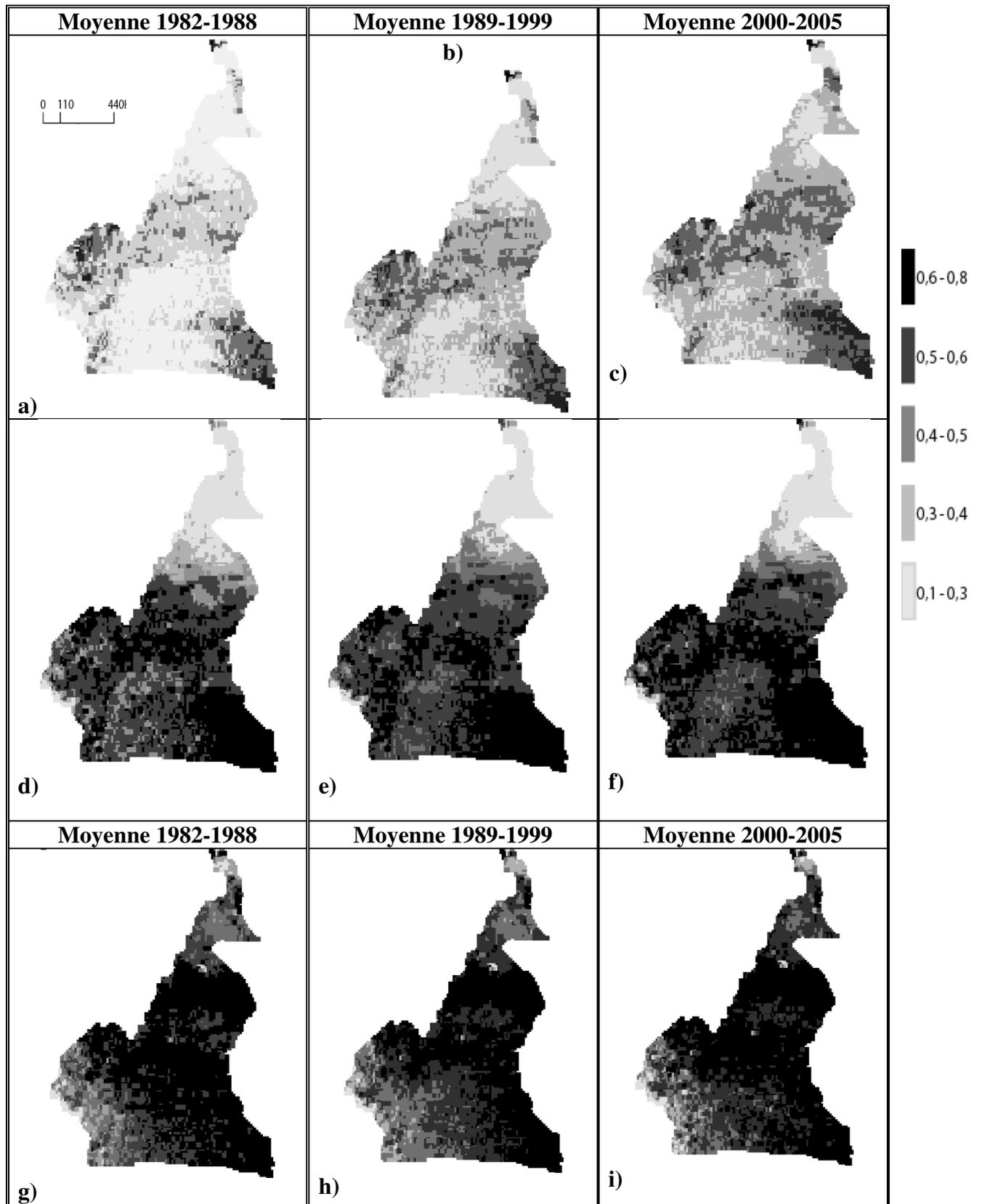
l'ouest et particulièrement à l'est du pays que les maxima de NDVI sont le plus forts. La comparaison des champs de NDVI au cours des trois sous-périodes montre un étirement spatial de la zone de faible activité végétative (10°E-12°E) ainsi qu'une diminution des maxima entre 1989 et 1999 (Fig. V-3 b). C'est au cours des années 2000 que l'activité végétative semble plus importante sur le pays, et de façon plus marquée à l'est de 15°E (Fig. V-3 c).

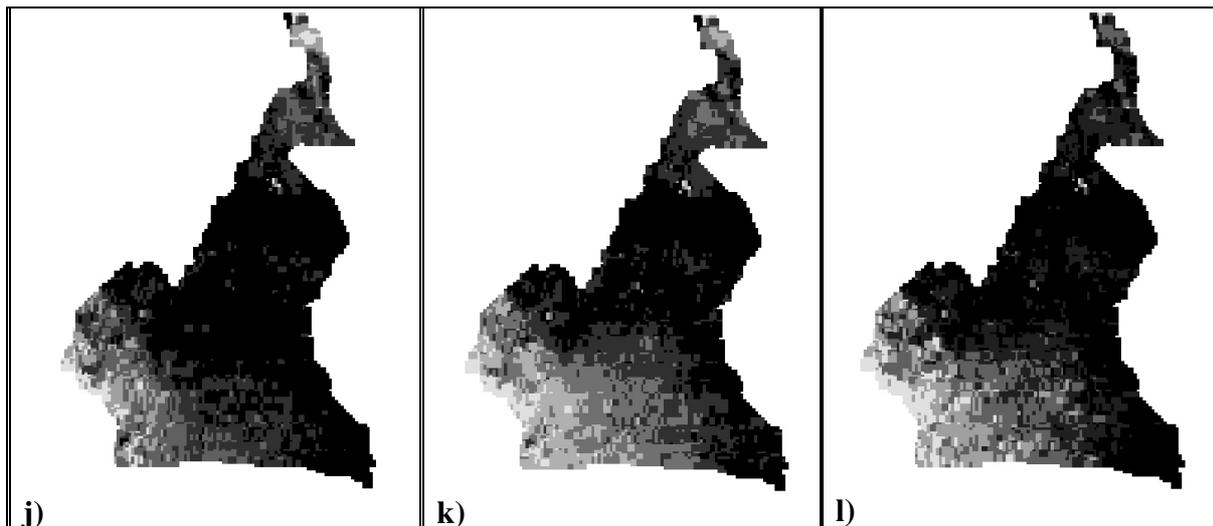


Figures V-3 : Diagrammes longitude/temps du champ de NDVI sur la fenêtre du Cameroun au cours des sous-périodes 1982-1988 (a), 1989-1999 (b) et 2000-2006 (c).

I-3-2. Répartition spatiale des moyennes annuelles

La cartographie du NDVI au cours des saisons humides et sèches a pour but d'évaluer spatialement les amplitudes de changements à l'échelle annuelle (Fig. V-4). Pour ce faire, on considère, d'une part la moyenne de la période de faible activité végétale (décembre-février), d'autre part celle des périodes d'activités maximales de la végétation (avril-mai, septembre-octobre et août-septembre), sachant toutefois que celles-ci ne sont pas synchrones dans toutes les régions du pays. Pour chaque saison et chaque sous-période, les sept mille deux cent onze points (ou pixels de 64 km²) de NDVI que compte l'ensemble du Cameroun sont segmentés en cinq classes de valeur. Les résultats sont ensuite exprimés en nombre de points représentatifs et en pourcentages correspondant (Fig. V-4).





Figures V-4 : Répartition spatiale du NDVI au Cameroun au cours de la saison sèche : (a, b, c) = moyenne décembre-février ; et au cours des périodes humides (d, e, f) = moyenne avril-mai; (g, h, i) = moyenne septembre-octobre ; (j, k, l) = août-septembre : les moyennes saisonnières sont calculées pour les sous-périodes 1982-1988, 1989-1999 et 2000-2006. La légende située sur la première carte est valable pour toutes les autres.

a) Évolution spatiale du NDVI en période sèche (décembre-février)

La saison sèche (décembre-février) est marquée par des valeurs particulièrement faibles ($< 0,3$) dans la partie septentrionale, ainsi que dans la partie centrale du sud du pays (Fig. V-4 a, b, c). Seules les régions de l'Adamaoua, du sud-est et des hautes terres de l'ouest présentent quelques pixels disparates où les valeurs sont supérieures à 0,5. Le tableau des statistiques montre que plus de 80 % des pixels de NDVI sont inférieurs à 0,4, alors que moins de 5 % d'entre eux présentent des valeurs supérieures à 0,5 (tableau V-1). Pour cette saison, la comparaison des cartes des trois sous-périodes rend compte d'une croissance de l'activité végétative des années 1980 vers la fin de période, avec donc une augmentation (diminution) du nombre de pixels de fortes (faibles) valeurs de NDVI (tableau V-1).

b) Évolution spatiale du NDVI en saisons humides (Cf. tableau III-2)

En avril-mai, les moyennes maximales se situent dans le sud-est du pays (0,84), alors que la partie septentrionale enregistre un indice faible ($< 0,3$) (Fig. V-4 d, e, f). Partout ailleurs, la croissance végétation est assez marquée : plus de 70 % des pixels ont des valeurs supérieures ou égales à 0,5. De plus, près de 43 % des pixels enregistrent des valeurs supérieures à 0,6 au cours de la dernière sous-période (2000-2006) qui est donc la plus verte (tableau V-1).

Tableau V-1 : Statistiques de la répartition saisonnière des pixels de NDVI suivant 5 classes de valeurs.

Saison / période	[0,01 - 0,3]	[0,3 - 0,4]	[0,4 - 0,5]	[0,5 - 0,6]	> 0,6
déc-fév / P1	3 399 pts	2 579 pts	1 041 pts	188 pts	4 pts
	(47 %)	(36 %)	(14 %)	(3 %)	(<1 %)
déc-fév / P2	2 439 pts	3 048 pts	1 461 pts	259 pts	4 pts
	(34 %)	(42 %)	(20 %)	(4 %)	(<1 %)
déc-fév / P3	1 178 pts	3 386 pts	2 268 pts	370 pts	9 pts
	(16 %)	47 %)	(31 %)	(5 %)	(<1 %)
avril-mai / P1	825 pts	379 pts	787 pts	2 878 pts	2 342 pts
	(11 %)	(5 %)	(11 %)	(40 %)	(32 %)
avril-mai / P2	683 pts	300 pts	737 pts	3 044 pts	2 447 pts
	(9 %)	(4 %)	(10 %)	(42 %)	(34 %)
avril-mai / P3	705 pts	286 pts	577 pts	2 547 pts	3 096 pts
	(10 %)	(4 %)	(8 %)	(35 %)	(43 %)
sept-oct / P1	96 pts	317 pts	865 pts	1 667 pts	4 266 pts
	(1 %)	(4 %)	(12 %)	(23 %)	(59 %)
sept-oct / P2	48 pts	271 pts	1 180 pts	2 361 pts	3 351 pts
	(1 %)	(4 %)	(16 %)	(33 %)	(46 %)
sept-oct / P3	85 pts	289 pts	775 pts	2 037 pts	4 025 pts
	(1 %)	(4 %)	(11 %)	(28 %)	(56 %)
août-sept / P1	118 pts	423 pts	903 pts	1 492 pts	4 275 pts
	(2 %)	(6 %)	(13 %)	(21 %)	(59 %)
août-sept / P2	170 pts	722 pts	1 330 pts	1 889 pts	3 100 pts
	(2 %)	(10 %)	(18 %)	(26 %)	(43 %)
août-sept / P3	303 pts	645 pts	1 142 pts	1 657 pts	3 464 pts
	(2 %)	(9 %)	(16 %)	(23 %)	(48 %)

P1 = sous-période 1982-1988 ; P2 = sous-période 1989-1999 ; P3 = sous-période 2000-2006 ; pts = pixels de NDVI de 8 km de côté.

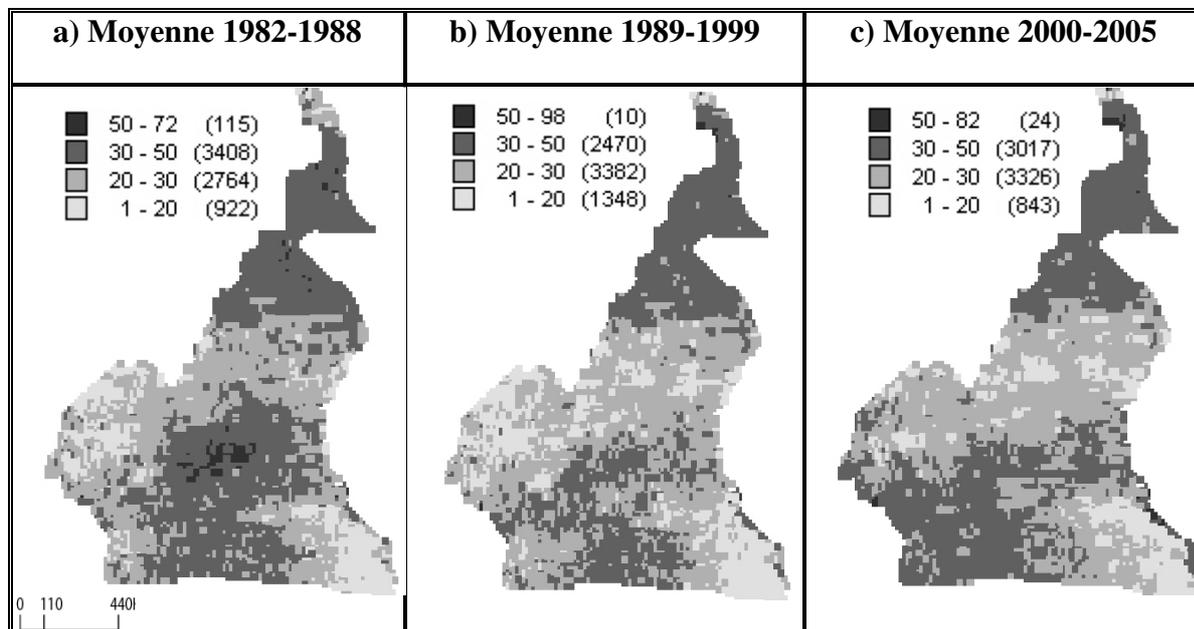
La période août-septembre est marquée par un décalage de la zone d'activité maximale de la végétation vers le nord du pays, à l'occasion de la petite saison des pluies en région équatoriale (Fig. V-4 j, k, l). Toutefois, contrairement aux latitudes de l'Adamaoua où l'activité végétale est assez homogène dans l'espace, celle-ci semble assez

discontinue plus au nord. Dans la partie méridionale, c'est la région centrale qui semble particulièrement sensible au fléchissement estival : l'activité végétale reste toujours soutenue dans la partie orientale. Les statistiques de la répartition des pixels montrent que 70 % ont une valeur supérieure ou égale à 0,5 ; l'on relève aussi une baisse d'activité dans la zone côtière, des années 1980 vers les années 2000.

En septembre-octobre, l'activité végétale plus développée dans le nord (> 0,4) ainsi que dans la région de l'Adamaoua (> 0,5), diminue dans le sud-ouest du pays (par rapport à la saison avril-mai) (Fig. V-4 g, h, j), alors que la partie centrale du sud-Cameroun enregistre une extension des pixels supérieurs à 0,5. En fait (tableau V-1), plus de 50 % des pixels du pays ont un NDVI supérieur ou égal à 0,6, avec des maxima supérieurs à 0,8.

I-3-3. Un point sur l'amplitude des variations spatiales

Les coefficients de variation annuels (rapport entre l'écart-type et la moyenne) du NDVI au cours des trois sous-périodes permettent de quantifier. Il ressort que, dans l'ensemble du pays, les valeurs dépassent rarement 50 %, sauf au cours de la première sous-période dans le centre-sud du pays, ainsi que dans quelques pixels de la partie septentrionale (Fig. V-5 a). Ces deux régions présentent la plus grande dispersion du coefficient à l'échelle annuelle (entre 30 % et 50 %), en raison des forts contrastes saisonniers qui y règnent.



Figures V-5 : Coefficient de variation annuel du NDVI au Cameroun (exprimé en pourcentage), calculé pour les sous-périodes 1982-1989 (a), 1990-1999 (b) et 2000-2006 (c) ; les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de points de grille appartenant à chaque classe de valeur. La légende située sur la première carte est valable pour les deux autres.

Partout ailleurs, on relève des valeurs inférieures à 20 %, particulièrement dans le sud-est du pays ainsi que dans quelques régions des hautes terres de l'Ouest et de l'Adamaoua. Dans la frange côtière, les coefficients sont compris entre 20 % et 50 %. À ce sujet, Bigot (1997) a montré qu'en Afrique centrale il est impossible d'établir une relation entre les coefficients de variation du NDVI et la couverture végétale le long de la bande côtière où les valeurs supérieures à 40 % traduisent l'extrême variabilité saisonnière.

Plus généralement, les faibles coefficients (< 20 %) occupent les zones de végétation dense telles que les forêts sempervirentes, alors que les zones de transitions péri-forestières ou les domaines savanicoles correspondent aux coefficients compris entre 20 % et 30 %. Les plus fortes valeurs sont en zone soudano-sahélienne et, dans une moindre mesure, dans le centre-sud, en rapport avec les contrastes saisonniers de la phénologie dans ces régions du pays.

II. REGIONALISATION DU NDVI PAR CLASSIFICATION AUTOMATIQUE

L'application des méthodes de régionalisation sur les champs de NDVI s'appuie sur le fait que chaque formation végétale a une signature spectrale et donc une activité photosynthétique (réflectance) spécifique. Ceci permettra de discriminer les principaux types de formations végétales et donc de mener une analyse en tenant compte des particularités de chaque classe de végétation. Ne seront présentés ici que les résultats de la classification (non supervisée) issue de la méthode *ISODATA*.

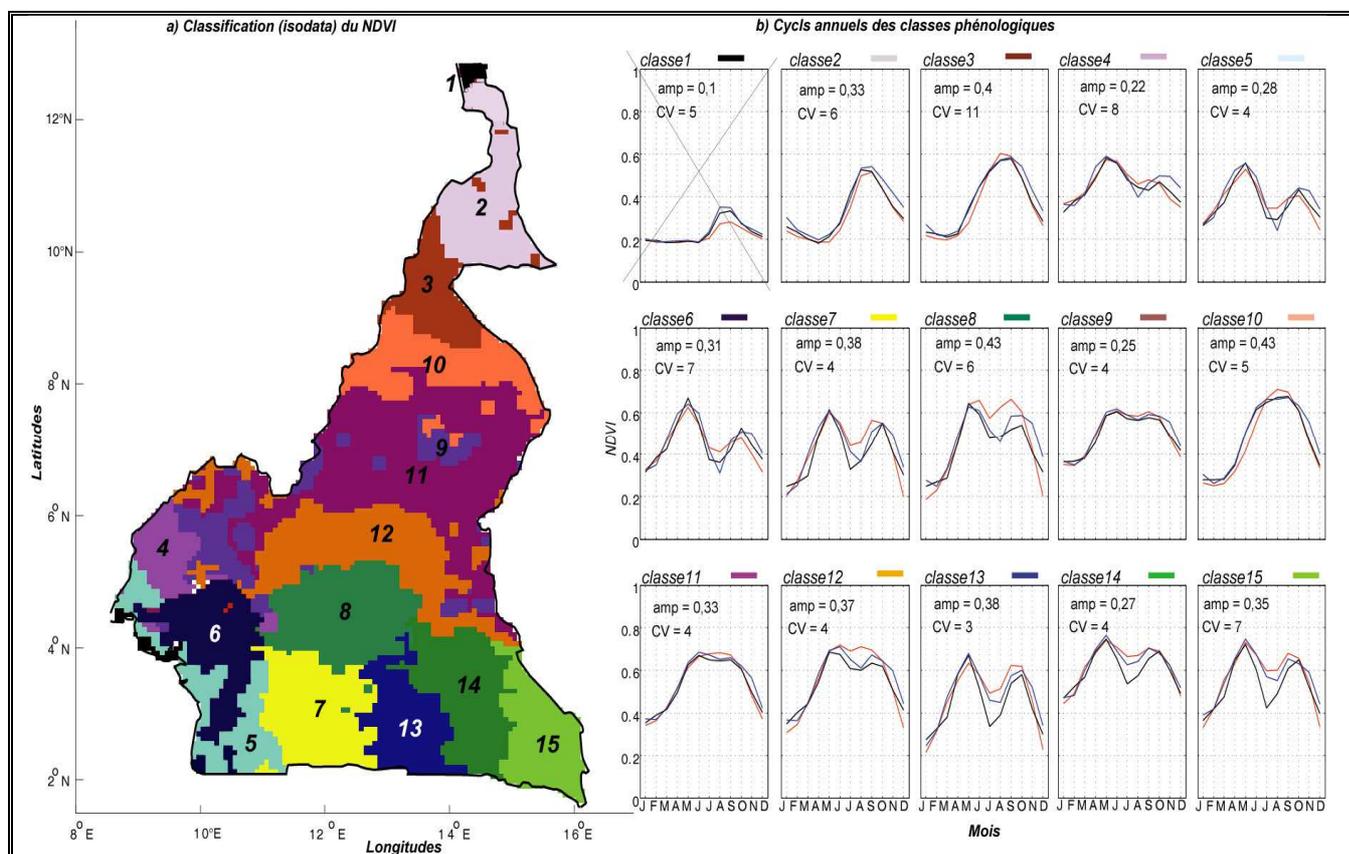
L'algorithme *ISODATA* compare les valeurs radiométriques de chaque pixel suivant un nombre prédéfini de clusters (seuils maximum et minimum), d'agrégats minimum par cluster, et de distance minimale entre les classes (Tou et Gonzalez, 1974 ; ERDAS, 1997). À chaque itération, les moyennes sont recalculées et les pixels reclassés en fonction des nouvelles moyennes. L'opération prend fin, soit lorsque le nombre d'itérations prédéfinies est atteint, soit lorsque le taux de pixels changeant dans chaque classe devient inférieur au seuil fixé. Les opérations post-classificatoires permettent soit de compacter des classes en éliminant les pixels isolés, soit de fusionner des classes présentant des caractéristiques apparentes ou de supprimer celles présentant des configurations non réalistes. Il faut noter que les classes de végétation constituées à partir de la méthode *ISODATA* sont, à quelques exceptions, superposables à celles calculées suivant les méthodes Kmeans ou CHA (exercices réalisés mais non présentés ici par souci de lisibilité).

La régionalisation du champ NDVI a été effectuée exclusivement sur les sept mille deux cent onze pixels de 8 km de côté que comporte la fenêtre du Cameroun. Pour chacun de ces pixels, l'on dispose de deux données de NDVI par mois, soit vingt-quatre données

par an et sur la période 1982-2006. Dans un premier temps, les moyennes bimensuelles ont été calculées en discriminant les sous-périodes retenues lors des analyses précédentes (1982-1989, 1990-1999 et 2000-2006). Ensuite, les seuils minimum et maximum du nombre de classes ont été fixés respectivement à 5 et 20, afin de discriminer un plus grand nombre de types phénologiques. Par ailleurs, le choix de deux cents itérations nous a semblé suffisant pour stabiliser les classes. En résumé, les classes de NDVI devront être distinctes les unes des autres par les caractéristiques de leurs profils annuels.

II-1. Cycles annuels des différentes phénologies végétales au Cameroun

Les figures V-6 présentent, d'une part (a) la répartition spatiale des classes identifiées par la méthode *ISODATA*, d'autre part (b) les cycles annuels de NDVI de chaque classe au cours des trois sous-périodes. On distingue quinze classes de végétation, dont la configuration est quasi similaire à celle des précipitations.



Figures V-6 : a) Classification (*ISODATA*) du NDVI moyen (1982-2002) au Cameroun en 15 classes ; b) cycles annuels du NDVI dans les différentes classes de végétation réparties en 3 sous-périodes : 1982-1988 (noir) ; 1989-1999 (bleu) ; 2000-2002 (rouge) ; les chiffres au-dessus des graphes représentent les valeurs d'amplitudes (amp) du NDVI et du coefficient de variation (CV), calculées sur le cycle annuel moyen de l'ensemble de la période.

Ceci est en lien avec la géométrie du pays : une organisation méridienne au nord du 5^e parallèle et une répartition plus zonale au sud de cette latitude (voir figure I-5). Observons

également que, contrairement aux approches globales qui considèrent la végétation du sud du pays comme étant grossièrement forestière, on relève un certain partitionnement : environ dix classes de végétation, contre cinq classes pour la partie septentrionale. Signalons également que les faibles valeurs de NDVI dans la classe 1 située à la pointe nord du pays ainsi que sur la bordure littorale traduisent moins le signal de la végétation que des biais radiométriques induits par la présence d'eau (lac Tchad, océan Atlantique) : cette classe ne sera par conséquent pas prise en compte lors des analyses. Celles-ci seront effectuées en tenant compte des formations situées de part et d'autre du 6^e parallèle.

II-1-1 Cycles annuels moyens du NDVI au nord du 6^e parallèle

Rappelons que la partie septentrionale du Cameroun est le domaine des formations floristiques soudano-sahélo-guinéennes et d'altitude (Letouzey, 1968). Les cycles annuels de ces classes phénologiques adoptent un profil unimodal (Fig. V-6 b ; classes 2, 3, 9, 10, 11). La classe 2 que l'on peut associer aux steppes à épineux soudano-sahélienne ainsi qu'aux prairies saisonnièrement inondables (yaérés) présente une période de forte activité végétative entre la première moitié du mois de juillet et la deuxième moitié d'octobre, avec un maximum sur la deuxième quinzaine d'août : la valeur moyenne du NDVI au cours de ce maximum reste toutefois en dessous de 0,6. La région située entre les 9^e et 10^e parallèles est le domaine par excellence des savanes soudaniennes (classe 3). Ici, le cycle annuel du NDVI présente un mode (0,6) entre la deuxième quinzaine d'août et la première quinzaine de septembre avec un début d'activité végétative plus précoce par rapport au domaine précédent. Autour du 8^e parallèle, les formations herbeuses laissent place au couvert arbustif et arboré, ce qui implique une activité végétative plus importante et commençant beaucoup plus tôt (classes 9, 10, 11). C'est d'ailleurs à partir de cette latitude que le cycle annuel perd son caractère unimodal strict, puisque la courbe présente un étalement après le maximum. Cette caractéristique, rencontrée surtout dans les formations soudano-guinéennes, a été mise en évidence dans plusieurs études et est associée à la pluviométrie. En effet, le NDVI n'est pas linéairement corrélé à la densité de biomasse : il présente une relation exponentielle à la densité de la végétation verte, mais sature en présence d'une épaisse couverture végétale. Nous y reviendrons dans le prochain chapitre.

II-1-2. Cycles annuels moyens du NDVI au sud du 6^e parallèle

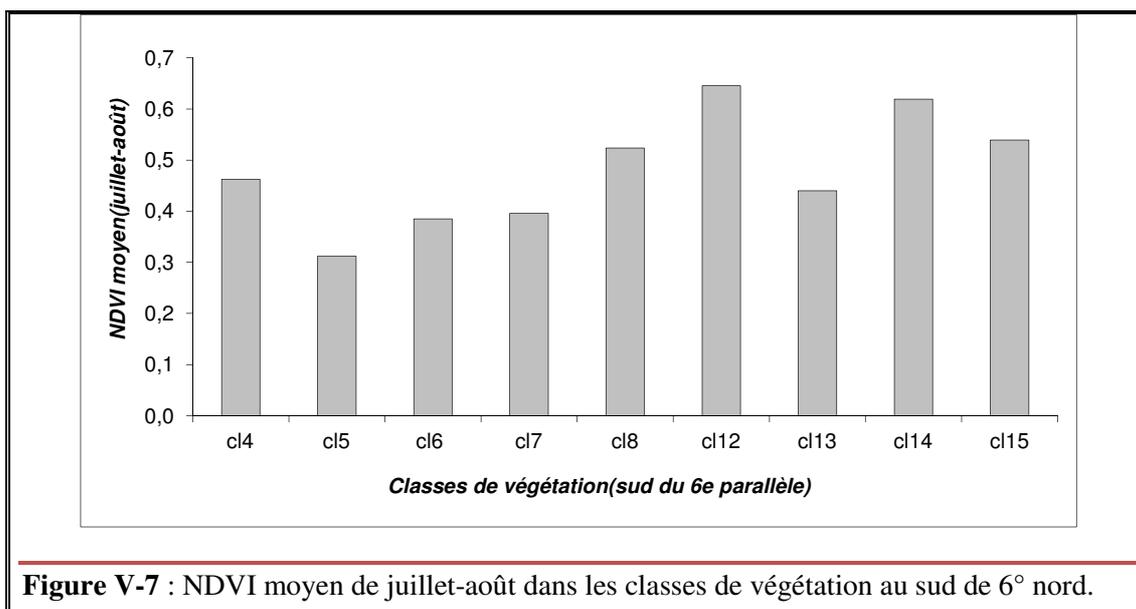
D'après Letouzey (1968), la végétation du sud-Cameroun se répartit en deux principaux types phénologiques. Le premier représente les forêts denses humides guinéennes avec plusieurs types floristiques : mangroves sur la côte atlantique, forêts sempervirentes congo-guinéennes et littorales, forêts semi-caducifoliées et marécageuses. Le deuxième type est la savane guinéenne péri-forestière qui englobe des savanes herbeuses, arbustives et arborées (voir carte de la végétation). En cette région, l'activité végétative présente une saisonnalité, même en zone forestière, où le couvert semble *a*

priori sempervirent (Fig. V-6 b ; classes 4-8 et 12-14). En effet, contrairement aux conclusions tirées à large échelle, des approches spatiales fines montrent que cet ensemble végétal présente plusieurs types de comportement phénologique.

Les valeurs de NDVI au sud du 6° parallèle se situent au-dessus de 0,3 durant toute l'année. Comme nous l'avons déjà remarqué, le cycle annuel de la végétation (à l'opposé de celui des précipitations), présente un pic plus important au cours de la première saison humide (mars-juin), avec des valeurs maximales qui varient de 0,55 à 0,75 suivant les formations végétales (Fig. V-6 b ; classes 4-8 et 12-14).

Au cours de la grande saison des pluies en revanche, les maxima ne dépassent pas 0,6. Précisons également qu'à l'image du cycle annuel de la pluviométrie, l'été boréal imprime sa marque. La comparaison des cycles annuels des trois sous-périodes montre des différences sur juillet-août : la baisse de l'activité végétative est plus accusée au cours de la sous-période 1982-1989, alors que cette saison semble s'effacer au cours des années 2000.

La figure V-7 présente le NDVI moyen de juillet-août, calculé sur la période 1982-2006 pour chacune des classes de végétation situées au sud de 6°N.



Pendant cette saison, les formations péri-forestières ou de la zone de transition forêt/savane enregistrent des moyennes élevées (> 0,4), ce qui traduit la gradation entre domaines soudanien et équatorial. Les formations équatoriales du sud-est (Fig. V-6 ; classes 14 et 15) présentent une particularité, puisque l'activité végétative reste soutenue (> 0,5) au cours de cette saison. Au demeurant, seul le couvert végétal des régions côtières ainsi que du centre-sud du pays (Fig. V-6 ; classes 5, 6 et 7) semble fléchir au cours de la petite saison sèche, mais l'indice de végétation ne descend pas en dessous de 0,3.

Ces résultats illustrent — à l'image de la pluviométrie — l'importance de la saison sèche boréale dans la discrimination des types floristiques du sud-Cameroun. Ils soulignent par ailleurs l'importance de la question d'échantillonnage lors de l'utilisation des données de NDVI.

II-1-3. Amplitudes de variation du NDVI selon les classes de végétation

Hormis les formations forestières du sud-est du pays (Fig. V-6 ; classes 13, 14, 15) qui enregistrent des maxima moyens de NDVI supérieurs à 0,7, ceux de toutes les autres classes de végétation fluctuent autour de 0,6 (tableau V-2). Ainsi, ce sont principalement les minima qui impriment les différences d'amplitude interclasses : ces minima ne dépassent pas 0,25 pour les formations soudano-sahéliennes (Fig. V-6 ; classes 2, 3 et 10), alors qu'ils oscillent autour de 0,3 en milieux de transition savanicole soudano-sahélien et guinéen (Fig. V-6 ; classes 9, 11, 12). Le NDVI moyen de l'ensemble du pays étant d'environ 0,45, ce seuil a été fixé pour discriminer les périodes le plus et le moins actives de la végétation. Ainsi, le tableau V-2 présente également, pour chaque classe, le nombre de quinzaines avec un NDVI supérieur à ce seuil.

Tableau V-2 : Maxima et minima moyens de NDVI et nombre de quinzaines avec un NDVI supérieur à 0,45 pour les classes de végétation du Cameroun (1982-2002) : les numéros de classes se rapportent à la figure V-1 ; les classes situées au sud (au nord) de 6°N sont en gris foncé (clair).

CLASSES	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Maxima	0,53	0,58	0,58	0,55	0,65	0,61	0,64	0,61	0,68	0,67	0,69	0,70	0,75	0,73
Minima	0,19	0,21	0,35	0,30	0,32	0,31	0,30	0,28	0,25	0,27	0,34	0,34	0,46	0,36
NDVI > 0,45	5	9	12	5	12	12	14	15	10	16	17	13	24	18

Il ressort qu'en dehors de la classe 5 qui présente un résultat assez particulier, la longueur de la période de pleine activité photosynthétique est proportionnelle à la densité des couverts : elle varie de cinq à dix quinzaines (2 mois et demi) dans les formations soudano-sahéliennes à quasiment toute l'année dans les formations plus fermées du sud-est du pays (tableau V-2). La particularité de la classe 5 — qui présente seulement cinq quinzaines sur vingt-quatre avec un indice de végétation supérieur à 0,45 — semble liée aux biais radiométriques induits par le fort contenu de vapeur d'eau présent en zone

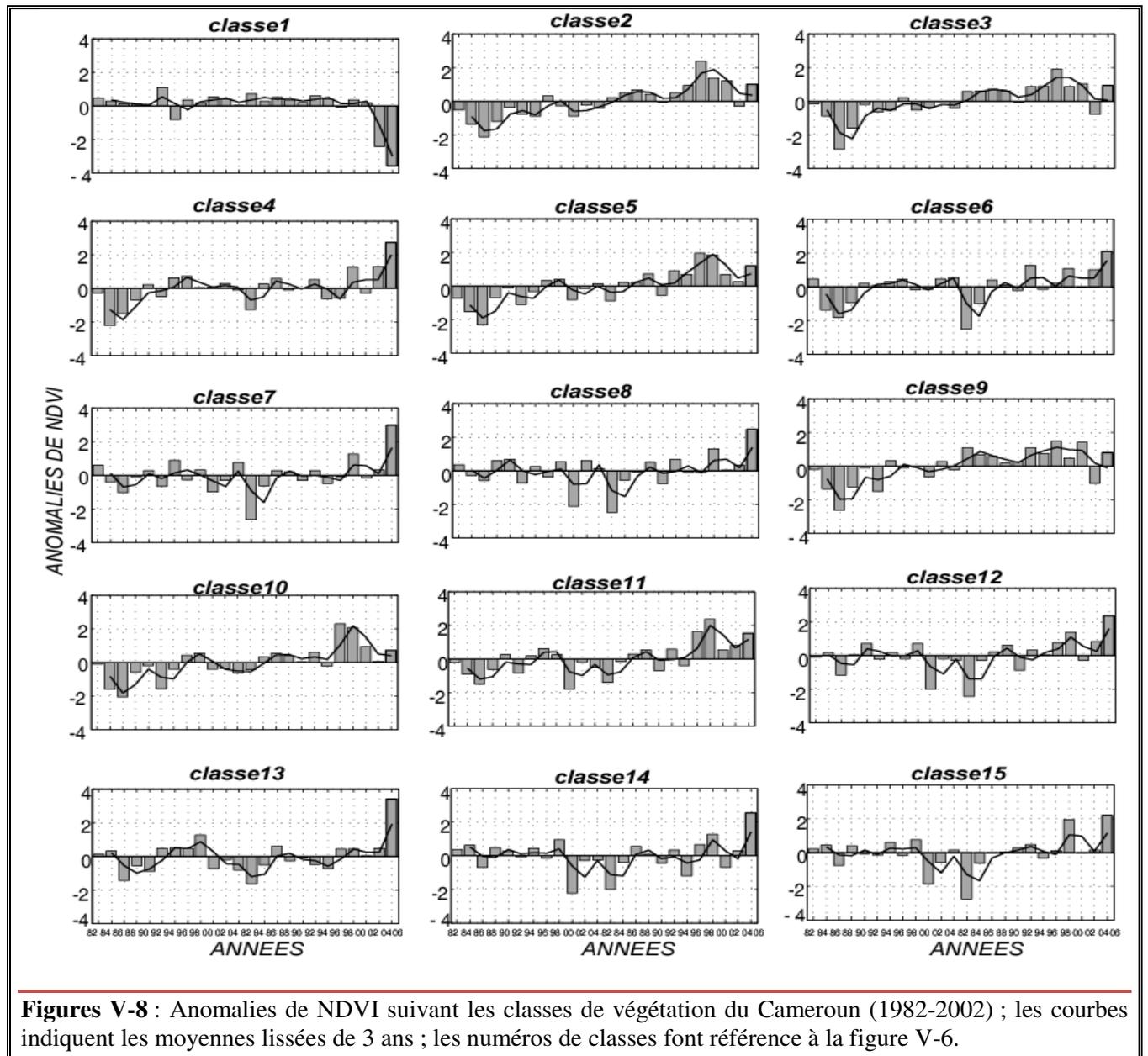
Il ressort de cette classification, que les différents ensembles phénologiques combinent plusieurs types floristiques, ce qui implique de multiples comportements végétaux dont le NDVI moyen ne reflète que le couvert dominant (tableau V-3). Les classes de végétation dépendent fortement de la fenêtre choisie et renvoient plus aux particularités photosynthétiques du couvert le plus représenté qu'à une quelconque homogénéité. Des îlots de végétation clairsemée, intercalés en zones de végétation dense ou inversement, témoignent aussi du caractère composite de la végétation. Il est important de rappeler qu'un changement de la composition floristique peut modifier considérablement la valeur de l'indice de végétation au sein d'un même ensemble phénologique. De plus, malgré leurs corrections radiométriques, orbitales ou atmosphériques, les images issues de capteurs grands champs peuvent présenter des biais dans certaines régions, ce qui induit une certaine prudence quant à leur interprétation. Sur les formations sahéliennes et forestières, les types floristiques sont moins importants (on compte 3 ou 4 biomes), ce qui témoigne d'un couvert moins hétérogène. En revanche, les formations guinéennes et celles situées en zones de transition sont les plus composites et le taux de contribution d'éléments constitutifs souvent très proches peuvent susciter des ambiguïtés quant à leur nomenclature. Dans l'ensemble, la cartographie phénologique moyenne reflète l'importante hétérogénéité de la productivité primaire, et la cartographie floristique à elle seule ne suffit pas pour établir la cartographie fonctionnelle de la végétation en Afrique centrale (Bigot, 1997). Toutefois, les amplitudes moyennes permettent de constater des grandes tendances de la végétation puisqu'au demeurant les maxima et minima varient d'année en année.

II-1-4. Variabilité à l'échelle interannuelle

Les variations interannuelles du NDVI sont illustrées au travers des anomalies standardisées par l'écart type et calculées sur la période 1982-2002, pour chaque classe de végétation identifiées par la CHA.

En Afrique tropicale, les tendances interannuelles du couvert végétal sont surtout associées à la pluviométrie, qui en reste le principal modulateur. Au Cameroun, le début des années 1980 est caractérisé par des anomalies négatives du NDVI, et de façon plus marquée (11,5) au cours des années 1983 et 1984 dans les classes situées au nord de 5°N (Fig. V-8 ; classes 2, 3, 9, 10, 11), ainsi que celles proches de la ligne côtière (Fig. V-8 ; classes 4, 5 et 6). Ces années déficitaires de prolongent même jusqu'en 1986 et particulièrement dans les classes situées au nord de 5°N, traduisant sans doute la « mémoire » de la végétation après une période de stress exceptionnel (Martiny *et al*, 2005). De ce fait, la reprise de la végétation ne se fait qu'après que les horizons du sol soient bien irrigués et le temps d'attente dépend de l'intensité du stress ainsi que de la nature du sol. De même, les classes de végétation du centre-sud et de l'est du pays (Fig. V-8 ; classes 7, 13, 14, 15) montrent entre 1983-1984, essentiellement des années

excédentaires quoique peu marquées, qui sont en adéquation avec les années de précipitations.



Ces résultats sont en adéquation avec les anomalies de pluies, témoignant que les précipitations sont directement ou indirectement associées aux modulations de la végétation dans ces régions. C'est à partir de la deuxième moitié de la décennie 90 que les anomalies positives deviennent importantes : la tendance des anomalies dans le nord-Cameroun vient confirmer la thèse d'un probable « reverdissement » du Sahel au cours de la dernière décennie (Eklundh, 2003 ; Olsson, 2005).

À l'inverse, il n'y a pas de tendance particulière dans le sud du pays (Fig. V-8 ; classes 4-8 et 12-15), puisqu'on relève une succession irrégulière d'années de forte et de

faible activité végétative tout au long de la période. Cependant, la courbe lissée montre des anomalies négatives plus marquées au cours de la première moitié de la décennie 90, alors que le NDVI des autres années de la période sont essentiellement au-dessus de la moyenne (~1,5).

Synthèse

Dans les précédents chapitres, l'analyse des variations spatiotemporelles des précipitations au sud du 6° parallèle a montré une diminution de la pluviométrie d'ouest en est, en relation avec la dynamique de mousson ainsi que les processus de surface continentale. Pourtant, la répartition spatiale de la végétation au travers du NDVI est contraire à cette configuration, puisque celle-ci semble plutôt se revigorer au fur et à mesure que l'on avance dans le continent. Au final, le couvert sempervirent proprement dit ne se retrouve bien que dans le sud-est du pays. Ce constat suscite plusieurs questions-clés : comment expliquer la persistance d'une végétation sempervirente dans un contexte où les processus pluviogènes sont considérablement atténués par l'effet de la continentalité ? Peut-on supposer que l'évolution du couvert végétal de cette région obéit à une autre dynamique que celle des précipitations ? Les analyses effectuées jusqu'ici ne permettent pas de fournir une réponse tranchée, mais celles-ci, alliées à quelques hypothèses émises par des études antérieures, fournissent une première approche.

i) Données NDVI et suivi du couvert végétal : Pour que le NDVI soit efficace pour l'étude de la productivité primaire en Afrique centrale, il faut que la réponse bioclimatique soit supérieure aux bruits d'origine instrumentale ou naturelle. Plusieurs études ont montré les limites des données AVHRR pour suivre la typologie de la couverture végétale au sein du biome forestier africain, puisqu'elles ont tendance à saturer pour les couverts de végétation très denses (Townshend *et al.*, 1986). En effet, le NDVI varie en fonction de plusieurs facteurs dont il est parfois difficile d'estimer l'importance relative. Parmi ceux-ci, on retiendra les facteurs liés aux caractéristiques physiologiques intrinsèques à la plante, à son environnement (sols, pente), aux conditions de prise de vue (angle zénithal solaire et angle de prise de vue), à l'âge et aux changements de capteurs et aux caractéristiques de l'atmosphère (Girard *et al.*, 1999 ; Huete *et al.*, 1997). Par exemple, de faibles valeurs de NDVI enregistrées en zone côtière peuvent relever des biais instrumentaux dus à la forte vapeur d'eau. Selon Bigot (1997), la difficulté à différencier les types de végétation dans des conditions de forte biomasse provient du fait que les échelles spatiales d'approche sont très grossières.

Les méthodes de régionalisation, le nombre de classes sont dépendants de la fenêtre choisie ainsi que des seuils maximum et minimum prédéfinis. Dans cette étude, la régionalisation du NDVI au Cameroun est considérée comme satisfaisante puisqu'elle

identifie assez bien les différents comportements phénologiques et leurs variations spatiales et temporelles.

ii) Facteurs liés à l'exploitation forestière et à l'occupation du sol : Les recherches menées dans le cadre du projet européen TREES initié par une équipe du Centre Commun de Recherche (CCR) d'Ispra en Italie, ont permis de dresser une cartographie des *hot points* (ou points chauds) de la déforestation en Afrique centrale, à partir de l'imagerie des capteurs AVHRR de la NOAA à 1 km de résolution, comparée aux cartes conventionnelles (White, 1983). La méthodologie d'identification des points chauds de déforestation est basée sur une combinaison des données de télédétection à basse résolution spatiale (pourcentage du couvert forestier, fragmentation forestière, feux de forêt, etc.) et d'indicateurs socioéconomiques (densité et taux d'accroissement de la population, migrations, utilisation du sol, accessibilité, aires protégées, etc.) d'impacts potentiels plus fins.

Les variables sont sélectionnées selon leur degré d'influence sur le processus de déforestation et d'autre part selon leur disponibilité. La combinaison de ces données débouche sur la mise en place d'un modèle spatial de déforestation permettant d'identifier les zones à changement rapide (Fig. V-9).

