

**UNIVERSITE MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC**

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER II

**Discipline : Mécanique, génie mécanique, génie-civil
Formation doctorale : Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental
Ecole doctorale : Géosciences**

présentée et soutenue publiquement

par

Mahaman OUEDRAOGO

le 18 décembre 2001

Titre :

**Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité
climatique sur les ressources en eau en Afrique de
l'ouest. Analyse des conséquences d'une
sécheresse persistante : normes hydrologiques et
modélisation régionale.**

JURY

M. SERVAT Eric, Directeur de Recherche, IRD, Montpellier	Directeur de Thèse
M. CHOCAT Bernard, Professeur, INSA, Lyon	Rapporteur
M. RIBSTEIN Pierre, Directeur de Recherche, IRD, Montpellier	Rapporteur
M. CONWAY Declan, Maître de conférence, UEA, Norwich	Examineur
M. DESBORDES Michel, Professeur, Université Montpellier II	Examineur

RESUME

Ce travail s'inscrit dans la problématique de la révision des normes hydrologiques dans un contexte de déficits pluviométrique et hydrométrique prolongé.

L'analyse bibliographique sur la variabilité climatique et des ressources en eau menée dans cette étude révèle que la sécheresse actuelle qui est intervenue à la fin des années 60 apparaît comme un phénomène anormal qui se distingue des autres sécheresses persistantes qui se sont déjà produites depuis le début du siècle par sa durée, son intensité et son extension.

L'application de différentes méthodes statistiques aux séries chronologiques de variables caractéristiques du régime pluviométrique et hydrométrique montre que globalement sur la zone d'étude (Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Mali), ces variables sont en baisse depuis les alentours de 1970. Le déficit pluviométrique annuel varie entre 10 et 40 %, alors que les débits moyens annuels présentent un déficit supérieur à 20% et dépassant quelques fois 60%.

Cette étude s'est intéressée aux limites de notions comme "normes hydrologiques" et "durée de retour" dans une région qui connaît un contexte déficitaire depuis plus de 30 ans.

L'étude de la récurrence des pluies annuelles montre des différences importantes des valeurs fréquentielles calculées selon les échantillons constitués (observations sur la période 1950-1997 et observations sur la période 1971-1997).

Les valeurs fréquentielles des séries de débits moyens annuels, de même que les variables caractéristiques des hautes-eaux présentent des résultats similaires à ceux observés sur les pluies annuelles. Les variables caractéristiques des basses-eaux sont également touchées avec l'apparition de valeurs nulles pour des fréquences rares lorsqu'on ne considère que les données de la période située après 1970.

Le recours à la modélisation de la relation pluie-débit, basée sur les équations de bilan hydrique nous a permis de procéder à une régionalisation des lames d'eau écoulées mensuelles et annuelles et de mener l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau. Les effets de la péjoration du climat se manifestent par une réduction des lames d'eau écoulées sur la période 1971-1997.

MOTS-CLES : Variabilité climatique, variabilité des ressources en eau, sécheresse, normes hydrologiques, modélisation spatialisée

**CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE IMPACT OF CLIMATIC
VARIABILITY ON WATER RESOURCES IN WEST AFRICA. CONSEQUENCES
ANALYSIS OF A PERSEVERING DROUGHT : HYDROLOGICAL NORMALS AND
REGIONAL MODELLISATION**

ABSTRACT

This work deals with the problem of hydrological standards revision in a context of rainfall and hydrometric decrease on a long period.

The bibliographical analysis on the climatic variability and water resources carried out in this study reveals that the current drought that intervened in the end of the 60s appears as an abnormal phenomenon that distinguishes it from the other persevering droughts which occurred since the beginning of century. Three characteristics of the recent drought make that it seems to be without equivalent since the beginning of century : its duration, its intensity and its extension.

The application of various statistical methods in the chronological series of variable, describing the rainfall and hydrometric patterns shows that globally, on the zone of study (Burkina Faso, Côte d'Ivoire and Mali), these variables are in decline since the beginning of 1970. Annual rainfall departures vary between