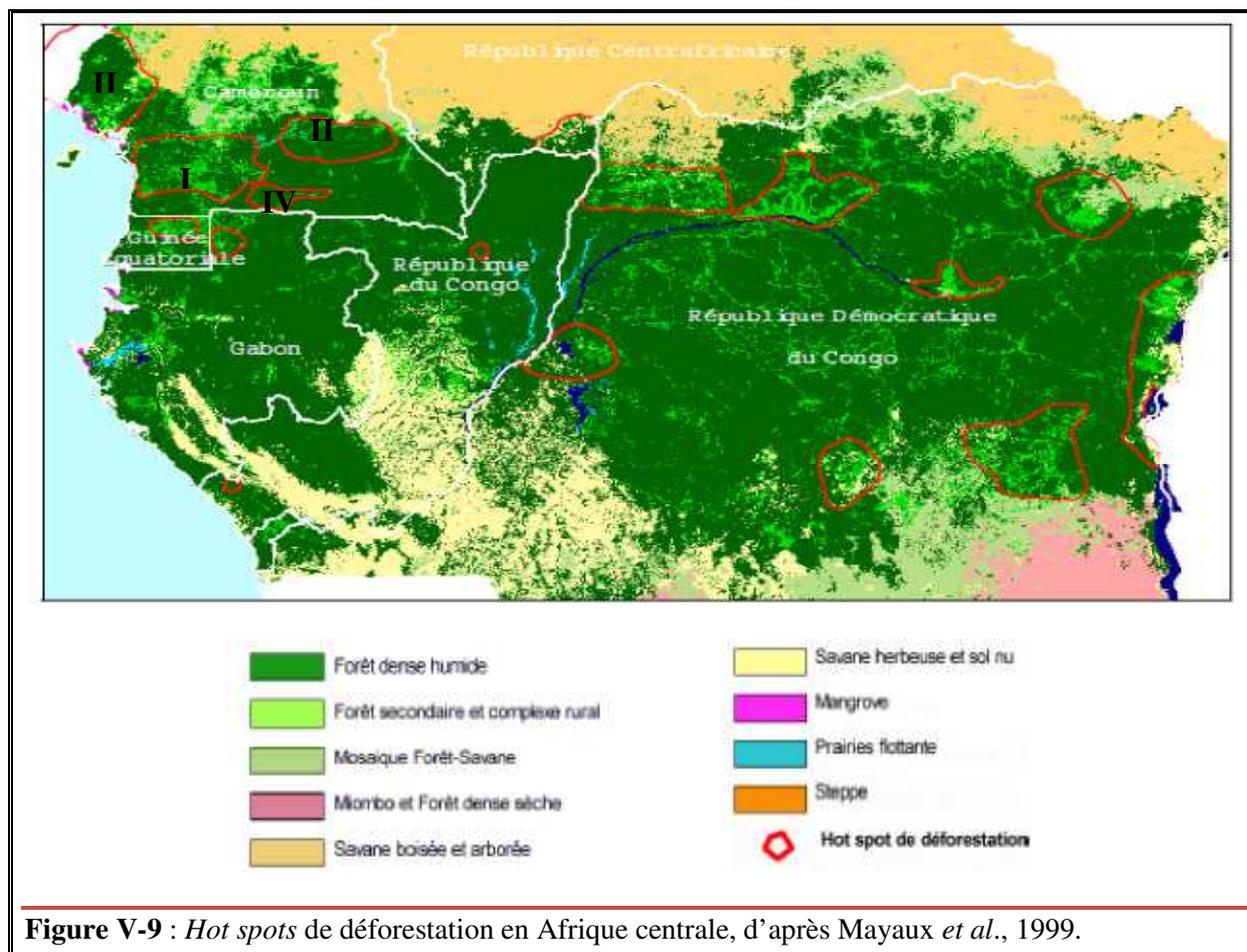


Figure V-9 : Hot spots de déforestation en Afrique centrale, d'après Mayaux *et al.*, 1999.

Suivant cette approche, il a été recensé dix-sept *hot spots* de déforestation en Afrique centrale, avec un risque majeur dans la partie méridionale du Cameroun (Fig. V-9). Les causes de cette déforestation relèvent principalement de l'extension des surfaces agricoles due à la croissance élevée de la population, surtout dans des villes comme Douala, Yaoundé ou Ebolowa (Achard *et al.*, 1998). Remarquons, par ailleurs, que les villes de plus de 100 000 habitants se trouvent essentiellement dans le centre-ouest et dans le sud-ouest du pays (Cf. figure V-1). Suivant la même étude, l'exploitation forestière et minière ainsi que les changements climatiques ne représentent quant à eux que des menaces moyennes mais susceptibles de produire des dégâts sévères et pouvant être irréversibles dans les dix prochaines années.

Le tableau V-4 montre les quatre régions du sud-Cameroun où le risque de déforestation est plus important. Toutes ces régions présentent une déforestation assez fragmentée avec une structure linéaire dans l'espace, mais c'est dans le sud-ouest (régions I et II) que le risque actuel est le plus élevé. C'est également dans cette région que l'on rencontre le plus de migrants agricoles (Achard *et al.*, 1998). À l'inverse, les régions de Bertoua et de Djoum (III et IV) ont un risque moins important en raison des difficultés d'accès et donc d'une anthropisation plus réduite.

LOCALISATION	période	risque	type	Structure spatiale	causes	agents
I - Ebolowa/ Mbalmayo	présent	élevé	frag.	linéaire	cultures vivrières et de rente	populations locales/migrants
II - Parcs Korup- cross river	présent	élevé	frag.	diffuse linéaire	cultures vivrières et de rente	populations locales/migrants
III - Bertoua- Abong-Mbang	futur	moyen	frag.	linéaire	cultures vivrières et de rente	populations locales
IV - Djoum	futur	moyen	frag.	linéaire	cultures vivrières et de rente	populations locales

Les études prospectives s'appuyant sur des indicateurs de changements tels que la croissance démographique, la fragmentation forestière et l'établissement des concessions forestières, prévoient un renforcement de la déforestation au cours des prochaines années (Mertens *et al.*, 2000). Ces concessions ne représentent pas en elles-mêmes un risque majeur de déforestation, puisque les sociétés forestières auxquelles elles sont attribuées se doivent de respecter les conditions de gestion durable : elles exploitent généralement quelques espèces commerciales, sans réduire substantiellement le couvert forestier. En

revanche, ce sont les étapes qui accompagnent ce processus d'exploitation qui sont nocives, notamment l'ouverture de nouvelles pistes forestières, principaux axes de pénétration dans la forêt. C'est de ce point de vue que les concessions forestières peuvent être considérées comme des indicateurs indirects pour modéliser la déforestation.

A ce sujet, Mertens et Lambin (1997, 2000) ont utilisé un modèle empirique pour étudier la répartition spatiale et la complexité du processus de déforestation dans le Sud-Cameroun, en comparant le canal infrarouge des images satellitales Landsat MSSS et SPOT XS en 1973 et 1986, les images plus récentes étant inutilisables en raison de leur contamination nuageuse. Les enquêtes de terrain ainsi que les photographies aériennes ont été utilisées pour valider les données de l'imagerie satellitale. Une analyse de régression multivariée a permis de tester l'impact de 4 variables indépendantes dans le processus de déforestation (variable dépendante) : la proximité des villes, des routes, la lisière de la forêt et la fragmentation forestière (Fig. V-10). Il ressort que les facteurs prédictifs de la déforestation peuvent être très diversifiés dans un même domaine, et opèrent différemment dans chaque cas. Ils sont souvent impulsés par les contextes politiques et socio-économiques locaux, et, par conséquent, ne peuvent être transposables à d'autres régions.

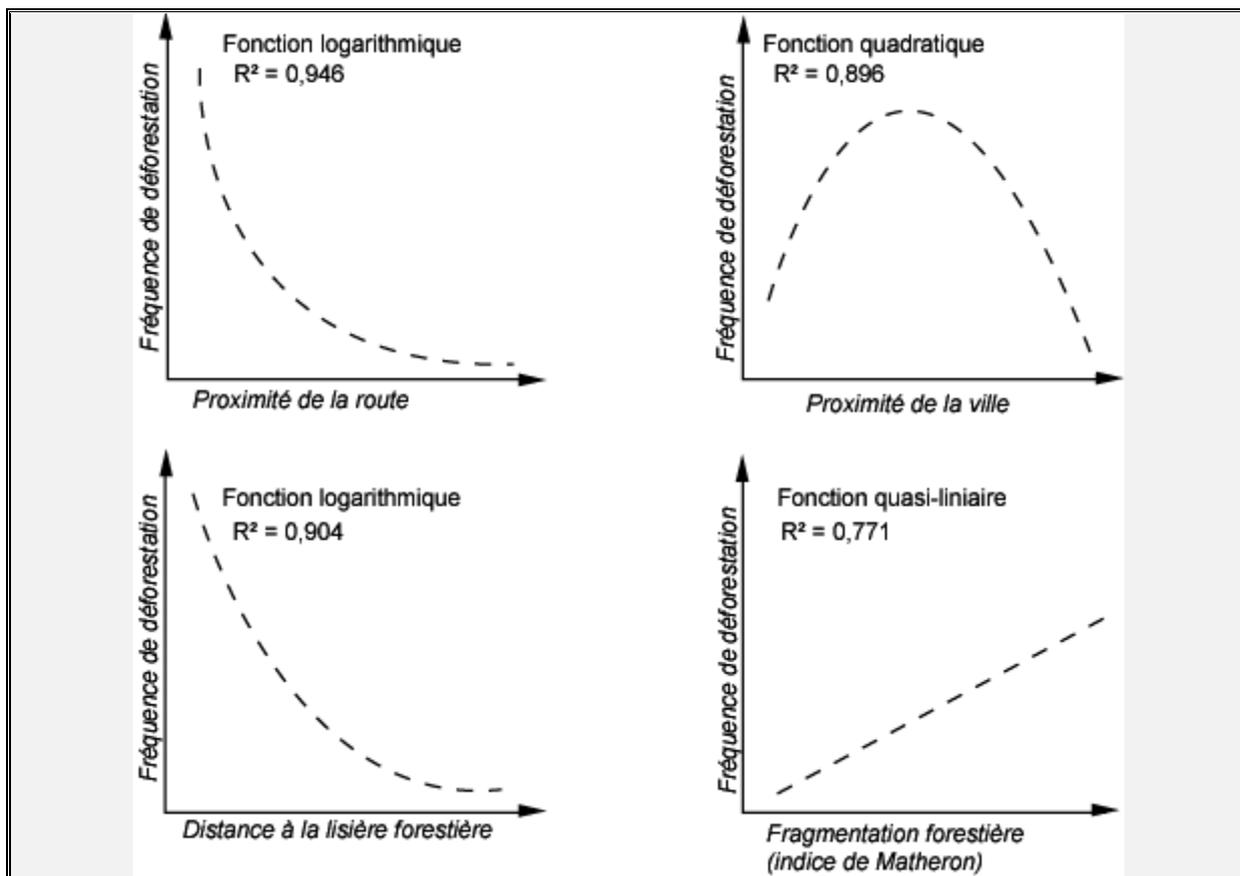


Figure V-10 : Relations entre la fréquence de déforestation et différentes variables testées par Martens et Lambin (1997) dans le Sud-Cameroun.

Dans le Sud-Cameroun, par exemple, la proximité des routes permet aux migrants agricoles d'accroître l'accessibilité à la forêt. Le but est ici de développer des systèmes agricoles orientés souvent vers les marchés internationaux et donc couvrant de grands espaces, alors que la proximité d'une forêt permet aux riverains de pratiquer l'agriculture de subsistance pour alimenter les marchés locaux. Ainsi, la proximité des villes favorise la déforestation périurbaine (nous reviendrons plus loin sur ce point avec un article en annexe). Par ailleurs, la déforestation est linéairement dépendante de la fragmentation forestière qui est associée au processus d'attribution des concessions forestières déjà signalé ci-dessus.

III-RAPPORT PLUIES/NDVI : IMPACTS DE LA VARIABILITE INTRA-SAISONNIERE DES PRECIPITATIONS SUR LE CYCLE VEGETATIF.

Cette section présente le contexte et le résumé détaillé d'un article accepté par la revue sécheresse intitulé : « Variabilité intrasaisonnière des précipitations et de leur distribution: impacts sur le développement du couvert végétal dans le Nord du Cameroun (1982-2002) » Le texte intégral de cet article est présenté en annexe.

III- 1. Problématique, contexte, résumé, et texte intégral de l'article

III-1.1. Problématique et contexte

Les études du programme ICCARE font apparaître, pour le Cameroun, une période de récession s'étalant de la fin des années 60 au milieu des années 80 avec un déficit de plus de 16%. Cette péjoration s'est traduite dans le Nord-Cameroun (6°N -13°N ; 11°E – 16°E) par des saisons pluvieuses parfois tardives et/ou écourtées, accompagnées de périodes de sécheresse d'échelle intra-saisonnières. Dans certaines stations, les débuts des saisons pluvieuses furent parfois précoces mais alors les fins de saisons connaissaient des sécheresses sévères. A Mora par exemple, le mois d'août 1971 enregistra un déficit de près de 136 mm de pluies. Cette situation s'est ensuite généralisée à l'ensemble du Nord-Cameroun, où la rareté des pluies a été à l'origine de l'assèchement des végétaux, la mobilisation par le vent des particules meubles du sol et le tarissement total des mayos (cours d'eau saisonniers) et des lacs. Il s'agit d'une situation d'autant plus préoccupante que la saison des pluies qui dure seulement 5 à 6 mois devrait suffire à constituer la réserve utile du sol pour l'agriculture, dont la contribution au Produit Intérieur Brut (PIB) en 1975 était de 40%. Ce chiffre est passé à 27% entre 1981-1982, soit une perte de 335 000 tonnes, - alors que l'agriculture occupait encore plus de 75% de la population active - et à 25% en 1990. De ce fait, l'aide alimentaire d'urgence sollicitée par le

gouvernement camerounais n'a couvert que 14% des besoins (rapport PAM, Maroua, 1999).

Ces statistiques traduisent bien les conséquences néfastes des perturbations climatiques sur les activités agricoles (Kemche, 1991). Pour survivre, les populations ont eu ainsi besoin de multiplier les campagnes agricoles, de pratiquer l'agriculture intensive ou de rechercher systématiquement des points d'eau pour des cultures de contre-saison. Dans l'Adamaoua, il y eut un peu partout une ruée vers les plaines de décrue, où la compétition pour la terre fut à l'origine de multiples conflits entre agriculteurs et éleveurs (Boutrais, 1989). Plus au nord, l'important flux de manœuvres agricoles venant des territoires voisins du Tchad et de Centrafrique s'est intensifié ainsi que l'abattage systématique des ligneux aux fins de développement de la culture du sorgho. Sur les régions des hautes terres, le captage des sources pour les cultures de contre saison est à l'origine du manque d'eau sur les plateaux environnants en saison sèche. En somme, le Nord-Cameroun présente une juxtaposition des systèmes agro-pastoraux parmi les plus intensifs, des densités de populations parmi les plus élevées, et des crises climatiques les plus récurrentes du pays (Dongmo, 1998).

On recherche ici, les facteurs intrasaisonniers qui déterminent la qualité pluviométrique des années. Trois facteurs principaux ont été testés : le nombre de jours secs (< 1mm), leur répartition et leur intensité au sein de la saison des pluies. Il a également fallu aborder la question des séquences sèches intra-saisonnière, définies par Barron et *al* (2003) comme étant de courtes périodes de stress hydrique durant la croissance des plantes, pouvant induire une plus ou moins forte réduction du rendement selon le stade de développement des plantes. Ces facteurs de risque pour le développement du couvert végétal, qu'il soit naturel ou cultivé, touchent potentiellement toutes les régions du Cameroun, mais les conséquences sont plus dommageables dans la partie septentrionale, par ailleurs, la plus pauvre du Cameroun, tant du point de vue économique (rapport DCSN, 2002) que pluviométrique.

Dans ce contexte de crise foncière permanente où l'autosuffisance alimentaire est toujours d'actualité, il convient d'étudier la sensibilité de la végétation aux variations intra-saisonnières des précipitations afin de déceler les particularités de chaque région, pour une meilleure prévision. C'est l'objet de l'article ci-dessous : « Variabilité intrasaisonnière des précipitations et de leur distribution : impacts sur le développement du couvert végétal dans le Nord du Cameroun (1982-2002) » - en cours de publication par la revue *sècheresse*. .

III-1-2. Résumé détaillé de l'article.

L'article traite de l'impact des variations intra-saisonnières des précipitations sur le développement du couvert végétal dans le Nord-Cameroun sur la période 1982-2002, à

partir des données ponctuelles de 20 stations inégalement réparties dans la zone d'étude, ainsi que des cartes bimensuelles de NDVI à 8Km de résolution.

On étudie d'abord les caractéristiques de la pluviométrie dans la région d'étude, partitionnée en deux domaines pluviométriques, en fonction de la longueur et de l'intensité de la saison des pluies (voir figures 2 et 3) et selon l'influence « continentale » et « océanique »: il s'agit du domaine sahélien, grossièrement au nord du 9°N, où la saison des pluies (avec P mensuel $\geq 50\text{mm}$) s'échelonne de mai à septembre, et du domaine soudanien (sud de 9°N) où la saison des pluies couvre la période avril-octobre.

A l'échelle saisonnière, les anomalies de pluies montrent dans l'ensemble, les mêmes signaux que ceux observés à l'échelle continentale sur l'Afrique de l'Ouest, c'est-à-dire, une tendance déficitaire au cours de la décennie 80s et une tendance à la reprise pluviométrique à partir de la fin de la décennie 90s. Entre ces deux périodes, on relève un déficit 64mm en domaine soudanien et de 116mm en domaine sahélien.

La question qui se pose alors est de savoir si ces anomalies saisonnières sont plutôt dues à la variabilité des jours à forte ($P > 40\text{mm}$), au bruit de fond résultant des pluies plus faibles ($P = [1 - 40\text{mm}]$) ou encore à une variation du nombre de jours secs, le seuil 40 mm étant dépassé dans 20% des jours de pluies ?

Il ressort que la variation des cumuls entre période anormalement sèche (exemple de la décennie 80s) et période plus arrosée (décennie 90s) est de l'ordre de 13% en domaine sahélien et de 7% en domaine soudanien. Il existe aussi des différences significatives sur le pic saisonnier. Mais le contraste entre années anormalement pluvieuses et sèches relève, sur la période 1982-2002, d'abord d'une variation du nombre de jours pluvieux et secondairement seulement d'une variation des cumuls moyens au cœur de la saison des pluies.

Le principal objectif de l'article est d'analyser l'impact des modulations intra-saisonnières sur le développement du couvert végétal, donc au début de la période végétative, c'est-à-dire au cours des deux premiers mois (61 jours), qui s'avèrent être les plus critiques. Il ressort qu'en domaine sahélien, 14 jours sur 61 de cette période critique présentent un cumul journalier compris entre 1 et 40mm, contre environ 3 jours avec un cumul $> 40\text{mm}$. Par ailleurs, la différence entre années exceptionnellement humides et sèches s'expliquent par une variation du nombre de jours les plus arrosés ($P > 40\text{mm}$) au cœur de la saison des pluies. Les mêmes tendances s'observent en domaine soudanien, avec toutefois des variations plus faibles.

Les séquences sèches ont été définies pour la région sahélienne (soudanienne) comme une période d'au moins deux jours consécutifs sans pluies observées ($P < 1\text{mm}$) entre le 1^{er} mai et le 30 septembre (le 1^{er} avril et le 31 octobre) et sur la période 1982-2002. On compte 12 à 20 séquences sèches ≤ 4 jours au sein de la saison des pluies contre une dizaine de 5 à 10 jours. Les séquences sèches supérieures sont rares (pas plus de 4) et ne se rencontrent qu'au cours de certaines années et en fin de saison. En fait les

séquences > 5 jours représentent environ 30% des occurrences. Le nombre et la longueur des séquences sèches expliquent une part importante de la variabilité pluviométrique.

Les relations précipitations – NDVI ont été regardées à l'échelle fine après projection de 20 points de précipitations au sol sur des cartes moyennes du NDVI saisonnier et considération de la moyenne du NDVI sur un rayon de 2 pixels autour de chaque point. Les corrélations en phase et déphasées sont calculées sur les cycles annuels de ces deux paramètres sur un transect nord/sud. Les résultats attestent de variations synchrones aux latitudes soudaniennes et décalées d'environ un mois (deux quinzaines) en domaine Sahélien.

Enfin, il s'est agit d'évaluer l'impact des séquences > 5 jours sur le NDVI en début de période végétative, la plus déterminante du cycle pour savoir si les anomalies de NDVI de cette période étaient associées au nombre de telles séquences sèches. Ce seuil s'appuie sur l'hypothèse qu'une interruption des pluies de durée ≤ 5 jours n'a pas d'impact significatif sur le cycle végétatif, même en début de période. On prend en compte 61 jours continus, afin de supprimer les biais induits par le chevauchement des séquences sèches entre deux mois consécutifs. Conformément aux résultats de l'analyse précédente, les corrélations entre les deux paramètres sont calculées en synchrone en domaine soudanien (pluie et NDVI d'avril-mai) et avec un décalage du NDVI de deux quinzaines en domaine sahélien (pluies de mai-juin et NDVI de juin-juillet). Les résultats montrent des corrélations significatives en domaine sahélien, traduisant une baisse (augmentation) de l'indice de végétation en cas de recrudescence (baisse) du nombre de séquences sèches ≥ 5 jours. En revanche, les corrélations sont plus faibles en domaine soudanien, en raison sans doute du nombre plus réduit des séquences sèches > 5 jours dans cette région et de la moindre sensibilité de la végétation à l'occurrence de telles séquences en début de cycle (voir figure 5).

IV. LES FACTEURS DE VARIABILITE ET D'EVOLUTION DU COUVERT VEGETAL AU CAMEROUN

Cette section évalue le rôle de quelques éléments climatiques et anthropiques sur l'évolution du couvert végétal au Cameroun, et de façon plus marquée dans la région septentrionale du pays. Elle est subdivisée en deux parties :

La première est consacrée au résumé d'un article accepté par la revue International Journal of Remote Sensing (IJRS) intitulé « Déterminants climatique et démographique du couvert végétal dans le nord-Cameroun » et en cours d'édition. Cet article traite de l'impact des précipitations et des conséquences de la démographie sur la modification du

couvert végétal du Nord-Cameroun. Il reprend quelques points méthodologiques, et présente les principaux résultats.

La deuxième partie évalue l'impact des différents types d'occupation du sol sur le couvert végétal du Cameroun, aux échelles annuelles et interannuelles, et à partir d'indices de végétation multisources et multidates.

IV-1. Problématique, contexte, résumé et texte intégral de l'article

IV-1.1. Problématique et contexte

Aux latitudes intertropicales, les variations spatiotemporelles du couvert végétal sont très souvent associées au climat en raison de l'importance première que prennent ici les échanges énergétiques entre surface terrestre et basses couches de la troposphère, régulés par les interactions sol-végétation-atmosphère. La recherche en ces matières a donc priorisé l'analyse des transferts radiatifs, d'humidité et de chaleur qui contribuent à établir l'état d'équilibre biologique et climatique d'un système végétal (Monteny *et al* 1986). L'étude des rapports entre le climat (ou les paléoclimats) et la végétation fait référence à la sensibilité de l'un ou l'autre, face aux actions et rétroactions qu'ils entretiennent fonctionnellement, telles que la nature et les propriétés des masses d'air, la nature des horizons superficiels, l'albédo, les flux de chaleur et d'eau — dont l'évaporation —, le ruissellement de surface, la rugosité, la composition de l'atmosphère, *etc.*

Toutefois, les premiers travaux se sont naturellement concentrés sur la variable *précipitation* puisque les grands territoires phytogéographiques d'Afrique tropicale sont régis par la pluviosité, et la végétation est donc étroitement liée aux conditions climatiques actuelles (Schnell, 1976). En d'autres termes, l'eau (*via* la pluie) est la principale contrainte de la plante, tant pour sa distribution géographique que pour le cycle saisonnier (Hulme *et al* 1993).

Les relations pluie - végétation ont déjà fait l'objet de diverses études, notamment en Afrique sahélienne (Davenport *et al.*, 1993 ; Prince *et al.*, 1998 ; Tucker *et al.*, 1999 ; Eklundh *et al.*, 2003 ; (Herrmann *et al.*, 2005 ; Martiny *et al.*, 2005 ; Olson *et al.*, 2005 ; Camberlin *et al.*, 2007), orientale (Nicholson *et al.*, 1990), australe (Richard *et al.*, 1998 ; Wesels *et al.*, 2007), et dans une moindre mesure, en Afrique centrale (Bigot, 1997). Cependant, ces études, menées très souvent à grande échelle spatiale (régionale, continentale, etc.), débouchent sur des conclusions assez générales ou trop lissées pour permettre des applications à l'échelle des hommes et de leurs activités. Par ailleurs, à ces latitudes faiblement industrialisées, les populations vivent essentiellement d'activités agricoles et pastorales, qui concourent à modifier considérablement le couvert végétal.

Au Cameroun, l'urbanisation est le phénomène le plus marquant touchant les populations, d'après les résultats du dernier recensement général de la population et de l'habitat (RGPH), publiés en 2010, puisque de 1987 à 2005, le taux d'urbanisation au Cameroun est passé de 38 % à 49 %, alors qu'il était seulement de 28 % en 1976, et que les projections montrent que la population urbaine sera d'environ 68 % en 2020. Ici, la notion de ville se rapporte à « un critère administratif qui renvoie à un mode de vie, à une architecture particulière et à la présence d'unités de production économique qui confèrent à sa population active, de nombreuses opportunités d'exercice d'une activité professionnelle dans les secteurs tertiaire et/ou secondaire » (BUCREP, 2010). Au-delà du facteur économique, se greffe également la volonté de s'instruire (surtout pour les post bacheliers) ou simplement celle du prestige (attraction urbaine). Ces principaux facteurs entraînent un rush rapide de la population des campagnes vers les villes, connu sous le nom d'exode rural (Barbier *et al.*, 1981-1982). Compte tenu des faibles capacités socio-économiques d'accueil des nouveaux arrivants, les périphéries des villes se transforment rapidement en zones d'habitation (Assako-Assako, 1997). Celles-ci sont d'autant plus consommatrices d'espace que les constructions se font plus en largeur qu'en hauteur. De ce fait, le morcèlement accéléré et anarchique qui s'ensuit a un impact visible et rapide sur la dégradation du couvert végétal et mérite également d'être pris en compte. Par exemple, travaillant sur les données de satellite multisources (Landsat, MSS), Sietchiping (2003) a montré que l'extension de la ville de Yaoundé a augmenté de plus de 8 % entre 1973 et 1988, comme le montre la figure V-11.

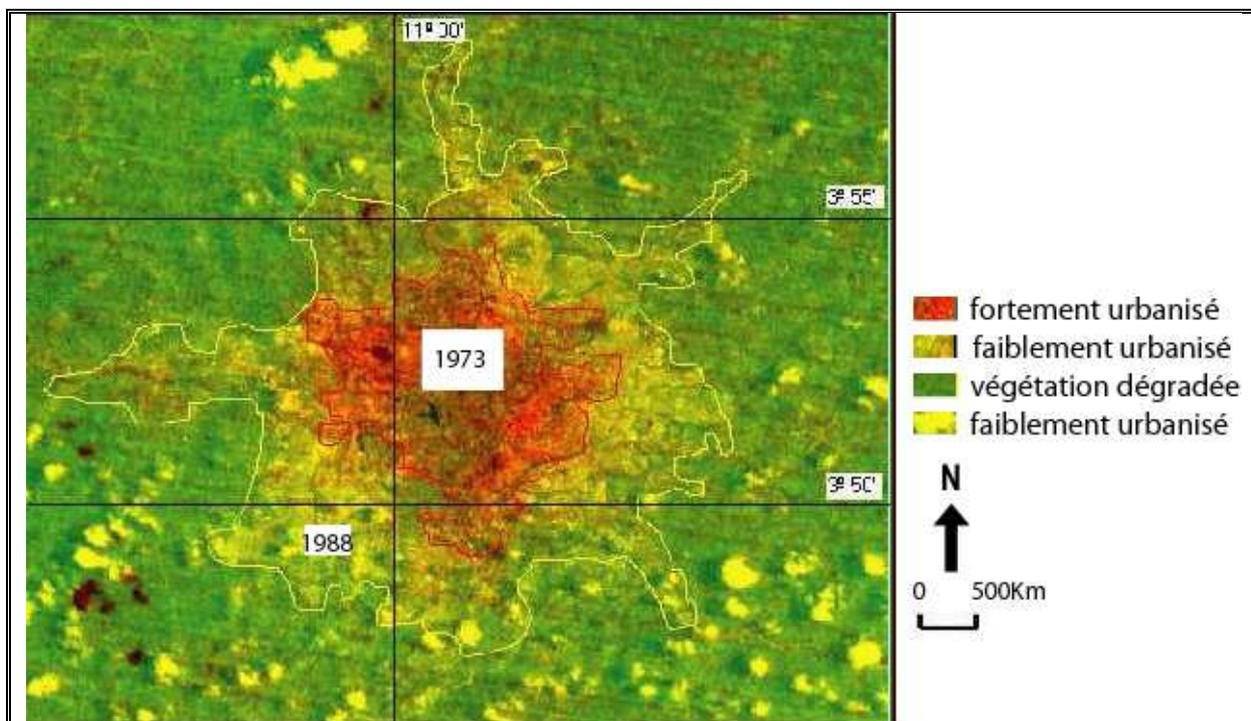


Figure V-11 : Périmètres urbains de Yaoundé en 1973 et 1988 (Sietchiping, 2003)

Enfin et surtout, la déforestation est sans doute le fléau qui a le plus d'impact sur l'évolution du couvert végétal. Elle intéresse d'abord la partie méridionale du pays qui est à dominante forestière, mais aussi les zones de savane et de transition, et peut être d'origine agricole, pastorale ou liée à l'exploitation du bois de chauffe et à l'exploitation industrielle (Bessat, 1996). Pour cette dernière, l'ouverture de pistes d'exploitation constituant les axes de pénétration au sein de la forêt représentent un facteur important de pression sur le milieu forestier, ceci même dans le cadre d'une exploitation réglementée dans les concessions forestières (Mayaux *et al.*, 2003).

Les facteurs qui concourent à la mise en place et à la répartition spatiotemporelle de la végétation sont maintenant présentés. Il ne s'agit pas d'une recherche complètement novatrice, puisque plusieurs travaux ont exploré la question, mais la plupart d'entre elles se sont limitées au paramètre précipitation. La particularité de la présente étude est double : elle est menée à une échelle qui permet de suivre les changements à la taille du pixel (8 km ; 1 km) ; elle intègre des facteurs anthropogéniques qui, jusqu'ici, étaient des paramètres très difficiles à prendre en compte.

Le domaine de l'étude est limité au Nord-Cameroun (6°N-13°N ; 11°E-16°E) en raison de la plus grande dépendance climatique de la végétation de cette région par rapport à celle prévalant aux latitudes méridionales où elle répond essentiellement à des dynamiques d'ordre anthropique (Peltier *et al.*, 1993).

On présente ci-dessous le résumé étendu de l'article en cours de gestion éditoriale à la revue International Journal of Remote Sensing (IJRS) qui définit et teste une méthode originale de détection des changements du couvert végétal dans le Nord-Cameroun à partir du NDVI-AVHRR (8 km) sur la période 1987-2002.

IV-1-2. Résumé détaillé de l'article

L'étude se focalise sur la partie septentrionale du Cameroun située entre 6°N et 13°N et entre 11°E et 16°E, et plus précisément dans les chefs-lieux des soixante-dix-neuf unités administratives (provinces, départements arrondissements et districts) que compte la région (Fig. 1A). Le choix de la période d'étude (1987-2002) est justifié par le fait que la recherche voulait s'affranchir des années de sécheresse de 1983-1984, et qu'un décalage de deux ans supplémentaires s'avère suffisant pour ne pas prendre en compte l'effet mémoire (Martiny *et al.*, 2006). Les objectifs spécifiques de l'étude visent à évaluer d'une part les impacts spatiotemporels des pluies saisonnières et, d'autre part, de la croissance de la population urbaine sur les variations du couvert végétal. Ceci est fait au travers d'une régression multiple avec pour variable expliquée la couverture végétale, et pour variables explicatives les précipitations et la croissance démographique urbaine.

La base de données de NDVI du GIMMS (8 km de résolution) est utilisée pour étudier l'impact des précipitations sur la végétation durant la période 1987-2002.

Toutefois, la comparaison de ces deux paramètres n'est possible que s'ils sont à la même résolution spatiale. Pour ce faire, les quarante-huit points de précipitations sont interpolés suivant la méthode de krigeage, à une résolution de huit kilomètres, conformément aux données de NDVI (Fig. 7). Si la configuration du nuage de points entre les deux paramètres est attendue (Fig. 8), les corrélations pluies/NDVI permettent de dégager les degrés de sensibilité de la végétation dans les différents domaines bioclimatiques du Nord-Cameroun, c'est-à-dire d'établir la limite physique à laquelle l'évolution de la végétation devient « statistiquement indépendante » des précipitations.

Sachant qu'une résolution de huit kilomètres est trop grossière pour appréhender l'impact des facteurs anthropogéniques sur le couvert végétal, c'est la base de données du NDVI à une kilomètre de résolution (SPOT-VEGETATION) qui est mise à contribution. Compte tenu de sa faible profondeur temporelle, la relation NDVI/croissance démographique est menée sur la période 1999-2008 (dix ans). Cette recherche est focalisée en milieu urbain car il est question d'étudier l'impact de la démographie urbaine sur l'évolution du couvert en s'appuyant sur l'hypothèse suivante : « *lorsque la croissance de la population urbaine est recrudescente (régressive), elle tend à multiplier les actions susceptibles sinon de dégrader (d'amplifier) le couvert végétal, du moins d'entraver (favoriser) sa reconstitution dans les centres urbains et leurs périphéries : une dizaine d'années est suffisante pour percevoir ces changements* » (Fig. V-11). L'impact de l'urbanisation sur le couvert végétal est démontré en comparant le NDVI en milieu urbain et non urbain (voir figure 9). Pour ce faire, l'extraction des données de NDVI dans les chefs-lieux des soixante-dix-neuf unités administratives utilise les méthodes de télédétection dans une chaîne de traitement important. Un métafichier de moyennes annuelles du NDVI est créé à partir des cartes décennales de NDVI, puis les coordonnées des villes sont vectorisées à partir d'un SIG, puis projetées sur le champ de NDVI créé précédemment. Le nombre de pixels extraits par ville est proportionnel à la taille de la population de chaque ville, soit environ neuf pixels (81 km²) pour la ville de Garoua et seulement deux pixels (4 km²) pour celle de Hina. Afin d'extraire le NDVI des zones extra-urbaines, un masque est ensuite appliqué sur les zones urbaines créées précédemment. Enfin, l'on extrait la moyenne du NDVI de la région adjacente à ce masque dans un rayon d'environ huit kilomètres pour représenter le NDVI extra-urbain (ou rural).

La relation pluies/NDVI en milieu extra-urbain montre de bonnes corrélations qui évoluent dans le même sens jusqu'à l'isohyète 1 200 mm. Au-delà, la valeur du NDVI reste constante malgré la recrudescence des pluies (voir figure 9B). Ce résultat montre qu'en milieu rural, ce sont les précipitations qui régissent prioritairement le cycle interannuel du NDVI. En revanche, la relation pluies/NDVI en milieu urbain montre deux tendances : (i) un nuage de points regroupés autour de la valeur 0,3 qui témoigne de l'importance du signal urbain par rapport à celui des pluies ; (ii) au-delà de cette valeur,

les points semblent mieux organisés autour de la droite de régression. En fait, ce deuxième signal regroupe les villes les moins peuplées et donc celles où le signal urbain n'est pas aussi important que celui des précipitations. En d'autres termes, plus (moins) une ville est importante du point de vue de la démographie et plus (moins) le signal urbain est dominant, donc susceptible de réduire (d'augmenter) la valeur de l'indice de végétation.

L'impact du signal urbain renvoie à une relation NDVI/ démographie urbaine qui se traduit dans l'ensemble par :

- des corrélations significatives dans les villes moyennement peuplées (8 000 à 30 000 habitants), ainsi que dans celles où la population urbaine a augmenté de plus de 30 % en dix ans (1999-2008). Dans ces deux cas, les deux paramètres évoluent en sens opposé, puisque la croissance de la population entraîne une baisse de NDVI, traduisant ainsi la recrudescence des actions en faveur du recul de la végétation. Cette situation intéresse la plupart des villes situées au nord de 9°N ;

- de faibles corrélations dans les villes les plus peuplées (Maroua, Garoua, Ngaoundéré), en raison du fort signal urbain qui se traduit par la constance de la valeur du NDVI autour de la valeur de 0,3, malgré la recrudescence des pluies ;

- un faible signal urbain dans les villes les moins peuplées puisque, dans cette logique, la variation du couvert végétal est surtout modulée par les précipitations et/ou des facteurs liés à l'occupation et à l'utilisation du sol.

Spatialement, il ressort que le couvert végétal de la province de l'extrême-nord (nord de 10°N) est le plus sensible à la variation saisonnière des précipitations. C'est également dans cette région que l'impact du signal urbain sur la végétation est le plus fort, puisque la plupart des villes sont très peuplées (Maroua, Mora, Mokolo, etc.). Les fortes corrélations se situent (i) dans les villes à croissance rapide (> 30 % en dix ans), comme Kolofata, Taibong, Guidiguis, et (ii) dans les villes les moins peuplées ou à dominante rurale comme Logone/Birni, Mindif ou Hile-Alifa, où la population urbaine a même régressé au cours de la période considérée.

Entre 8°N et 10°N, l'évolution du couvert est également influencée par la pluviométrie, bien que les corrélations entre les deux paramètres soient plus faibles que dans le domaine précédent. Dans les villes, les corrélations NDVI/ démographie sont presque toutes significatives au test de Monte-Carlo (95 %), à l'exception de la ville de Garoua.

Au sud de 8°N, la dépendance pluviométrique de la végétation reste faible, mais la plupart des chefs-lieux d'unités administratives présentent des corrélations significatives, à l'exception de Ngaoundéré et Banyo en raison de leur forte densité urbaine. Dans cette

région, on relève également plusieurs villes où la population a régressé, telles Mbé, Meiganga et Mayo-Darlé.

L'article montre donc que la connaissance des facteurs d'évolution du couvert végétal ne peut être dissociée de la composante anthropique. Il permet aussi de quantifier l'impact du signal urbain sur les valeurs de NDVI aux échelles spatiales fines. Toutefois, bien que important, l'effet urbain n'est pas unique : les autres facteurs potentiels seront étudiés dans la dernière partie de ce chapitre.

V-EVOLUTION DU COUVERT VEGETAL DANS LE NORD-CAMEROUN

On regarde ici l'évolution de quelques types d'occupation du sol au Cameroun sur une période de dix ans, à partir du NDVI-VEGETATION (1km). La synthèse de ces travaux permet de mieux comprendre l'évolution spatiotemporelle du couvert végétal au Cameroun en général.

V-1. Étude de la différence pixel à pixel des images

L'objectif de cet exercice est de mener une étude diachronique afin de détecter, spatialement, les changements qui affectent les grands types de couvert végétal du Nord-Cameroun entre 1987 et 2002. L'analyse se fait à l'échelle de la saison des pluies qui s'étend au nord de 10°N entre mai et septembre, et entre avril et octobre au sud de cette latitude. Pour ce faire, l'on constitue deux échantillons comprenant les cinq années les plus récentes (1998-2002) et les cinq années les plus anciennes (1987-1991) de la période. La prise en compte de ces sous-périodes plutôt que des deux années extrêmes (1987 et 2002) permet de réduire la sensibilité des résultats aux années extrêmes et donc de conserver un signal tendanciel robuste. C'est la même raison qui motive la prise en compte des médianes de chaque sous-période de cinq ans plutôt que des valeurs moyennes.

La détection des changements est faite à partir de la différence pixel-à-pixel entre image finale et l'image initiale, soit deux mille cinq cent vingt-neuf pixels par sous-période. RAPPELONS QUE, POUR obtenir de meilleurs résultats dans ce type d'exercice, l'on suppose que les deux images pour lesquelles l'on cherche à détecter les changements obéissent aux mêmes conditions de prise de vue (atmosphériques, inclinaison solaire, dérive orbitale, etc.). Partant de là, ces images ont subi les mêmes prétraitements (filtrage, classification, post-classification, etc.).

En effet, avec un logiciel de télédétection (ENVII 4.3), on utilise les mêmes paramètres de classification (*Isodata*) pour les cartes de NDVI de départ (médiane 1987-1991) et d'arrivée (1998-2002). L'objectif est d'avoir un aperçu global de la variation des principaux types de couvert ; le nombre maximal de classes est fixé à cinq. Les deux

cartes sont ensuite comparées visuellement afin de faire correspondre les vecteurs représentant chaque type de végétation. Des procédés post-classificatoires permettent d'évaluer la qualité des classifications. Le coefficient de Kappa est de 0,82, avec 89,31 % de précision globale, chiffres qui témoignent d'une bonne qualité des classifications. Le Tableau V-5 résume la matrice de confusion des classifications entre les deux sous-périodes. D'après la légende du GLC200 (voir figure I-3), chaque classe peut être associée à un type d'occupation du sol, soit : la zone d'agriculture dense (>50 % ; classe 1) ; la mosaïque agriculture/végétation sèche (classe 2) ; la région de savane arborée à arbustives décidues (classe 3) ; la savane boisée décidue (classe 4) et la mosaïque forêt/savane (classe 5), assurant la transition entre couvert soudano-sahélien du nord et forestiers du sud : nous y reviendrons dans la section suivante.

Tableau V-5: Matrice de confusion de la classification : les 5 classes sont issues de la classification du NDVI (voir figure V-12) et définitions ci-dessus.

Class	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5	Total
Class 1	276	24	0	0	0	300
Class 2	61	284	65	5	0	415
Class 3	1	74	248	232	18	573
Class 4	0	13	121	354	199	687
Class 5	0	0	27	179	348	554
Total	338	395	461	770	565	2529

Il apparaît que ce sont les classes 3, 4 et 5 qui sont celles qui ont subi les plus grands changements au cours de la période d'étude, de l'ordre de 46 %, 54 % et 38 %, respectivement, contre moins de 30 % pour les classes 1 et 2. Ces changements traduisent des conquêtes et/ou des pertes d'un type de couvert par rapport à un autre ou, plus concrètement, des augmentations ou diminutions d'intensité photosynthétique dues aux variations de la pluviométrie ou à des facteurs liés à l'occupation et à l'utilisation du sol. En d'autres termes, un couvert arboré peut devenir arbustif ou inversement.

La figure V-12 présente un aperçu spatial des changements au cours des deux sous-périodes, les moyennes saisonnières de chaque classe, ainsi qu'un décompte de pixels entre les stades initiaux et finaux (Fig. V-12A, 2B).

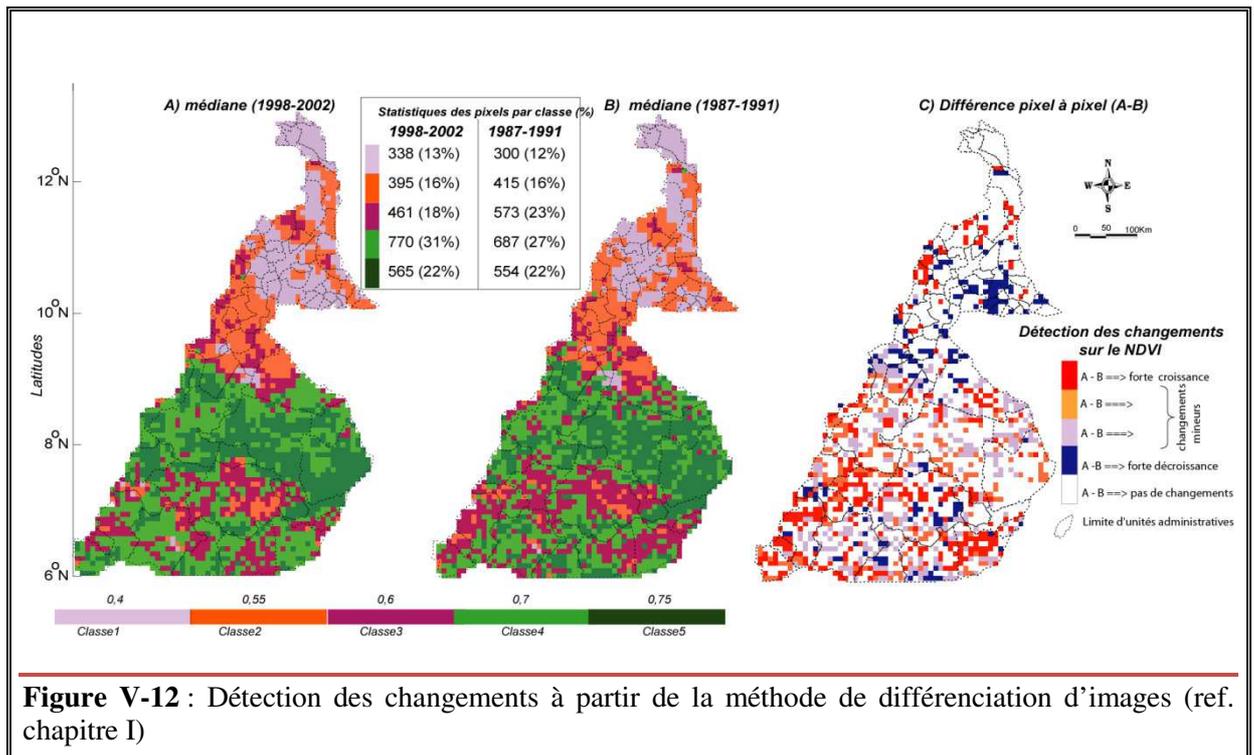


Figure V-12 : Détection des changements à partir de la méthode de différenciation d'images (ref. chapitre I)

Les différences entre les classes témoignent de l'intensité photosynthétique, traduisant la proportion de production nette primaire de chaque classe. Pour chaque pixel (i), la différence (D) entre les deux sous-périodes ($P1$ et $P2$) est calculée ainsi :

$$D = (i_{P2} - i_{P1}) / i_{P2} \times 100$$

Visuellement, il apparaît qu'en seize ans, la classe 1 a gagné du terrain vers le sud du pays, alors que la classe 2 a faiblement empiété sur la classe 3 au centre-sud de la région d'étude. C'est la classe 3 qui enregistre le plus important déficit (5 %) entre les deux périodes, avec une recrudescence à l'est de la partie septentrionale. Les pixels représentant la classe 4 se sont accrus de 4 % entre les deux périodes, et très faiblement dans la classe 5.

La carte de différence (Fig. V-12C) renseigne mieux sur les tendances du NDVI au cours de la période. Les résultats sur les deux mille cinq cent vingt-neuf pixels varient entre 77 % et 0,003 % et sont partitionnés en cinq classes, partant du postulat que les résultats supérieurs à 50 % témoignent soit d'une recrudescence (en rouge) ou d'une dégradation (en bleu) significative du NDVI ; les résultats compris entre 20% et 50% témoignent d'une faible hausse (orangé) et d'une faible baisse (grisé) du NDVI ; et, enfin, des pixels où la valeur du NDVI n'a presque pas changé (< 20 %) au cours des deux sous-périodes ne sont pas coloriés (en blanc).

Dans la partie septentrionale, on relève un NDVI assez stable, mais en nette diminution au sud et à l'est, alors qu'on note quelques pixels excédentaires à l'ouest. Il y a

donc une reconversion dans l'occupation et/ou l'utilisation associée à la régression du couvert végétal vers l'est, et le phénomène inverse vers l'ouest.

Entre 8°N et 9°N, les différences du NDVI sont plus faibles, témoignant des modifications mineures de la couverture végétale au cours de la période.

Dans la partie méridionale, cohabitent en proportion quasi égale les cinq classes de différences, traduisant sans doute une faible spatialisation de l'évolution du couvert dans la région : pixels déficitaires à l'ouest et dans le centre ; pixels excédentaires à l'est ainsi qu'à l'ouest, alors que la partie centrale présente de faibles différences. De plus, il apparaît que la zone de transition entre couverts sahélien et soudanien enregistre une diminution du NDVI, alors que la zone mosaïque entre couverts soudanien et guinéen est essentiellement excédentaire (différences positives ; figure IV-2C).

Ces constats peuvent-ils à la fois témoigner d'un glissement vers le sud des couverts sahéliens et d'une avancée des formations guinéennes vers le nord en dépit de la résolution à 8Km des pixels et des limites inhérentes aux dérives orbitales pouvant biaiser la comparaison pixel-à-pixel entre nos 2 sous-périodes ? C'est cette limite qui justifie la prise en compte des données NDVI-SPOT à 1Km de résolution qui, malgré leur faible profondeur temporelle, peuvent mieux nous renseigner sur les tendances de l'occupation du sol au cours des 10 dernières années.

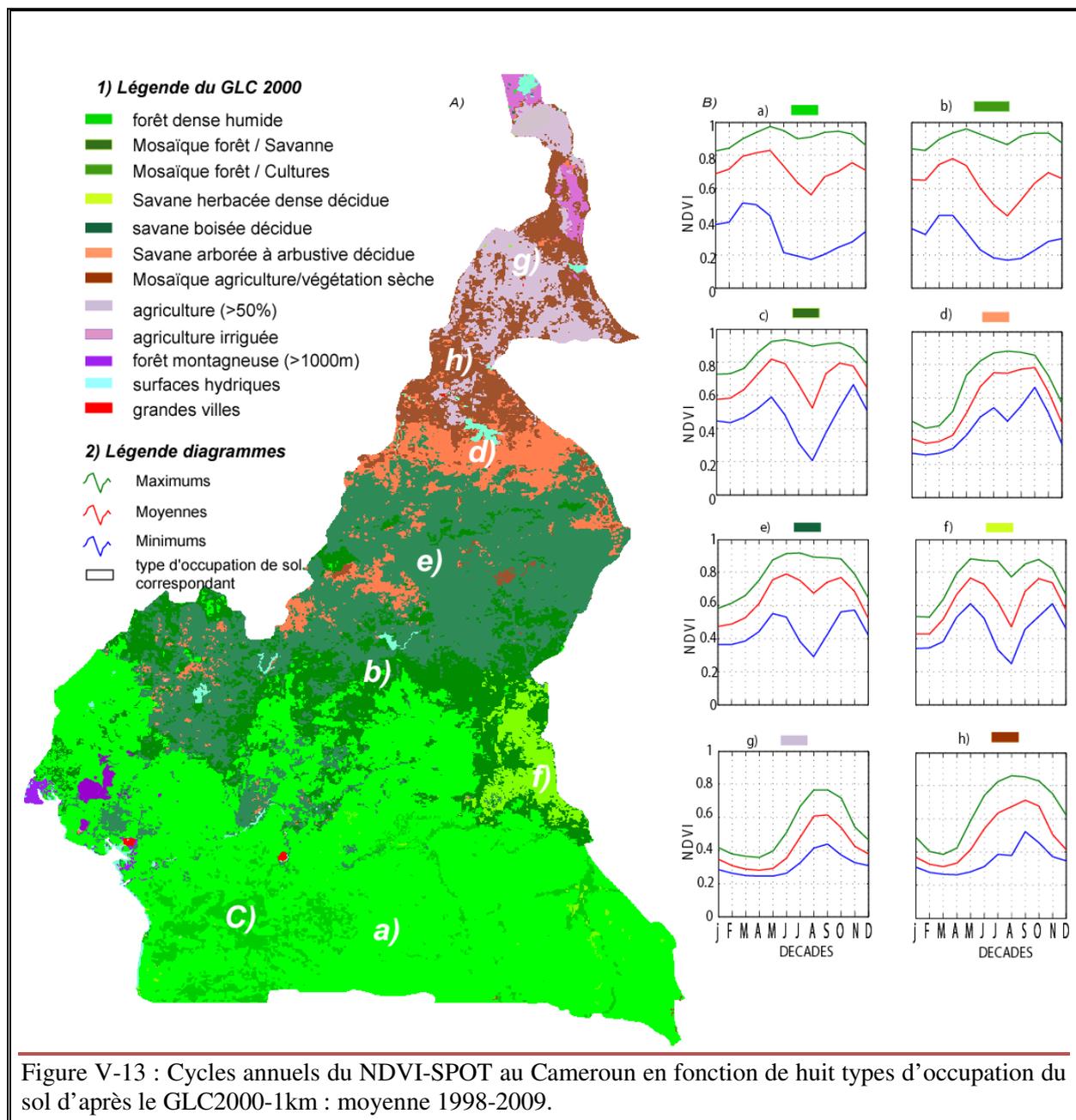
V-2. Les types d'occupation du sol d'après le GLC2000 et leur évolution spatiotemporelle au Cameroun à partir du NDVI-SPOT

Le mode d'occupation et d'utilisation des sols influence relativement la biomasse végétale. Par exemple, l'élevage (bovin) et l'agriculture n'ont pas le même impact sur le couvert végétal, de même qu'une agriculture sur brûlis, ou intensive, par rapport à une agriculture durable. L'identification des principaux types d'occupation du sol au Cameroun est faite à travers l'utilisation concomitante des données de NDVI-SPOT, et d'occupation du sol du Global Land Cover (GLC 2000 ; voir chapitre 1), toutes les deux à un kilomètre de résolution. Pour ce faire, les données du GLC2000 ont été calées (géo-référencées) sur la fenêtre du Cameroun, puis les types d'occupation du sol ont été vectorisés et projetés sur les cartes moyennes annuelles du NDVI, sachant que chaque vecteur correspond à un type d'occupation du sol. Cet exercice a permis de retenir douze thèmes (classes) pour le Cameroun.

V-2.1. Les cycles annuels des types d'occupation du sol

La figure V-13 est une représentation spatiale des types d'occupation du sol d'après le GL2000, ainsi que les cycles moyens annuels de quelques-uns d'entre eux entre

1998 et 2008. Il en ressort qu'au Cameroun, l'occupation du sol est essentiellement liée à l'agriculture, souvent irriguée au nord, alors qu'elle s'incruste davantage au sein de la végétation naturelle au sud, formant avec elle des zones de mosaïque (Fig. V-13A). Des zones de mosaïques marquent aussi la transition entre les grandes formations végétales. À cette résolution, l'on peut percevoir quelques villes importantes par leur superficie, notamment Yaoundé et Douala, et dans une moindre mesure, Garoua, Maroua, Mora et Bafoussam, ainsi que plusieurs cours d'eau, notamment dans la région de l'Adamaoua, ainsi que les lacs de Lagdo et de Maga localisés respectivement dans les provinces du nord et de l'extrême-nord du pays.



L'analyse des cycles moyens annuels de huit types d'occupation du sol associés à la végétation présentent des profils quasi similaires à ceux issues de la classification du NDVI (voir figures V-6), ce qui traduit la relation entre les modes d'occupation et d'utilisation du sol, et la répartition bioclimatique de la végétation (Fig. V-13B). Les minima et maxima permettent d'évaluer la dispersion des pixels de NDVI par vecteur. Rappelons que dans les régions sahéliennes et subdésertiques, le NDVI maximal peut être utilisé comme un indicateur de la production nette primaire (PNP ; différence entre l'énergie photosynthétique acquise et utilisée par la plante). En d'autres termes, le pic de croissance de la végétation est calé sur le maximum de NDVI, et la date d'occurrence de ce pic est très utile pour la gestion de la transhumance (Crépeau *et al.*, 2003).

De plus, le ratio entre maxima de NDVI et précipitations permet d'évaluer l'efficacité des pluies (RUE), qui est aussi considéré comme un indice de sécheresse. Les minima de NDVI, quant à eux, peuvent permettre de déterminer les dates de sénescence qui sont indirectement associées aux disponibilités fourragères. Dans les zones d'agriculture dominante (>50 %, figure V-13 Bg) et de mosaïque agriculture/végétation sèche (Fig. V-13 Bh), les cycles annuels se distinguent par leur profil strictement unimodal (en cône), et leurs valeurs extrêmes (maxima et minima) plus faibles. En effet, pour des plantes à cycle annuel, le début de la période végétative est matérialisé par une amorce de croissance du NDVI, soit respectivement aux mois de mai et d'avril dans les deux classes mentionnées : cette période regroupe les phases de développement de la plante, partant de la germination jusqu'à la croissance qui atteint son maximum entre juillet et août. La phase de maturation qui suit s'accompagne d'un flétrissement de la plante et donc d'un abaissement du NDVI. À la fin de l'année, la plante présente un indice de végétation de 0,4, mais cette valeur décroîtra progressivement à l'occasion de la grande saison sèche, pour se retrouver autour de 0,2 entre avril et mai (début de la période végétative).

C'est d'ailleurs l'occasion de signaler les différences sur les mois de démarrage de la saison végétative dans les domaines sahélien *stricto sensu* (Fig. V-13 Bg) et soudano-sahélien (Fig. V-13 Ba).

Les savanes arborées à arbustives décidue (Fig. V-13 Bd) présentent des caractéristiques quasi similaires que précédemment, mais le temps entre le maximum et l'amorce de la décroissance est plus important, témoignant d'un couvert moins purement ligneux et donc doté d'une plus grande capacité de rétention d'eau. Ce profil est représentatif des couverts assurant la transition entre domaines sahélien et soudanien.

Au sud, les principaux discriminants des types d'occupation du sol sont :

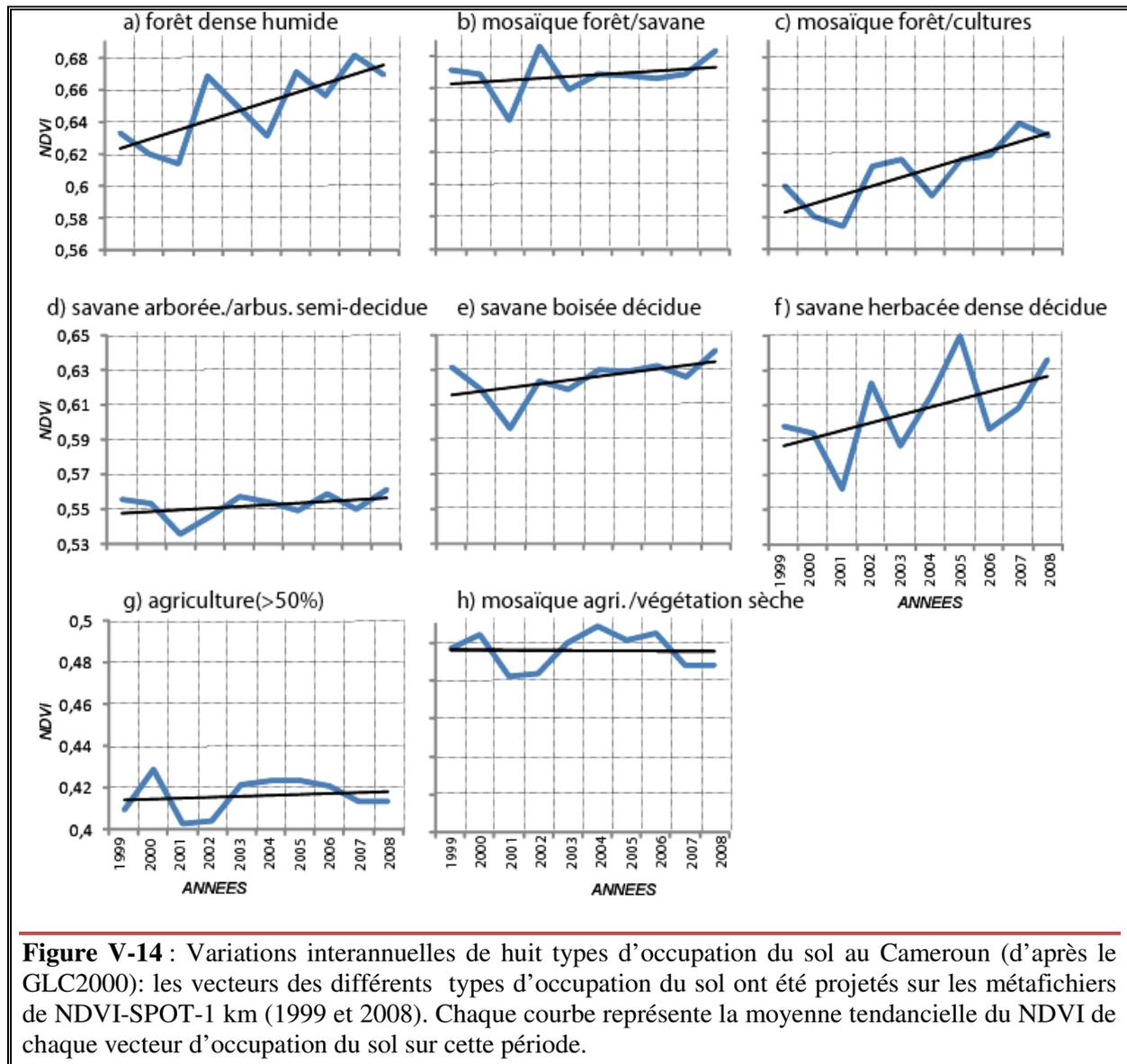
i) la caractéristique de la période juillet-août : cette particularité a déjà été signalée lors de l'analyse des classes de NDVI en figure V-6. La baisse de la valeur du NDVI semble moins marquée dans les domaines forestiers (Fig. V-13Ba) *stricto sensu* que dans

des formations décidues (Fig. V-13Be ; 3Bf) et les zones de mosaïques végétation/agriculture (Fig. V-12Bb ; 3Bc) : dans le premier cas, la PNP est assez importante pour compenser le déficit de la saison car, malgré une légère baisse du NDVI, sa valeur demeure autour de 0,6 ; dans les deux derniers cas, le couvert végétal est sensible à l'occurrence des sécheresses et la perte des feuilles (formations décidues) entraîne une baisse remarquable du NDVI. Par ailleurs, la culture des plantes annuelles accentue la baisse de l'indice en saison sèche, bien qu'elle soit pratiquée en milieu forestier. L'exemple le plus illustratif est la comparaison des cycles annuels de la forêt dense humide (Fig. V-13Ba) et celui de la mosaïque forêt/cultures (Fig. V-13Bc) ;

ii) l'amplitude des extrêmes (entre maxima et minima) : elle montre que la dispersion entre différents couverts tend à passer des formations forestières (0,7) aux couverts sahéliens ou anthropisés (~ 0,4).

V-2.2. Évolution temporelle des types d'occupation du sol au Cameroun

Les cycles interannuels du NDVI-SPOT des huit types d'occupation du sol identifiés ci-dessus, sont calculés sur la période 1999-2008 (Fig. V-14). Partant du fait que l'évolution spatiale d'un couvert à partir de produits de moyenne résolution (1-8 km) ne peut s'apprécier que sur la durée, l'analyse ne tient compte ici que des tendances de chaque type d'occupation du sol. Ainsi, on étudie les variations du NDVI dans chaque polygone d'occupation du sol sur les dix ans d'observations, en supposant que ceux-ci ne varient pas dans l'espace. Afin d'éliminer les biais d'échelle lors de l'analyse des tendances, les diagrammes de la figure V-13 sont classés selon l'importance de la production nette primaire : domaines forestiers (a, b, c) ; savaniques (d, e, f) et steppiques (g, h).



NB : Les variations interannuelles du NDVI peuvent apparaître a priori insignifiantes mais, dans un contexte où leurs valeurs maximales varient entre 0,5 et 0,68, un décalage du NDVI de 0,04 équivaut respectivement à une augmentation ou un déficit du NDVI de 6 % à 8 %, ce qui est considérable pour la courte période d'observation (dix ans).

L'analyse montre que les minima de toutes les classes d'occupation du sol sont observés en 2001, alors que celle-ci n'est pas essentiellement déficitaire du point de vue pluviométrique (voir indices pluviométriques de la figure III-12). Est-ce à dire que cette baisse est liée à un bug dans les mesures de NDVI ? Toujours est-il qu'il s'agit d'un phénomène d'ensemble, bien que les métadonnées ne signalent pas de particularités de mesure ou de traitement au cours de cette année. Ce constat démontre l'importance de la réalité terrain pour valider les résultats.

Deux tendances ressortent des couverts forestiers : une tendance nette à la hausse du NDVI dans les couverts de forêt dense et de mosaïques forêt/cultures (Fig. V-14a ; amplitude $>0,4$) ; une tendance moins marquée, voire une quasi-constance, dans les mosaïques forêt/savanes (Fig. V-14b). Ces résultats permettent d'émettre deux hypothèses :

i) une densification des couverts forestiers et une possible avancée — bien qu'assez faible (amplitude de 0,2 en dix ans) — des couverts forestiers sur les savanes, dans les zones de mosaïques forêt/savane. Ceci pose une question fondamentale : comment expliquer ces résultats dans un contexte de forte déforestation (environ 1 % par an au Cameroun contre 0,2 % par an pour les autres pays de la sous-région) ? On sait, en effet, que plusieurs thèses ont prôné une avancée significative de la savane sur la forêt au centre de laquelle l'homme était le principal instigateur (Aubréville, 1949 ; Myers, 1988). Ceci a d'ailleurs été vérifié par Monnier (1990) en Côte-d'Ivoire ; Schnell (1971) en Guinée ; Keay (1959) au Nigéria et Vennetier (1969) au Congo.

Pourtant, travaillant sur quelques sites tests du sud du Cameroun, Schwartz *et al* (1997) et Achoundong *et al.*, (1998) ont montré que les zones de transitions forêts/savanes sont des héritages paléoclimatiques. Aujourd'hui, ces régions bénéficient de conditions climatiques et édaphiques (Kamgang *et al.*, 2007 ; Youta, 1997) favorables (sols profonds, forte humidité, etc.), dans un contexte où la faible densité des populations (de 1 à 9 habitants/km²) associée à l'exode rural (essentiellement vers Yaoundé) de la population active minimise les risques de déforestation. De plus, ces auteurs signalent le rôle accélérateur de *Chromolaena odorata* (voir en particulier Ponn *et al*, 2007 et Dibong *et al.*, 2011) une plante qui envahit spontanément, après abandon, les parcelles de lisière et de savane cultivées, reconstitue la matière organique, recouvre efficacement les sols grâce à l'abondant feuillage qu'elle produit, élimine les graminées et favorise sous son couvert l'implantation d'espèces pionnières de la forêt en moins d'une dizaine d'années. La hausse du NDVI en couvert forestier (Fig. V-14a) serait-elle biaisée par la conquête de *Chromolaena odorata* malgré la forte déforestation ? Seul un zoom permettant la *descente d'échelles* avec des capteurs de plus haute résolution et des investigations de terrain permettront de répondre à cette question fondamentale ;

ii) Une probable recrudescence des activités agricoles en zones forestières : dans les agrosystèmes forestiers tropicaux, l'agriculture, très pratiquée en raison des terres fortement arables, sous-tend une forte croissance démographique, principal responsable de leur dégradation rapide (Diao Camara *et al.*, 2010). L'évolution des systèmes de cultures peut également expliquer les différences de pression anthropique à densité de population comparable. Ainsi, dans le Sud-Cameroun, les cultures sous forêt ont connu des extensions/abandons au gré de la conjoncture économique (Poicam *et al.*, 1999). Deux points sont à mentionner :

i) l'exode urbain des années 1987 à 1997 a fortement peuplé les campagnes suite à une crise économique ayant entraîné beaucoup de chômage urbain. Ceci a suscité une reconversion des nouveaux arrivants dans l'agriculture vivrière sans que les superficies s'accroissent pour autant, puisque celle-ci était pratiquée sur les terres jadis vouées à la culture du cacao et du café ;

ii) la forte demande des marchés — urbains locaux et étrangers — a entraîné une extension des surfaces culturales par défrichement de forêts denses pour des cultures qui ne sont plus seulement vouées à la consommation locale, mais à la commercialisation.

Dans les savanes herbacées dense décidues (Fig. V-14f), situées au nord-est du Sud-Cameroun, le NDVI est marqué par une tendance à la hausse (amplitude d'environ 0,04) au cours de la période, alors que les couverts arborés à arbustifs semi-décidues (Fig. V-14d) et boisés (Fig. V-14e) présentent une quasi-stabilité ($< 0,02$), ce qui témoigne sans doute de la constance des systèmes d'occupation et d'utilisation du sol. En effet, selon Boutrais (1984), les couverts végétaux aux latitudes de l'Adamaoua portent l'empreinte d'une occupation agricole ancienne beaucoup plus dense qu'aujourd'hui, les pâturages du siècle dernier étant plus abondants sous un couvert arbustif moins dense. Ces conditions se sont toutefois dégradées au fil des années, entraînant le départ des éleveurs, puis, après un court sursis, celui des cultivateurs (Boutrais, 1974), en vertu de la relation de réciprocité liant ces activités : grâce à l'élevage, les agriculteurs engraisent leurs champs avec la fumure animale et, en retour, ceux-ci apportent aux éleveurs une partie de leurs récoltes. Il est donc logique qu'après leur départ, les champs deviennent incultes et soient voués à l'abandon. Or, ce dépeuplement entraîne une baisse des superficies cultivées sous un couvert boisé suffisamment dense pour favoriser la propagation des glossines (mouche tsé-tsé dont le territoire est normalement limité dans la zone équatoriale), et donc difficilement exploitable pour l'agriculture.

Toutefois, il est important de noter que ce qui précède n'est qu'un aperçu très global des systèmes d'occupation du sol en domaine soudanien camerounais. Effet, ceux-ci sont entachés de processus anthropogéniques beaucoup plus subtils en raison de la cohabitation en ces lieux d'hommes différents par leurs cultures (les Musulmans sont très souvent éleveurs et les Chrétiens cultivateurs, alors que certaines tribus allient les deux activités), leurs perceptions de la question de l'environnement et de leurs processus propres d'occupation et d'utilisation du sol. Par exemple, les parcours transhumants qui se caractérisent par des piétinements du bétail sont également des facteurs non négligeables de modification du couvert végétal.

De ce qui précède, la quasi-stabilité des couverts des savanes arborées et boisées est la conséquence des systèmes d'occupation du sol, certes moins denses qu'en domaine sahélien, mais plus variées et donc plus difficiles à appréhender. Ceci rejoint les conclusions de l'article précédent où il est démontré qu'entre 9°N et 6°N, les variations de

la végétation (à travers le NDVI) ne sont associées que faiblement à la variabilité pluviométrique et démographique.

En revanche, ce n'est pas le cas en région de savane herbacée dense décidue (Fig.14f) où la variabilité du NDVI entre deux années consécutives peut dépasser 0,06, comme observé entre 2001 et 2002. Ce sont des couverts assez instables du point de vue de l'occupation du sol, mais ayant une grande capacité de reconstitution, sans doute en raison de leur situation à la lisière de la forêt dense humide.

Les latitudes plus septentrionales sont les domaines où l'agriculture occupe plus de 50 % des terres cultivables. D'après Letouzey (1985), deux grands ensembles de végétation cohabitent dans cette région : les prairies, saisonnièrement inondables, et les steppes à épineux. Ces dernières sont le domaine de cultures et de jachères très anthropisées. En effet, ces friches jouent le rôle de pâturages et sont le lieu de prélèvement du bois de chauffe et d'œuvre, le restant étant brûlé chaque année en saison sèche (Donfack, 1998). Ici, les valeurs interannuelles du NDVI restent au-dessous de 0,43, sans doute en raison de la forte densité de population (voir article ci-joint). Au cours de la période d'étude, la tendance est quasi constante malgré de faibles fluctuations interannuelles. Ces conditions bioclimatiques rudes sont toutefois atténuées par la remontée de la nappe phréatique en saison des pluies sur les sols hydromorphes situés à l'est de la région. D'après le GLC2000, ces sols marquent le domaine des mosaïques agriculture/végétation sèche et de végétation irriguée permettant de pallier les longues sécheresses ou d'alimenter les cultures de contre-saison (*Mouskouwari*) exigeantes en eau, notamment celle du coton (Bella-Medjo, 2008). Sous ces couverts, la valeur du NDVI demeure autour de 0,5, témoignant de conditions moins rudes.

Cette quasi-constance des systèmes d'occupation du sol au nord de 10°N est en adéquation avec les résultats de la section II, où l'analyse diachronique de la différence entre pixels a montré peu de changements dans l'extrême nord du pays. Ici, malgré la forte croissance démographique qui affecte le couvert dans certaines villes, les dynamiques d'occupation et d'utilisation, quoique denses, semblent assez stables dans le temps. Du point de vue spatial, on relève une nette dégradation vers l'est et une tendance à la densification du couvert végétal à l'ouest.

Toutefois, nous restons conscients qu'au-delà des paramètres testés dans ce chapitre — et qui nécessitent d'ailleurs d'être validés sur le terrain — la dynamique du couvert végétal au Cameroun est subtile, complexe et multifactorielle. Les poids respectifs des facteurs d'ordres économique, social, culturel, ethnique, conflictuel ou migratoire, ou encore de l'occurrence des sauterelles/criquets (comme ce fut le cas en 2004 dans le Sahel), ne peuvent être appréhendés qu'à l'échelle locale par des enquêtes de terrain spécifiques dépassant le cadre de ce travail.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Le but de ce chapitre était d'abord de présenter un état des lieux de la couverture végétale au Cameroun tout en suivant son évolution spatiotemporelle, à partir des données d'indices de végétation. C'était ensuite de présenter l'analyse des liens que la couverture végétale entretient avec la pluviométrie et les facteurs sociodémographiques tout en détectant les changements d'occupation du sol au travers du NDVI. Ce qui suit revient sur les aspects majeurs.

- **Evolution du NDVI entre 1982-2006**

La régionalisation par classification automatique a permis d'identifier quatorze biomes principaux en fonction de leurs caractéristiques phénologiques et de leur productivité primaire. Ceci témoigne d'une organisation plus complexe qui tranche avec les cartes de végétation d'antan, qui, le plus souvent, se réduisaient à des schémas simplistes, présentant une zonalité assez régulière entre zones équatoriale, soudanienne ou sahélienne.

Les conclusions de plusieurs programmes de recherche montrent que, par rapport aux autres pays de la sous-région Afrique centrale, la couverture végétale évolue rapidement dans le sud-Cameroun et affecte aussi bien les couverts forestiers que savaniques. Dans les zones de transition, il y aurait une progression de la forêt sur les savanes (Youta, 1991), mais la tendance générale s'inscrit dans une régression du potentiel forestier malgré la législation qui prévaut pour réglementer ce secteur. Dans la partie septentrionale du pays où les conditions bioclimatiques sont plus rudes, les conséquences d'une régression du couvert végétal sont plus dommageables.

L'analyse de l'évolution spatiale du NDVI montre, à l'échelle annuelle, une nette organisation méridienne des dates de début, de la durée, ainsi que de l'intensité de l'activité végétative. Au sud du 4^e parallèle, les valeurs de l'indice de végétation sont supérieures à 0,4 pendant toute l'année avec des maxima entre mai et juin au cours de la petite saison des pluies saison océanique. Ceci contraste avec les cycles annuels des précipitations dont la période la plus importante en termes de cumuls est la saison continentale (voir chapitre III). En fait, il semble qu'entre mai et juin, l'indice de végétation réponde au signal des cultures qui sont alors dans leur phase la plus active.

A ces latitudes, l'autre paradoxe entre cycle de la végétation et précipitations vient du fait que les maxima de NDVI se situent à l'est du 15^e méridien, alors que les régions de plus faible activité végétative se trouvent plutôt entre 10^e E et 12^e E, avec des valeurs en dessous de 0,5 pendant toute l'année. Pourtant, la dynamique des flux montre que dans son avancée sur le continent, la mousson génère des pluies plus faibles à l'est que dans la

zone côtière. En fait, la dynamique du couvert végétal entre les parties occidentales et méridionales du pays répondrait à des logiques autres que celle liée aux précipitations, notamment l'occupation du sol qui est plus dense à l'ouest.

Au nord de 6°N, les cycles annuels unimodaux diffèrent entre eux selon leur profil - étalé ou en cône-, mais aussi selon les valeurs de l'indice de végétation. Un profil étalé suppose une saison végétative plus longue qui, par rapport aux profils en cône intéressant les régions situées au nord de 9°N, commence souvent un ou deux mois plus tôt. Par ailleurs, au nord du 9° parallèle, la valeur du NDVI ne dépasse le seuil 0,3 qu'entre mai et novembre, le maximum annuel restant en dessous de 0,6. La latitude de 8°N est le règne des formations soudano-guinéennes beaucoup plus denses et c'est à partir de cette latitude que le cycle annuel perd son caractère unimodal strict ou en cône.

Les anomalies interannuelles du NDVI de 1982 à 2006 présentent des tendances déficitaires au début des années 1980 (121) pour les classes situées au nord de 5°N et en zone côtière. Entre la fin des années 80 et le début des années 90, le NDVI de ces classes fluctue autour des moyennes, alors qu'à partir de la deuxième moitié de la décennie 90 le NDVI devient excédentaire dans le nord-Cameroun, ce qui vient confirmer la thèse d'un probable « reverdissement » du Sahel (Eklundh, 2003 ; Olsson 2005).

Ainsi les cycles saisonniers des classes du domaine Sud-Cameroun présentent une saisonnalité quasi-similaire à celle des précipitations, et les tendances interannuelles possèdent des similitudes. Cependant seules des études de cas sur régions d'intérêts, réalisées à partir d'images à plus haute résolution, jointes à des données bioclimatiques et socioéconomiques précises, permettront d'étudier les facteurs de répartition et d'évolution du couvert végétal de manière plus précise.

- **Analyse combinée du lien entre NDVI, pluviométrie et facteurs sociodémographiques**

Les principaux facteurs modulant la variabilité spatiotemporelle du couvert végétal au Cameroun à partir de mesures NDVI ont été identifiés.

Le travail a d'abord été présenté sous la forme d'un article centré sur le Nord-Cameroun qui est la partie du pays où les conséquences économiques et environnementales de modifications du couvert végétal sont les plus dommageables. Deux paramètres ont été regardés : **les précipitations**, en raison de leur relation avec la dynamique du couvert végétal, et **l'évolution de la démographie urbaine** qui conditionne le rythme d'occupation du sol et donc les modifications du couvert dans les villes et leurs périphéries. Cette étude a permis d'une part de déterminer la limite de dépendance pluviométrique de la végétation dans le Nord-Cameroun, et d'autre part d'évaluer l'impact du signal urbain sur la végétation, dans les soixante-dix-neuf chefs-lieux d'unités administratives qui composent la région.

Plus spécifiquement, l'étude montre que la croissance démographique s'accompagne d'une baisse significative du NDVI dans les villes moyennement peuplées (8 000 à 30 000 habitants), ainsi que dans celles où la population urbaine a augmenté de plus de 30 % en dix ans (1999-2008). En revanche, le signal urbain étant faible dans les villes moins peuplées, les modifications du couvert végétal y sont régies par la pluviométrie et/ou par des facteurs associés à l'utilisation du sol. Ce cas de figure se retrouve particulièrement aux latitudes de l'Adamaoua (6°N-7°N). Enfin, de faibles corrélations sont enregistrées dans les plus grandes villes (Maroua, Garoua, Ngaoundéré) où les valeurs de NDVI restent autour de 0,3, malgré la croissance exponentielle de la population.

Si des études sur l'évolution spatiale des villes (surtout les plus grandes) ne sont pas rares au Cameroun, aucune d'elles, à notre connaissance, ne l'a corrélée à la démographie. Ainsi, les résultats de cette étude peuvent contribuer, sinon à la sensibilisation sur le problème épineux de l'exode rural au Cameroun, du moins participer à la prise de décision sur des questions d'urbanisme (logements urbain, etc.).

Un deuxième exercice a consisté à détecter les changements de couvert végétal au Nord-Cameroun à partir de la différence des cartes médianes des cinq années les plus récentes et des cinq années les plus anciennes de la période 1987-2002. Cette étude a montré de faibles changements de la couverture végétale au nord de 10°N, avec cependant une baisse importante (>50 %) du NDVI vers l'est, et quelques pixels témoignant de la recrudescence du couvert végétal vers l'ouest de cette région. Entre 8°N et 9°N, les changements du NDVI entre les deux sous-périodes sont faibles, ce qui illustre des modifications mineures de couverture végétale au cours de la période considérée. Dans la partie méridionale du Nord-Cameroun, l'analyse est plus complexe et aucun mode ne se démarque clairement, ce qui rejoint les conclusions de l'article joint, qui démontre que la grande variabilité spatiale du NDVI de cette région n'est que très faiblement sensible aux variations pluviométriques ainsi qu'à celles de la démographie urbaine.

Une troisième analyse a cherché à évaluer l'impact des systèmes d'occupation du sol sur l'évolution du couvert végétal au Cameroun. Pour ce faire, les vecteurs d'occupation du sol du GLC2000 ont été projetés sur les cartes de NDVI (SPOT-VEGETATION), afin de suivre l'évolution de chaque type d'occupation du sol sur dix ans (1999-2008).

Les cycles annuels de NDVI dans chaque classe d'occupation du sol rendent compte de l'intensité de la production nette primaire, ainsi que celle de l'occupation du sol. À l'échelle interannuelle, tous les types d'occupation du sol présentent des minima en 2001 pour des raisons qui restent à éclaircir. On relève, cependant, une probable densification des couverts forestiers, comme en témoignent la droite de tendance et la prépondérance des couverts forestiers sur les savanes dans les zones de mosaïque

forêt/savane, signalée aussi par plusieurs chercheurs sur les sites test du Sud-Cameroun. Dans les zones de mosaïque forêt/agriculture, les activités agricoles sont en nette progression, sans doute en raison de la forte demande des marchés locaux, urbains et internationaux en produits vivriers. Aux latitudes savaniques, il n'y a pas de tendance marquée, sans doute en raison de la faible densité des populations dans un milieu peu favorable aux activités agricoles et pastorales, et où les migrations agricoles ne sont pas rares.

Ces observations ne sont toutefois que des préliminaires utiles pour les validations futures sur le terrain, qui seules permettront d'étayer nos hypothèses et de cerner les autres facteurs à l'origine de la modification du couvert végétal, non perceptibles encore à l'échelle de la télédétection.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

I-CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce mémoire était de contribuer à l'étude de la variabilité multiéchelle de la pluviométrie observée au Cameroun, particulièrement sur la période 1951-2001, et d'évaluer l'impact de cette variabilité sur le développement du couvert végétal au sens large. Sa principale innovation a été d'intégrer dans le complexe climat-couvert végétal régional, la composante anthropique aux échelles pertinentes, tout en ciblant la région Nord, plus vulnérable aux points de vue climatique, économique et environnemental.

Plus précisément, il s'est agi de décrire les impacts régionalisés de la transition climatique au regard des modifications des états de surface observées afin de dégager la part revenant aux activités humaines et aux changements d'occupation des sols. Si la vulnérabilité et la complexité géographiques régionales justifiaient de réduire l'espace d'étude, la disponibilité et la fiabilité des données *in situ* ont limité l'ambition initiale. Il a fallu se restreindre à l'interface entre variabilité pluviométrique, évolution des états de surface et dynamique démographique. Mais, au final, ces contraintes se sont avérées intéressantes d'un double point de vue. Régionalement d'abord, parce que le Nord-Cameroun prend en compte le gradient climatique entre zones de savanes et zones de steppes, tout en offrant une grande variété de paysages, d'organisations sociales et de modes de développement observés ailleurs en Afrique de l'Ouest. Thématiquement ensuite, puisque l'interface étudiée est, en ces régions, la composante première des relations nature-société.

1. Climat et pluviométrie

Après avoir rappelé les bases conceptuelles de la climatologie tropicale et les éléments majeurs de la mousson ouest-africaine (chapitre II), les facteurs géographiques, physiques et démographiques de la zone d'étude ont été présentés, notamment le système de la mousson africaine dont dépend climatiquement le Cameroun, les conditions géographiques et thermiques régionales affectant le cycle de l'eau, les conditions de surface (continentale et océanique). Une étude de la variabilité spatio-temporelle des précipitations a été effectuée à l'échelle régionale et à celle des stations, au travers d'analyses spatio-temporelles.

L'attention s'est notamment portée sur les cycles annuels et la variabilité interannuelle des précipitations, mais avec une profondeur temporelle plus importante que dans les études précédentes. Surtout, la régionalisation des précipitations sur la période 1951-2002, a permis d'identifier cinq domaines pluviométriques au regard de l'intensité des cumuls et de l'allure des profils pluviométriques (unimodal/bimodal, étalé/en cône etc.). Les indices pluviométriques du Cameroun utilisés dérivent de cette classification.

L'analyse des facteurs saisonniers associés aux anomalies pluviométriques a été faite en chacun des cinq domaines pluviométriques. Il a été montré qu'en domaine subéquatorial, une diminution (augmentation) des cumuls annuels est associée à une réduction (accroissement) des mois à cumuls supérieurs à 150 mm, alors que, pour les autres domaines du pays, c'est essentiellement la variabilité des pluies au seuil mensuel de 200 mm qui imprime les anomalies pluviométriques. La contribution saisonnière à la variabilité des totaux annuels montre qu'en régime bimodal quasiment toutes les saisons sont significativement corrélées (test de Monte-Carlo à 99 %) au total annuel, excepté la grande saison sèche (décembre-février) en domaine équatorial, et la petite saison des pluies (juillet-août) en domaine subéquatorial, malgré sa plus forte contribution aux cumuls annuels (18 %). En régime unimodal en revanche, l'ensemble des saisons est significativement corrélé aux cumuls annuels, bien que la saison sèche n'y contribue en moyenne que pour 10 %.

Par ailleurs, la comparaison des cumuls saisonniers au cours des années les plus humides et les plus sèches de la période 1951-2002 montre qu'en domaine soudano-sahélien les années excédentaires (déficitaires) sont aussi caractérisées par une recrudescence (diminution) des précipitations en saison sèche, contrairement à ce qui est observé en domaine tropical humide et en domaine côtier.

Aux échelles fines, le nombre de jours pluvieux et l'intensité des cumuls journaliers sont les facteurs qui déterminent la qualité pluviométrique d'une année. Cependant, le déficit pluviométrique des années sèches dépend plus de la baisse du

nombre de jours pluvieux au cœur de la saison des pluies que de la diminution des volumes précipités par jour pluvieux. Dans tous les domaines pluviométriques, les cumuls journaliers le plus fréquemment recensés sont compris entre 5 mm et 30 mm, et représentent en moyenne 40 % des jours pluvieux.

L'étude des dates de démarrage des saisons des pluies montre une répartition essentiellement méridienne, en bonne relation avec le déplacement classique de la ZCIT : on compte environ treize jours d'écart par degré de latitude, soit une différence d'environ cent cinquante jours entre les deux points les plus éloignés du pays. En fin de saison, la transition est beaucoup plus rapide puisqu'elle s'opère en quarante jours seulement. Si, maintenant, on suit les critères agronomiques, 62 % des débuts de saison se font en mars dans les domaines équatorial et côtier ; 42 % et 53 % en avril, en domaines subéquatorial et tropical humide, et 40 % en juin en domaine soudano-sahélien. La longueur de la saison des pluies dépend surtout des dates de démarrage, puisqu'au demeurant les dates de fin de saisons sont quasi stables selon les années et les stations. L'analyse des séquences sèches, définies comme des périodes d'au moins deux jours consécutifs secs ($P < 1$ mm) a permis aussi de préciser quelques statistiques. Ainsi, pendant la saison des pluies, nous avons montré que les petites séquences de longueur inférieure ou égale à cinq jours sont d'ordre synoptique — elles reviennent en moyenne tous les quatre jours —, alors que les séquences de plus longues durées sont à rattacher à la variabilité intrasaisonnière — elles surviennent en moyenne tous les trente à cinquante jours. En fait, ce sont les séquences sèches de durée supérieure à cinq jours qui influencent particulièrement le cycle végétatif.

2. La dynamique du couvert végétal

La régionalisation par classification automatique de l'indice de végétation a permis d'identifier quatorze classes en fonction de leurs caractéristiques phénologiques et de leur productivité primaire. L'étude de leur typologie et de leur évolution spatiale a montré une configuration quasi similaire à celle des précipitations, c'est-à-dire un gradient méridien au nord de 4°N, et une organisation zonale au sud de cette latitude. Dans cette dernière région, les cycles annuels du NDVI montrent une saisonnalité qui traduit la sensibilité de la végétation — même sempervirente — aux saisons de récession pluviométrique et donc à une période de stress prolongé. De façon intéressante, on remarque aussi que, contrairement aux cycles annuels des précipitations, le cycle annuel du NDVI de cette région présente de plus fortes valeurs ($> 0,7$) au cours de la saison *océanique* (autour de mai). En fait, ceci semble dû au fait que le signal de la végétation naturelle est renforcé par celui des cultures qui se trouvent dans leur phase la plus active à cette période du cycle. D'ailleurs, la plus forte activité végétative retrouvée à l'est, comparé à l'ouest qui est pourtant davantage pluvieux, est sans doute inhérente aux facteurs associés à l'occupation et à l'utilisation du sol.

Au nord du 4^e parallèle, la valeur du NDVI n'atteint le seuil de 0,3 qu'entre mai et novembre, le maximum annuel restant toujours inférieur à 0,6. La valeur du NDVI ne dépasse le seuil 0,3 qu'entre mai et novembre au nord du 9^e parallèle, la latitude 8°N concentrant les formations soudano-guinéennes les plus denses (NDVI maximal = 0,6). C'est d'ailleurs au sud de cette latitude que le cycle annuel perd son caractère unimodal. Les tendances interannuelles du NDVI en domaine unimodal sont quasi similaires à celles des précipitations, marquant bien la baisse des pluies en début de décennie 1980, et la tendance à la reprise après 1996.

Cette typologie du couvert végétal à partir du NDVI témoigne bien de la complexité de leur organisation spatiale, alors que la plupart des études précédentes décrivaient la végétation du Cameroun comme un continuum reflétant une répartition méridienne assez régulière entre zones équatoriale, soudanienne et sahéenne. Toutefois, si l'analyse du NDVI a permis d'appréhender les tendances du couvert végétal au Cameroun et de fournir un diagnostic, seules des études de cas à partir d'images à plus haute résolution sur les régions d'intérêts, jointes aussi à des données bioclimatiques et socioéconomiques précises, pourront permettre d'étudier les facteurs de répartition et d'évolution du couvert de manière efficiente.

3. Le poids des facteurs naturels et anthropiques

Un autre objectif de cette thèse était de rechercher les facteurs de la variabilité du couvert végétal dans le temps et l'espace. Le choix de la zone d'étude s'est porté sur le Nord-Cameroun (au nord de 6°N) parce que différentes analyses ont montré la vulnérabilité climatique de cette région, qui est par ailleurs l'une des plus denses et des plus pauvres du pays. Le but était de travailler à une échelle plus fine afin de saisir les modifications à l'échelle des activités humaines. Le Nord-Cameroun n'a donc pas été considérée comme une entité, contrairement aux analyses précédentes, la plus forte densité des données sol ayant permis de discriminer — en fonction des caractéristiques pluviométriques — un domaine soudanien au sud de 9°N S et un domaine sahéen au nord.

▪ Pluviométrie et NDVI

Le premier facteur de variabilité de la végétation qui a été testé est le paramètre *précipitations*. Une limite géographique fondée sur la réponse du NDVI par rapport à la pluie a été établie : autour de l'isohyète annuelle 900-1 000 mm, soit grossièrement par 9°N. Au sud de cette latitude, les plus fortes corrélations entre pluies et NDVI sont synchrones, alors qu'elles s'obtiennent en décalant le NDVI d'environ un mois au nord. Pour chaque saison des pluies (mai-septembre en domaine sahéen, et avril-octobre en domaine soudanien), l'impact des séquences sèches sur le développement du cycle

végétatif a aussi été étudié : les séquences sèches de durée supérieure à cinq jours affectent le développement de la végétation. Le test a été effectué sur les soixante et un premiers jours (deux mois) du cycle végétatif — du 1^{er} juin au 31 juillet en domaine sahélien et du 1^{er} avril au 31 mai en domaine soudanien par corrélations. Celles-ci sont faibles en domaine soudanien, sans doute en raison du nombre très réduit des séquences sèches supérieures à cinq jours en début de cycle, mais significatives en domaine soudanien où on observe une baisse (augmentation) de l'indice de végétation en année de recrudescence (de baisse) du nombre de séquences sèches.

La non-significativité des corrélations pluies/NDVI au sud de 9°N traduit le fait que, dans cette région, la dynamique végétative obéit à des logiques autres. C'est dans ce contexte que le paramètre *démographie* est introduit, vu que le taux d'accroissement est très élevé dans ces régions, particulièrement en zone urbaine. L'urbanisation, en effet, est le phénomène le plus marquant du dernier recensement de la population en 2005, comme le précise le Bureau Central des Recensements et d'Études de la Population (BUCREP). L'étude a donc été menée sur les relations entre l'évolution de la population urbaine des chefs-lieux des soixante-dix-neuf unités administratives du Nord-Cameroun entre 1987 et 2006 et le NDVI (8 km) sur la même période. L'hypothèse émise est que l'augmentation de la population urbaine sur un espace limité est susceptible de générer des actions de dégradation du couvert végétal pour l'habitat ou pour étendre les surfaces culturales. Cette situation est encore plus vraie dans les villes à faible capacité d'accueil où les populations cultivent les périphéries urbaines pour leur survie, chômage oblige. Ainsi, la démographie urbaine est considérée ici comme un facteur indirect de l'occupation du sol dans les villes et leurs périphéries.

- **NDVI, signal urbain et dynamique démographique**

Dans un premier temps, nous avons illustré l'impact du signal urbain en comparant les corrélations pluies/NDVI obtenues dans les villes et dans leurs périphéries. Dans les villes, les corrélations revêtent deux aspects : (i) un regroupement du nuage de points au dessous de la valeur 0,3 du NDVI en raison du signal urbain impulsé par les villes les plus peuplées ; (ii) une distribution du nuage de points autour de la droite de régression, dans les villes moins peuplées parce qu'ici le couvert végétal est moins contraint par l'homme, l'urbanisation étant plus faible. C'est d'ailleurs ce dernier signal qui est retrouvé dans les corrélations pluies/NDVI en milieu rural.

La corrélation NDVI/ démographie urbaine a été obtenue à partir des données de NDVI/SPOT (1 km) sur la période 1999-2008, la résolution de 8 km étant trop grossière pour saisir l'impact de la démographie sur le couvert végétal. Il en est ressorti :

- des corrélations significatives dans les villes moyennement peuplées (8 000 à 30 000 habitants), ainsi que dans celles où la population urbaine a augmenté de plus de 30 % en dix ans (1999-2008). Cette situation intéresse la plupart des villes situées au nord de 9°N ;

- de faibles corrélations dans les villes les plus peuplées (Maroua, Garoua, Ngaoundéré), en raison du fort signal urbain qui se traduit par la constance de la valeur du NDVI autour de la valeur de 0,3, malgré la recrudescence des pluies ;

- un faible signal urbain dans les villes peu peuplées puisqu'ici la variation du couvert végétal est surtout modulée par les précipitations et/ou des facteurs liés à l'occupation et à l'utilisation du sol.

En somme, dans la province de l'extrême-nord (nord de 10°N), le couvert végétal est sensible à la variation saisonnière des précipitations, mais la part anthropique du signal y est également très forte dans et autour des villes, ici très peuplées (Maroua, Mora, Mokolo, etc.). Les plus fortes corrélations se situent soit dans les villes à croissance rapide (> 30 % en dix ans), comme Kolofata, Taibong, Guidiguis, soit dans les villes les moins peuplées ou à dominante rurale comme LogonelBirni, Mindif ou Hile-Alifa, où la population urbaine a même régressé au cours de la période considérée.

Entre 8°N et 10°N, l'évolution du couvert reste influencée par la pluviométrie, bien que les corrélations entre les deux paramètres soient plus faibles que dans le domaine précédent. Dans les villes, les corrélations NDVI/ démographie sont presque toutes significatives au test de Monte-Carlo (95 %), à l'exception de la ville de Garoua.

Au sud de 8°N, la dépendance pluviométrique de la végétation est faible, mais la plupart des chefs-lieux d'unités administratives présentent des corrélations significatives, à l'exception de Ngaoundéré et de Banyo, en raison de leur forte densité urbaine. Dans cette région, pourtant, on relève également plusieurs villes où la population a régressé, telles Mbé, Meiganga et Mayo-Darlé.

Ces résultats montrent que l'évolution du couvert végétal au Nord-Cameroun dépend de la composante anthropique. Cependant, il existe des approches plus directes pour mieux appréhender l'impact de la démographie sur l'occupation du sol. Ainsi, la base de données du GLC2000 a permis d'identifier douze types d'occupation du sol au Cameroun. L'analyse a retenu huit thèmes associés à la végétation. La projection de ces polygones d'occupation du sol sur les cartes de NDVI/SPOT permet de rendre compte des variations interannuelles de la production nette primaire au sein de chaque type d'occupation du sol entre 1999 et 2008, en supposant que ces polygones n'évoluent pas spatialement.

Par ailleurs, tous les types d'occupation du sol présentent une baisse marquée du NDVI en 2001, pour des raisons qui restent à éclaircir. On relève aussi une densification des couverts forestiers, même dans les zones de mosaïque forêt/savane. Cette avancée de la forêt sur la savane a également été soulignée par d'autres chercheurs et relèverait du rôle de *Chomolaena odorata* (ou herbe du Laos), une plante qui envahit l'espace après abandon des savanes cultivées et recouvre efficacement les sols grâce à l'abondant feuillage qu'elle produit. Dans les zones de mosaïque forêt/agriculture, les activités agricoles sont en nette progression. Cela est probablement dû à la forte demande des marchés locaux, urbains et internationaux en produits vivriers. Aux latitudes savaniques, il n'y a pas de tendance marquée, sans doute en raison de la faible densité des populations dans un milieu peu favorable aux activités agricoles et pastorales, et où les migrations agricoles ne sont pas rares.

Ces résultats ne sont, bien entendu, que des préliminaires utiles pour les validations futures sur le terrain qui, seules, permettront d'étayer nos hypothèses et de cerner les autres facteurs à l'origine de la modification du couvert végétal, non perceptibles encore à l'échelle de la télédétection.

II. PERSPECTIVES

Ces résultats, évidemment partiels, supposent d'être confirmés dans des études futures. Pour ce faire, il faut, entre autres, préciser les différentes étapes nécessaires et spécifier les données et techniques à privilégier. Il nous semble que la démarche suivante serait à même d'apporter les premiers éclaircissements. Elle comprend trois étapes.

- a) Effectuer une cartographie actualisée du couvert végétal dans le Nord-Cameroun, en hiérarchisant les zones selon les risques (naturels et/ou anthropiques), ce qui nécessite un travail de télédétection par utilisation conjointe des produits satellitaires à haute résolution de type MODIS (1-250 m de résolution), SPOT (1 km) et Landsat (30 m) avec validation par enquêtes de terrain (Yao-Brou, 2005 ; Dubreuil, 2010). En effet, la descente d'échelle n'a pu être finalisé dans cette thèse, faute de temps matériel pour notamment, la validation terrain. Une attention particulière sera donc portée sur les zones de transition et les mosaïques pour suivre la dynamique végétale à partir des données multitudes des produits Landsat qui ont déjà été largement explorés au cours des différents stages effectués dans les laboratoires « pôle Image » (université de Paris7) et de « Dynamique des Réseaux et des Territoires » (université d'Artois).
- b) Décrire les relations entre la dynamique à grande échelle de la mousson et les processus d'échelles fines qui conditionnent le cycle de l'eau, selon différents pas de temps, pour quantifier l'évolution saisonnière des bilans hydriques et radiatifs en fonction de celle affectant les conditions de surface. Rappelons que dans le Nord-Cameroun, le bilan hydrique est directement associé aux rendements agricoles, ce qui par ailleurs, a permis de construire des indices de rendements pour une dizaine de cultivars (L'Hôte, 1998), en collaboration avec le PRASAC, le CIRAD et l'IRAD. Il serait donc intéressant d'associer aux précipitations, d'autres paramètres du cycle de l'eau comme l'Evapotranspiration potentielle (ETP) pour déterminer de façon plus robuste les dates de saisons agronomiques.
- c) Quantifier le poids d'autres paramètres naturels (relief, pente, sol) et anthropiques (voies de communication, activités agricoles, feux de brousse, exploitation des produits ligneux, surpâturage etc.) - non pris en compte dans cette étude - sur l'évolution du couvert végétal : en effet, il s'agit de facteurs directs des variations du couvert végétal et des catalyseurs de la baisse des rendements agricoles. Ces phénomènes seront appréhendés à partir de l'imagerie satellitaire Landsat ETM+ à moyenne résolution dans des zones cibles, puisque cette approche s'est avérée efficace pour la détection et le suivi

des surfaces brûlées par types de peuplements végétaux dans le sud de l'Adamaoua (Yao-Brou, 2005 ; Kana *et al.*, 2007).

En aval de ces travaux, je souhaite enfin souligner l'intérêt de deux types d'actions complémentaires qui pourraient être entrepris sur des domaines plus appliqués et spécifiques au Cameroun.

i- Réaliser des enquêtes auprès des ménages : la confrontation avec les résultats obtenus permettrait de constituer des indicateurs de vulnérabilité pour fournir aux décideurs des supports de gestion participative des ressources en place, ainsi que des mesures de reconstitution ou de restauration. Ainsi, l'un des programmes réintégré par le Cameroun en 2008 et dénommé « opération Sahel vert » a connu un échec cuisant vu l'insuffisance des connaissances amont relatives aux systèmes d'occupation du sol et à la variabilité bioclimatique, mais aussi à la perception et la sensibilisation des populations sur la question environnementale ; vu, enfin, l'indisponibilité des solutions palliatives des problèmes d'exploitation abusive et anarchique du bois.

ii- Utiliser les données d'observations et les résultats de classification pour caler les modèles statistiques et intégrer les données climatiques et anthropiques. Ceci permettrait d'améliorer la représentation des conditions de surface dans les modèles de climat régionaux et les modèles de surface afin de juger de leur pertinence à simuler la végétation actuelle et à venir.

BIBLIOGRAPHIE

ACHARD F., OUATTARA L. et BANOIN M., 1998 : Activités de recherche conduites sur le terroir de Ticko, résultats 1998, Projet Amélioration et gestion de la jachère en Afrique de l'Ouest, Niamey, Faculté d'Agronomie-ORSTOM, 45 p.

ACHOUNDONG G., YOUTA-HAPPI Y., BONVALLOT J. et GUILLET B., 1998 : Formation et évolution des recrûs sur savanes, In M. Servant et S. Servant-Vildary (eds). Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux, Colloques et Séminaires, ORSTOM, Bondy, pp. 115-119.

ALI A., LEBEL T., 2009: The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology*, 29 (4), 1705-1714.

AMATO N. (d') and LEBEL Th., 1998: On the characteristics of the rainfall events in the Sahel with a view to the analysis of climatic variability, *International Journal of Climatology*, 18: 955-974.

ARVOR D. et DUBREUIL V., 2006 : Apport des images NDVI du satellite SPOT-végétation à l'étude de l'impact des précipitations sur les rendements de soja au Mato Grosso (Brésil), Actes du Colloque « Interactions Nature-Société, analyses et modèles », La Baule, mai 2006, 6 p., publication CD-ROM.

ASPLIDEN C.I. and ADEFOLALU D., 1976: The mean troposphere of West Africa, *Journal of Applied Meteorology*, 15: 111-111.

ASSAKO ASSAKO R.J., 1997 : *Yaoundé : éléments pour un SIG urbain*, Rapport de stage post-doctoral, Institut de Géographie de l'Université de Fribourg, Suisse, 67 p.

ATI O.F, STIGTER C.J. and OLADIPO E.O., 2002: A comparison of methods to determine the onset of the growing season in Northern Nigeria, *International Journal of Climatology*, 22: 731-742.

AUBRÉVILLE A., 1949 : *Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale*, Société d'Éditions géographiques maritimes et coloniales, Paris, 60 fig., 4 tabl., 12 cartes, 351 p.

AVILA L.A. and PASCH R.J., 1995: Atlantic Tropical Systems of 1993, *Monthly Weather Review*, 123: 887-896.

BALL G.H. and HALL D.J., 1965: *ISODATA* , a novel method of data analysis and pattern classification, Technical report, Standford Research Institute, Menlo Park, California, 72 p.

BALME M., GALLE S. et LEBEL Th., 2005 : Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger, *Sécheresse*, vol. 16, n°1, pp. 15-22.

BALME M., VISCHEL T., LEBEL Th., PEUGEOT C. and GALLE S., 2006: Assessing the water balance in the Sahel: Impact of small scale rainfall variability on runoff. Part I: Rainfall variability analysis, *Journal of Hydrology*, 331(1-2): 336-348.

BARBIER J.-Cl., COURADE G. et GUBRY P., 1981-1982 : L'exode rural au Cameroun, *Cahiers ORSTOM, Série Sciences Humaines*, vol. XVIII, n° 1, Paris, pp. 107-147.

BARET F.S., JACQUEMOUD S. and HANOCQ J.-F., 1993: The soil line concept in remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, 7: 65-82.

BARIOU R.D., LECAMUS D. et LE HÉNAFF F., 1985 : Indices de végétations, in *Dossier de télédétection*, Rennes, Université de Rennes 2, France, 121 p. + 29 p. biblio.

BARTHOLOMÉ E. 1990 : Suivi par télédétection des productions céréalières pluviales en pays sahéliens, *Télédétection et sécheresse*, Éd. AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext, Paris, pp. 15-27.

BELLA-MEDJO M., 2008 : Analyse multiéchelles de la variabilité pluviométrique au Cameroun et ses conséquences sur les rendements de coton, thèse de doctorat d'État, Paris, Université Paris VI, sp.

BELTRANDO G. et CADET D.L., 1990 : Variabilité interannuelle de la petite saison des pluies en Afrique orientale : relations avec la circulation atmosphérique générale, *Veille Climatique Satellitaire*, n° 33, pp. 19-36.

BENOÎT P., 1977: The start of the growing season in Northern Nigeria, *Agricultural Meteorology*, 18: 91-99.

BESSAT C., 1996 : La déforestation dans les zones de savane humide en Afrique centrale sub-saharienne ; la prise en compte des dynamismes sociaux de la déforestation par les projets de développement, *United Nations Research Institute for Social Development (UNSRISD)*, Paper No. 70, 49 p.

BIGOT S., 1997 : Précipitations et convection profonde en Afrique centrale. Cycle saisonnier. Variabilité interannuelle et impact sur la végétation, Thèse de doctorat de Géographie, spécialité Climatologie, Centre de Recherches de Climatologie, Université de Bourgogne, Dijon, 186 p.

BIGOT S., BROU T.Y., OSZWALD Y., DIEDHIOU A. et HOUNDENOU C., 2005 : Facteurs d'explication de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales, *Sécheresse*, vol. 16, n°1, pp. 5-13.

BOUTRAIS J., 1974 : Les conditions naturelles de l'élevage sur le plateau de l'Adamaoua (Cameroun), *Cahiers ORSTOM, Série Sciences Humaines*, vol. IX, n° 2, pp. 145-198

BOUTRAIS J., 1983 : L'élevage soudanien, éditions IRD, 148 p.

BOUTRAIS J., 1984 : Les unités naturelles, Le nord du Cameroun, des hommes, une région, *Collection Mémoires*, 102, ORSTOM, Paris, pp. 23-62.

BOUTRAIS J., 1996 : Hautes terres d'élevage au Cameroun, Thèse de Doctorat (1995), Paris, ORSTOM, Université de Paris X-Nanterre, Département de Géographie, 3 vol., 1 302 p.

BOWDEN P., 1966: Origin of the younger granites of northern Nigeria, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 25(2): 153-162.

BRABANT P. et GAVAUD M., 1985 : Les sols et les ressources en terre du Nord Cameroun. Notice explicative n° 103, Paris, ORSTOM éditions, Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique (MESRES), Institut de recherche agricole (IRA), 285 p. + six cartes couleurs hors texte.

BUCINI G. and LAMBIN E.F., 2002: Fire impacts on vegetation in Central Africa: a remote-sensing-based statistical analysis, *Applied Geography*, 22: 27-48.

BUCREP (Bureau for Population Census and Research), 2010, Final report of results of the general census of population and habitat (2005), 6 volumes + 1 special edition.

BURPEE R.W., 1972: The origin and structure of Easterly waves in the lower troposphere of North Africa, *Journal of Atmospheric Sciences*, 29: 77-90.

BUTTERWORTH S., 1930: On the theory of filter amplifiers, *Experimental wireless and the wireless engineer*, 7: 536-541.

CAMBERLIN P. and OKOOLA R.E., 2003: The Onset and Cessation of the 'Long Rains' in Eastern Africa and their Interannual Variability, *Theoretical and Applied Climatology*, 75: 43-54.

CAMBERLIN P. et al., 2011 : Climats tropicaux d'aujourd'hui à demain : variabilité et changements, in *Natures tropicales : enjeux actuels et perspectives* (F. Bart, dir. ouvrage), Presses Universitaires de Bordeaux, collection Espaces tropicaux, n°20, 562 p.

CAMBERLIN P., MARTINY N., PHILIPPON N. and RICHARD Y., 2007: Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa, *Remote Sensing Environment*, 106: 199-216.

CAMBERLIN P., OKOOLA R. et DIOP M., 2002 : Identification des dates de démarrage de la saison des pluies : applications à l'Afrique de l'Est et au Sénégal, Actes du XV^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Besançon, vol. 15, pp. 295-303.

CARBONNEL J-P. et HUBERT P., 1985 : Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'Ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso (ex. Haute-Volta), *Compte rendu de l'Académie des Sciences, série II, tome 301, n°13*, pp. 941-944.

CARTON J.A. and HUANG B., 1994: Warm events in the tropical Atlantic, *Journal of Physical Oceanography*, 24: 888-903.

CATTELL R.B., 1966: The Scree Test for the number of factors, *Multivariate Behavioural Research*, 1: 245-276.

CHARNEY J.G., QUIRK W.J., CHOW S.H. and KORNFIELD J.D., 1977: A comparative study of the effects of albedo change on drought in semiarid régions, *Journal of Atmospheric Sciences*, 34: 1366-1385.

CHARRE J., 1977 : À propos de sécheresse, *Revue de Géographie de Lyon*, vol. 52, n°52-2, pp. 215-226.

COCHEMÉ J. et FRANQUIN P., 1967: A study of the agroclimatology of the semiarid area south of the Sahara in West Africa, Technical Report, Rome, Paris, Genève, FAO, Unesco, WMO, 324 p.

COLLET C. et CALOZ R., 2001 : Précis de télédétection : traitements numériques d'images de télédétection, Presses de l'université du Québec, 386 p.

CORNELIUS J.M. and REYNOLDS J.F., □1991: On determining the statistical significance of discontinuities within ordered ecological data, *Ecology*, 72: 387-406.

CRÉPEAU C., BENNOUNA T., BICHERON P., CAYROL P., DJABY B., LEGROS Y., GANZIN N., DIOP S., KA A., DIOUF A. et SAMBA A., 2003 : Suivi de la végétation en zone sèche par des produits d'information dérivés de l'imagerie spatiale, *Science et changements planétaires / Sécheresse*, vol. 14, n° 1, pp. 56-57.

DAVENPORT M. L. and NICHOLSON S. E., 1993: On the relation between rainfall and the Normalized Difference Vegetation index for diverse vegetation types in east Africa, *International Journal of Remote Sensing*, 2: 2369-2389.

DEKKER R.J., 1998: Speckle filtering in satellite SAR change detection imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 19(6): 1133-1146.

DEMANGEOT J., 1992 : Les milieux « naturels » du Globe, Masson, Paris, 276 p.

DHONNEUR G., 1985 : *Traité de météorologie tropicale*, Météo-France, 151 p.

DIBONG SIEGFRIED D., NDIANG Z., ONDOUA J-M. , BILONG P., 2011: Origin and propagation of *Chromolaena odorata* (L.) king and robinson (Asteraceae) between Mabele and Meiganga in the North of Cameroon, *American Journal of Food and Nutrition* ISSN 2157-1317, doi:10.5251/ajfn.

DI GREGORIO A. and JANSEN L., 2000: Land cover classification system, classification concepts and user manual, Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome, FAO ISBN 92-5-104216-0.

DIAO CAMARA A. et ANCEY V., 2010 : Évolution des rapports au travail des éleveurs du Ferlo, In Béguin Pascal (ed.), Dedieu Benoît (ed.), Journées d'étude INRA SAD - CIRAD ES, 2010-03-24/2010-03-26, Parent, France, pp. 191-196.

DIEDHIOU A., JANICOT S., VILTARD A., de FÉLICE P. and LAURENT H., 1999: Easterly waves regimes and associated convection over West Africa and the tropical Atlantic: Results from the NCEP/NCAR and ECMWF reanalyses, *Climate Dynamics*, 15: 795-822.

- DIN N., LACAZE D. et BLASCO F., 2001 : Carte thématique des mangroves de l'estuaire du rio Del Rey (Cameroun) par photo-interprétation et SIG, 13 p.
- DONFACK P., 1998 : Végétation des jachères du Nord-Cameroun : typologie, diversité, dynamique, production, Thèse de Doctorat d'État, Université de Yaoundé 1, Cameroun, 225 p.
- DONGMO J.-L., 1981 : Le dynamisme Bamiléké, Yaoundé-Ceper, 2 tomes, 424 p. et 293 p.
- DUBREUIL V., 1993 : télédétection et cartographie à petite échelle des paysages de la France de l'ouest, in *Mappemonde*, Vol 2, pp.18-21.
- DUBREUIL V., 2010: Geographical Information, Remote Sensing, and Climatology in "Geographical Information and Climatology" Dir. P.Carrega, WILEY-ISTE Ltd ed., London, pp.73-102
- DUVEL J.-P., 1990: Convection over tropical Africa and the Atlantic Ocean during northern summer. Part. II: Modulation by easterly waves, *Monthly Weather Review*, 118: 1855-1868.
- DYER T.G.J., 1975: The assignment of Rainfall stations into homogeneous groups: An application of principal component analysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101(430): 1005-1013.
- EBISUZAKI W., 1997: A method to estimate the statistical significance of a correlation when the data are serially correlated, *Journal of Climate*, 10: 2147-2153.
- EKLUNDH L. and OLSSON L., 2003: Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999, *Geophysical Research Letters*, 30(8): 1430-1433.
- ERDAS, 1997: ERDAS Field Guide, ERDAS, Inc., Atlanta, Georgia, pp. 225-229.
- FAO, 1995 : Rapport de pays pour la conférence technique internationale de la FAO sur les ressources phytogénétiques du Cameroun, MINREST/MINEF (Yaoundé), 84 p.
- FÉLICE P. (de), VILLARD A., MONKAM D. and OUSS C., 1990: Characteristics of North African 6-9 day waves during summer 1981, *Monthly Weather Review*, 118: 2624-2633.
- FONDOUN J.-M., 2001 : Situation des ressources génétiques forestières du Nord Cameroun, Atelier sous-régional FAO/IPGRI/ICRAF. Document FGR/15F, Département des forêts, FAO, Rome, Italie, 28 p.
- FONTAINE B. and BIGOT S., 1993: West-African rainfall deficit and sea surface temperatures, *International Journal of Climatology*, 11: 271-286.
- FONTAINE B., 1991 : Variations pluviométriques et connexions climatiques : l'exemple des aires de mousson indienne et ouest-africaine, *Sécheresse*, vol. 2, pp. 259-264.
- FONTAINE B., JANICOT S. and MORON V., 1995: Rainfall anomaly patterns and wind fields signal over West Africa in August (1958-1989), *Journal of Climate*, 8: 1503-1510.

- FONTAINE B., JANICOT S., MORON V., ROUCOU P. et TRZASKA S., 1998 : Anomalies de températures de surface de la mer et précipitations tropicales : synthèse de quelques travaux récents portant sur les précipitations au Sahel et dans le Nordeste, *La Météorologie*, vol. 8, n° 23, pp. 14-35.
- FOTSING J.-M., 1990 : Colonisation agricole et élevage sur les pentes des monts Bamboutos, *Revue de Géographie camerounaise*, vol. VIII, n°2, pp. 118-138.
- GARBUTT D.J., STERN R.D., DENNET M.D. and ELSTON J., 1981: A comparison of the rainfall climate of eleven places in West Africa using a two-part model for daily rainfall, *Archives for Meteorology, Geophysics and Bioclimatology, Serie B*, 29: 137-155.
- GAUTIER F., LUBÈS-NIEL H., SABATIER R., MASSON J.-M., PATUREL J.-E. et SERVAT E., 1998 : Variabilité du régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne entre 1950 et 1959, *Hydrological Sciences Journal*, 43(6): 921-936.
- GÉNIEUX M., 1958 : Climatologie du Cameroun, Atlas du Cameroun, Yaoundé , 4 p.
- GEORGE P., 1970 : Dictionnaire de la géographie, Presses universitaires de France, Paris, 448 p.
- GIRARD M.C. et GIRARD C.M., 1999 : Traitement des données de télédétection, Dunod, Paris, 527 p.
- GOUTORBE J.-P., LEBEL Th., DOLMAN A.J., GASH J.H.C., KABAL P., KERR Y.H., MONTEURY B., PRINCE S.D., STRICKER J.N.M., TINGA A. and WALLAU J.S., 1997: An Overview of HAPEX-Sahel: a study in climate and désertification, *Journal of Hydrology*, 188-189: 4-17.
- GRIST J.P. and NICHOLSON S.E., 2001: A Study of the Dynamic Factors Influencing the Rainfall Variability in the West African Sahel, *Journal of Climate*, 14: 1337-1359.
- GUILLOT B., 1990 : L'utilisation des satellites météorologiques pour l'estimation de la pluie en zone sahélo-soudanienne au Centre de Météorologie Spatiale de Lannion, disponible sur <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:30021>
- HASTENRATH S., 1984: Interannual variability and annual cycle; mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic sector, *Monthly Weather Review*, 112: 1097-1107.
- HASTENRATH S., 1988: Climate and circulation of the tropics, Reidel, 455 p.
- HERRMANN S.M., ANYAMBA A. and TUCKER C.J., 2005: Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate, *Global Environmental Change*, 15: 394-404.
- HISARD Ph., 1980 : Observations d'une réponse de type El Niño dans l'Atlantique tropical oriental. Golfe de Guinée, *Oceanologica Acta*, vol. 3, n° 1, pp. 69-78.

- HOCHHEIM K.P. and BARBER D.G., 1998: Spring Wheat Yield Estimation for Western Canada Using NOAA NDVI Data, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 24(1): 15-31.
- HOLBEN B.N., 1986: Characteristics of maximum values composite images from temporal AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, 7: 1417-1434.
- HOUGHTON J.T., CALLANDER B.A. and VARNEY S.K., (Eds.) 1992: *Climate Change 1992. The Supplement to the IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, xii + 200 p.
- HUBERT P. et CARBONNEL J.-P., 1989 : Dimensions fractales de l'occurrence de pluie en climat soudano-sahélien, *Hydrologie continentale*, vol. 4, n°1, pp. 3-10.
- HUETE A.R., LIU H.Q., BATCHILY K. and VAN LEEUWEN W., 1997: A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 59: 440-451.
- HULME M. and JONES P.D., 1993: A historical monthly precipitation dataset for global land areas: applications for climate monitoring and climate model evaluation, pp. A/14-A/17, in *Analysis methods of precipitation on a global scale Report of a GEWEX Workshop*, 14-17 September 1992, Koblenz, Germany, WMO/TD-No 558, Geneva.
- HUMPHREYS L.G. and ILGEN D.R. 1969: Note on a criterion for the number of common factors, *Educational & Psychological Measurement*, 29: 571-578.
- ILESANMI O.O., 1972a: An empirical formulation of the onset, advance and retreat of rainfall in Nigeria, *Journal of Tropical Geography*, 34: 17-24.
- ILESANMI O.O., 1972b: Aspect of the precipitation climatology of the July-August rainfall minimum of Southern Nigeria, *Journal of Tropical Geography*, 35: 51-59.
- JANICOT S. and SULTAN B., 2001: Intra-seasonal modulation of convection in the West African monsoon, *Geophysical Research Letters*, 28: 523-6.
- JANICOT S. et FONTAINE B., 1993 : L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'Ouest, *La Météorologie*, 8^e série, n°1, pp. 28-53.
- JANICOT S., 1996: Impact of warm ENSO events on atmospheric circulation and convection over the tropical Atlantic and West Africa, *Annales Geophysicae*, 15: 471-475.
- JANICOT S., HARZALLAH A., FONTAINE B. and MORON V., 1997: Forcing of equatorial Atlantic and Pacific surface temperatures on West African monsoon dynamics in July-August (1958-1989), *Journal of Climate*, 9: 2480-2497.
- JANICOT S., HARZALLAH A., FONTAINE B. and MORON V., 1998: West African Monsoon Dynamics and Eastern Equatorial Atlantic/Pacific SST Anomalies (1970-1988), *Journal of Climate*, 11: 1874-1882.

JANICOT S., MORON V., FONTAINE B., 1996: Sahel droughts and Enso dynamics, *Geophysical Research Letters*, 23(5): 515-518.

JANICOT S., TRZASKA S. and POCCARD I., 2001: Summer Sahel-ENSO teleconnection and decadal time scale SST variations, *Climate Dynamics*, 18: 303-320.

JANODET E., 1995 : Stratification saisonnière de l'Afrique continentale et cartographie fonctionnelle des écosystèmes forestiers africains, Final report to the Joint Research Centre, Contract n°10 350: 94-07.

JOLLIFFE I.T. and SARRIA-DODD D.E., 1994: Early detection of the start of the wet season in tropical climates of Western Africa, *International Journal of Climatology*, 14: 71-76.

KAISER H.F., 1958: The Varimax criterion for analytic rotation in factor analysis, *Psychometrika*, 23(3): 187-200.

KALNAY E., KANAMITSU M., KISTLER R., COLLINS W., DEAVEN D., GANDIN L., IREDELL M., SAHA S., WHITE G., WOOLLEN J., ZHU Y., CHELLIAH M., EBISUZAKI W., HIGGINS W., JANOWIAK J., MO K.C., ROPELEWSKI C., WANG J., LEETMAA A., REYNOLDS R., JENNE R. and DENNIS J., 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bulletin of the American Meteorological Society* 77(3): 437-471.

KAMGANG V., BEYALA K., EKODECK G.E., VINCENS A., BOULANGE B. et DUBOIS M.A., 2007 : Argument pédologique de l'évolution de la mosaïque forêt/savane dans le sud-est du Cameroun, *Science et changements planétaires / Sécheresse*, Vol. 15, N° 2, avril-mai-juin, Note de recherche, 181-5.

KANA C.E. et ETOUNA J.E., 2007 : Apport de trois méthodes de détection des surfaces brûlées par imagerie Landsat ETM+ : application au contact forêt-savane du Cameroun, *Cybergeo: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, article 357, mis en ligne le 20 octobre 2006, modifié le 3 juillet 2007.

KANA R., 2007 : Business plan pour le développement d'une pépinière rurale de production et de commercialisation des plants améliorés d'arbres fruitiers locaux, *Mémoire de fin d'étude*, ICRAF-WCA, 108 p.

KANAMITSU M., EBISUZAKI W., WOOLLEN J., YANG S.K., HNILO J.J., FIORINO M. and POTTER G.L., 2002: NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2), *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83: 1631-1643.

KASEI C.N. and AFUAKWA J.J., 1991: Determination of optimum planting date and growing season of maize in the northern savannah zone of Ghana, *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone (Proceedings of the Niamey Workshop)*, IAHS Publ. no 199: 593-600.

KAUFMAN Y.J. and TANRÉ D.C., 1992: Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 30(2): 261-270.

- KEAY R.W.J., 1959: An Outline of Nigerian Vegetation, Federal Department of Forestry Research, Federal Ministry of Information, Lagos.
- KEMP P.R., CORNELIUS J.M. and REYNOLDS J.F., 1994: Temporal discontinuities in precipitation in the central North American prairie, *International Journal of Climatology*, 14(5): 539-557.
- KENDALL M. G. 1975: Rank Correlation Methods. Griffin, London, UK.
- KHODJA H., 1996 : Étude spatiotemporelle de données pluviométriques. Recherche d'une rupture, Mémoire de DEA Biostatistique, USTL, Montpellier, 44 p.
- KIJAZI A.L. and REASON C.J.C., 2004: Relationships between intraseasonal rainfall variability of coastal Tanzania and ENSO, *Theoretical and Applied Climatology*, 82(3-4): 153-176.
- KNUDSEN P., ANDERSEN O.B. and KNUDSEN T., 1996: ATSR sea surface temperature data in a global analysis with TOPEX/POSEIDON altimetry, *Geophysical Research Letters*, 23(8): 821-824.
- KOWAL J.M. and KNABE D.T., 1972: An Agroclimatological Atlas of the Northern States of Nigeria, Ahmadu Bello University Press, Zaria, Nigeria.
- L'HÔTE Y., 1998 : Climatologie et agroclimatologie de la province extrême nord (p.e.n.) du Cameroun. Préparation de l'atlas de la p.e.n., Documents ORSTOM, laboratoire d'Hydrologie, 31 p.
- L'HÔTE Y., MAHÉ G. and SOMÉ B., 2003: The 1990s rainfall in the Sahel: the third driest decade since the beginning of the century, *Hydrological Sciences Journal*, 48(3): 493-496.
- L'HÔTE Y., MAHÉ G., SOMÉ B. and TRIBOULET J.-P., 2002: Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues, *Hydrological Sciences Journal*, 47(4): 563-572.
- LAMB P. J., 1982: Persistence of subsaharan drought, *Nature*, 299: 198-212.
- LAMB P.J., 1978a: Case studies of tropical Atlantic surface circulation patterns during recent sub-Saharan weather anomalies: 1967 and 1968, *Monthly Weather Review*, 106: 482-491.
- LAMB P.J., 1978b: Large-scale tropical Atlantic surface circulation patterns associated with sub-Saharan weather anomalies, *Tellus*, 30A: 240-251.
- LAMB P.J., 1983: Subsaharan rainfall update for 1982: Continued drought, *Journal of Climate*, 3: 419-422.
- LAMBERT R., 1979 : Cours d'hydrologie, ISP/BUKAVU, inédit.

- LAMBIN E.F. and STRAHLER A.H., 1994: Change-vector analysis in multispectral space: a tool to detect and categorize land-cover change processes using high temporal-resolution satellite data, *Remote Sensing Environment*, 48: 231-244.
- LANDIS J.R. and KOCH G.G., 1977: The measurement of observer agreement for categorical data, *Biometrics*, 33: 159-174.
- LAPLACE P.S. (comte de), 1814 : *Essai philosophique sur les probabilités*, Madame Veuve Courcier éd., Paris, 324 p.
- LE BARBÉ L. and LEBEL Th., 1997: Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990, *Journal of Hydrology*, 188-189: 43-73.
- LE BARBÉ L., LEBEL Th. and TAPSOBA D., 2002: Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990, *Journal of Climate*, 15(2): 187-202.
- LE LAY M. et GALLE S., 2005 : Variabilité interannuelle et intrasaisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien, *Hydrological Sciences Journal*, 50: 509-524.
- LEBEL Th., DIEDHIOU A. and LAURENT H., 2003: Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales, *Journal of Geophysical Research*, 108(D8): 83-89.
- LEROUX M., 1970 : *La dynamique des précipitations en Afrique occidentale*, Thèse de doctorat de troisième cycle, Université de Dakar, 320 p.
- LETOUZEY R., 1968 : *Étude phytogéographique du Cameroun*, Paul Lechevalier éd., Paris, *Encyclopédie biologique*, n° 69, 511 p. + figures.
- LETOUZEY R., 1979 : *Atlas de la République du Cameroun*, éd. Jeune Afrique, Paris, 72 p., cartes en couleurs, figures, 21x29 cm, échelles variées.
- LETOUZEY R., 1985 : *Notice de la carte phytogéographique du Cameroun au 1/500 000°*, Institut de la Carte Internationale de la Végétation, Toulouse, 4 fascicules, 142 p.
- LIÉNOU G., MAHÉ G., PATUREL J.-E., SERVAT E., SIGHOMNOU D., EKODECK G.-E., DEZETTER A. et DIEULIN Cl., 2008 : Évolution des régimes hydrologiques en région équatoriale camerounaise : un impact de la variabilité climatique en Afrique équatoriale, *Hydrological Sciences Journal*, 53(4): 789-801.
- LOUGH J.M., 1986: Tropical Atlantic SST and rainfall variations in sub-Saharan Africa, *Monthly Weather Review*, 114: 561-570.
- LU D., MAUSEL P., BRONDIZIO E. and MORAN E., 2004: Change detection techniques, *International Journal of Remote Sensing*, 20(12): 2365-2407.
- LUBÈS-NIEL H.J., MASSON M., PATUREL J.-E. et SERVAT E., 1998 : Variabilité climatique et statistiques. Étude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques

tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques, *Revue des Sciences de l'Eau*, n° 3, pp. 383-408.

LUNETTA R.S., EDIRIWICKREMA J., JOHNSON D.M., LYON J.G. and MCKERROW A., 2002: Impacts of vegetation dynamics on the identification of land-cover change in a biologically complex community in North Carolina, USA, *Remote Sensing Environment*, 82: 258-270.

MAHÉ G. et OLIVRY J.-Cl., 1991 : Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale, du mensuel à l'interannuel, *Hydrology for the Water Management of large River Basins, Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991, IAHS Publication, 201: 163-171.*

MAHOP F., VAN RANST E. et BOUKAR S.L., 1995 : Influence de l'aménagement des sols sur l'efficacité des pluies au Nord-Cameroun, *Journées de l'AFSE (Association Française de Science Économique, France), Études et gestion des sols, vol. 2, n° 2, pp. 105-117.*

MALINGREAU J.-P., 1990: The contribution of remote sensing to the global monitoring of fires in tropical and subtropical ecosystems, in *Fire in Tropical Biota* (J.G. Goldammer, editor), Springer Verlag, Berlin, 337-370.

MALOBA MAKANGA J.D. et BOKO M., 2000 : Nébulosité-précipitations et facteurs géographiques en Afrique équatoriale atlantique durant les saisons juin-août et décembre-février, *Science et changements planétaires / Sécheresse*, vol. 11, n° 1, pp. 11-17.

MALOBA MAKANGA J.D., 1998 : Approche diagnostique et satellitale des climats et de leur variabilité en Afrique équatoriale atlantique : Gabon, Congo et sud-Cameroun, *Thèse de doctorat d'État, Centre de Recherches de Climatologie, Université de Bourgogne, Dijon, 198 p.*

MANN H.B., 1945: Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13, pp. 245-259.

MAPANDE A.T. and REASON C.J.C., 2004: Links between rainfall variability on intraseasonal and interannual scales over western Tanzania and regional circulation and SST patterns, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 89: 215-234.

MARTEAU R., MORON V. and PHILIPPON N., 2009: Spatial coherence of monsoon onset over Western and Central Sahel (1950-2000), *Journal of Climate*, 22(5): 1313-1324.

MARTIN D., 1961 : Étude pédologique de la station Quinquina : Dschang, Bansa, Ndougé, *Rapport IRCAM, Yaoundé, pp. 176-201.*

MARTINY N., CAMBERLIN P. and RICHARD Y., 2005: Interannual persistence effects in vegetation dynamics of semi-arid Africa, *Geophysical Research Letters*, 32: L24403, doi:10.1029/2005GL024634.

- MARTINY N., CAMBERLIN P., RICHARD Y. and PHILIPPON N., 2006: Compared regimes of NDVI and rainfall in semi-arid regions of Africa, *International Journal of Remote Sensing*, 27: 5201-5223.
- MATTHEWS E., 1983: Global vegetation and land use: new high resolution data bases for climate studies, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22: 474-487.
- MAXWELL J.C., 1860: Illustrations of the dynamical theory of gases, *Philosophical Magazine*, 19: 19-32.
- MAYAUX P., GONG V., MASSART M., PAIN-ORCET M. et ACHARD F., 2003 : Évolution du couvert forestier du bassin du Congo mesurée par télédétection spatiale, *Télédétection*, n° 277 (3), pp. 45-52.
- MAYAUX P., RICHARDS T. and JANODET E., 1999: A vegetation map of Central Africa derived from satellite imagery, *Journal of Biogeography*, 26: 353-366.
- MERTENS B. and LAMBIN E.F., 1997: Spatial modelling of deforestation in southern Cameroon: Spatial disaggregation of diverse deforestation processes", *Applied Geography*, vol.17, no.2, 143-162.
- MERTENS B and LAMBIN E.F., 2000: Land-cover change trajectories in southern Cameroon, in *Annals of the association of American Geographers*, 90(3), P. 467-494.
- MITCHELL T.D and JONES P.D., 2005 : An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids, *International Journal of Climatology*, 25: 693-712.
- MKANKAM K.F., TSALEFAC M. et MBANE B.C., 1994 : Variabilité pluviométrique sur le territoire camerounais: essai de régionalisation à partir des cumuls mensuels et du cycle annuel, *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, vol. 7, pp. 439-446.
- MONNIER Y., 1990 : La poussière et la cendre. Paysages, dynamique des formations végétales et stratégies des sociétés en Afrique de l'Ouest, Ministère de la Coopération et Agence de Coopération Culturelle et Technique, Paris (2^e édition), 264 p.
- MONTENY B.A. et ZELLER B., 1986 : Interactions végétation-atmosphère et leurs impacts sur les caractéristiques climatiques, *Climat et développement*, séminaire des 15 et 16 octobre 1985, éd. ORSTOM, Paris, pp. 157-166.
- MORIN S., 1981 : Les paysages de l'ouest-Cameroun et leur perception par l'imagerie Landsat, *Revue Géographique du Cameroun*, n° 2, pp. 149-165.
- MORON V., FONTAINE B. et ROUCOU P., 1995: Global equatorial variability of 850 and 200 hPa zonal winds from rawinsondes between 1963 and 1989, *Geophysical Research Letters*, 22(13): 1701-1704.

- MÜLLER J.-P., 1978 : La séquence verticale d'organisation des horizons meubles des sols ferrallitique camerounais : variation en latitude en fonction du pédoclimat et de l'âge des sols, Cahiers de l'ORSTOM, série Pédologie, vol. XVI, n°1, pp. 73-82.
- MYERS N. 1988: Threatened biotas: "hotspots" in tropical forests, *The Environmentalist*, 8(3): 1-20.
- NICHOLSON S.E. and ENTEKHABI D., 1986: The quasi-periodic behaviour of rainfall variability in Africa and its relationship to the Southern Oscillation, *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie A, Meteorologie und Geophysik*, vol. 34, n°3-4, pp. 311-348.
- NICHOLSON S.E. and ENTEKHABI D., 1987: Rainfall variability in equatorial and Southern Africa: Relationships with sea-surface Temperatures along the Southwestern Coast of Africa, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26(5): 561-578.
- NICHOLSON S.E., 1989: Remote sensing of land surface parameters of relevance to climate studies, *Progress in Physical Geography*, 13(1): 1-12.
- NICHOLSON S.E., DAVENPORT M.L. and MALO A.R. , 1990: A comparison of the végétation response to rainfall in the Sahel and east Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR, *Climatic Change*, 17: 209-241.
- NIEL H., LEDUC C. et DIEULIN C., 2005 : Caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle des précipitations annuelles sur le bassin du lac Tchad au cours du XX^e siècle, *Hydrological Sciences Journal*, 50(2): 223-243.
- NORTH G.R., BELL T.L. and CAHALAN R.F., 1982: Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions, *Monthly Weather Review*, 110: 699-706.
- ODEKUNLE T.O., 2003: Rainfall and the length of the growing season in Nigeria, *International Journal of Climatology*, 24(4): 467-479.
- ODEKUNLE T.O., ORIMOOGUNJE I.O.O. and AYANLADE A., 2007: Application of GIS to Assess rainfall Variability impacts on crop yield in Guinea Savanna part of Nigeria, *African Journal of Biotechnology*, 6(18): 2100-2113
- OJO O., 1977: The climates of West Africa, Heinemann, London, xvii, 218 p.
- OLANIRAN O.J., 1983: The Onset of the Rains and the Start of the Growing Season in Nigeria, *Nigerian Geographical Journal*, 26: 81-88.
- OLANIRAN O.J., 1991: Evidence of climatic change in Nigeria based on annual séries of rainfall of différent daily amounts, 1919-1985, *Climatic change*, 19: 319-341.
- OLIVRY J.-Cl. 1986 : Fleuves et rivières du Cameroun, Monographies hydrologiques, MESRES/ORSTOM, n° 9, 733 p. + 2 cartes.

OLIVRY J.-Cl., BRIQUET J.-P. et MAHÉ G., 1994 : De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies, In Servat E., Hugues D., Fritsch J.M., Hulme M. (Eds), *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*, Proceedings de la conférence Abidjan'98, ORSTOM/AISH/UNESCO, AISH Publication, 252: 189-197.

OLIVRY J. C., 1997: Long term effects of rain shortage: the ill rivers of Western and Central Africa. *FRIEND General Reponl UNESCO IHP V. UNESCO*, IS8-162. Paris, France

OLSSON L., EKLUNDH L. and ARDO J., 2005: A recent greening of the Sahel-trends, patterns and potential causes, *Journal of Arid Environments*, 63: 556-566.

OMOTOSHO J.B., BALOGUN A.A. and OGUNJOBI K., 2000: Predicting monthly and seasonal rainfall, onset and cessation of the rainy season in West Africa using only surface data, *International Journal of Climatology*, 20: 865-880.

OMOTOSHO B.J., 1992: Long-range prediction of the onset and the end of the rainy season in West Africa, *International Journal of Climatology*, 12: 369-92.

ONANA J., TOUFFET J., ALEXANDRE D.-Y., YONKEU S., ASONGWED-AWA A., MVONDO AWONO J.-P. et TARLA F.N., 2002 : La végétation herbacée des zones humides du nord-Cameroun. Phytosociologie et utilisation pastorale, Actes du colloque, « Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis », Garoua, Cameroun, 27-31 mai 2002, PRASAC N'Djamena, Tchad et CIRAD Montpellier, France, 8 p.

ONGUENE MALA, 1993 : Différenciations pédologiques dans la région de Yaoundé (Cameroun) : transformation d'un sol ferrallitique rouge en sol à horizon jaune et relation avec l'évolution du modèle, Thèse de Doctorat, université de Paris 06, 257 p.

OZER P., ERPICUM M., DEMARÉE G. and VANDIEPENBEECK M., 2003: The Sahelian drought may have ended during the 1990s, *Hydrological Sciences Journal*, 48(3): 489-492.

PATUREL J.-E., LUBES H., SERVAT E., DELATTRE M.O., 1996 : Séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et centrale, XII^e Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 10-11 octobre 1996, communication.

PATUREL J.-E., SERVAT E., DELAT M.O. et LUBÈS-NIEL H., 1998 : Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique, *Hydrological Sciences Journal*, 43(6): 937-946.

PEIXOTO J.P. and OORT A.H., 1992: *Physics of climate*, American Institute of Physics, New York, 520 p.

PELTIER R., TRIBOULET C., NJITI C.F. et HARMAND J.-M., 1993 : Les fronts pionniers soudaniens. L'exemple du Nord-Cameroun, *Bois et forêts des tropiques*, n° 236, pp. 5-23.

PETTITT A. N., 1979: A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.* 28(2), 126-135.

PHILIPPON N., 2002 : Une nouvelle approche pour la prévision statistique des précipitations saisonnières en Afrique de l'Ouest et de l'Est : méthodes, diagnostics (1968-1998) et applications (2000-2001), Thèse de doctorat, Centre de Recherches de Climatologie, Université de Bourgogne, Dijon, France, décembre 2002, 241 p

PIAS J. et GUICHARD E., 1956 : Sols hydromorphes à alcalis et salés à alcalis de la partie méridionale de la cuvette tchadienne (Tchad-Cameroun), Sixième Congrès de la science du sol, ORSTOM, n°6, vol. 5, pp. 425-432.

PINZON J., BROWN M.E. and TUCKER C.J., 2005: Satellite time series correction of orbital drift artifacts using empirical mode decomposition (EMD), In N. Huang (Editor), Hilbert-Huang, Transform: Introduction and Applications, pp. 167-186.

POCCARD I., 1996 : Approche des relations entre OLR, pluies et NDVI en Afrique, Mémoire de DEA, Centre de Recherches de Climatologie, université de Bourgogne, Dijon, 46 p.

POICAM WADJA KEMAJOU J. et SUNDERLIN W., 1999 : L'impact des migrations sur le couvert forestier du Sud-Cameroun, Center for International Forestry Research (CIFOR), Rapport de recherche, 73 p.

POLCHER J., 1994 : Étude de la sensibilité du climat tropical à la déforestation, Thèse de doctorat d'État, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.

POON E., WESCOTT D. A., BURROWS D., WEBB A. 2007: Assessment of research needs for the management of invasive species in the terrestrial and aquatic ecosystems of the Wet Tropics, Csiro/James Cook university, 145P.

POUCHIN T., DEBRIE J. et BOURCIER A., 2002 : L'observation de la végétation de l'Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale : l'apport de végétation normalisé, *Sécheresse*, vol. 13, n° 3, pp. 187-195.

PRINCE S.D., BROWN DE COLSTROUN E. and KRAVITZ L.L., 1998 : Increased rain-use efficiencis indicate no extensive Sahelian désertification, *Global Change Biology*, 4: 359-374.

RAHMAN M., HASAN M.R., OBA T. and SHIMIZU K., 2006: Effect of *rpoS* gene knockout on the metabolism of *Escherichia coli* during exponential growth phase and early stationary phase based on gene expressions, enzyme activities and intracellular metabolite concentrations, *Biotechnology & Bioengineering*, 94: 585-595.

RAMAGE C.S., 1971: *Monsoon Meteorology*, Academic Press, 270 p.

RAYNER N.A, BROHAN P., PARKER D.E., FOLLAND C.K., KENNEDY J.J., VANICEK M., ANSELL T. and TETT S.F.B., 2005: Improved analyses of changes and uncertainties in

sea surface temperature measured *in situ* since the mid-nineteenth Century: the HadSST2 data set, *Journal of Climatology*, 19: 446-469.

REDELSPERGER J.-L., THORNCROFT C.D., DIEDHIOU A., LEBEL Th., PARKER D.J. and POLCHER J., 2006: African Monsoon Multidisciplinary Analysis: An International Research Project and Field Campaign, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(12): 1739-1746.

RICHARD Y. et POCCARD I., 1998: A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa, *International Journal of Remote Sensing*, 19: 2907-2920.

RICHARD Y., CAMBERLIN P. et FAUCHEREAU N., 2002 : El Niño-La Niña : cohérence intrasaisonnière de la variabilité pluviométrique interannuelle en Afrique du Sud, *Espace géographique*, vol. 1, pp. 63-72.

RICHMAN M.B., 1986: Review article: Rotation of principal components, *Journal of Climatology*, 6: 293-335.

RIEHL H., 1945: Waves in the easterlies and the polar front in the tropics, *Miscellaneous Rep.*, 17, Department of Meteorology, University of Chicago, 79 p.

RIGNOT E.J.M. and VAN ZYL J.J., 1993: Change detection techniques for ERS-1 SAR data, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 31(4): 896-906.

RONDEAUX G., STEVEN M. and BARET F., 1996: Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices, *Remote Sensing of Environment*, 55: 95-107.

ROOSE E., 2007 : Restauration de la productivité des sols tropicaux, *Actes des JSIRAUF, Hanoi (Viêt-Nam)*, 6P.

ROSENLOF K.H., STEVENS D.E., ANDERSON J.R. and CIESIELSKI P.E., 1986: The Walker circulation with observed zonal winds, a mean Hadley cell, and cumulus friction, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 43(5): 449-467.

ROSNAY P. (de), 1999 : Représentation de l'interaction sol-végétation-atmosphère dans le modèle de circulation général du laboratoire de météorologie dynamique, Thèse de doctorat, Université de Paris 06, 189 p.

ROSSEL F. and GARBRECHT J., 2000: Analysis and improvement of a divisional monthly precipitation index for the Southern great plains of the United States, *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 13, n°1, pp. 39-46.

ROUSE J.W., HAAS R.W., SCHELL J.A., DEERING D.W. and HARLAN J.C., 1974: Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation, NASA/GSFC Type-III, Final Report, Greenbelt (Maryland), 164 p.

ROWELL D.P., 2003: The impact of Mediterranean SSTs on the Sahelian rainfall season, *Journal of Climate*, 16: 849-862.

ROWELL D.P., FOLLAND C.K., MASKELL K., and WARD M.N., 1995: Variability of summer rainfall over tropical North Africa (1906-1992), Observations and modelling, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 121: 669-674.

RUIZ-BARRADAS A., CARTON J.A. and S. NIGAM, 2000: Structure of interannual-to-decadal climate variability in the tropical Atlantic sector, Journal of Climate, 13: 3285-3297.

SADOURNY R., 1994 : Le Climat de la Terre, Flammarion, coll. Dominos, 126 p.

SALL S.M., 1997 : Interaction entre les ondes tropicales et les systèmes convectifs sur l'Afrique de l'Ouest durant les étés 1990, 1993 et 1994, Thèse de Docteur-Ingénieur, École Supérieure Polytechnique, Dakar, 134 p.

SAMBA-KIMBATA M. J., 1991 : Précipitations et bilans de l'eau dans le bassin forestier du Congo et ses marges, Thèse d'Etat, Centre de Recherches de Climatologie, Université de Bourgogne, Dijon, 241 p. + 163 fig.

SANTIAGO-JEGADEN A. et SUCHEL J.-B., 1991 : Les bilans hydriques au Cameroun. Essai de synthèse cartographique, Cahier n°13 du Centre de Recherches de Climatologie, Université de Bourgogne, Dijon, pp. 105-137.

SANTIAGO-JEGADEN A., 1998 : Impact des états de surface continentaux sur la dynamique pluvieuse au Cameroun. Répartition spatiotemporelle des indicateurs Météosat : occurrences de nuages à sommet froid et températures maximales de brillance, Thèse de doctorat d'État, Atelier national de Reproduction des Thèses, Lille.

SANTOIR C. et BOPDA A., 1995 : Atlas régional du Sud-Cameroun, Éd. ORSTOM, Paris, 53 p., 21 planches.

SAPORTA G., 2006 : Probabilités, analyse des données et statistiques, Éd. Technip, 2nd édition, 582 p.

SCHNELL R., 1971 : Introduction à la phytogéographie des pays tropicaux. Les problèmes généraux, vol. II : Les milieux, les groupements végétaux, Gauthier-Villars, Paris, pp. 503-951.

SCHNELL R., 1976 : Introduction à la phytogéographie des pays tropicaux. La flore et la végétation de l'Afrique tropicale, vol. 3 et 4, Gauthier-Villars, Paris, 470 p. et 378 p.

SCHWARTZ D., VINCENS A., BERTAUX J., ELENGA H., SERVANT S., ALEXANDRE A., BONVALLOT J., GUILLET B., MARIOTTI A., DE NAMUR C., NGUETSOP F., REYNAUD-FARRERA I., SERVANT M., YOUTA-HAPPI J., DELÈGUE M.-A., FUHR M., 1997 : Réponses des végétations d'Afrique centrale atlantique (Congo, Cameroun) aux changements climatiques depuis l'Holocène moyen : pas de temps, variabilité spatiale, Communication aux Journées PIREVS de Toulouse, nov. 1997, 10 p.

SELESHI Y. et CAMBERLIN P., 2006: Recent changes in dry spell and extreme rainfall events in Ethiopia, Theoretical and Applied Climatology, 83: 181-191.

- SERRAUD C., 2006 : Étude des interactions atmosphère-océan contrôlant les pluies en Atlantique tropicale, Mémoire de Master 2, Université Paul Sabatier, Toulouse, sp.
- SERVAIN J., WAINER I., AYINA H.L. and ROQUET H., 2000: The relationship between simulated climatic variability modes of the tropical Atlantic, *International Journal of Climate*, 20: 939-953.
- SERVAT E., 1994 : ICCARE. Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en Afrique de l'Ouest non sahélienne - Présentation du programme. ORSTOM, Abidjan, Côte d'Ivoire, rapport n°1.
- SERVAT E., PATUREL J.-E., LUBÈS-NIEL H., KOUAMÉ B., MASSON J., TRAVAGLIO M. et MARIEU B., 1999 : De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne, *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 12, n°2, pp. 363-387.
- SIETCHIPING R., 2001b : Mise en évidence de la dynamique urbaine en milieu tropical à partir d'images Landsat : application à la ville de Yaoundé, Cameroun, Paper presented at the Journées Scientifiques du Réseau Télédétection Yaoundé (Cameroun), pp. 128-129.
- SIETCHIPING R., 2003 : Évolution de l'espace urbain de Yaoundé, au Cameroun, entre 1973 et 1988 par télédétection, *Télédétection*, vol. 3, n° 2-3-4, pp. 229-236.
- SIGHA-NKAMDJOU L., SIGHOMNOU D. & LIENOU G., 1998 : Variabilité des régimes hydrologiques des cours d'eau de la bande méridionale du plateau sud-camerounais, *Water Resources Variability in Africa during the XXIth Century* (ed. par E. Servat, D. Huches, J.-M. Fritsch & M. Hulme, Proceedings Abidjan Symposium, November 1998, IAHS Publ. 252: 215-222
- SILLANS R., 1958 : Les savanes de l'Afrique centrale française. Essai sur la physionomie, la structure des formations végétales ligneuses de l'Oubangui-Chari, Le Chevalier, Paris , 423 p.
- SIVAKUMAR M.V.K., 1988: Predicting rainy season potential from the onset of the rains in southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa, *Agricultural and Forest Meteorology*, 42: 295-305.
- SNIJDERS, T.A., 1986: Interstation correlations and non stationarity of Burkina Faso Rainfall, *Journal of Climatology and Applied Meteorology*, 25: 524-531.
- STERN R.D., DENNET M.D. and GARBUTT D.J., 1981: The start of the rains in West Africa. *International Journal of Climatology*, 1: 59-68.
- SUCHEL J.-B., 1972 : La répartition des pluies et les régimes pluviométriques au Cameroun, *Travaux et Documents de Géographie Tropicale*, CEGET, Bordeaux, 5, 287 p.
- SUCHEL J.-B., 1987 : Les climats du Cameroun, Thèse de Doctorat d'État, Université de Bordeaux III, France, 3 vol., 1 186 p.
- SUCHEL J.-B., 1988 : Quelques aspects significatifs de l'influence du relief sur la répartition des pluies au Cameroun, *Actes des Journées de Climatologie*, Mont Rigi, pp. 269-289.

- SULTAN B. and JANICOT S., 2000: Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability, *Geophysical Research Letters*, 27: 3353-3356.
- SULTAN B. and JANICOT S., 2003b: The West African monsoon dynamics. Part II: The 'preonset' and 'onset' of the summer monsoon, *Journal of Climate*, 16: 3407-3427.
- SULTAN B. et JANICOT S., 2004 : La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles saisonnière et intrasaisonnière : mise en place de la mousson et variabilité intrasaisonnière de la convection, *Sécheresse*, vol. 15, n° 4, pp. 321-330.
- SULTAN B., JANICOT S. and DIEDHIOU A., 2003a: The West African monsoon dynamics. Part I: Documentation of intraseasonal variability, *Journal of Climate*, 16: 3389-3406.
- TAPSOBA D., 1997 : Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques ouest-africains et leur récent changement, Thèse de doctorat, université Paris 11-Orsay, 145 p.
- TCHAWA P., 1991 : Dynamique des paysages sur la retombée méridionale des hauts plateaux de l'ouest-Cameroun, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux III-Michel de Montaigne, 400 p.
- TCHIADEU G. et MALOBA MAKANGA J.-D., 1997 : Variabilité de la pluviométrie au Cameroun de 1951 à 1993 et ses relations avec la température de la surface de la mer, *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, vol. 9, pp. 512-519.
- TCHIADEU G.M., 2000 : *Calendriers des pluies et bilans hydriques au Cameroun (1951-1993)*, thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 232 p.
- THOMSON R.M., PAYNE S.W., RECKER E.E. and REED R.J., 1979: Structure and properties of synoptic-scale wave disturbances in the Intertropical Convergence Zone of the Eastern Atlantic, *Journal of Atmospheric Sciences*, 36: 53-72.
- THORNCROFT C.D. and BLACKBURN M., 1999: Maintenance of the African easterly jet. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125:763-786.
- THORNTHWAITE C.W. 1955: The water balance, *Climatology*, VIII(1), 104 p.
- TOU J. and GONZALEZ R., 1974: *Pattern Recognition Principles*, Addison-Wesley, San Mateo, CA, 377 p.
- TOWNSHEND J.R.G. and JUSTICE C.O., 1986: Analysis of the dynamics of African vegetation using the Normalized Difference Vegetation Index, *International Journal of Remote Sensing*, 8(8): 1189-1207.
- TRZASKA S., MORON V. and FONTAINE B., 1996: Global atmospheric response to specific linear combinations of the main SST modes. Part I: Numerical experiments and preliminary results, *Annales Geophysicae*, 14: 1066-1077.
- TSALEFAC M., 1983 : L'ambiance climatique des hautes terres de l'ouest Cameroun, Thèse de Doctorat de 3^e cycle, Université de Yaoundé (Cameroun), 398 p.

- TSALEFAC M., 1994 : Crises climatiques récentes et bouleversements du système économique traditionnel à Fongo-Tongo (monts Bamboutos, Cameroun), Savanisation process in tropical Africa (London), II: 95-106.
- TUCKER C.J. and ANYAMBA A., 2005: Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003, *Journal of Arid Environments*, 63(3): 596-614
- TUCKER C.J. and NICHOLSON S.E., 1999: Variation in the size of the Sahara Desert from 1980 to 1997, *Ambio*, 28: 587-591.
- VALET S., 1980: Map of the slopes of the agro-geological landscapes in West Cameroon, Centre de Cooperation Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier.
- VAUCLAIR F. et PENHOAT Y. (du), 2001: Interannual variability of the upper layer of the tropical Atlantic Ocean from *in situ* data between 1979 and 1999, *Climate Dynamics*, 17: 527-546.
- VENNETIER P., 1969 : Le développement urbain en Afrique tropicale, *Les Cahiers d'Outre-Mer*, Revue de géographie de Bordeaux et de l'Atlantique, Vol. 22, n° 85, pp. 5-62.
- VERHOEF W., MENENTI M. and AZZALI S., 1996: A colour composite of NOAA-AVHRR NDVI based on time series analysis (1981-1992), *International Journal of Remote Sensing*, 17(2): 231-235.
- VERNIER P. et HAMASSELBE A., 1988 : Amélioration de la riziculture sur nappe phréatique. Cinq années de recherche au Nord-Cameroun, *Agronomie tropicale*, Vol. 43, n°1, pp. 3-17.
- VIZY E.K. and COOK K.H., 2001: Mechanisms by which Gulf of Guinea and Eastern North Atlantic sea surface temperature anomalies can influence African rainfall, *Journal of Climate*, 14: 795-821.
- WALTER M.W. 1967: Length of the rainy season in Nigeria, *Nigerian Geographical Journal*, 10: 123-8.
- WANZIE S., 1993: The Mangrove in Cameroon: general state of knowledge, *Proceedings of the Asia-Pacific Symposium on Mangrove Ecosystem*, Yuk-Shan Wong and Nora, F.Y. Tam, eds., The Hong Kong University of Science & Technology, 1-3 September, 368 p.
- WARD M.N., 1998: Diagnosis and short-lead time prediction of summer rainfall in tropical North Africa at interannual and multidecadal timescales, *Journal of Climate*, 11: 3167-3191.
- WESSELS K.J., PRINCE S.D., MALHERBE J., SMALL J., FROST P.E., VANZYL D., 2007: Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa, *Journal of Arid Environment*, 68(2): 271-297.
- WHITE F., 1983: The vegetation of Africa, UNESCO/AETFAT/UNSO Memoir, 356 p. and maps.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION / GLOBAL WATER PARTNESHIP, 2003 : Gestion intégrée des eaux de crues : cas de la plaine d'inondation du fleuve Logone, support technique, 9P.

YAO T. BROU, 2005 : climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte-d'Ivoire, mémoire d'HDR, Université des Sciences et Technologies de Lille, 212 P.

YOUTA-HAPPI J. et BONVALLOT J., 1996 : La disparition des savanes au Centre-Cameroun entre 1950 et 1990, Symposium International Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux, Bondy, 20-22 mars 1996, pp. 199-200.

YOUTA-HAPPI J., 1998 : Arbres contre graminées : la lente invasion de la savane par la forêt au Centre-Cameroun. Thèse de doctorat, Université Paris IV-Sorbonne, 237 p

ZONING A., 1993: Mangroves of Cameroon, In Diop E.S., Conservation and sustainable utilization of mangrove forests in Latin America and Africa regions, Part II: Africa, pp. 193-211, Mangrove Ecosystems Technical Reports vol. 3, ITTO/ISME Project PD114/90, Okinawa, Japon, ISME, 262 p.

ANNEXE A

TEXTE INTEGRAL DE L'ARTICLE A PARAITRE DANS SECHERESSE

**« Variabilité intrasaisonnière des précipitations et de leur distribution :
impacts sur le développement du couvert végétal dans le Nord du
Cameroun (1982-2002) ».**

Résumé

La variabilité intrasaisonnière des précipitations est étudiée dans le Nord-Cameroun (6°N-13°N et 11°E-16°E) à partir des données journalières d'une vingtaine de stations, ainsi que leur relation avec la variabilité du couvert végétal à travers les données bimensuelles de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) à 8 km de résolution, sur la période 1982-2002. En domaine soudanien (situé au sud de 9°N), la saison des pluies (avec pluies mensuelles > 50 mm s'étend entre les mois d'avril et octobre, et entre mai et septembre en domaine sahélien (nord de 9°N). Dans l'ensemble, les anomalies saisonnières sont corrélées significativement (test de Monte-Carlo à 95 %) au nombre de jours à faibles et à moyennes précipitations ($P \leq 40$ mm), puisqu'au demeurant les pluies exceptionnelles ne représentent que 15 % environ des cumuls saisonniers. Les corrélations entre les cycles annuels des précipitations et du NDVI correspondant (moyenne des trois pixels les plus proches de celui où se situe la station) montrent qu'ils évoluent de façon synchrone en domaine soudanien et avec un temps de réponse de la végétation d'environ deux quinzaines en domaine sahélien. L'on s'intéresse particulièrement aux séquences sèches > 5 jours, ainsi qu'à leur impact sur le NDVI en début de saison de pluies, période critique pour la levée de dormance de la plupart des espèces. Les corrélations (séquences sèches > 5 jours et NDVI) ne sont pas significatives (test de Monte-Carlo à 95 %) en domaine soudanien, alors que seules quelques stations sont concernées en domaine sahélien. Si la contrainte pluviométrique de la végétation est plus forte dans cette dernière région, l'évolution de la productivité primaire répond également à des facteurs démographiques qu'il serait important d'intégrer dans les prochaines études.

Mots-clés : variabilité, séquences sèches, précipitations, intrasaisonnier, NDVI.

Abstract

The intraseasonal variability of rainfall is studied in northern Cameroon (6°N-13°N and 11°E 16°E), using daily data from twenty stations, along with their relationship with the vegetation cover variability, through 15-days data of the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) at 8-km spatial resolution, over the period 1982-2002. The rainy seasons (monthly amounts > 50mm) extends from April to October in Sudanese area (south of 9°N), and between May and September in the Sahelian area (north of 9°N). Overall, seasonal anomalies are significantly correlated (Monte Carlo test, 95%) with the number of days with low and moderate rainfall (≤ 40 mm) since heavy rainfall (> 40 mm) represents only 15% of seasonal amounts. Correlations between the annual cycles of precipitation and corresponding NDVI (average of the closest three pixels) show that both parameters change synchronously in the Sudanese belt, whereas in the Sahelian area, the start of vegetation occurs approximately one month after the rainfall onset. We are particularly interested in dry spells longer than five days, and their impact on vegetation in the early growing season, which is a critical period for the dormancy breaking of most species. Correlations (dry spells > 5 days/NDVI) are not significant (Monte Carlo test, 95%) in the Sudanese area, while only a few stations are concerned in the Sahelian area. If the pluviometric impact on vegetation is stronger in the

latter region, the evolution of the primary productivity also answers demographic factors that it would be important to integrate into next studies.

Keywords: variability, dry spells, rainfall, intra-seasonal, NDVI.

Dans le nord du Cameroun (ou Nord-Cameroun), les principales activités économiques que sont l'agriculture, l'élevage et la pêche sont fréquemment perturbées par certains aléas climatiques tels que les faux départs de la saison des pluies, les occurrences de longues séquences sèches intrasaisonniers, les raccourcissements de la saison des pluies, *etc.* [1]. Ceux-ci induisent une baisse des rendements agricoles et un renforcement de la pauvreté. Il en est ainsi dans la province de lla plus pauvre — et la plus peuplée — du pays, avec 56,3 % de la population qui vit en dessous du seuil de pauvreté (moins de 637 francs CFA par jour [2, 3]). La vulnérabilité climatique est d'autant plus marquée que les méthodes d'adaptation telle que l'irrigation sont encore très limitées. Aux latitudes où les contrastes saisonniers de température sont faibles, l'intérêt des études de variabilité climatique concerne souvent l'utilisation optimale de la réserve utile du sol — alimentée par les précipitations — qui n'est disponible que quelques mois dans l'année. La réserve utile est ici le volume d'eau que le sol est susceptible d'absorber et donc qui est utilisable par les végétaux. Jusqu'ici, la plupart des études se sont attelées à décrire les aspects moyens de la pluviométrie à différentes échelles temporelles ainsi que leur caractère erratique [4, 5, 6]. Quelques études— menées à partir de la fin des années 1990 — se sont intéressées aux facteurs sociopolitiques de l'évolution de la filière agricole dans le Nord-Cameroun [7]. En revanche, peu d'entre elles ont traité de l'impact du climat et notamment des précipitations. On peut cependant citer une étude récente qui a souligné l'importance de certaines variables climatiques dans le rendement de la culture du coton dans le nord du Cameroun [8], notamment les précipitations du mois de juin qui sont essentiellement modulées par la variabilité intrasaisonnière de la mousson ouest africaine. Seules de telles approches permettent de détecter les sécheresses intrasaisonniers qui mesurent le risque de stress hydrique susceptible de perturber le cycle végétatif des plantes et éventuellement leur rendement productif. En effet, les réponses du couvert végétal à un stress hydrique varient suivant leur propriété physiologique à résister ou non à l'intensité et à la durée de la perturbation, mais dépendent également de la période du cycle végétatif au cours de laquelle survient le stress.

I. Contexte scientifique et géographique

I.1. Originalité de l'étude et objectifs

L'activité végétative étant entièrement liée à la ressource en eau en Afrique tropicale, on relève une littérature abondante sur les relations spatiotemporelles entre la variabilité des précipitations et les indices de végétation, notamment le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), qui est l'indicateur le plus utilisé pour évaluer le signal photosynthétique au-dessus de la canopée. Ces études mettent en évidence les phénomènes de persistance, d'hystérésis (ici, constance de la valeur du NDVI malgré la hausse de la pluviométrie), ou les

temps de réponse de la végétation par rapport à la pluie [9, 10, 11]. Toutefois, ces études — effectuées pour la plupart à l'échelle régionale — ne cernent pas toujours les modulations d'échelle fine ainsi que les mécanismes sous-jacents liés à ces variations : leurs conclusions sont assez globalisantes et donc difficilement transposables. Au Cameroun, les différents biomes se calquent à peu près sur la répartition moyenne de la pluviométrie et, si des études d'inventaires botaniques ou réalisées sur des zones cibles, comme des mosaïques de végétation (forêt/savane, savane/steppe, etc.) ont montré les impacts des variations climatiques sur la végétation, peu d'études ont mesuré les mécanismes saisonniers de ces changements. Par ailleurs, la plupart des études ne vont pas au-delà de l'année 1993.

Dans cette étude, nous nous intéressons à la variabilité intrasaisonnière des précipitations dans le nord du Cameroun, ainsi qu'à ses impacts sur la productivité du couvert végétal au cours de la période 1982-2002. L'intérêt de travailler sur le nord du Cameroun relève de la plus grande sensibilité de la végétation de cette région aux variations pluviométriques, contrairement au sud du pays qui est à dominante forestière. Comparativement aux études à large maille, cette approche permet de déterminer les changements à l'échelle du pixel.

I.2. Présentation physique de la zone de l'étude

Le Nord-Cameroun s'étend entre les 6° et 13° degrés de latitude nord et entre les 11° et 16° degrés de longitude est. Il couvre les provinces de l'Adamaoua, du Nord et de l'Extrême Nord pour une superficie d'environ 16 3513 km² (Fig. 1).

La végétation comprend, du nord au sud, des steppes à épineux et des prairies périodiquement inondées (Yaérés) [12], qui se développent sur des vertisols topomorphes et hydromorphes et présentent un aspect dégradé en raison du pâturage intensif, des feux de brousse ou de la riziculture industrielle [13]. Autour du 9° parallèle, l'on rencontre les formations soudaniennes d'altitude sur les monts Alantika (1 880 m) et Mandara (1 442 m), dont les versants sont de plus en plus cultivés en raison de la forte densité des populations installées dans les plaines et les piémonts [3]. L'Adamaoua est une vaste région de plateaux, essentiellement pastorale, qui assure la transition entre les régions forestières du sud du pays et les formations sahéliennes du nord. Sa partie septentrionale est constituée de formations soudaniennes plus ou moins arbustives, alors que le sud est le domaine des savanes boisées et des forêts claires soudano-guinéennes. L'occupation du sol (anthropisation) répond à des critères historiques, pédologiques, climatiques, sanitaires et surtout économiques. En raison de sa situation géographique plus continentale, le Nord-Cameroun est, pour une grande période de l'année, sous l'emprise de l'alizé saharien mais, dans l'ensemble, la variabilité saisonnière est régie par la translation méridienne de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), ainsi que par les mécanismes associés à la mousson africaine. En effet, la répartition saisonnière des pluies dans le Nord-Cameroun dépend des propriétés thermodynamiques de la mousson [4] au moment où l'anticyclone de Sainte-Hélène peut conjuguer son action avec celle des dépressions sahariennes pour étendre son influence jusqu'au sud du Sahara. Les régimes pluviométriques présentent un seul mode et les cumuls annuels vont de 1 500 mm dans le sud de la région à moins de 500 mm dans la partie septentrionale.

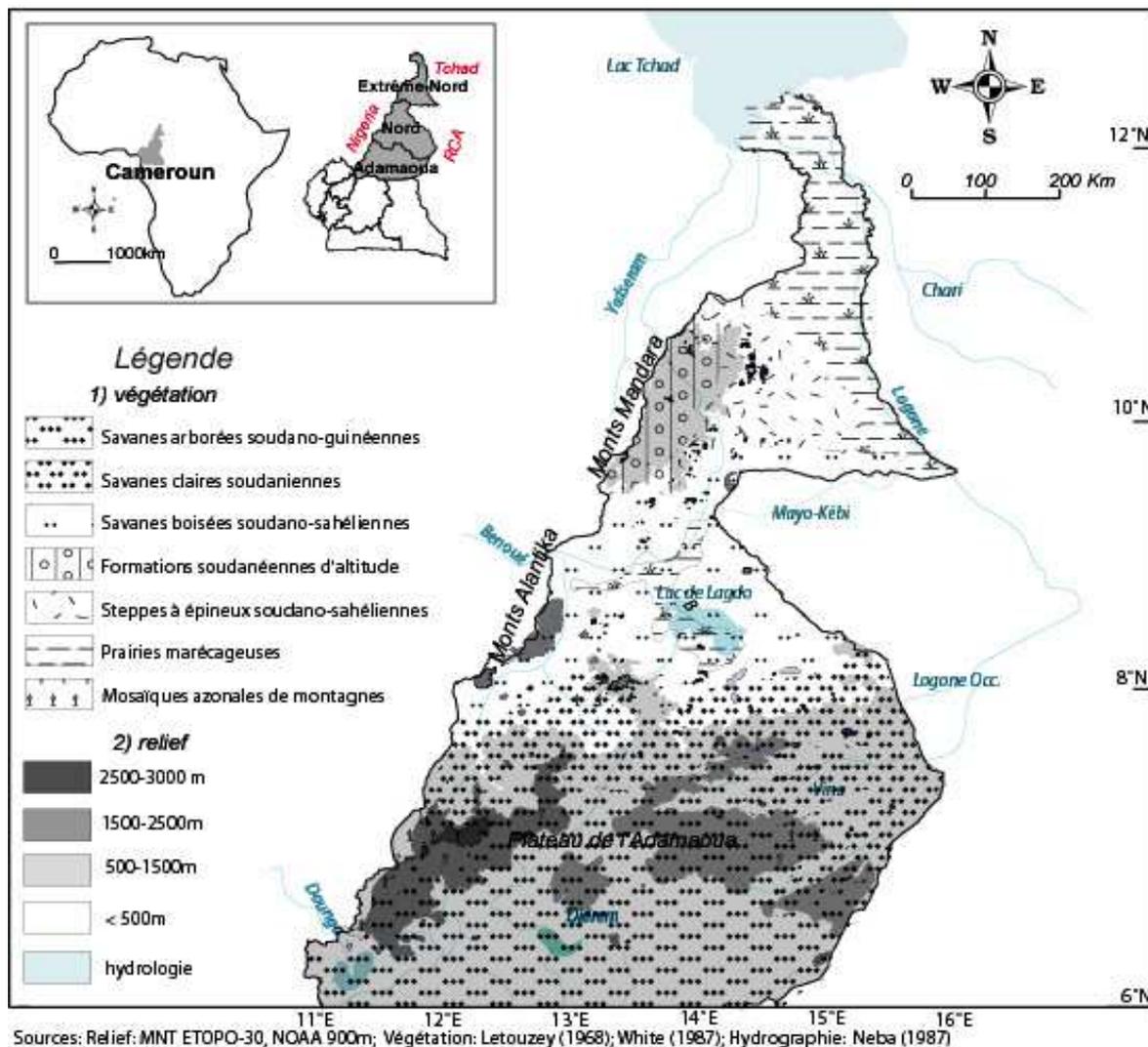


Figure 1 : Présentation physique de la région d'étude.

Dans cette dernière région, les températures moyennes sont de 28°C, avec cependant des maxima de près de 34°C au cours de certains mois. Les amplitudes thermiques sont fortes (environ 7°C), ainsi que les déficits de saturation moyen, et la sévérité des conditions climatiques annoncent déjà les climats aride ou désertique de l'Afrique du Nord. En revanche, aux latitudes de l'Adamaoua, le climat est moins rude (saisons moins tranchées, températures moyennes d'environ 24°C, amplitudes thermiques faibles, etc.), puisque cette région bénéficie des assauts de l'alizé océanique qui adoucit les contrastes. Ces disparités spatiales exigent ainsi de tenir compte séparément des régions situées de part et d'autre du 9^e parallèle, qui seront dénommées *soudanienne* pour la région située au sud de cette latitude et *sahélienne* pour celle située au nord de cette latitude. Signalons toutefois que la régionalisation des nomenclatures suivant le critère pluviométrique n'est pas uniforme en Afrique tropicale puisque les corrélations entre les nomenclatures et leur répartition spatiale peuvent varier entre auteurs ou même évoluer pour un même auteur suivant les échelles spatiales et les publications.

II. Données et méthodes

II.1. Données

II.1. a) Précipitations

Si des approches aux échelles temporelles fines ont l'avantage de se rapprocher des processus physiques associés à la pluviogénèse ainsi que de ceux liés au vécu des hommes et à leurs activités, leur difficulté réside dans la disponibilité de données fiables et complètes sur une longue période. Dans le Nord-Cameroun, les données de plusieurs stations ne couvrent que la période post-1993. Seules vingt stations présentent des données complètes sur la période 1982-2002. Les données sont à l'échelle journalière et les stations sont irrégulièrement réparties sur la région de l'étude : quinze stations appartiennent au domaine sahélien alors que cinq stations seulement représentent le domaine soudanien. La plupart de ces stations appartiennent au réseau d'observation de la Sodécoton (Société de Développement du Coton du Cameroun). D'autres données sont fournies par la Direction nationale ainsi que les Services départementaux de Météorologie du Cameroun. La comparaison de ces données multisources a permis de contrôler leur qualité.

II.1.b) NDVI

Les données de NDVI utilisées dans ce travail proviennent du capteur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Elles couvrent la surface continentale à l'échelle globale et sont disponibles à partir d'avril 1981. Cet indice est obtenu en faisant le rapport normalisé de la différence entre la réflectance de la bande spectrale du visible (VIS) et celle du proche infrarouge (PIR) du capteur [14] :

$$\text{NDVI} = (\text{VIS} - \text{PIR}) / (\text{VIS} + \text{PIR})$$

Le résultat est une estimation de la quantité d'énergie absorbée par la chlorophylle du couvert végétal : le NDVI est donc un indicateur de la biomasse verte au-dessus d'un lieu. La base de données utilisée dans cette étude est diffusée par le Global Inventory Monitoring and Modeling Systems (GIMMS) et comprend les cartes de synthèse bimensuelles (tous les quinze jours) de NDVI à 8 km de résolution. Les processus de synthèse incluent les corrections atmosphériques (nuages, aérosols stratosphériques, cours d'eau, etc.), ainsi que celles liées à la calibration des capteurs puisque plusieurs missions se sont succédées jusqu'ici : NOAA-7 (de 1981 à 1985) ; NOAA-9 (de 1985 à 1988 et d'août 1994 à janvier 1995) ; NOAA-11 (de 1989 à 1994) ; NOAA-14 (de 1995 à 2000) et NOAA-16 (depuis 2000). On pourra se référer à [15] pour des informations supplémentaires concernant ces données. Les données de NDVI ont été considérées sur la fenêtre du Nord-Cameroun pour un ensemble de 5141 points (97 et 53 longitudes) et sur la période 1982-2002.

II.2. Méthodes

II.2. a) Détermination de l'occurrence et de la longueur d'une séquence sèche

Une séquence sèche influe sur le cycle de croissance et le développement de la végétation pendant les mois de saison des pluies. Sachant que la présente étude prend en compte le couvert végétal au sens large, l'on admet que le cycle végétatif (du moins celui de

la végétation naturelle) commence dès que surviennent les premières pluies ($P > 1$ mm), après la saison sèche. Sont considérés comme mois de saison humide ceux qui présentent un cumul pluviométrique supérieur ou égal à 50 mm ($P \geq 50$ mm) : il s'agit des mois de mai à septembre pour le domaine sahélien (nord de 9°N) et de la période avril-octobre pour le domaine soudanien (sud de 9°N). Cette différence de longueur de saisons des pluies découle des différences de circulation atmosphérique sur les deux domaines, contrôlée par la translation méridienne saisonnière de la ZCIT au sein du système de mousson africain. De ce fait, les séquences sèches sont parfois définies pour la région sahélienne comme une période d'au moins deux jours consécutifs sans pluies ($P < 1$ mm), observées chaque année entre le 1^{er} mai et le 30 septembre, alors que pour le domaine soudanien la période d'observation se situe entre le 1^{er} avril et le 31 octobre de chaque année de la période considérée. Signalons toutefois l'ambiguïté de prendre en compte une saison fixe quand on sait que, suivant les années, la longueur de la saison des pluies est susceptible de connaître des fluctuations.

À partir des données journalières de précipitations observées, on affecte aux jours secs ($P < 1$ mm) la valeur 1 et aux jours pluvieux ($P > 1$ mm) la valeur 0. On calcule ensuite, pour chaque année et pour chaque station, la longueur des séquences sèches à partir d'un minimum de deux jours secs consécutifs observés. Sachant que la succession de quelques jours secs ($P < 1$ mm) n'aura pas le même impact sur la végétation en début, en milieu ou en fin de cycle, plusieurs seuils sont testés : séquences de deux à quatre jours, de cinq à dix jours et supérieures à dix jours. Ces tests sont effectués sur les deux premiers mois de la saison des pluies, puisqu'il s'agit de la période critique pour la levée de dormance ou de reprise pour la plupart des espèces, après une longue saison sèche. C'est donc cette période qui déterminera la croissance et le développement des végétaux. Par ailleurs, l'occurrence des séquences sèches en milieu de cycle n'est préoccupante pour la plante que lorsque celles-ci sont relativement longues (par exemple supérieures à dix jours) pour réduire ou épuiser la réserve utile des sols. Mais encore faut-il que cette séquence sèche ne soit pas précédée de cumuls quotidiens exceptionnels (par exemple $P > 50$ mm).

II.2.b) Extraction du NDVI et stations pluviométriques

Un métafichier de données bimensuelles du NDVI entre les mois de mars et novembre (dix-huit valeurs annuelles) et couvrant la période 1982-2002 a, au préalable, été constitué sur le nord du Cameroun. La projection des stations pluviométriques sur cette carte a ensuite permis de considérer la moyenne des trois pixels de NDVI les plus proches de chaque point. L'intérêt de prendre en compte trois pixels adjacents à chaque station (plutôt que l'unique pixel sur lequel est localisée la station) relève des incertitudes de dérives orbitales inhérentes à la structure même de ces données, puisque l'angle de prise de vue des capteurs est susceptible d'être décalé (un pixel considéré à une date donnée n'est pas forcément le même à une autre date). Toutefois, nous restons conscient d'une part du lissage des données par l'utilisation de la moyenne des quatre pixels et d'autre part par la comparaison entre des données ponctuelles (précipitations) et celles représentant une aire de 64 km^2 (NDVI).

III. Résultats

III.1. Répartition spatiotemporelle des précipitations dans le Nord-Cameroun (1982-2002)

La carte de la répartition des cumuls annuels moyens (1982-2002) montre que les isohyètes suivent un gradient nord/sud, légèrement orienté nord-est/sud-ouest au sud de 8°N (Fig. 2a). Comme déjà signalé précédemment, le cycle annuel est unimodal et présente un maximum en août (250 mm).

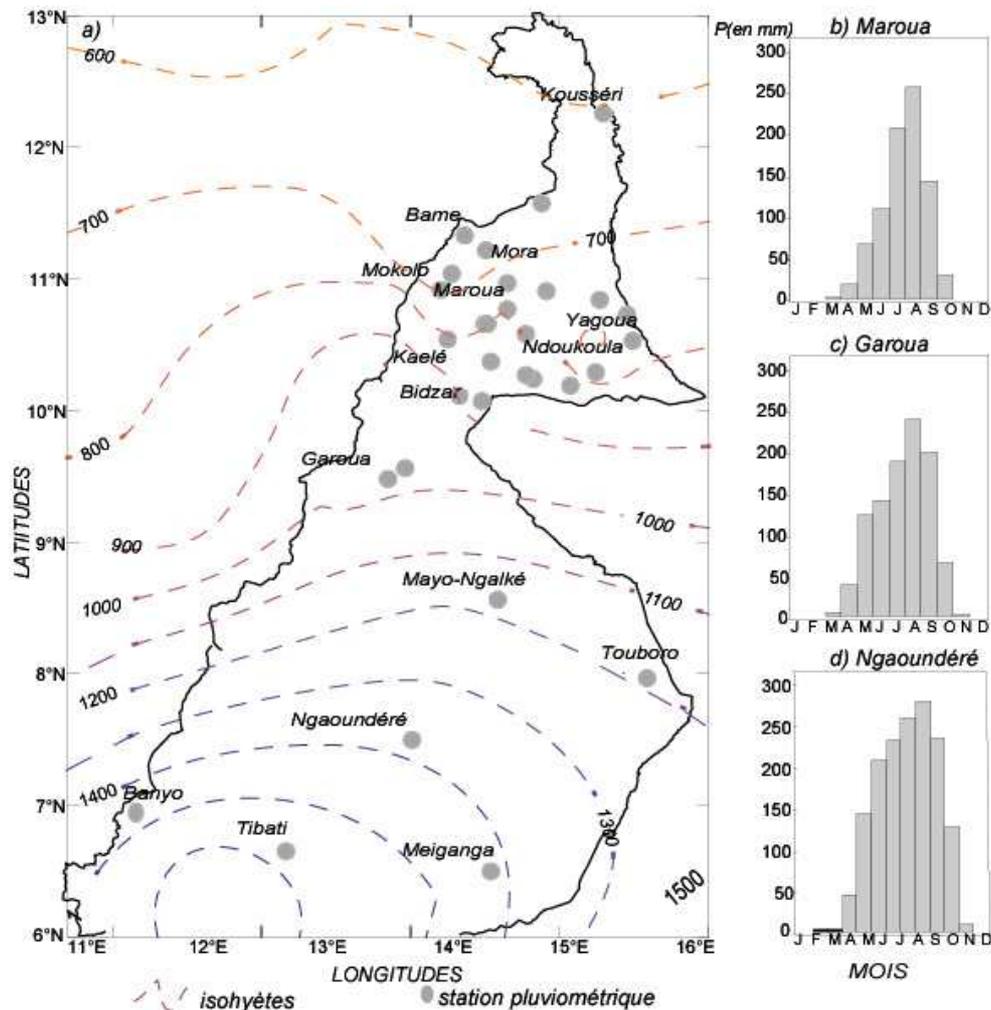


Figure 2 : a) Répartition spatiale de précipitations dans le Nord-Cameroun (moyenne annuelle 1982-2002) ; b), c), d) : Cycles moyens annuels des stations de Maroua, Garoua et Ngaoundéré, respectivement, sur la période 1982-2002.

Les cumuls supérieurs à 50 mm (Fig. 2b, 2c et 2d) s'échelonnent *grosso modo* de mai à septembre dans le nord (exemple de la station de Maroua), et d'avril à octobre dans la partie méridionale (exemple de la station de Ngaoundéré). La répartition des cumuls pluviométriques annuels présente, du nord au sud, des amplitudes maximales de 900 mm

entre les stations. De fortes variations sont signalées avant la décennie 1990, avec des moyennes inférieures à 800 mm et 1 300 mm en domaines sahélien et soudanien respectivement, alors qu'au cours de la période post-1990, l'on note une légère hausse des pluies (*Fig. 3a et 3d*). Dans l'ensemble, l'année 1983 est la plus déficitaire ($P < 600$ mm en domaine sahélien et $P < 1\ 100$ mm en domaine soudanien), alors que l'année 1994 est la plus excédentaire. Mais les amplitudes importantes entre stations (non présenté) témoignent d'une grande variabilité spatiale, qui constitue d'ailleurs la principale caractéristique des précipitations tropicales.

III.2. Variabilité saisonnière des précipitations entre 1982 et 2002

La comparaison des cumuls saisonniers entre les deux domaines pluviométriques montre que la saison sèche contribue pour moins de 5 % au total annuel. Cependant, la différence de longueur des saisons des pluies témoigne de l'impact du régime continental entre les deux domaines. La forte contribution de la saison des pluies (*Fig. 3b et 3e*) se reflète sur la répartition des anomalies qui présentent les mêmes tendances que la variabilité des cumuls annuels (*Fig. 3a*), c'est-à-dire une décennie 1980 essentiellement déficitaire et une décennie 1990 marquée par une plus forte occurrence d'années humides : la différence moyenne des cumuls saisonniers entre les deux sous-périodes est de 64 mm pour le domaine soudanien et de 116 mm pour le domaine sahélien.

Cette ré-humidification de la décennie 1990 a d'ailleurs été soulignée dans d'autres régions et notamment en Afrique de l'Ouest [16]. Afin de déterminer les facteurs qui impriment ces anomalies saisonnières, trois paramètres ont été analysés : (i) le nombre de jours secs ($P < 1$ mm), (ii) le nombre de jours à pluies faibles et moyennes ($1 \geq P \leq 40$ mm) et (iii) le nombre de jours à fortes précipitations ou pluies exceptionnelles ($P > 40$ mm). Ces différents seuils ont été fixés à partir des typologies des pluies journalières effectuées précédemment au Cameroun [3, 4] et en domaine soudano-sahélien africain [17, 18]. De manière générale, la délimitation des classes de pluies dépend du contexte bioclimatique et surtout des exigences de leur application. En domaine sahélien, on compte en moyenne cinquante à soixante jours secs entre mai et septembre au cours de la décennie 1980, contre trente à cinquante au cours de la décennie 1990 (*Fig. 3c*), ce qui est en adéquation avec les tendances décennales. En domaine soudanien (*Fig. 3f*), le nombre de jours secs par saison des pluies varie en moyenne de trente à soixante avec également une tendance à la baisse entre les décennies 1980 et 1990. Leur distribution ne présente pas de tendance particulière tout au long de la période. Le nombre de jours à faible ou moyenne pluviométrie ($1 \geq P \leq 40$ mm) occupe près de 75 % (environ cent soixante jours sur deux cent quatorze) de la saison des pluies en domaine soudanien et de 60 % (soixante-dix jours sur cent cinquante-trois) en domaine sahélien (*Fig. 3c et 3f*).

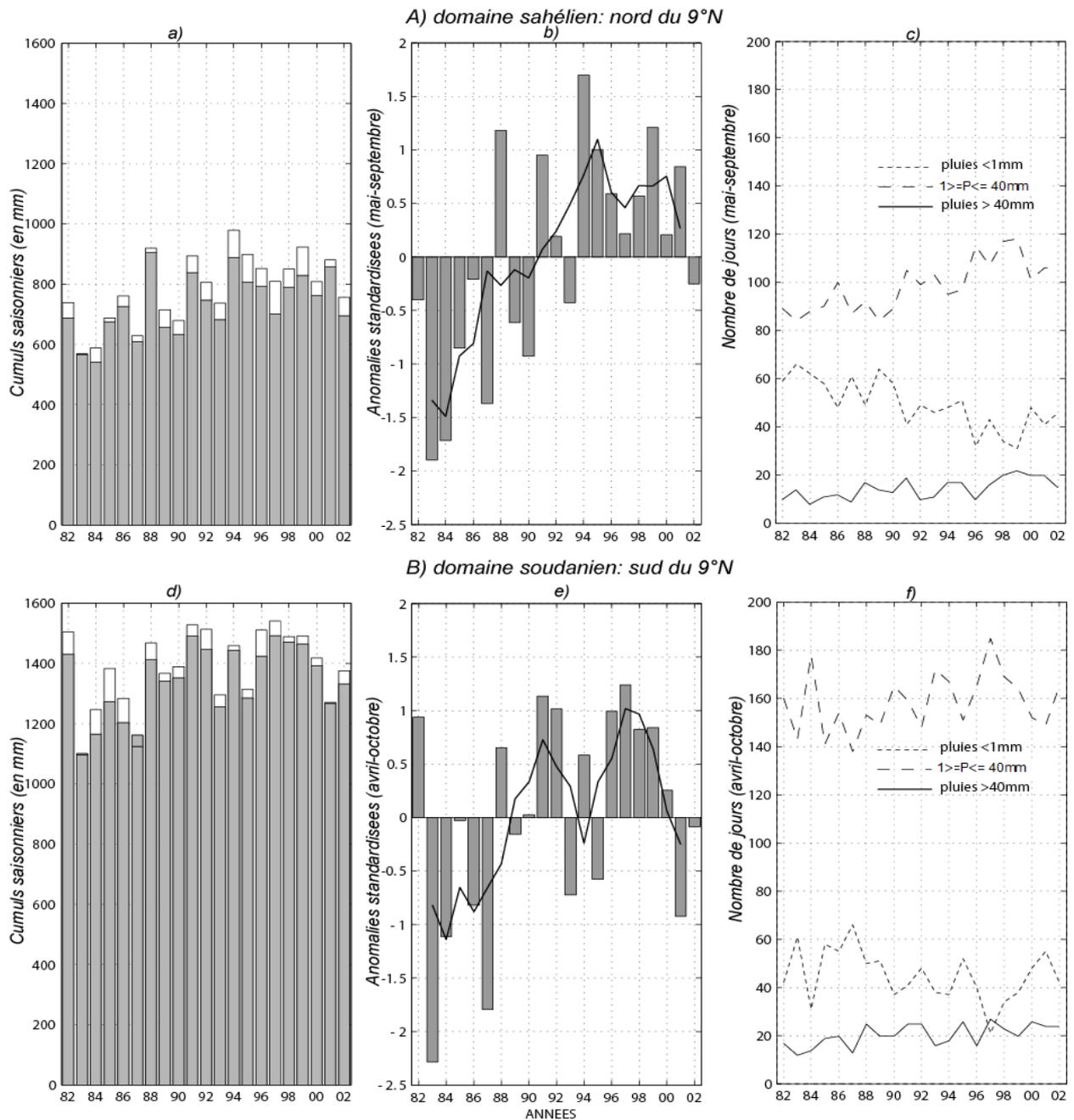


Figure 3 : a) Cumuls saisonniers de précipitations en domaine sahélien : saison des pluies mai-septembre (en grisé) et saison sèche octobre-avril (incoloré) ; b) Anomalies standardisées des cumuls saisonniers (mai-septembre) en domaine sahélien ; c) Variabilité interannuelle du nombre de jours avec $P < 1$ mm , $1 \geq P \leq 40$ mm et $P > 40$ mm en domaine sahélien ; d) Cumuls saisonniers de précipitations en domaine soudanien : saison des pluies avril-octobre (en grisé) et saison sèche novembre-mars (incoloré) ; e) Anomalies standardisées des cumuls saisonniers (avril-octobre) en domaine soudanien ; f) Interannuelle du nombre de jours avec $P < 1$ mm , $1 \geq P \leq 40$ mm et $P > 40$ mm en domaine soudanien.

Les corrélations entre ces différentes classes de pluies et les cumuls saisonniers sont consignées dans le *tableau 1*.

Tableau 1 : Corrélations entre précipitations journalières (classées suivant 3 intensités) et cumuls saisonniers de pluies en domaines soudanien et sahélien.

<i>Classes de pluies</i>	<i>P < 1 mm</i>	<i>P = [1 mm – 20 mm]</i>	<i>P > 20 mm</i>
	<i>Domaines pluviométriques</i>		
<i>Domaine sahélien</i>	-0,71 _{t1, t2, t3}	0,55 _{t1, t2}	0,53 _{t1, t2}
<i>Domaine soudanien</i>	-0,60 _{t1, t2, t3}	0,42 _{t1}	0,50 _{t1, t2}

t1, t2, t3 = corrélations significatives au test de Monte-Carlo à 90 %, 95 % et 99 %, respectivement

Il ressort pour la classe $P < 1$ mm que plus le nombre de jours secs est important et moins importants sont les cumuls annuels. Cette évidence se traduit dans les deux domaines par des corrélations opposées entre les deux paramètres, mais toutes significatives au test de Monte-Carlo à 99 % qui conserve l'autocorrélation des séries. Le nombre de jours à moyenne et à faible pluviométrie ($1 \geq P \leq 40$ mm) d'une part et le nombre de jours à forte pluviométrie ($P > 40$ mm) d'autre part, évoluent en phase avec les cumuls saisonniers et sont significativement corrélés au test de Monte-Carlo à 95 %, sauf pour les pluies moyennes en domaine soudanien qui ne sont significativement corrélées qu'au seuil de 90 %. Ce qui précède nous permet de dire que la qualité pluviométrique d'une saison au Nord-Cameroun dépend à la fois du nombre de jours pluvieux et de leur intensité. En domaine sahélien, le début de saison de pluies (soixante-et-un premiers jours) compte en moyenne quatorze jours avec $1 \geq P \leq 40$ mm. Pour le même seuil, on compte environ vingt-quatre jours pour les mois de juillet-août (cœur de la saison) et huit jours pour le mois de septembre (fin de saison). Le nombre de jours avec $P > 40$ mm, quant à lui, est de trois, quatre et un, respectivement au début, en milieu et en fin de saison des pluies. La distribution de ces classes de pluies entre les cinq années les pluies humides et les cinq années les moins humides de la période 1982-2002 montre — sans surprise — des décalages plus importants au cœur de la saison, et de manière plus marquée pour le seuil de $P > 40$ mm. En effet, entre juillet et août, on compte en moyenne neuf jours avec $P > 40$ mm pendant les années humides, alors qu'en années sèches ce nombre est réduit à deux. Les mêmes tendances s'observent en domaine soudanien, mais avec des amplitudes plus faibles. Au Sahel ouest africain, les études ont montré que 90 % des précipitations annuelles étaient produites par des systèmes convectifs de mésoéchelle et que leur réduction était à l'origine de la variabilité interannuelle des pluies [19]. Il ressort ici qu'environ 15 % des pluies saisonnières seulement sont associées aux très fortes perturbations ($P > 40$ mm), la plus forte contribution étant assurée par des pluies moyennes à faibles ($1 \geq P \leq 40$ mm).

Afin d'analyser les variations du cycle saisonnier, une composite des cinq années les plus pluvieuses et des cinq années les plus sèches de la période 1982-2002 est constituée pour chaque domaine pluviométrique (*Fig. 4a et 4d*).

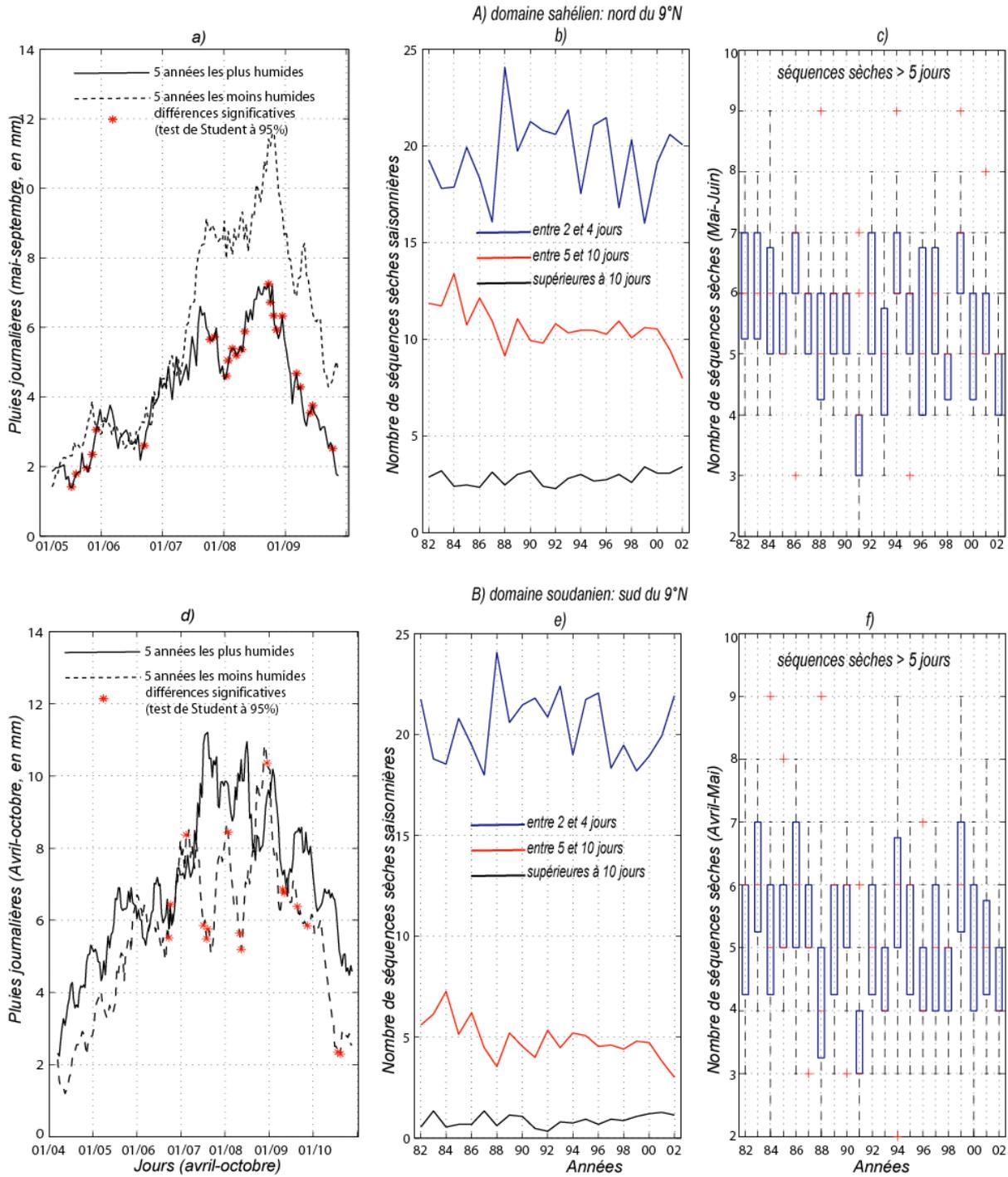


Figure 4 : a) et d) : Cycles saisonniers des pluies au cours des cinq années les plus humides et des cinq années les moins humides de la période 1982-2002 en domaines sahélien et soudanien, respectivement : cycles présentés en moyennes mobiles sur dix jours ; * = différences significatives au test de Student à 95 % ; b) et e) Répartition des séquences sèches (2-4 jours, 5-10 jours et > 10 jours) au cours de la saison des pluies dans les domaines sahélien et soudanien, respectivement ; c) et f) Boxplots représentant la distribution des séquences sèches supérieures à cinq jours, en début de saison des pluies (mai-juin en domaine sahélien et avril-mai en domaine soudanien).

Les différences significatives entre les cycles saisonniers des deux types d'années sont détectées à partir du test de Student à 95 % (version appariée pour comparer les valeurs entre les deux échantillons). Il en ressort que ces différences concernent le cœur de la saison des pluies et, dans une moindre mesure, les mois de mars et de septembre avec des amplitudes plus marquées en domaine sahélien. En effet, au cours du mois d'août, les différences entre les cumuls journaliers sont en moyenne de 2 mm en domaine soudanien et de 4 mm en domaine sahélien. Ces décalages sont encore plus importants lorsqu'on considère les cycles de l'année la plus pluvieuse et celle de la moins pluvieuse de la période où les cumuls journaliers en début et en fin de saison sont très contrastés (résultats non présentés). Cette variabilité interannuelle est gouvernée par le système de mousson ouest-africaine qui génère une variabilité interne contrôlée par la dynamique atmosphérique et une variabilité forcée régie essentiellement par le cycle de l'eau et les conditions de surface continentale et océanique. En effet, les variations thermiques de l'Atlantique forcent des anomalies dans la circulation divergente de l'atmosphère qui modulent significativement le flux de mousson en été [20]. Ainsi, une année à pluviométrie excédentaire (déficitaire) est associée à un forçage (une diminution) de la convergence des flux d'humidité dans les basses couches, induit par des anomalies chaudes (froides) de l'océan et qui favorise des mouvements ascendants (subsidents). En ce qui concerne l'influence des processus continentaux, les différences observées dans les deux domaines découlent du fait qu'au nord de 9°N, la plupart des sites se situent en position d'abri (versants opposés aux lignes de flux), ce qui limite l'influence des turbulences orographiques et surtout celle de l'alizé permanent, contrairement au domaine situé au sud de cette latitude.

Ces résultats permettent de se faire une idée globale des éléments déterminants des anomalies saisonnières. Étudions maintenant la répartition des séquences sèches à l'échelle intrasaisonnière, paramètre qui influence particulièrement le cycle végétatif.

III.3. Répartition des séquences sèches au cours de la saison des pluies dans le nord du Cameroun

Pour l'analyse de la répartition des séquences sèches, leurs longueurs (ou durées) ont été réparties en trois classes, permettant ainsi de mieux évaluer les risques potentiels de stress hydrique dans la croissance et le développement du couvert végétal (*Fig. 4b et 4e*) : séquences sèches de deux à quatre jours ; de cinq à dix jours et enfin, de durée supérieure à dix jours. Ainsi, au cours de la saison des pluies, l'on compte en moyenne quinze à vingt séquences sèches de deux à quatre jours en domaine sahélien, contre douze à dix-huit en domaine soudanien. Quant aux séquences sèches de cinq à dix jours, l'on en compte une dizaine par saison des pluies environ dans les deux domaines, alors que les séquences sèches de durée supérieure à dix jours sont en moyenne de trois par saison. Les résultats précédents ayant montré que les cumuls saisonniers sont associés au nombre de jours secs, on peut déduire que ceux-ci sont également liés au nombre et à la durée des séquences sèches. *A priori*, plus le nombre et la durée des séquences sèches sont importants et plus s'accroît le risque de stress hydrique pour la plante. Si l'on remarque, dans l'ensemble, une légère tendance à la hausse du nombre de séquences sèches au cours des années 1980 par rapport à la période post-1990, il

demeure que leurs relations avec les anomalies saisonnières sont assez ambiguës. L'exemple de la distribution du nombre de séquences sèches supérieures à dix jours est, à ce titre, illustratif puisque leur variabilité interannuelle ne présente pas de tendance marquée (*Fig. 4b et 4e*). Partant de ces résultats, les classes de séquences sèches de cinq à dix jours et celles supérieures à dix jours ont été regroupées en une seule (supérieures à cinq jours) suivant l'hypothèse qu'une interruption des pluies inférieure ou égale à cinq jours n'aura pas un impact très significatif sur la végétation, même en début de cycle. Comment se répartissent ces séquences sèches supérieures à cinq jours suivant les années dans le Nord-Cameroun ?

La répartition des séquences sèches supérieures à cinq jours entre années humides et sèches montre, pour le domaine sahélien, un nombre quasi équivalent mais, en années humides, 30 % seulement de ces séquences surviennent au cours des deux premiers mois de la saison des pluies. La répartition des 70 % restants est compensée par un nombre plus important de jours à très forte pluviométrie ($P > 40$ mm) et donc présente un risque moindre pour la végétation. En années sèches, en revanche, le début de saison est marqué par des pluies moyennes ou faibles, souvent entrecoupées de séquences sèches supérieures à cinq jours (environ 50 % de l'ensemble de la saison). Par ailleurs, le nombre de jours à cumul exceptionnel est plus réduit au cœur de la saison et c'est en fin de saison que surviennent près de 30 % des séquences sèches supérieures à cinq jours. En domaine soudanien en revanche, la distribution des séquences sèches supérieures à cinq jours varie selon les stations, mais les valeurs médianes oscillent autour de quatre, que ce soit en années humides ou sèches. Elles sont également distribuées aléatoirement au cours de la saison des pluies, quelle que soit la qualité pluviométrique de l'année.

Quel est l'impact de la variabilité de ces séquences sèches supérieures à cinq jours sur la végétation ? Pour répondre à cette question, nous allons présenter succinctement les corrélations entre les pluies et le NDVI dans quelques stations du Nord-Cameroun.

III.4. Relations entre pluies et NDVI au nord du Cameroun

Une étude précédente sur les relations entre pluies et NDVI au Cameroun a montré une répartition latitudinale des corrélations [21], ainsi qu'un partitionnement du territoire de part et d'autre du 6° parallèle, avec des corrélations plus fortes ($> 0,8$) au nord de cette latitude. Afin de prendre en compte ce gradient méridien, l'analyse s'effectue au long d'un transect nord/sud (*Fig. 5*), la période d'étude étant segmentée en deux sous-périodes (1982-1990 et 1991-2002), conformément aux tendances des précipitations (*Fig. 3a et 3e*).

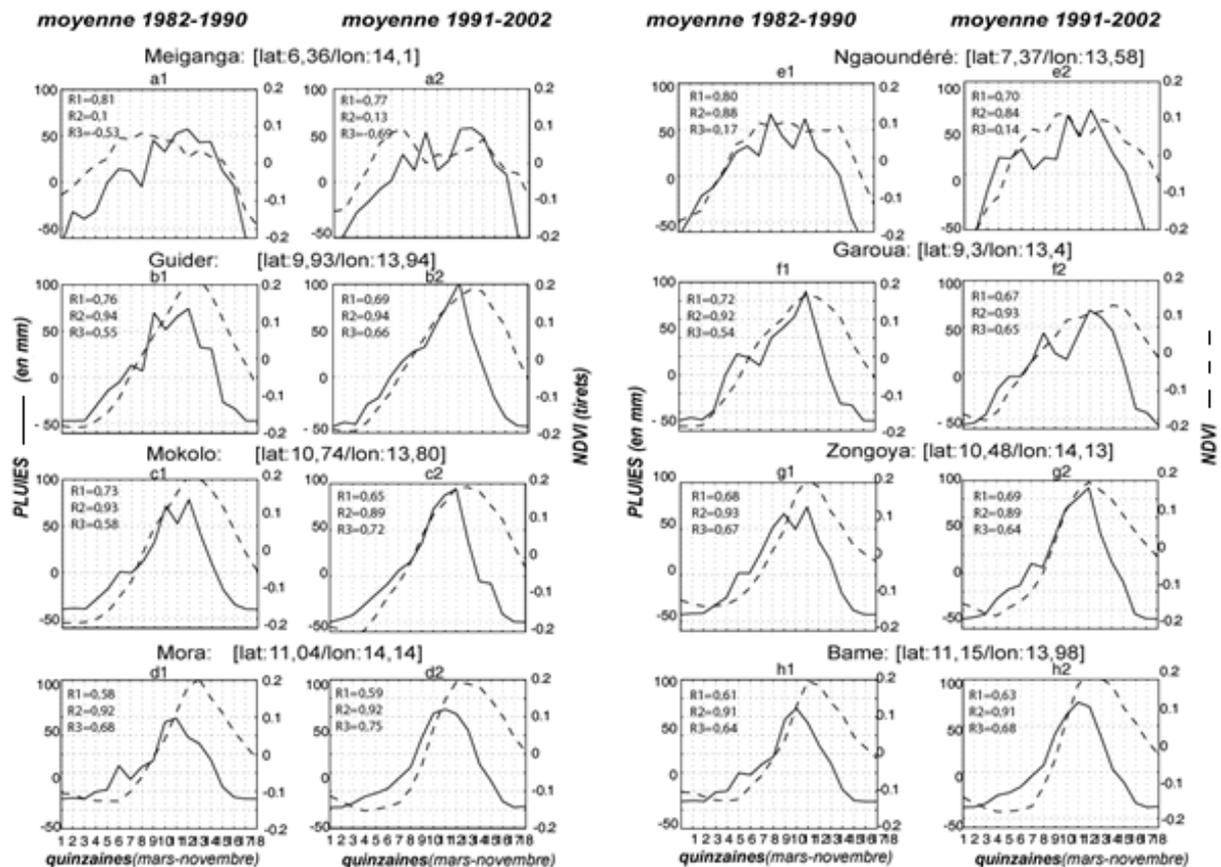


Figure 5 : Cycles moyens annuels de la relation pluies/NDVI dans quelques stations du nord du Cameroun suivant un transect sud/nord ; les moyennes annuelles (dix-huit quinzaines de mars à novembre) sont désaisonnalisées et sont calculées pour chaque station suivant les périodes 1982-1990 et 1991-2002 ; R1 = corrélations synchrones ; R2 = corrélations décalées de deux quinzaines (1 mois) ; R3 = corrélations décalées de quatre quinzaines (2 mois) ; courbes continues = pluies ; courbes interrompues = NDVI.

L'analyse du cycle annuel du NDVI est effectuée entre les mois de mars à novembre afin d'intégrer l'ensemble de la période végétative, soit dix-huit valeurs bimensuelles par an. Les pluies stationnelles sont également ajustées à la matrice du NDVI. Les corrélations pluies/NDVI sont calculées en synchrone (R1), et avec un décalage du NDVI par rapport à la pluie d'un mois (R2) et de deux mois (R3), puisque l'amorce du cycle végétatif dans certaines régions est souvent précédée par une période de précipitations relativement longue qui constitue le temps nécessaire au sol pour reconstituer sa réserve utile après la saison sèche [10, 22, 23, 9]. Les données de pluies et de NDVI sont désaisonnalisées, c'est-à-dire mises en anomalies par rapport à la moyenne afin de s'affranchir du cycle moyen saisonnier.

Les graphiques (Fig. 5) montrent que vers le 6^e parallèle (station de Meiganga), les corrélations sont plus fortes lorsqu'elles sont quasi synchrones (0,81) que lorsqu'elles sont décalées de deux (R2) ou quatre (R3) quinzaines (Fig. 5 a1 et a2). Dans ce dernier cas, les

deux paramètres sont même corrélés négativement au cours des périodes 1982-1990 et 1991-2002, et traduisent sans doute le phénomène d'hystérésis de la végétation, c'est-à-dire

l'apparition de phénomènes de seuils et d'effets irréversibles, lorsqu'elle a atteint un stade assez avancé de son développement. En revanche, au nord du 6^e parallèle, les valeurs se renforcent (> 0,8) avec un décalage du NDVI de deux quinzaines, notamment à Guider (9^e parallèle), Mokolo (10^e parallèle) et Mora (11^e parallèle). Le même constat peut être fait sur le transect Ngaoundéré/Bame. Ce temps de réponse précède donc le démarrage dit *agronomique* qui, au Sahel, coïncide avec la date du saut de mousson qui est situé en moyenne lors de la troisième décennie de juin [24]. Par ailleurs, il n'y a pas de différence notable au cours des périodes 1982-1990 et 1991-2002, bien que la dernière ait été plus humide. Ces résultats sont cohérents avec les études de [25] et [21].

III.5. Relations NDVI/ séquences sèches (> 5 jours) en début de cycle végétatif

Rappelons que l'analyse entre le NDVI et le nombre de séquences sèches de durée supérieure à cinq jours est effectuée en début de période végétative et pour chaque domaine pluviométrique (avril-mai pour le domaine soudanien et mai-juin pour le domaine sahélien). L'analyse prend en compte les soixante-et-un jours continus afin de supprimer les biais induits par le chevauchement des séquences sèches entre deux mois consécutifs. Les corrélations entre les deux paramètres sont calculées en synchrone en domaine soudanien (pluie et NDVI d'avril-mai) et avec un décalage du NDVI de deux quinzaines en domaine sahélien (pluies de mai-juin et NDVI de juin-juillet), conformément au temps de réponse de la végétation à la pluie, d'après les résultats de la section précédente.

Dans l'ensemble, la valeur moyenne du NDVI au cours de cette période est en dessous de 0,6 (*tableau 2*).

Tableau 2 : Corrélations entre le nombre de séquences sèches (> 5 jours) et le NDVI en début de saison des pluies dans quelques stations du Nord-Cameroun

Nombre séquences sèches/ Stations	Corrélations domaine sahélien															Corrélations domaine soudano-sahélien				
	Bame	Bidzar	Billiam	Doukoula	Dziguilao	Guétalé	Guider	Kaélé	Karhay	Maroua	Mokolo	Mora	Yagoua	Zongoya	Garoua	M-Ngalké	Meiganga	Ngaoundéré	Tibati	Touboro
>5jours	53*	59*	58*	-39	53*	51*	-41	54*	42*	52*	57*	56*	-34	-39	-32	-28	-36	-38	-35	-31

(*) = corrélations significatives au test de Monte Carlo à 95% ; valeurs de corrélations multipliées par 100 pour une meilleure lisibilité

En domaine sahélien, les anomalies standardisées de NDVI au cours des mois de mai et juin sont plus faibles au cours de la décennie 1980 (< -1), alors qu'elles sont majoritairement excédentaires sur la période post-1990 (> 1,5). La distribution du nombre de séquences sèches (> 5 jours) est opposée aux anomalies de NDVI et les corrélations entre les deux paramètres

sont significatives (0,63). En domaine soudanien, en dehors de l'année 1987 qui présente un NDVI exceptionnellement faible (-3,5), les amplitudes sont en général faibles (tableau 2).

Les anomalies de NDVI et les séquences sèches (> 5 jours) évoluent également en sens opposé comme précédemment, mais leur corrélation est plus faible (0,46). Les exemples pris dans quelques stations du Nord-Cameroun renforcent ces constats.

Dans la station de Maroua appartenant au domaine sahélien, la corrélation entre les deux paramètres est de 0,52 alors qu'elle est de 0,38 à Ngaoundéré en domaine soudanien. Par ailleurs, aucune station du domaine sahélien ne présente de corrélation significative au test de Monte-Carlo (95 %). Ces résultats traduisent d'une part la plus faible sensibilité de la végétation soudanienne à l'occurrence des séquences sèches (> 5 jours) en début de cycle, et d'autre part le fait que leur nombre plus réduit qu'en domaine sahélien ne peut influencer fortement le cycle végétatif (Fig. 5a et 5b).

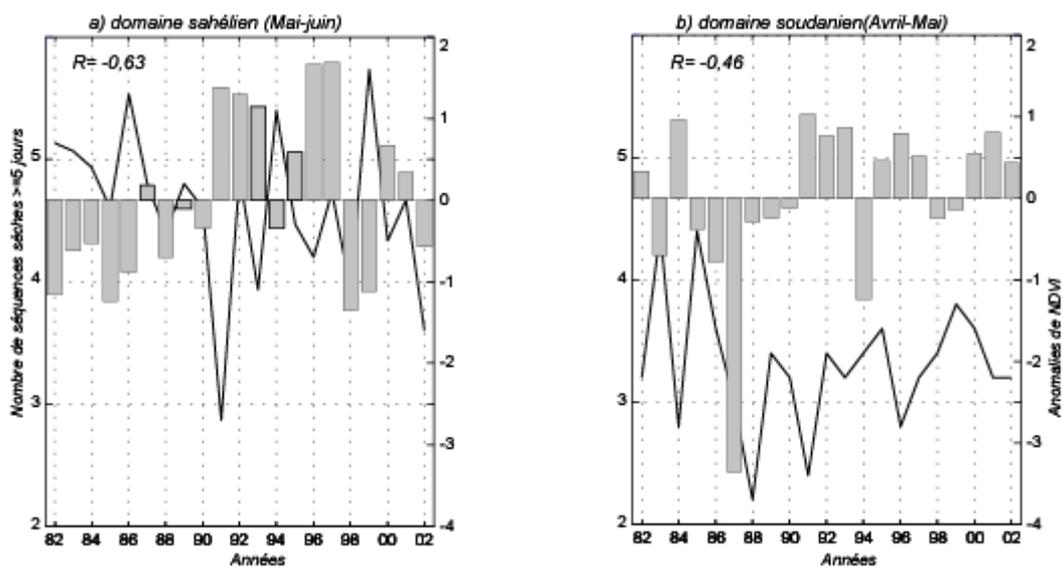


Figure 6 : Corrélations entre le nombre de séquences sèches (> 5 jours) et le NDVI au cours des deux premiers mois du cycle végétatif en domaine sahélien (a) et soudanien (b), respectivement. Courbes = variabilité des séquences sèches (> 5 jours) ; barres = anomalies standardisées de NDVI.

Cette variabilité spatiale des relations est liée à la complexité des contextes bioclimatiques et pédologiques, ainsi qu'à la diversité génétique des espèces végétales. Par ailleurs, l'emprise bioclimatique n'explique pas à elle seule la variabilité de la productivité primaire puisqu'en ces régions l'homme modifie le couvert végétal en raison de la forte croissance démographique [26]. Ainsi, l'intégration du paramètre démographique serait intéressante pour améliorer nos connaissances sur la variabilité de la phénologie végétale dans cet espace géographique assez complexe.

IV. Conclusion

L'objectif de cette étude était d'étudier la variabilité intrasaisonnière des précipitations, en relation avec la répartition des séquences sèches au cours de la saison des pluies dans le nord du Cameroun, ainsi que les corrélations entre ces séquences sèches et le NDVI entre 1982 et 2002. La région a été partitionnée en deux ensembles afin de tenir compte des particularités pluviométriques de chacune d'elle : le domaine sahélien situé au nord de 9°N avec une saison de pluies qui va de mai à septembre, alors qu'en domaine soudanien au sud de cette latitude la saison humide s'étend d'avril à octobre. Les séquences sèches (jours consécutifs avec $P < 1$ mm) ont été définies pour chaque année entre le 1^{er} mai et le 30 septembre pour le domaine sahélien et entre le 1^{er} avril et le 31 octobre pour le domaine soudanien.

Afin de déterminer les facteurs qui impriment la qualité de la saison de pluies — qui contribue pour près de 95 % aux cumuls annuels — deux paramètres ont été testés : (i) le nombre de jours pluvieux par saison ainsi que (ii) leur intensité suivant deux seuils, $1 \geq P \leq 40$ mm et $P > 40$ mm. En domaine sahélien, 39 % des jours en moyenne sont secs au cours de la décennie 1980, contre 26 % pour la période post-1990. Ces chiffres sont respectivement de 23 % et de 18 % pour le domaine soudanien. Par ailleurs, près de 85 % de jours pluvieux reçoivent moins de 40 mm de pluies, et ce même en domaine sahélien. Les différences pluviométriques entre épisodes humides et sèches de la période 1982-2002 sont associées à un déficit des cumuls journaliers essentiellement au cœur de la saison des pluies. L'étude de la répartition des séquences sèches saisonnières a été faite suivant trois classes de durées. En saison des pluies, on compte en moyenne quinze à vingt séquences sèches de durées comprises entre deux et quatre jours en domaine sahélien, contre douze à dix-huit en domaine soudanien. Les séquences sèches supérieures à cinq jours oscillent en moyenne autour de dix alors que celles supérieures à dix jours sont réduites à trois ou quatre en moyenne par saison dans les deux domaines pluviométriques.

Les corrélations entre les séquences sèches > 5 jours et le NDVI ont été calculées en respectant le temps de réponse de la végétation par rapport à la pluie : en synchrone pour le domaine soudanien et avec un décalage du NDVI de deux quinzaines en domaine sahélien. Dans l'ensemble, les valeurs sont plus faibles en domaine soudanien. En revanche, la végétation sahélienne est plus sensible à l'occurrence des séquences sèches en début de cycle (douze stations sur quinze sont significativement corrélées au test de Monte-Carlo à 95 %). En fait, il existe une certaine variabilité spatiale à l'intérieur d'un même domaine pluviométrique en lien avec les facteurs bioclimatiques sous-jacents, compte tenu de l'occupation et de l'utilisation du sol, contraintes qui seront intégrées dans les prochaines études.

Références

1. Rapport DSCN. *Conditions de vie des ménages et profil de pauvreté à l'Extrême-Nord Cameroun en 2001*. Composante N°1 suivi-évaluation de la pauvreté, MINAEPAT/UNDP, 2002 ; 21 p.
2. Tchiadeu G. *Calendriers des pluies et bilans hydriques au Cameroun (1951-1993)*. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2000 ; 250 p.
3. Donfack P. Dynamique de la végétation après abandon de la culture au Nord-Cameroun. *La jachère en Afrique de l'Ouest* ; Floret C. et Serpantier G. (éds) ORSTOM-Paris, 1993 ; 319-330.
4. Suchel J-B. *Les climats du Cameroun*. Thèse de doctorat d'État, Université de Bordeaux III, 3 tomes, 1987 ; 286 p.
5. Tsalefac M. Variabilité des précipitations dans le Nord-Cameroun à partir des données CMAP (1979-2005). *Revue de Géographie du Cameroun*, 2006 ; 8 ; 78-88.
6. Santiago-Jegaden A. *Impacts des états de surface continentaux sur la dynamique pluvieuse au Cameroun*. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 1998 ; 243 p.
7. Temple L. *Déterminants institutionnalistes des changements technologiques dans les agricultures du sud*. Rapport HDR, Université de Toulouse, 2009 ; 210 p.
8. Bella-Medjo M. *Analyse multi-échelles de la variabilité pluviométrique au Cameroun et ses conséquences sur les rendements du coton*. Thèse de doctorat, Université Paris VI, 2008 ; 249 p.
9. Martiny N, Richard Y, Camberlin P. Interannual persistence effects in vegetation dynamics of semi-arid Africa. *Geophysical Research Letters*, 2005; 32: L24403.1-L24403.4.
10. Camberlin P, Martiny N, Philippon N, Richard Y. Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa. *Remote Sensing of Environment*, 2007; 106: 199-216.
11. Eklundh L, Olsson L. Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999. *Geophysical Research Letters*, 2003; 30: 1430.
12. Lienou G, Sighomnou D, Sigha-Nkamdjou L, Mahé G, Ekodeck GE, Tchoua F. Système hydrologique du Yaéré (Extrême-Nord-Cameroun), changements climatiques et actions anthropiques : conséquences sur le bilan des transferts superficiels. *Hydrology of Mediterranean and semiarid regions*, 2003; IAHS Publ. 278; 403-409.
13. Braband P. *Le sol des forêts claires du Cameroun*. Paris : Éd. de l'ORSTOM/Yaoundé : MESIRES, 1991 ; 530 p.
14. Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW, Harlan JC. *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation*. Final Report Greenbelt Md. USA, 1974; 371 p.
15. Tucker CJ, Pinzon J, Brown ME, Slayback D, Pak EW, Mahoney R, Vermote E, El Saleous N. An extended AVHRR-8km NDVI data set compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005; 26: 4485-4498.
16. Lebel T, Ali A. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, 2009; 375: 52-64.
17. Le Barbé L, Lebel T, Tapsoba D. Rainfall variability in West Africa during the 1950-1990. *Journal of Climate*, 2002; 15: 187-202.

18. Sultan B, Janicot S. The West African monsoon dynamics. Part 2: The 'preonset' and 'onset' of the summer monsoon. *Journal of Climate*, 2003; 16: 3407-3427.
19. D'Amato N, Lebel T. On the characteristics of the rainfall events in the Sahel with a view to the analysis of climatic variability. *International Journal of Climate*, 1998; 18: 955-974.
20. Fontaine B, Janicot S. Sea surface temperature fields associated with West African rainfall anomaly types. *Journal of Climate*, 1996; 9: 2935-2940.
21. Shinoda M. Seasonal phase lag between rainfall and vegetation activity in tropical Africa as revealed by NOAA satellite data. *Journal of Climate*, 1995; 15: 639-656.
22. Nicholson SE, Davenport ML, Malo AR. A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using Normalized Difference Vegetation Index from NOAA AVHRR. *Climate Change*, 1990; 17: 209-241.
23. Richard Y, Pocard I. A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 1998; 19(15): 2907-2920.
24. Balme M, Galle S, Lebel T. Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité à des échelles hydrologique et agronomique. *Sécheresse*, 2005 ; 16 (1) : 15-22.
25. Djoufack V. Cycle saisonnier du NDVI dans le Nord-Cameroun et relations avec la pluviométrie (1982-2002). *Actes Commission Climat et Société*, 2008 ; ISSN 1958-2773 : 94-104.
26. Dongmo JL. Human impact on the degradation of vegetation in north Cameroon. *Population and environment in arid regions*, 1998; UNESCO Publ. Chap: 45-60.

ANNEXE B

**TEXTE INTEGRAL DE L'ARTICLE A
PARAITRE DANS INTERNATIONAL JOURNAL
OF REMOTE SENSING**

“CLIMATIC AND DEMOGRAPHIC DETERMINANTS OF VEGETATION COVER IN NORTHERN CAMEROON”

V. DJOUFACK^{2†}, B. FONTAINE[†], N. MARTINY[†], M. TSALEFAC[‡]

[†]Centre de Recherches de Climatologie, UMR 5210, Université de Bourgogne/CNRS,
6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France

[‡]FALSH, département de géographie, Université de Yaoundé1, BP. 755-Yaoundé, Cameroun
(Received 09 February 2010; in final form 25 February 2011)

The objective of the study is to evaluate spatio-temporal impacts of the seasonal rainfall and the urban population growth on NDVI variations in the North-Cameroon, which includes from south to north, Sudanese and Sahelian climates. To this end, 48 points of measured rainfall are interpolated based on the kriging method at a spatial resolution of 8km, in accordance with the NOAA-AVHRR NDVI dataset. Relationships between rainfall and NDVI, on the one hand, and urban population growth and NDVI, on the other hand, are analyzed considering the 79 Administrative Units (AU) in Cameroon. Seasonal (rainy seasons) variations of the vegetation cover are studied during the period 1987-2002, using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) product at 8-Km (NOAA-AVHRR) and 1-Km (SPOT-VEGETATION) of spatial resolution. The paper demonstrates the importance of the urban signal for the NDVI studies at finer scales.

1. Introduction

Vegetation indices are currently used to follow trends of the vegetation cover, at various temporal scales (Hermann *et al* 2005, Martiny *et al* 2005, Tucker *et al* 2005, Bigot *et al* 2005, Pouchin *et al* 2002), as well as to estimate the biomass yields (Lambin *et al* 2002) or crop yields (Bartholomé 1990, Hockheim *et al* 1998, Odekunle *et al* 2007). Relationships between vegetation indices such as the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and climate parameters have shown that the rainfall variability explains an important part of seasonal and intra-seasonal variations of vegetation activities in Sudanese and Sahelian regions of Africa (Eklundh *et al* 2003, Hermann *et al* 2005, Martiny *et al* 2006, Camberlin *et al* 2007). However, changes in vegetation cover are also linked to human activities, driven by socio-economic, cultural and demographic factors that also deserve to be explored. These anthropologic factors remain difficult to measure, as they are much diversified and often connected to parameters not easy to quantify.

The Northern Cameroun (or north-Cameroon) is a particularly interesting region as it presents a juxtaposition of dense land cover, population densities among the highest of the country as well as farming systems among the most intensive. The region is prone to climatic crisis (intra-seasonal droughts, false starts and shortening of rainy seasons, etc) which has direct consequences on the natural and cultivated vegetation cover. The leading climatic factor of vegetation cover variability in the study area is rainfall. The leading anthropologic

² Corresponding author : vi3433dj@u-bourgogne.fr

factors of vegetation cover variability are primarily, as in many countries of sub-Saharan Africa, wood cutting (for heating and for sale), farming and agriculture, all directly related to the demography (Dongmo 1999). Therefore, to face up the unceasingly growth of population which is about 2.8% per year (Central Office of Census and Demographic Studies of Cameroon (BUCREP, 2010)), cultivators need to enlarge their agricultural area or to open up new fields.

Since the 1950s, agricultural clearings have significantly increased (Dongmo 1999, Yengué 2002, Donfack 1998) and, because of the economic crisis, a strong rural exodus was raised since the end of the 80s. However, unemployment and low wages, leads the majority of citizens to invest in agriculture, especially in the outskirts of the cities. In addition, urbanization is the most striking demographic fact that reveals the final results of the last population census of Cameroon. Thus, the practice of agriculture is no longer the exclusiveness of the population living in rural areas: floodplains such as the Diamare and Benoue, are most coveted, because of their greater fertility (*Karal*), especially for dry seasons crops, e.g. *mouskouwari* (Mathieu 2000). In short, the vegetation cover (natural or cultivated) being considered as a resource as it augurs good harvests and better pastures. So, it becomes necessary to compute changes which affect vegetation, in order to detect the most affected areas, and to evaluate the sensitivity of vegetation cover to both climatic and demographic variations: this is the objective of the current study, conducted in Northern Cameroon.

For that purpose, the NDVI (Tucker 1979) is used as an indicator of the vegetation cover, and *in-situ* rainfall measurements are used as the climatic parameter. The demographic parameter is the urban population defines as people living in areas of at least 5000 inhabitants (WALTPS, ONU), because the urbanization phenomenon involves the implementation of economics infrastructures (roads, industries, housing) and strong migrations (of jobs seekers), that are directly or indirectly connected to vegetation changes inside and around urban centres (Antoine, 1997). Given the successive droughts which occurred at the beginning of the 80s, the study focuses on the period after 1987, in order to remove the interannual memory effects of vegetation. The originality of this study is to work on a scale that allows to detect changes on a restricted space (pixel) and to evaluate interactions between rainfall, NDVI and urban population growth in each administrative units (AU), in order to supply elements of decision-making support in terms of climatic and anthropogenic impacts of the land-cover change. After presentation of the key-elements of the geographical context (section 2), the datasets (NDVI, rainfall, urban population), and the main methodological approaches are presented (section 3). The results are discussed in section 4.

2. Geographical context

The North-Cameroon comprises a diversity of physical and natural conditions. Located between 6°N and 13°N and 11°E and 16°E, it includes from south to north, the Adamaoua, North and Extreme-north provinces (divisions), over a total area of about 164,000Km² (Fig.1).

2.1. Vegetation: the vegetation cover (Fig. 1(A)) constituted by sudano-guinean savannas and deciduous woodland south of 9°N, becomes irregular and discontinuous northward: the central part of the extreme-north division is occupied by sparse grasses and thorny sahelian steppes, whereas “sudanese savannas of Mountains” (Letouzey 1968, White 1983) are found in the region of Mandara Mountains. The eastern part of the Far-North division is covered by floodable grassland.

2.2. Topography: Three main units can be distinguished (Fig. 2 (B)): the Mandara and Alantika Mountains, from 900m to 1885m, in the western part of the northern zone, between Cameroon and Nigeria; the Adamaoua plateaux (~ 1000m) in the southern part of the region, which shelter mountains reaching up to 2500m (Fig.1(B)); The plains (altitudes below 300m), drained by the permanent rivers of Benoue and Logone, and practically flooded from July to November.

2.3. Climate: the North-Cameroon is under the influence of the African monsoon, and is dominated by the seasonal translation of the ITCZ (Inter-Tropical Convergence Zone) and by the Harmattan winds coming from Sahara. It can be divided into 2 sub-climatic areas: the sahelian zone stretching over the 8th parallel, and the sudanian (or sudano-sahelian) zone located southward. Mean annual temperatures vary from 28°C in the Sahelian region to 24°C over the Adamaoua, while monthly maximums are between 34°C and 28°C, respectively. The mean annual rainfall amounts range between 500-1500mm, and show strong interannual variability (Fig. 6).

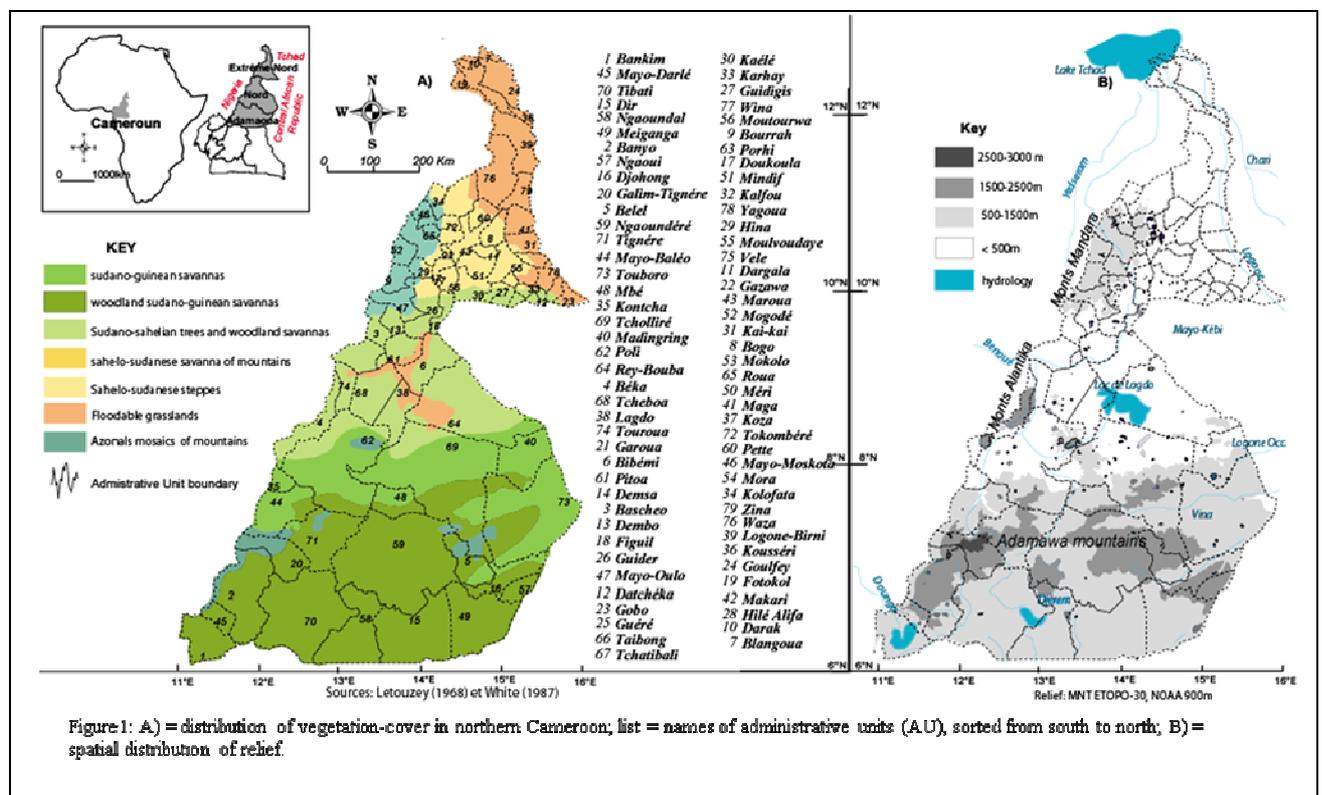


Figure 1: A) = distribution of vegetation-cover in northern Cameroon; list = names of administrative units (AU), sorted from south to north, B) = spatial distribution of relief.

2.4. Population: According to the results of the last population census of Cameroon (2010), the size of the urban population has been multiplied by 3.9 between 1976 and 2005, highlighting a particularly strong urban dynamism. In addition, the WALTPS (West African Long Term Perspective Study) showed that, about 50% of the population of Cameroon lived in urban areas in 1995, and this rate increases for about 4.9% per year (Antoine 1997). In 2007, the North-Cameroon population was estimated at nearly 5 million seven hundred thousand inhabitants (BUCREP 2008), i.e. an increase of more than 3 million inhabitants since the population census of 1976. However, the spatial distribution of the population in that region is striking: the most populated regions are found in the capital towns of each sub-division unit and specifically in Maroua, Garoua, Ngaoundere, Kousseri and Mora (See figure 1(A) to locate the places), whereas the back country is often depopulated (Marguerat 1982). The population of Extreme-North, North and Adamaoua divisions represents respectively 18%, 10%, and 5% of the total population of the country.

3. Data and methods

3.1. NDVI

Vegetation indices obtained by remote sensing methods are largely used today as indicators of vegetation photosynthetic activity, which can be representative of the vegetation cover of a region, when the indices are time-integrated. These indices are computed based on the combination of spectral bands shown to be related to green biomass (Tucker 1979). The one used in this study is the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), based on the ratio between the difference and the sum of the top-of-atmosphere reflectances in the “near infrared” (NIR) and the “visible” (RED) spectral bands: $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$. These reflectances are those of the AVHRR sensor (Advanced Very High Resolution Radiometer) of the NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) satellites, compiled during various missions: NOAA-7(1981-1985); NOAA-9 (1985 -1988 and August 1994-January 1995); NOAA-11 (1989-1994); NOAA-14(1995-2000); NOAA-16(since 2000). The dataset is broadcasted by the Global Inventory Monitoring and Modelling Systems (GIMMS) and includes 15-days synthesis maps of NDVI at 8Km spatial resolution. Those bi-monthly synthesis maps include corrections for calibration bias, orbital drifts, and geometrical viewing/illumination conditions and atmospheric aerosol. The bi-monthly integration of the NDVI enables to remove the effects of clouds (Tucker 2005). NDVI data are extracted on the “window” of the North Cameroon, for a total of 2497 points (97 degrees of latitude and 53 degrees of longitude for each time period), from 1987 to 2002.

For each of the 16 years, the mean NDVI of the rainy seasons is computed, i.e. those where the average cumulative rainfall exceeds 50mm (Suchel 1987): in the Sahelian region, the rainy season being defined in May-September, and April-October for the region southward to 9N. The interest to work on seasonal average charts of NDVI during the subsequent rainy seasons is justified by the fact that, it is the most active period for vegetation (Martiny *et al* 2006). It is thus easier to separate various classes (or clusters) of vegetation at this period, although the distinction between woody savannas and crops remain fuzzy in soudanian areas

(Achard et al.1990). After having constituted seasonal NDVI meta-files of the 16 years, the next concern was to evaluate, for each pixel, changes which occurred during the period 1987-2002.

The second dataset of NDVI used, comes from the VEGETATION (VGT) instrument of the Système Probatoire d'Observation de la Terre (SPOT) satellite, which ensures daily global coverage of the earth's surface with a 1-Km spatial resolution. Datasets are broadcasted by the Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VIITO), which routinely operates angular and atmospheric corrections on data, which are available in 10-days composite NDVI, from the 1st April 1998 to the 31 October 2009. Values are encoded and the real NDVI values are derived using the formula: $NDVI = -0.1 + 0.004 X$; (X= encoded value). Further information about VIITO's data is available at www.vgt.vito.be. This database is used to study efficiently, land cover changes into urban areas, given their high spatial resolution. To do this, only years with complete data are taken into account, i.e. from 1999 to 2008.

3.1.1. NDVI classifications

Various methods of regionalization which uses NDVI are based on the fact that each type of vegetation has its own spectral signature and may have a distinct photosynthetic activity with respect to the rainfall. Thus, regionalization methods allow discriminating the main vegetation types. It was used in the current study, the *ISODATA* method which is a non-supervised approach: the *ISODATA* algorithm compares radiometric values of each pixel, based on initial clusters vectors, primarily assigned (maximum and minimum threshold), as well as the minimum aggregates by cluster and the minimal distance between classes (Tou and Gonzalez 1974, Lacombe 2007). At each iteration, averages are re-computed and pixels are reclassified according to new averages. The operation ends, either when the number of iteration preset is reached, or when the rate of changes in each cluster becomes lower than the fixed threshold. Post-classification operations enable either to compact classes by eliminating isolated pixels, or by merging classes presenting similar characteristics or removing those presenting non-realistic configurations. Note that the initial numbers of clusters vectors were assigned based on the main vegetation types of the North-Cameroon (Letouzey 1968, White 1983).

3.1.2. Extraction of the NDVI in urban regions and out of urban areas.

Our objective being to focus on small scales, a spatial resolution of 8-km seemed inaccurate to evaluate the impact of urbanization on vegetation. For that reason, the 1-km SPOT-VGT NDVI is used. Lacking the exact size of all cities, regions of interest (ROI) over urban areas are selected from a Geographic Information System software (G.I.S), based on population size of each AU (table 1)

Table 1: extraction of NDVI in urban areas, according to the size of the population

Populations classes (inhabitants)	ROI surface (km ²)
10,000	9
]10,000 - 20,000]	16
]20,000 - 60,000]	50
>60,000	81

Each ROI is constituted by the pixel containing the city itself, as well as the adjacent pixels which can be considered as suburbs. In order to take into account the non-urban areas (rural), a mask is applied on urban areas previously located (cities and suburbs). Then a radius of 4km (equivalent to 4 pixels) is considered around those urban areas. The average of those pixels, are considered as the NDVI of rural areas.

3.2. Rainfall data and spatial interpolation at a 8-km spatial resolution

Seasonal rainfall data of 48 stations (31 located in the North of Cameroon and 17 others in Chad, Nigeria and Central African Republic) are selected to generate regular grids of rainfall at a 8-km spatial resolution, in accordance with the NOAA-AVHRR NDVI grid. Most of the data of the North-Cameroon belong to the SODECOTON network (Bella-Medjo 2008), while other data are given by the direction of the national meteorology as well as by the departmental offices of meteorology of countries mentioned above. Several spatial interpolation methods are tested with the aim to find out the one which will be closer to reality. The Kriging method is finally selected. Kriging algorithm analyzes statistical variations of values over different distances (closer points are weighted more heavily than distant ones), and different directions (anisotropy), with the intention to determine those that will produce the minimum error in the rainfall estimate (Cressie 1991). It was initially checked if: (i) the average and variance of points are stationary, i.e. they only depend on the distance between points and if (ii) there is a spatial coherence in rainfall distribution over the region. So, the spatial continuity of data is computed on points for which values are known and the degree of reliability of results can be expressed as an experimental variogram (or semi-variogram). Values of the variogram are computed by averaging the squared differences of all pairs of observations, with the specified distance and direction (for further details see Gratton *et al* 2002, Baillargeon 2005, Joly *et al* 2008, Oliver *et al* 1990). To perform the results, the experimental variogram plot needs to be adjusted because its shape serves only as a basis for determining the appropriate model. The cross validation is an approach to estimate how well the model chosen is going to perform yet-unseen data. In this study, the linear model is the one which adjusted our variogram the best, i.e. where the error between estimated and observed rainfall is the weakest. Then, using a G.I.S., data are readjusted on the north-Cameroonian “window” and gridded at a 8-km spatial resolution.

Standardized indices of each parameters (NDVI or Rainfall) are computed using the formula below, where (ny) is the number of stations of the year (y); P_s^y is the corresponding parameter in year (y) and at the station (s); $(\overline{P_s^y})$ the seasonal mean of the considered parameter at the station (s); and (σ_s) , the seasonal standard deviation of the considered

parameter in the station (s). Results are expressed in standardized anomalies, computed as follow:

$$SI = \frac{1}{ny} \sum_{s=1}^{ny} \frac{P_s^y - \overline{P_s}}{\sigma_s}$$

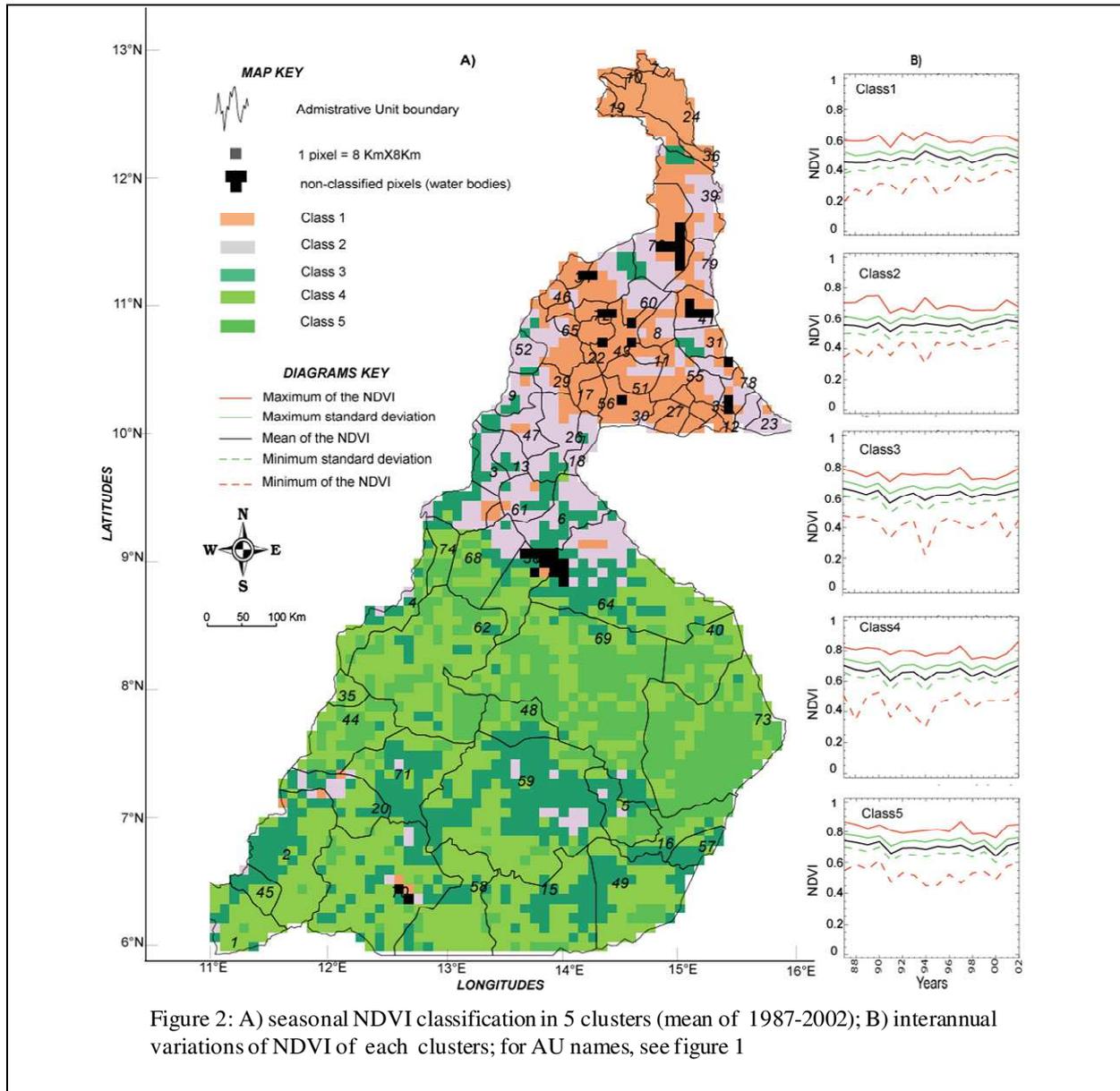
3.3. Demographic data

The demographic data set is constituted by urban population of 79 administrative units (A.U.) that represent divisions, sub-divisions and districts of northern Cameroon. These data come from Population Census report of years 1987 and 2005, as well as demographic surveys in 1998, 2002, 2007 and 2010, carried out by the National Institute of Statistics (NIS, for year 2002), the National Office of Accounting and Statistics (DSCN, for year 2002) and the (BUCREP, for years 1998, 2007, 2010). Demographic projections of intermediate years are computed based on the rate of growth of the urban population in each A.U. The rate of population change is computed using the formula:

4. Results and analysis

4.1. Spatial patterns of NDVI in northern Cameroon (1987-2002)

Figure 2(A) displays the results of the classification (*ISODATA*) based on mean NDVI annual regimes in the northern Cameroon over the period 1987-2002. Referring to the prevailing land-use/land-cover type (GLC2000), as well as the cartography of the main types of “natural” vegetations (Fig.1(a)), the 5 NDVI clusters which come out from the classification can be somewhere matched with the main vegetation types of this region (Fig. 2(B)).

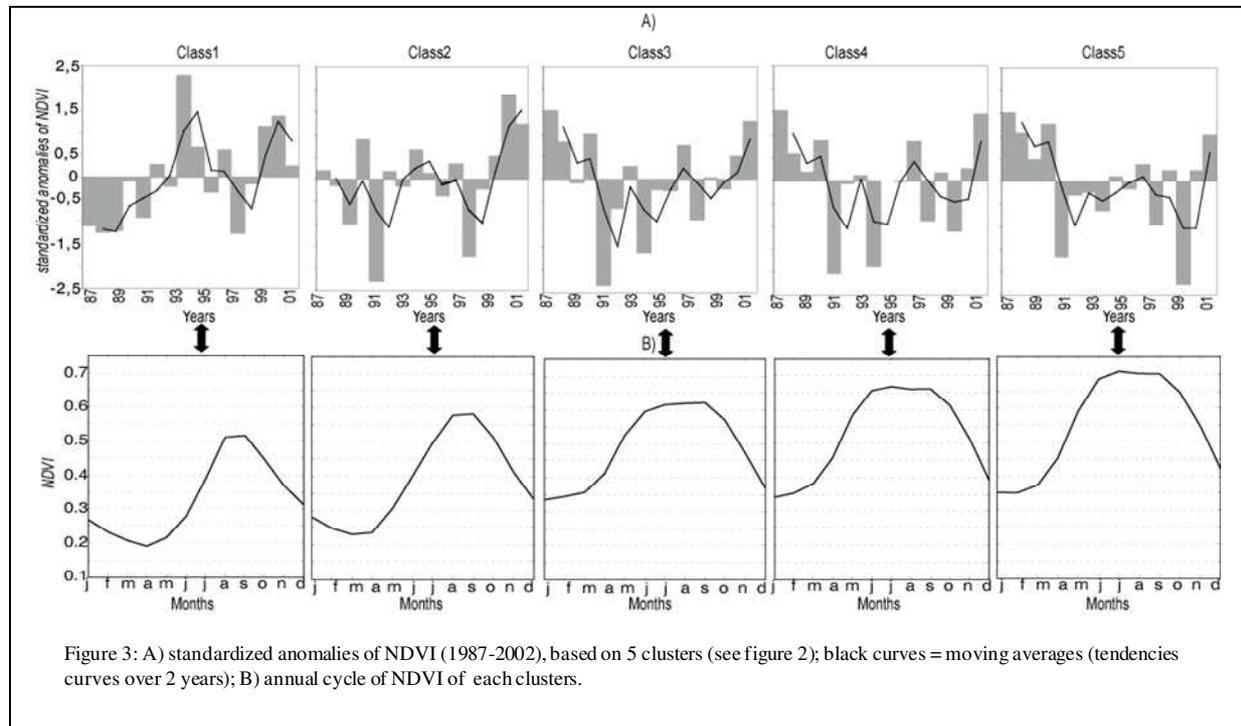


Indeed, there is a gradation of vegetation from north to south: from 0.4 in the steppe (classes 1 and 2), to up to 0.7 in shrublands and woodlands of southern region (classes 3, 4 and 5). Although clusters can be constituted by different vegetation species (e.g. mosaics) the signal displayed refers to the dominant species. So, averages of the NDVI are a smoothing (often non-realistic) of data, which consist of reducing the variance. That is why it is interesting to consider other parameters, such as maxima, minima or standard deviations that indicate the dispersion of NDVI in the different classes (Fig. 2(B)).

All these regions are overexploited for agriculture and cattle livestock, with more damaging environmental consequences in the North part.

At the interannual time scale (Fig. 3(A)), all classes emphasize an increase in NDVI at the end of the period 1987-2002. In early period, classes 1 and 2 show negative anomalies, whereas classes 3-5, are in surplus over the first four years of the period (> 1), and deficits in the years 90s. The NDVI mean annual regimes present an unimodal profile (Fig. 3(B)), with a

flattened shape for classes 3-5. However, the duration and the amplitude of the rainy season highly changes from North to South: maxima are observed in August with an increase in NDVI at the peak date, from 0.5 (North) to 0.7 (South); an early onset and an early shrinkage of vegetation are observed into northern classes (1, 2), and the opposite situation in southern classes (3-5).



As a summary, the vegetation of northern Cameroon is very diverse, in terms of typology, annual cycle and interannual variations. Significant variations are also observed between urban areas. The averaged NDVI (1987-2002) in AU-capitals show large variations from one city to another, even in those belonging to the same class of NDVI (Fig. 4), but a mean difference by 8°N (approximately 0.2) clearly appears.

What are the parameters underlying those spatio-temporal changes in NDVI during the period 1987-2002? To answer this question, the spatial evolution of rainfall is initially explored. Then the rainfall/NDVI correlation will allow focusing on urban areas. Analysis will be done, under two assumptions:

- Positive NDVI anomalies induce an above-normal vegetation activity that can be associated either to an increase in rainfall, or to the conversion of fallow land or wasteland (with lower reflectance) into farmland (Beauvilain 1989, Gonné 2005);

- conversely, negative anomalies imply a strengthening of activities that promote vegetation degradation: this can be due to rainfall decline, or to some processes associated with urbanization, inducing the cut and the uprooting of trees for the building of new urban infrastructures or new residences (Dongmo 1999, Ndamé et al 2004).

4.2. First explanatory factor: the rainfall

4.2.1. Spatio-temporal variations of rainfall (1987-2002)

Figure 5(A) displays the rainfall spatial distribution in northern Cameroon, as well as annual rainfall regimes averaged over 3 latitudes (Fig. 5(B)).

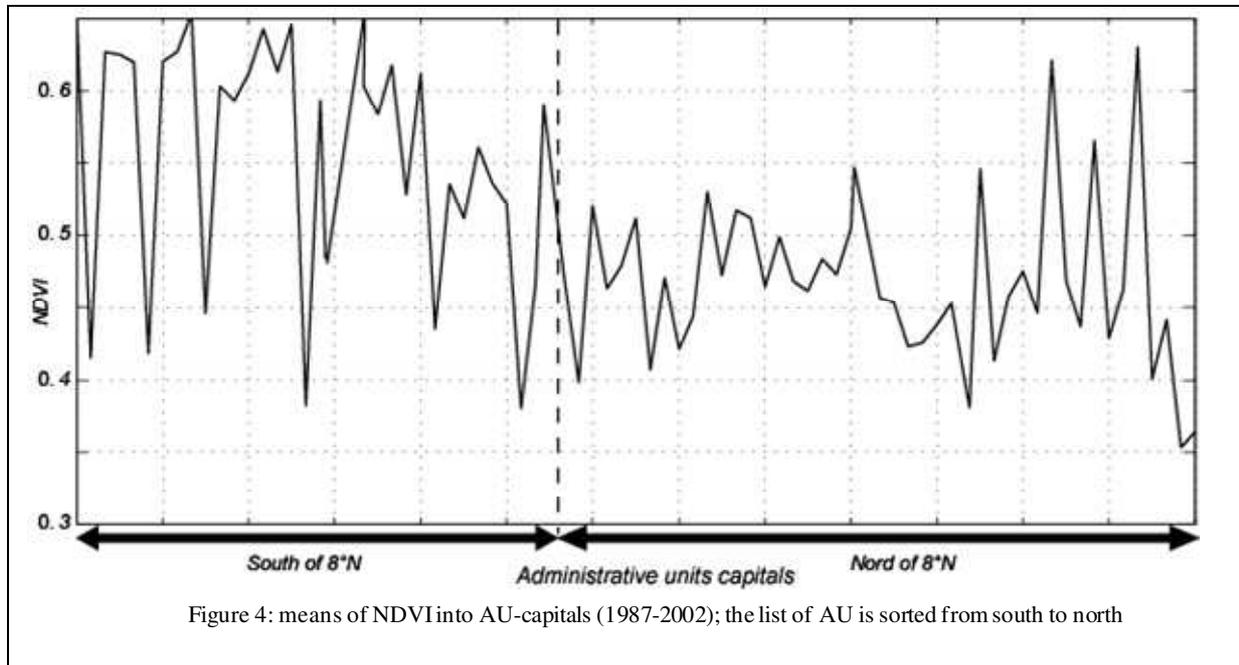
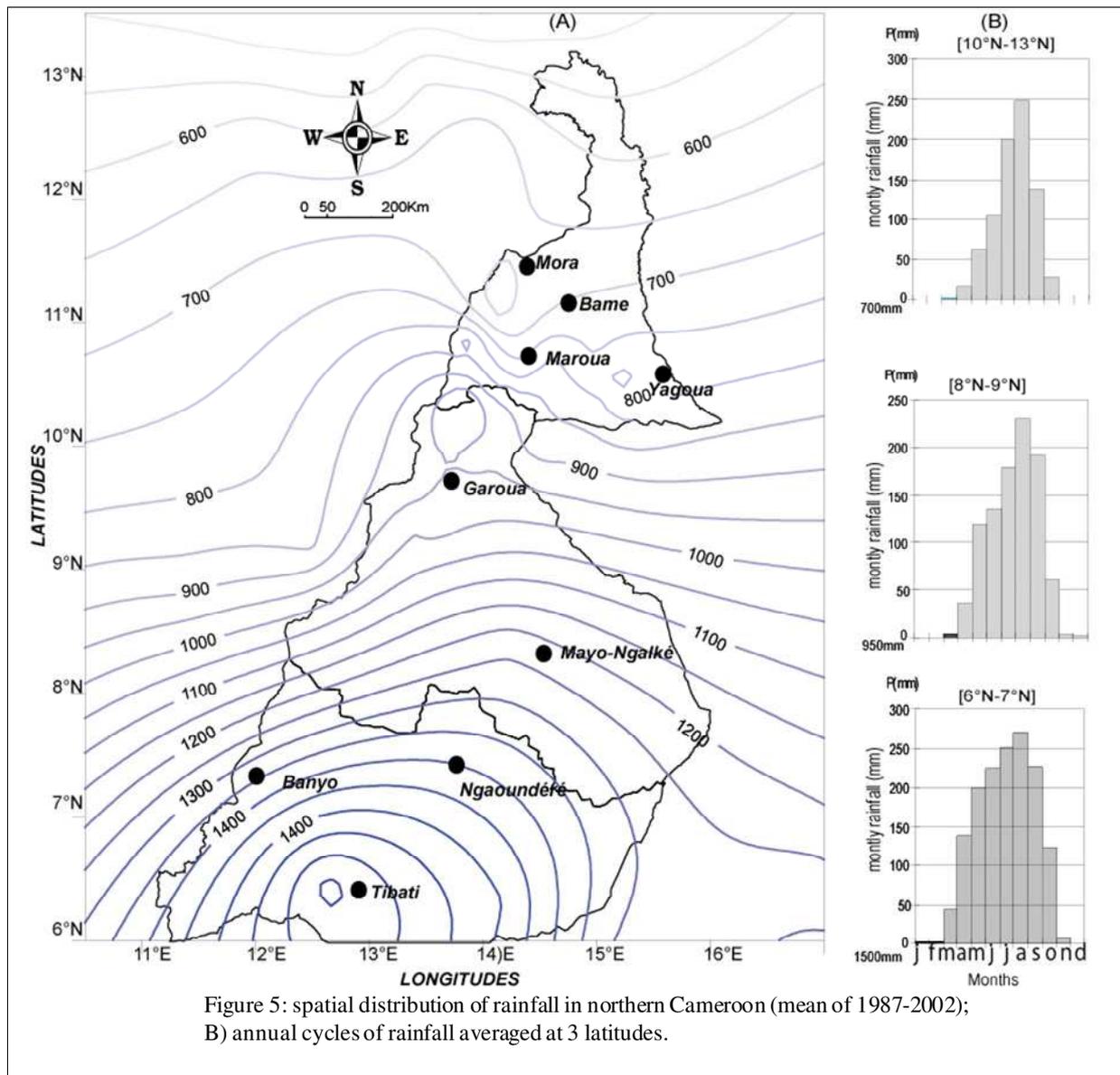


Figure 4: means of NDVI into AU-capitals (1987-2002); the list of AU is sorted from south to north

It expresses a general North / South gradient, with a more northeast / southwest orientation, southward to 7°N. Annual rainfall amounts are lower than 1000mm in the North of the 8th parallel: the local values vary from 1500mm around the station of Tibati to approximately 600mm in Kousseri, located in the extreme-North of the region. Annual cycles, which are unimodal with maxima observed in August, show an elongation of the duration of the rainy season (monthly rainfall > 50mm from March to October) in southern latitudes (Fig. 5(B)).



Northward to 8°N (> 1000mm), inter-annual trends (Fig. 6) are positives, whereas south of this latitude, most years are deficient, despite few positive anomalies observed between 1994 and 1999. These results raise the question of a probable re-greening in the Sahel, since the early 2000s (Ozer *et al* 2003, Olson *et al* 2005, Lebel *et al* 2009). In short, the rainy season extend from April to October in the sudanian region and from May to September over the Sahelian area: these spatial particularities will be taken into account throughout the study. Is the localization of the maximum of rainfall in August as for the NDVI, testifies to the absence of lag between the rain and the NDVI? The answer to this question requires a comparison of the two parameters, provided that they are at the same spatial and temporal scale.

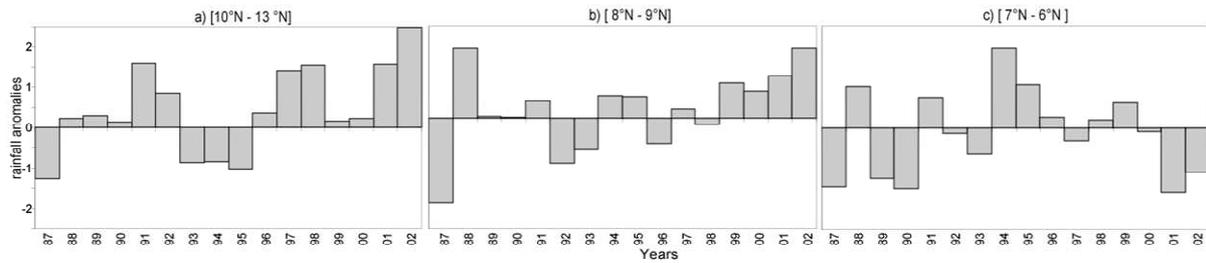


Figure 6: standardized anomalies of rainfall averaged at 3 latitudes of northern Cameroon (see figure4) and between 1987 – 2002.

4.2.2 Spatial interpolation of rainfall data at a spatial resolution of 8 km.

Figure 7 shows the scatter plots (44 points) of observed, versus estimated rainfall over the period 1987-2002 along with the regression line. It emerges that simple linear correlations are strong and significant, as shown by the “line of best fit” ($r=0.89$) reflecting both the quality of the adjustment model in the semi-variogram, and the greater consistency in the spatial distribution of rainfall over the period.

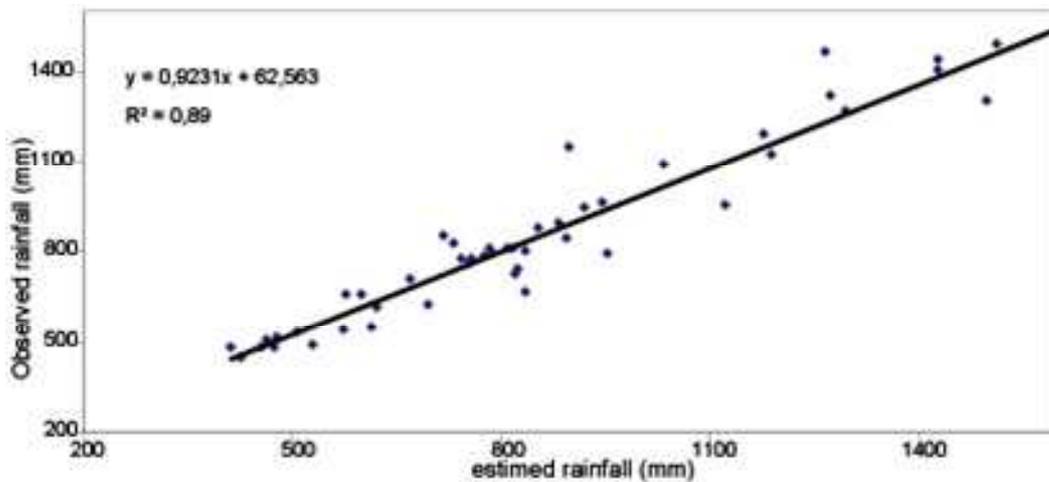


Figure 7: cross validation of the kriging model (mean of 1987-2002)

4.2.3 Composite analysis of rainfall and NDVI

a) In the whole region

Figure 8, displays the mean rainfall / NDVI relationship considering 2497 pixels, over the period 1987-2002. There is a gradual and simultaneous increase of both parameters up to 1000 mm of rain, while the NDVI is around 0.6. Above this threshold, the NDVI (between 0.6-0.7) remains constant independently of the rainfall increase. This saturation phenomenon beyond 1100 mm is due to the physiological properties of plants, which become insensible to rainfall variations, when they have already reached a certain stage of phenological development. In this situation of hysteresis, the rainfall is not any more a constraint for plants growth.

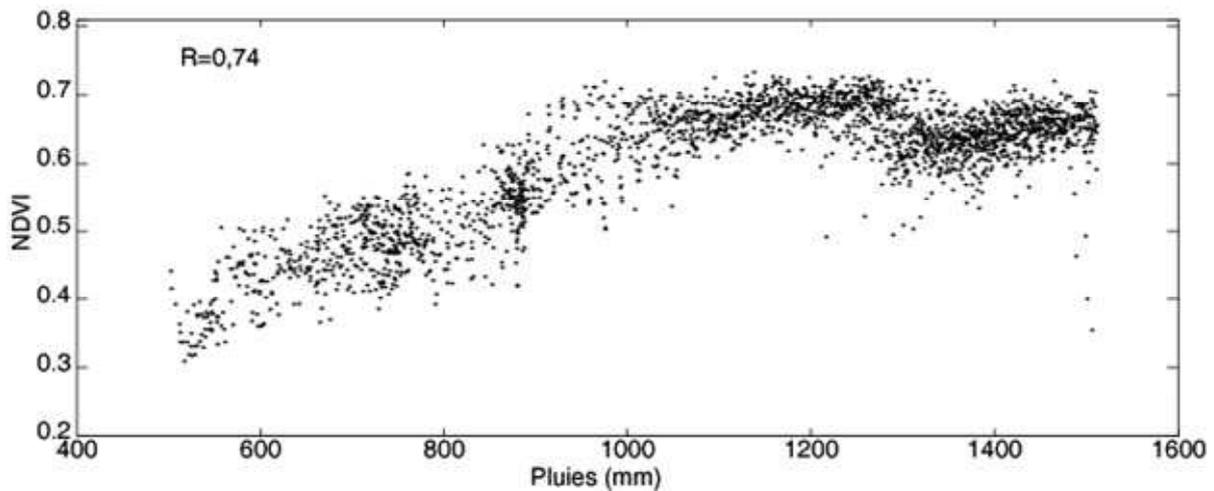


Figure 8: NDVI/Rainfall relationship at seasonal time period (mean of 1987-2002).

The saturation threshold of NDVI varies according to bioclimatic characteristics as well as to the considered spatial scale. The threshold of saturation is often fixed at 1000mm in East and West Africa (Davenport *et al* 1993, Malo *et al* 1990, Camberlin *et al* 2007, Hermann *et al* 2005, Seghieri *et al* 2009, Eklundh *et al* 2003).

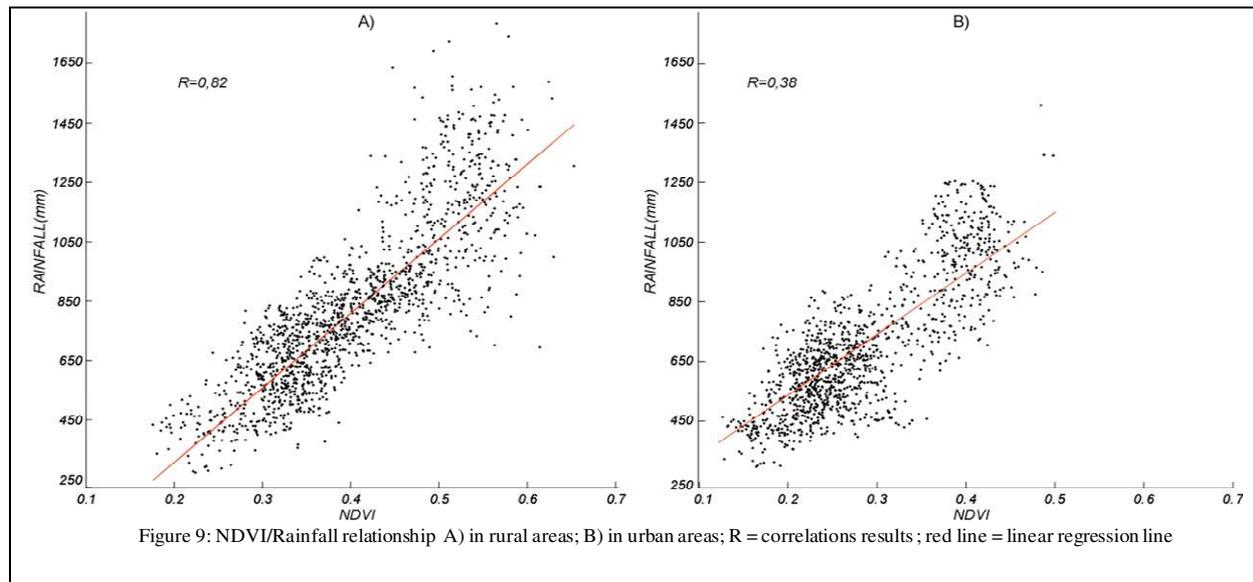
Consequently, synchronous NDVI/rainfall correlations are around 0.7, when computed over the whole region, but this value can be improved over the Sahelian belt, if the rainfall leads the NDVI by approximately one month (Shinoda 1987, Djoufack 2008).

b) In urban and non-urban areas

Figure 9 displays the rainfall / NDVI relationship in rural (Fig. 9(A)) and urban (Fig. 9(B)) areas. The urbanization explains the NDVI decrease in urban areas and the presence of a large number of points around 0.25 despite increased rainfall. This calls upon two assumptions:

- In non-urban areas, the rainfall / NDVI relationship is quasi-natural and reflects the spatial distribution of the two parameters (Fig. 8);

- In urban areas, the correlation seems to be sensitive to the importance of cities. Two groups of points are clearly distinguished: NDVI below 0.35 corresponds to the largest cities in terms of urban infrastructure. Beyond 0.35, the weight of urbanization is less marked. This result suggests that, local NDVI values are likely to be biased by the urban signal. To verify this hypothesis, urban population data are now examined as an indirect factor in cities typology, knowing that most (less) populated cities areas are more (less) important in terms of urban infrastructure.



4.3. Second explanatory factor: the urban population growth

4.3.1. Spatial distribution and evolution of the urban population in the North-Cameroon

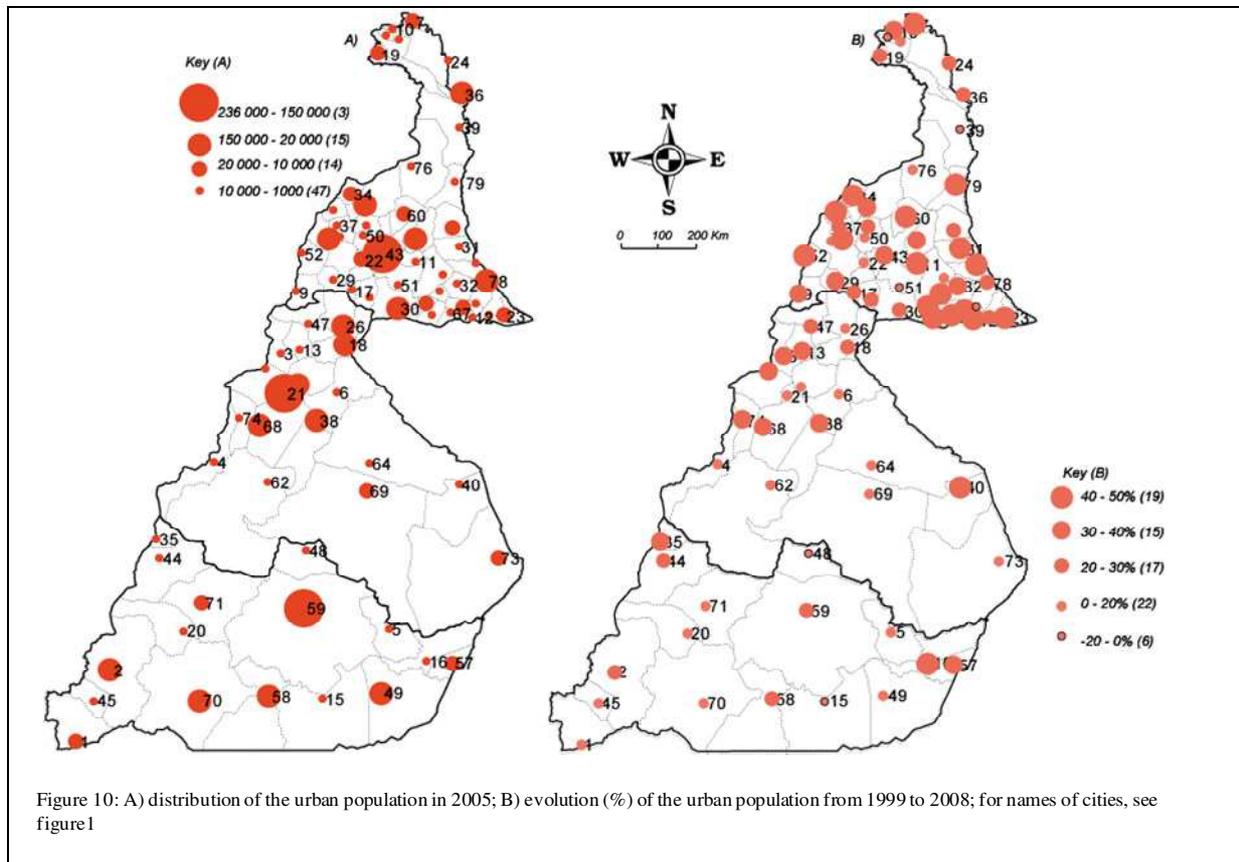
Given that phenomena such as urbanization are better apprehended by using high spatial resolution products, the NDVI data (SPOT-1Km) is now involved, to study the relationship between NDVI and urban population. Because of the low temporal depth of these data, the study is undertaken over a 10-year period (1999-2008).

As in most countries of sub-Saharan Africa, the main characteristic of the spatial distribution of urban population in north-Cameroon is “macrocephaly”, i.e. the overwhelming preponderance of a single city over the rest of the urban system (Marguerat 1982).

Indeed, in 2005, nearly 40% of the urban population of northern Cameroon is concentrated in cities of Maroua, Garoua and Ngaoundere (>590,000 inhabitants), which also represent capital cities of the three provinces (Fig. 10(A)). These cities are followed by Kousseri and Guider, whose urban populations in 2005 are estimated around 89,000 inhabitants and 52,500 inhabitants, respectively. Indeed 47 cities have urban populations under 10,000 inhabitants. Also, compared to the two other provinces, the Far-North shows the highest urban densities, due to small areas of AU: This is one of the reasons for the high land crises in that region.

Figure 10(B) shows the evolution of the urban population in AU- capitals between 1999 and 2008. In ten years, 19 AU experienced a population increase from 40 % to 50%, while 22 AU registered a population increase between 10% and 20%. The decline in urban population relates to only 6 AU.

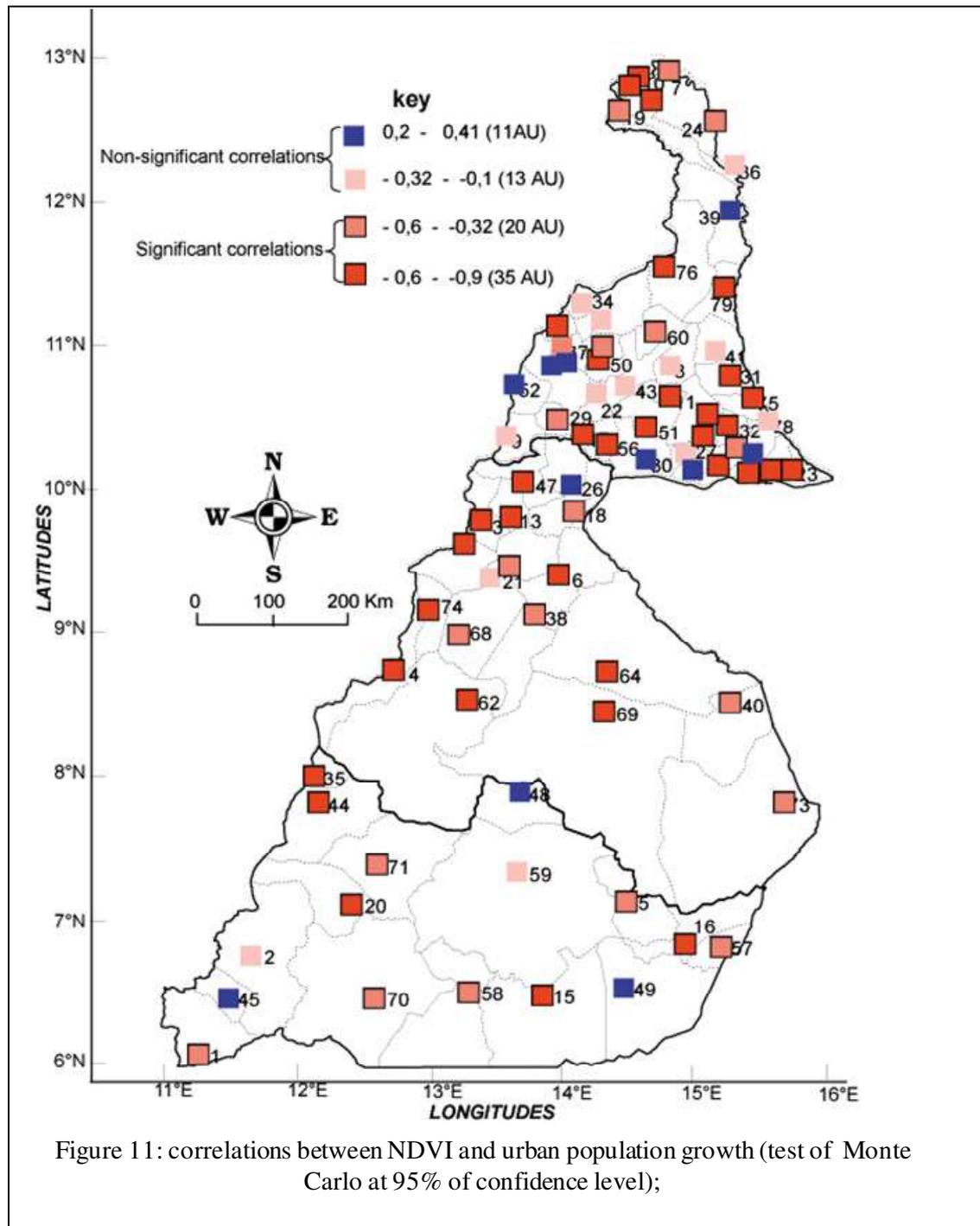
It should be also noticed that the highest growths do not concern the most populous cities like Maroua, Garoua and Ngaoundere (30%, 17% and 20%, respectively) but cities as Djohong, Madingring, Zina, Blangoua and Datchéka which increased their population, of more than 45 % in 10 years.



Besides, Guider and Mokolo, which represent the 6th and the 10th most populous city of Northern Cameroon, had only growths of 7% and 12%, respectively. This rapid rise in population in cities considered as rural areas some years ago can be explained by natural growth (through birth) and more important by the urban exodus, due to high urban unemployment. A few towns located north of the 8th parallel, experienced more than 30% in 10 years of population growth. South of this latitude, urban growth over 30% involve only the cities of Djohong, Madingring Kontcha and Ngaoui. Elsewhere, urban growth does not exceed the threshold of 30%.

4.3.2. Composite analysis of NDVI/urban population growth relationships

For each AU, the correlation coefficients between NDVI and urban population are calculated at the interannual time scale (79 AU x 10 years), for a set of 790 data for each parameter. Correlations are analyzed and tested through, Monte Carlo simulations at the 95% confidence level. The results in Figure 11 show that beyond the 6 cities experiencing population decreasing, the urban demographic evolution in northern Cameroon is an exponential function.



Based on this observation, it can be predicted that, the relationship between NDVI and urban population growth will be opposed, i.e. urban growth would imply a decrease in NDVI in urban areas. What about results?

The results show that, both parameters evolve in opposite way, i.e. annual values of the NDVI decrease, according to the increase of the population. However, following the 10-year period, the significant correlations ($R = -0.32$ to -0.9) are observed into cities as Ngaoundal, Kaele, Gobo, where the urban expansion is between 8000 and 30,000 inhabitants, and in those that have experienced an increased population of at least 30%, like Mora, Ngaoui and

Madingring. In both cases, the vegetation cover decreases, to the benefit of processes accompanying the population growth like, housing, politic and economic infrastructures. For cities as in Mbé, Taibong, Dembo, where the urban population remains low (< 8000 inhabitants), and those where the population has regressed (Zina, Doukoula, Porhi), the NDVI behaves as in non-urban areas. In this case, NDVI variations seem to be more related to the rainfall as in figure 9(A). Finally, the correlations between NDVI and urban population are weaker, i.e. NDVI values remain almost constant from year to year, in more populated cities as Maroua, Garoua, Ngaoundéré, Kousseri, where population has not increased significantly. Indeed, in those cities, the land use process evolves in a gradual way, compared to other regions where the rapid population growth entailed important changes in land-use.

The significant correlations are found in both northern and southern cities but the urban signal explains a larger part of vegetation cover variations, northward to 9°N, where 19 AU out of 46 AU show no significant NDVI / urban population correlation. South of this region, the urban signal is equally important, since only 5 AU shows no significant correlation.

These results might reflect the fact that, NDVI variations are less sensitive to the number of inhabitants than to the urban extension caused by the population growth. This is the reason why NDVI studies at local scale require some caution. What also emerges from this study is that, the demography of urban areas is growing sharply, in particular in cities still considered as rural. a few years ago. Most of the cities located northward of 8°N, experienced more than 30% in population increase between 1999 and 2008. In these localities the relationship between NDVI / urban population enlargement is significant because, the increase was followed by a reduction of vegetation cover, through the establishment, or the expansion of urban infrastructures. Southward to 8°N, the correlations are less significant in some cities as Meiganga, Mayo-Darle, and banyo. This mean that, in that specific cities, the vegetation dynamics is related to other factors than rainfall and urban population growth, since it is the where the vegetation cover is less dependent to rainfall.

Noteworthy these correlations have been computed at cities spatial scale, because urbanization is known as one of the poles of degradation of vegetation, and more specifically of deforestation (Ruth *et al* 2010). Indeed, the densely populated urban areas, as well as agricultural trade, are the main drivers of deforestation in tropical regions, while population of rural areas is not correlated with deforestation, indicating the importance of urban-based and international demands for agricultural products as drivers of deforestation.

5. Conclusion

The objective of this study was to evaluate factors of vegetation-cover variations through NDVI at 8 Km and 1Km resolutions in northern Cameroon. With this intention, two parameters were tested: precipitation, because of its well-known relationship with the NDVI, and the urban population growth, considered as indirect factor of vegetation cover decrease in urban areas and suburbs. Seasonal charts of NDVI at 8-km of spatial resolution were used as indicators of vegetation, while punctual rainfall data were interpolated, based on a kriging

method at 8-km of spatial resolution, according to the spatial resolution of NDVI data, from 1987 to 2002. The study focused on the 79 AU of Northern Cameroon, and was conducted following 3 aspects:

1) **Inventory of vegetation cover changes:** the main spatial patterns of the NDVI were described, as well as their annual and interannual evolution over the period 1987-2002. The 5 spatial classes of vegetation obtained from NDVI classification, reproduce the vegetation type gradient from north to south. These clusters are different from each other by their inter-annual and annual characteristics: annual profile; start and duration of the greening season, interannual anomalies, *etc.* At the cities scale, the NDVI also varies widely, even in cities belonging to the same cluster.

2) **NDVI/Rainfall relationship:** the changes in NDVI were explained, using the spatio-temporal evolution of rainfall. The NDVI/rainfall relationship shows better positive correlations northward to the 1000mm annual isohyet, confirming that, rainfall variability clearly explains a smaller part of the vegetation cover dynamics southward to 8°N, where the rainfall is more abundant.

3) **NDVI/urban population growth relationship:** NDVI changes were studied in urban areas which have known a significant increase in population over the period 1999-2008, in order to assess the impact of urbanization on vegetation.

The NDVI/ urban population relationship was based on a 10 years (1999-2008), due to the shallow temporal SPOT-NDVI data at 1-km resolution. The results showed good correlations into moderately populated cities (8000-30,000 inhabitants), as in those which have experienced a rapid increase in population (> 30%). By contrast, in the most populated cities such as capitals of provinces, the urban signal is strong, and NDVI values, although weak, remained constant, despite changes in population. In the sparsely populated towns (<8000), the urban signal is weaker so vegetation evolutions depends more on rainfall or land use related factors as South of the 8th latitude. Thus, NDVI studies of at local scale are often biased by anthropogenic factors in and around urban areas and require therefore some caution. Our results show that NDVI variations are less sensitive to the number of inhabitants than to the urban expansion caused by the population growth.

These preliminary findings enable a better understanding of the determinants of vegetation cover change in the Northern Cameroon and more generally, in the Sahelian and Guinean areas. Therefore, they suffer from methodological constraints since the NDVI spatial resolution of 8-km or 1-Km cannot detect changes below the size of that pixel. Consequently, the reflected signal is the proportion of photosynthetic radiation absorbed by the dominant land-cover. A pixel is thus likely to gather several types of land-use, those being often the results of complex anthropogenic or bioclimatic processes. This limit arouses the interest to take into account products with higher resolution, like Landsat dataset at a 30m spatial resolution available since 1972.

It would also be of high interest to explore the impact of other demographic factors like the rural population growth or migrations, in particular the seasonal movements of livestock

(transhumance) that occupies a significant part in land-use (Boutrais 1998). Additionally, the organisation of human activities in Northern Cameroon is generally closely related to ethnic origins: Islamic people (Peulh, Arabs) are basically cattle raisers or nomadic pastoralists whereas the non-Muslim populations are essentially farmers. The association between agriculture and livestock is made for socioeconomic, cultural or healthy reasons, and is very often soiled by numerous land conflicts (Blanc-Pammard 1995, Watang *et al* 2006). So, it would be interesting to include those parameters to understand the mechanisms which are associated with land-use. Discussions to include such hypotheses are ongoing, using higher resolution satellite products and possibly field surveys.

Acknowledgements

We are grateful to the Global Inventory Monitoring and Modelling Systems (GIMMS) group and the Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VIITO) which provided NDVI data, and National Meteorology offices of Chad, Central Africa Republic, Nigeria and Cameroon for the provision of rainfall data. Special thanks, to J.-B. Djoumessi, for his invaluable assistance in the acquisition, and analysis of demographic data.

The study was supported by the Global change and Ecosystems programme (EU Integrated project: African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA) and the French component of AMMA. Based on a French initiative, AMMA was built by an international scientific group and is currently funded by a large number of agencies, especially from France, UK, US and Africa. Detailed information on scientific coordination and funding is available on the AMMA International web site <http://www.amma-international.org>

References

- Achard, F., Blasco, F., 1990, Analysis of vegetation seasonal evolution and mapping of forest cover in West-Africa with the use of NOAA-AVHRR HRPT data. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, Vol. 56, n° 10, p. 1359-1365.
- Antoine, P., 1997, L'urbanisation en Afrique et ses perspectives. *Programme FAO/approvisionnement et distribution alimentaire des villes, Aliments dans les villes DT/12-97F*, 21 p.
- Baillargeon, S., 2005, Le Krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec.
- Batholomé, E., 1990, Suivi par télédétection des produits céréaliers pluviaux en pays sahéliens. *Télédétection et Sécheresse*, Ed. AUPELF-UREF, pp. 15-27.
- Beauvillain, A., 1989, Nord Cameroun : Peuplement et crise. Thèse de Doctorat, Université de Rouen, France.
- Bella-Medjo, M., 2008, Analyse multi-échelles de la variabilité pluviométrique au Cameroun et ses conséquences sur les rendements du coton. Thèse de doctorat, université Paris, France.

- Bigot, S., Zin, I., Diedhiou, A., 2005, Apport des données de HRV de SPOT pour l'étude des variations phénologiques dans le bassin de l'Ouémé Bénin. *Télédétection*, Vol.4, N°4, pp. 339-353.
- Blanc-Pammard, C., Cambrézy, L., 1995, *Terres, terroirs, territoires, les tensions foncières*, Paris, ORSTOM, Ed. « colloques et séminaires », 472 p.
- Boutrais, J., 1996, *Hautes terres d'élevage au Cameroun*, Thèse, 3 vol., Paris, Éd. de l'ORSTOM, 1 302 p.
- BUCREP, 2010, Final report of results of the general census of population and habitat (2005), 6 volumes + 1 special edition.
- Camberlin, P., Martiny, N., Philippon, N., Richard, Y., 2007, Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa, *Remote sensed of Environment* 106, pp. 199-216.
- Clarke, John I., Kosinski, L., 1982, *Redistribution of population in Africa*, Londres Heinemann, 212 p.
- Cressie, N.A.C., 1991, *Statistics for Spatial Data*, New York: John Wiley & Sons, 900 p.
- DIBONG SIEGFRIED D., NDIANG Z., ONDOUA J-M. , BILONG P., 2011: Origin and propagation of *Chromolaena odorata* (L.) king and robinson (Asteraceae) between Mabele and Meiganga in the North of Cameroon, *American Journal of Food and Nutrition* ISSN 2157-1317, doi:10.5251/ajfn.
- Djoufack ,V., 2008, Cycle saisonnier du NDVI dans le Nord-Cameroun et relations avec la pluviométrie 1982-2002. in *Actes des journées de climatologie de la commission climat et société*, 13-14 mars 2008, Nantes, pp. 94-104.
- Donfack, P., 1998, Végétation des jachères du Nord-Cameroun : typologie, diversité, dynamisme, production. Thèse de doctorat d'Etat, Université de Yaoundé1, Cameroun.
- Dongmo, J.L., 1998, Human impact on the degradation of vegetation in north Cameroon, *Population and environment in arid regions*, UNESCO Publication chapter, pp. 45-60.
- Eklundh, L., Olsson, L., 2003, Vegetation index trends for the African Sahel 1982–1999. *Geophysical Research Letters* 30, 1430, doi: 10.1029/2002GL016772.
- Fung, T., LeDrew, E., 1987, Application of Principal Components Analysis to change detection. *Photogrammetric Engineering And Remote Sensing*, 53, pp. 1649-1658.
- Gong, P., 1993, Change detection using principal component analysis and fuzzy set theory. *Canadian Journal Remote Sensing*, 19, pp. 2-29.
- Gonné, B., 2005, Migrations et problématique d'installation récente des paysans dans la vallée de la Bénoué Nord Cameroun. In *XIIIe Colloque international du réseau MEGA TCHAD*, 31 octobre-3 novembre 2005, Maroua, pp. 68-81.
- Gratton, Y., 2002, le Krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale. Available online at: www.iag.asso.fr.

- Herrmann, S.M., Anyamba, A., Tucker, C.J., 2005, Recent Trends in Vegetation Dynamics in the African Sahel and their Relationship to Climate. *Global Environmental Change*, 15, pp. 394-404.
- Hochheim, K.P., Barber, D.G., 1998, Spring wheat yield estimation for western Canada using NOAA NDVI Data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, N°1, pp. 17-25.
- Hurault, J., 1975, *Surpâturage et transformation du milieu physique, formations végétales, hydrologie de surface, géomorphologie : l'exemple des hauts plateaux de l'Adamaoua Cameroun*, Institut géographique national. Paris, 206 p.
- Isaaks, and Srivastava, 1989, *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, 592 p.
- Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailhès, J., Hilal. M., Wawresky, P., 2008, Interpolation par recherche d'information locale, *Climatologie*, 5, pp. 27-48.
- Journel, A. G., and Huijbregts, C. J., 1981, *Mining Geostatistics*, Academic Press, 597 p.
- Lacombe, J.P., 2007, *Initiation au logiciel ENVII 4.3, initiation au traitement d'images satellitales travaux dirigés*, cahier 2, E.N.S.A.Toulouse, 91 p.
- Lebel, T., Ali, A., 2009, Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime 1990-2007. *Journal of hydrology*, 3751-2, pp. 52-64.
- Letouzey, R., 1968, *étude phytogéographique du Cameroun*, Lechevalier, 508 p.
- Marguerat, Y., 1982, Les réseaux urbains en Afrique noire : de la pyramide a la macrocéphalie, *bulletin de la société languedocienne de géographie*, 16, pp. 19-28.
- Martiny, N., Richard, Y., Camberlin, P., 2005, Interannual persistence effects in vegetation dynamics of semi-arid Africa, *Geophysical Research Letters*, 32, doi:10.1029/2005GL024634.
- Martiny, N., Camberlin, P., Richard, Y., Philippon, N., 2006, Compared regimes of NDVI and rainfall in semi-arid regions of Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 27, pp. 5201-5223.
- Mas, J.F., 1999, Monitoring land-cover changes a comparison of change detection techniques, *International Journal of Remote Sensing*, 2, pp. 139-152.
- Mathieu, B., 2000, le sorgho repiqué au Nord-Cameroun : de l'analyse des pratiques culturelles à l'accompagnement technique des producteurs. Mémoire de stage DEA ETES, DPGT/CIRAD, Montpellier, France.
- MINAEPAT/UNDP, 2002, *Conditions de vie des ménages et profil de pauvreté à l'Extrême-Nord Cameroun en 2001*, Rapport de la Direction des Statistiques et de la Comptabilité Nationale DSCN, composante N°1 suivi-évaluation de la pauvreté, 21 p.
- Ndame, J.P., Briltey, B., 2004, croissance urbaine, mutations agricoles et dépendance alimentaire dans le Nord-Cameroun. *Annales de la Faculté des Lettres*, 3, p. 21.
- Odekunle, T.O., Orinmoogunje, I.O.O., Ayanlade, A., 2007, Application of GIS to assess rainfall variability impacts on crop yield in Guinean savanna part of Nigeria, *African. Journal of Biotechnology*, 6, N°18, pp. 2100-2113.

- Oliver, M.A., Webster, R., 1990, Kriging: a method of interpolation for geographical information system. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4, N°3, pp. 313-332.
- Olson, L., Eklundh, L., Ardö, J.A., 2005, Recent greening of the Sahel trend, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environments*, 63, pp. 556-566.
- Ozer, P., Michel, E., Demarée, G., Vandiepenbeeck, M., 2003, Discussion of analysis of sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000: the drought continues, the sahelian drought may have ended during the 1990. *Hydrological Sciences Journal*, 483, pp. 489-496.
- Pouchin, T., Debrie, J., Bourcier, A., 2002, l'observation de la végétation de l'Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale: l'apport de l'indice de végétation normalisé. *Sécheresse*, 13, N°3, pp. 187-194.
- Ruth, S. DeFries, Rudel, T., Uriarte, M., Hansen, M., 2010, Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century. *Nature Geoscience*, 3, pp. 178-18.
- Seignobos, C., Moukouri Kuoh, H., 2000, *Les sols et les ressources en terres du Nord Cameroun*, Atlas de la province de L'Extrême-Nord Cameroun, Ed-IRD, Paris.
- Singh, A., 1986, Change detection in the tropical environment of north-eastern India using Landsat. *Remote Sensing And Tropical Land Manager*, 1, pp. 237-254.
- Suchel, J.B., 1987, les climats du Cameroun. Thèse doctorat d'Etat, Université de Bordeaux III, France.
- Tou, J.T., Gonzalez, R. C., 1974, *Pattern Recognition Principes*. Addison-Wesley Publishing Co.
- Tucker, C.J., 1979, Red and Infrared linear combination for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 8, pp. 127-150.
- Tucker, C.J., Pinzon, J., Brown, M.E., Slayback, D., Pak, E.W., Mahoney, R., Vermote, E., El Saleous, N., 2005, An extended AVHRR-8km NDVI data set compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 26, pp. 4485-4498.
- White, F., 1983, *The vegetation of Africa*, Ed. UNESCO, Paris, 356 p.
- Yengué, J.L., 2002, les mécanismes du déboisement et du reboisement dans le Nord du Cameroun, *Annales de géographie*, 11, N°624, pp. 138-156.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

- Figure I-1:** Moyennes annuelles des précipitations régionales à partir du CRU en mm (1951-2002)..... 14
- Figure I-2 :** répartition en 3 sous-périodes de la profondeur temporelle des stations de l'étude 17
- Figure I-3:** répartition spatiale et noms des stations d'observation pluviométriques au Cameroun 18
- Figure I-4:** Carte des types d'occupation du sol en Afrique, d'après le GLC2000 : celle-ci peut être rapprochée des figures II-11 pour le contexte ouest-africain, V-9 dévolu au domaine régional (Equatorial Atlantique), I-6 qui zoome spécifiquement sur le Cameroun et V-1 qui présente le seul Sud-Cameroun. 23
- Figure I-6:** grandes formations végétales du Cameroun d'après Letouzey (1979) et White(1983) ; figure adaptée d'après Youta (1998). 35
- Figure I-7:** réseau hydrographique et relief (en mètres) du Cameroun (d'après les données du MNT ETOPO30-NOAA à 900m) ; 38
- Figure I-7 :** spatialisation des précipitations et diagramme ombro-thermique de quelques stations représentatives des domaines climatiques..... 43

CHAPITRE II

- Figure II-1 :** régions du monde soumises au régime de mousson : Adapté d'après Ramage, (1971) : le cadre englobe les domaines de mousson ; les zones en hachures sont celles qui répondent au critère (i), (ii) et (iii) ; la courbe foncée marque la limite septentrionale du critère (iv). 50
- Figure II-2 :** Vent méridien moyenné sur les longitudes 20W-20E et au cours de la période 1979-2002 ; (en abscisses) : latitudes 30S-30N ; (en ordonné) 10 niveaux de pression; (en bleu)= : vent d'est, (en rouge)= : vent d'ouest, les côtes indiquent la vitesse du vent (m/s). Les flèches en bleu indiquent la direction des vents, leur dimension étant proportionnelle à leur vitesse. 52
- Figure II.3 :** Vitesse et direction du vent zonal à 10 niveaux de pression (en ordonnée) et entre les longitudes 20W-20^E (en abscisse), calculées au cours des 4 trimestres de l'année et sur la période 1979-2002 ; A) moyennes entre 6°N-20°N ; B) moyennes entre 1°N-6°N ; (en

bleu)=vent d'est ; (en rouge)= vent d'ouest ; la longueur des flèches est proportionnelle à la vitesse du vent. 53

Figure II-4: Pressions (SLP), vents moyens annuels en surface (925hPa) en août, et principaux « centres d'action dynamiques » de surface et/ou d'altitude; moyennes calculées suivant les réanalyses du NCEP/DOE2 entre 1979 et 2002..... 55

Figure II-5: champs moyens bimensuels des températures de surface (en °C) dans le bassin de l'atlantique tropical ; moyennes calculées entre (1951-2002)..... 57

Figures II-6 : cycles annuels des températures de surface océanique (SST) sur la période 1951-2002: a) SST de l'Atlantique nord, calculées d'une part aux échelles décennales et d'autre part pour les sous-périodes 1951-1970 et 1971-2002 ; b) idem que précédent sur l'Atlantique nord ; c) idem que précédent sur la Méditerranée ; d) idem que précédent sur le golfe de Guinée. 58

Figure II-7. Schéma de la circulation superficielle et sub-superficielle dans l'Atlantique tropicale et le Golfe de Guinée : (Flèches en trait continu) =courants de surface : Contre Courant Equatorial Nord (CCEN) ; Courant de Guinée (CG) ; Contre Courant Equatorial Sud (CCES) ; Courant Equatorial Sud (CES) ; Courant de Benguela (CB) ; (Flèches en traits pointillés)=Courants de sub-surface : Sous courant Equatorial Nord (SCEN) ; Sous Courant Equatorial (SCE) ; Sous Courant Equatorial Sud (SCES) ; Sous courant du Gabon-Congo ; Courant d'Angola (CA)..... 59

Figure II-8: deux premiers modes d'une ACP (avec rotation Varimax) sur le rythme annuel et la variabilité interannuelle des SST de l'océan Atlantique tropicale (latitude 45°N-45°S ; longitude 30W-30E) pour la période 1951-2002. Les vecteurs propres exprimés en unités de coefficients de corrélation, expliquent 25% (VP1) et 17% (VP2) de la variance commune, respectivement. CP1 et CP2 : respectivement, composantes principales associées aux vecteurs propres VP1 et VP2..... 60

Figure II-9: Champs de cumuls moyens annuels de pluies (en mm) à l'échelle régionale: a) moyenne 1901-1951 ; b) moyenne 1951-2002 ; c) moyenne 1951-1970, d) moyenne 1971-2002..... 62

Figure II-10. cycle saisonnier moyen des précipitations : (a,b,c,d)=moyennes trimestrielles des précipitations (en mm) calculées sur la période 1951-2002 64

Figure II-11 : principales formations végétales en Afrique de l'ouest 65

CHAPITRE III

Figures III-1 : a) Comparaison des cycles annuels de précipitations dans le Nord-Cam entre 1901-1950 et 1951-2002 ; b) idem que précédemment au cours des périodes 1951-1970 et 1971-2002 ; * test de significativité de Student à 95 % ; c) cumuls interannuels entre 1901 et 2002 ; courbe au-dessus = moyenne mobile (filtre) sur 8 ans..... 72

- Figures III-2 :** a) Comparaison des cycles annuels de précipitations dans le Sud-Cam entre les périodes 1901-1950 et 1951-2002 ; b) idem pour les périodes 1951-1970 et 1971-2002 ; * test de Student à 95 % ; c) variabilité interannuelle des précipitations dans le Sud-Cam entre 1901 et 2002 ; courbe en noir = filtre sur un pas de 8 ans. 74
- Figures III-3 :** Champs moyens bimestriels de précipitations (en mm) au Cameroun entre 1951 et 2002. 75
- Figures III-4 :** a) Diagramme latitude-temps des précipitations sur la période 1951-1970 : en ordonnée = latitudes, en abscisse = mois ; les hauteurs de pluies sont exprimées en mm ; b) idem qu'en a) mais le diagramme est réalisé sur la période 1971-2002. 76
- Figures III-5 :** a) Diagramme longitude-temps (9°E - 17°E) des précipitations sur la période 1951-1970 : en abscisse = longitudes, en ordonnées = mois ; les hauteurs de pluies sont exprimées en mm ; b) idem qu'en a) mais le diagramme est réalisé sur la période 1971-2002. 78
- Figures III-6 :** Variabilité pluviométrique au Cameroun au cours de la saison des pluies (calculée à partir des indices pluviométriques de chaque domaine climatique). 80
- a) Moyenne cumulée des précipitations au cours de la saison de pluies mai-septembre dans le Nord-Cam entre 1951 et 2002 ; (courbe au-dessus) : signal basse fréquence filtré sur 8 ans ; b) résidu (signal haute fréquence) pour la période 1951-2002 dans le Nord-Cam c) idem que pour a) mais moyenne cumulée sur la *petite saison des pluies* (MAMJ) dans le sud entre 1951 et 2002 ; d) résidu MAMJ dans le Sud-Cam entre 1951 et 2002 ; e) et f), idem que c) et d) mais opérations effectuées au cours de la grande saison des pluies (SON).
- Figures III-7 :** Analyse spectrale de la variabilité pluviométrique en saison des pluies au Cameroun entre 1951 et 2002 (testée sur le signal filtré < 8 ans sous une hypothèse de bruit blanc à 95 %) ; a) saison des pluies dans le Nord-Cam (mai- septembre) ; 82
- b) petite saison des pluies dans le Sud-Cam (mars-juin) ; c) grande saison des pluies dans le Sud-Cam (septembre-novembre). 82
- Figures III-8 :** Deux premiers modes de l'ACP avec rotation Varimax à l'échelle annuelle représentant 54 % et 45 % de la variance commune respectivement : a) nombre de facteurs à extraire à partir de l'analyse parallèle de Humphrey-Ilgen ; b) scree-test ; (c, e) : deux premiers vecteurs propres de l'ACP (avec rotation Varimax) en unités de coefficient de corrélation, cercles proportionnels : en gris = corrélations positives, en blanc = corrélations négatives, doubles cercles = corrélations significatives au test de Pearson à 95 % ; (d, f) : deux premières composantes principales normalisées. 83
- Figures III-9 :** ACP sur les pluies interannuelles au Cameroun entre 1951 et 2002 : a) nombre de facteurs à extraire à partir de l'analyse parallèle de Humphrey-Ilgen ; b) scree-test ; (c, e) : deux premiers vecteurs propres de l'ACP (avec rotation Varimax) en unités de coefficient de corrélation, cercles proportionnels : en gris = corrélations positives, en blanc = corrélations négatives, doubles cercles = corrélations significatives au test de Pearson à 95 % ; (d, f) : deux premières composantes principales normalisées représentant 41 % et 21 % de la variance commune respectivement. 85

- Figures III-10:** CAH1 des données pluviométriques du CRU : a) dendrogramme de la répartition des points ; b) répartition spatiale des classes ; c) cycles annuels des 5 classes de la CAH. 88
- Figures III-11:** CAH2 automatique des pluies suivant les stations du Cameroun entre 1951 et 2002 : a) spatialisation des classes ; b), c) (classes 1, 2, 3, 4, 5) moyennes annuelles suivant les classes de la CAH. 89
- Figures III- 12:** recherche des ruptures de stationnarité dans les séries pluviométriques des domaines équatorial et subéquatorial. Pour chaque domaine pluviométrique, a) variabilité interannuelle ; b) SMWDA sur les fenêtres de 26 et de 30 ans; c) test de Pettit ; d) test de Mann Kendall..... 93
- Figures III-13 :** recherche des ruptures de stationnarité dans les séries pluviométriques des domaines équatorial et subéquatorial. Pour chaque domaine pluviométrique, a), e) i) = variabilité interannuelle ; b) f) j) = SMWDA avec un seuil de confiance de 95% sur les fenêtres de 26 et de 30 ans (voir légende) ; c) g) k) = test de Pettit (95%) ; d) h) l) = test de Mann-Kendall (95%)..... 95
- Figure III-14:** CAH automatique des pluies au Cameroun : (a, b) dendrogramme et champ spatial de la CAH entre 1951 et 1970 ; (c, d) : entre 1971 et 1990 ; (e, f) : entre 1991 et 2002. Les figurés à l'intérieur des cartes représentent les points d'observations du CRU (grille régulières de 0.5°x 0.5°)..... 97
- Figures III-15 :** Indices pluviométriques des 5 régions pluviométriques du Cameroun (1951-2002)..... 100
- Figures III-16 :** Nombre de mois humides en domaines équatorial (a) et subéquatorial (b) sur la période 1951-2002 : traits interrompus =variations interannuelles des cumuls mensuels à $P > 50$ mm (rouge) ; $P > 100$ mm (bleu) ; $P > 150$ mm (vert) et $P > 200$ mm (noir) ; traits continus = courbes lissées sur 3 ans, suivant différents seuils. 104
- Figures III-17 :** Idem que précédent pour les domaines côtier (a) ; tropical humide (b) et soudano-sahélien (c)..... 106
- Figures III-18 :** Variabilité saisonnière des pluies en domaine bimodal camerounais entre 1951 et 2002 : A) en domaine équatorial ; B) en domaine subéquatorial ; a1 à a4 : anomalies standardisées des cumuls saisonniers en domaine équatorial ; b1 à b4 : idem que précédemment, mais en domaine subéquatorial..... 108
- Figures III-19 :** Boxplots représentant la comparaison des cumuls saisonniers entre les 5 années les plus humides et les 5 années les moins humides de la période 1951-2002 dans les domaines équatorial (a, b) et subéquatorial (c, d). 111
- Figure III-20:** Contribution moyenne saisonnière des pluies en domaine unimodal : a) domaine côtier ; b) domaine tropical humide ; c) domaine soudano-sahélien ; (a1 et a2) : anomalies saisonnières en domaine côtier ; (b1 et b2) : idem que précédemment en domaine tropical humide ; (c1 et c2) : idem que précédemment en domaine soudano-sahélien..... 113

Figures III-21 : Comparaison saisonnière des cinq années les plus humides et des cinq années les moins humides de la période 1951-2002 en domaine unimodal (a, b, c) ; d) : années humides et sèches classées par ordre croissant dans chaque domaine pluviométrique..... 115

Figures III-22 : a) Positions mensuelles (avril-octobre) de la ZCIT calculées sur la période 1988-2002, et entre les longitudes 5°E-20°E ; b) idem, au cours d'une année excédentaire ; c) idem, au cours d'une année déficitaire..... 117

CHAPITRE IV

Figure IV-1 : Variabilité du nombre de jours de pluies par an dans différents domaines pluviométriques du Cameroun (1951-2002) ; (courbe) nombre moyen de jours pluvieux par an 125

Figure IV- 2 : Cycles annuels du nombre moyen de jours pluvieux suivant les domaines pluviométriques du Cameroun (1951-2002). 127

Figure IV-3: cycles annuels du cumul moyen des jours pluvieux dans les domaines pluviométriques du Cameroun et suivant les composites d'années humides et sèches. 128

Figure IV -4: Fréquence d'occurrence des jours pluvieux entre le 1^{er} mars et le 30 novembre au cours des 52 années d'observation (1951-2002) et suivant différentes classes de cumuls journaliers ; les stations a) à e) représentent respectivement les domaines équatorial, subéquatorial, côtier, tropical humide et soudano-sahélien ; pou plus de lisibilité, les résultats sont présentés en moyennes lissées sur 5 jours. 132

Figure IV-6 : Début et retrait de la saison des pluies dans les domaines pluviométriques du Cameroun suivant les 26 années les plus humides et les 26 années les moins humides de la période 1951-2002, d'après la méthode des probabilités (Garbutt et *al*, 1981). 139

Figure IV-7 : Cycle moyen annuel des dates de démarrage de la saison des pluies dans les domaines pluviométriques du Cameroun suivant la méthode de fréquences cumulées (Ilesamni, 1972). 142

Figure IV-8 : Variabilité interannuelle (1951-2002) des dates de démarrage (A) et de fin (B) et durée (C) de la saison des pluies dans les 5 domaines pluviométriques du Cameroun suivant la méthode des fréquences cumulées (Ilesamni,1972). 143

Figures IV-9 : Relations entre dates de début et de fin de saison des pluies avec les latitudes d'une part et les longitudes d'autre part ; calculs effectués suivant 35 stations sur la période 1951-2002..... 146

Figure IV-10 : Comparaison entre dates de début (A), de fin (B) et de longueur (C) de la saison des pluies suivant les méthodes de fréquences cumulées et de probabilités ; stations classées par domaine pluviométrique..... 148

- Figure IV-11** : Répartition spatiale de la longueur de la saison des pluies au Cameroun suivant la méthode des probabilités (A) et des fréquences cumulées (B). 149
- Figure IV-12**: Début de la saison des pluies suivant les critères agronomiques dans quelques stations du Cameroun : (en noir) moyennes (en 52 ans) des dates de démarrage dans les stations classées par domaines pluviométriques 154
- Figure IV-13** : Fin de saison des pluies suivant les critères agronomiques dans quelques stations du Cameroun : (en noir) moyennes des stations classées par domaines pluviométriques 156
- Figure IV-14** : Longueur de la saison des pluies suivant les critères agronomiques dans quelques stations du Cameroun : les stations sont classées par domaines pluviométriques .. 157
- Figure IV-15** : Corrélations entre cumuls saisonniers et dates de début (colonne de gauche) et de fin (colonne de droite) de saison de pluies dans différents domaines pluviométriques du Cameroun (méthode agronomique)..... 159
- Figure IV-16** : Corrélations entre les dates moyennes de début et de fin de saison des pluies (méthodes agronomiques) et situation géographique des stations. 160
- Figure IV-17** : Répartition spatiale de la longueur de la période végétative au Cameroun, suivant les critères agronomiques. 161
- Figure IV-18** : évolution du nombre de séquences sèches suivant différentes longueurs, et dans les différents domaines pluviométriques du Cameroun. L'exercice est effectué sur 3 sous-périodes entre 1951-2002..... 165
- Figure V-1** : Typologie du couvert végétal dans le sud-Cameroun, d'après le CARPE-PFBC. 172
- Figures V-2** : Diagrammes latitude/temps du champ de NDVI sur la fenêtre du Cameroun au cours des sous-périodes 1982-1988 (a), 1989-1999 (b) et 2000-2006 (c). 175
- Figures V-3** : Diagrammes longitude/temps du champ de NDVI sur la fenêtre du Cameroun au cours des sous-périodes 1982-1988 (a), 1989-1999 (b) et 2000-2006 (c)..... 176
- Figures V-4** : Répartition spatiale du NDVI au Cameroun au cours de la saison sèche : (a, b, c) = moyenne décembre-février ; et au cours des périodes humides (d, e, f) = moyenne avril-mai; (g, h, i) = moyenne septembre-octobre ; (j, k, l) = août-septembre : les moyennes saisonnières sont calculées pour les sous-périodes 1982-1988, 1989-1999 et 2000-2006. La légende située sur la première carte est valable pour toutes les autres..... 178

CHAPITRE V

Figures V-5 : Coefficient de variation annuel du NDVI au Cameroun (exprimé en pourcentage), calculé pour les sous-périodes 1982-1989 (a), 1990-1999 (b) et 2000-2006 (c) ; les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de points de grille appartenant à chaque classe de valeur. La légende située sur la première carte est valable pour les deux autres... 180

Figures V-6 : a) Classification (*ISODATA*) du NDVI moyen (1982-2002) au Cameroun en 15 classes ; b) cycles annuels du NDVI dans les différentes classes de végétation réparties en 3 sous-périodes : 1982-1988 (noir) ; 1989-1999 (bleu) ; 2000-2002 (rouge) ; les chiffres au-dessus des graphes représentent les valeurs d'amplitudes (amp) du NDVI et du coefficient de variation (CV), calculées sur le cycle annuel moyen de l'ensemble de la période. 182

Figure V-7 : NDVI moyen de juillet-août dans les classes de végétation au sud de 6° nord. 184

Figures V-8 : Anomalies de NDVI suivant les classes de végétation du Cameroun (1982-2002) ; les courbes indiquent les moyennes lissées de 3 ans ; les numéros de classes font référence à la figure V-6..... 188

Figure V-9 : *Hot spots* de déforestation en Afrique centrale, d'après Mayaux *et al.*, 1999.. 190

Figure V-11 : Périmètres urbains de Yaoundé en 1973 et 1988 (Sietchiping, 2003)..... 198

Figure V-12 : Détection des changements à partir de la méthode de différenciation d'images (ref. chapitre I)..... 204

Figure V-13 : Cycles annuels du NDVI-SPOT au Cameroun en fonction de huit types d'occupation du sol d'après le GLC2000-1km : moyenne 1998-2009. 206

Figure V-14 : Variations interannuelles de huit types d'occupation du sol au Cameroun (d'après le GLC2000): les vecteurs des différents types d'occupation du sol ont été projetés sur les métafichiers de NDVI-SPOT-1 km (1999 et 2008). Chaque courbe représente la moyenne tendancielle du NDVI de chaque vecteur d'occupation du sol sur cette période. .. 209

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I-1. Couverture temporelle des capteurs AVHRR	20
Tableau I-2: Caractéristiques des images NDVI-GIMMS pour le continent africain	21
Tableau I-3: Caractéristiques du NDVI/SPOT-VEGETATION pour l’Afrique	22
Tableau I-5 : qualité des valeurs de Kappa	29
Tableau I-5: récapitulatif des caractéristiques géo-climatiques du Cameroun	45

CHAPITRE II

Tableau II-1 : évolution du couvert forestier en Afrique centrale (chiffres en 1000 ha)	66
--	----

CHAPITRE III

Tableau III-1 : Corrélations entre cumul mensuel de pluies à différents seuils et anomalies interannuelles dans les 5 domaines pluviométriques du Cameroun.....	107
Tableau III-2 : Contribution saisonnière moyenne des pluies en domaine bimodal et corrélations avec les cumuls annuels (test de Monte-Carlo à 99 %).	109
Tableau III-3 : Contribution saisonnière moyenne des pluies en domaine unimodal et corrélations entre anomalies saisonnières et indices régionaux (test de Monte-Carlo à 99 %).	114

CHAPITRE IV

Tableau IV-1 : Comparaison du nombre de jours secs ($P < 1\text{mm}$) et pluvieux ($P \geq 1\text{mm}$) suivant les composites humides et sèches de la période 1951-2002 dans les domaines pluviométriques du Cameroun : les jours pluvieux sont classés selon différents seuils	
---	--

(intensité) et les cumuls de chaque seuil de pluies sont estimés en pourcentage par rapport au cumul annuel. 130

Tableau IV-2 : Corrélations entre cumul annuel et hauteur moyenne des jours pluvieux suivant différents seuils et composites d'années humides et sèches de la période 1951-2002 131

Tableau IV-3 : Délimitation de la longueur de la saison des pluies dans quelques stations du Cameroun, à partir de la méthode des probabilités Garbutt *et al.*, (1981) 140

Tableau IV-4: Corrélations entre début/longueur et début/fin de la saison des pluies dans les domaines pluviométriques du Cameroun à partir de la méthode des pourcentages cumulés ; Ilesamni, 1972)..... 144

Tableau IV-5 : Longueur de la saison des pluies dans quelques stations du Cameroun, à partir de la méthode des pourcentages cumulés (Ilesamni, 1972) : dates en numéros de pentades. 145

Tableau IV-6 : Nombre d'occurrence des dates de début de la saison des pluies (critères agronomiques) classé par mois dans quelques stations du Cameroun (1951-2002). 155

Tableau IV-7 : corrélations entre début/longueur et début/fin de la saison des pluies dans les domaines pluviométriques du Cameroun suivant les critères agronomiques. 158

Tableau IV-8 : Répartition des séquences sèches intrasaisonnières de différentes longueurs et dans les 5 domaines pluviométriques du Cameroun 164

CHAPITRE V

Tableau V-1 : Statistiques de la répartition saisonnière des pixels de NDVI suivant 5 classes de valeurs..... 179

Tableau V-2 : Maxima et minima moyens de NDVI et nombre de quinzaines avec un NDVI supérieur à 0,45 pour les classes de végétation du Cameroun (1982-2002) : les numéros de classes se rapportent à la figure V-1 ; les classes situées au sud (au nord) de 6°N sont en gris foncé (clair). 185

Tableau V-3 : Fréquences des types floristiques par rapport à la phénologie végétale nord-équatorial, déterminées suivant la classification de Matthews (1983) et calculées suivant une classification automatique des régimes annuels décennaux moyens du NDVI entre 1983 et 1992. 186

Tableau V-4 : Grands foyers de déforestation au Cameroun, d'après Achard *et al.*, 1998. . 191

Tableau V-5: Matrice de confusion de la classification : les 5 classes sont issues de la classification du NDVI (voir figure V-12) et définitions ci-dessus. 203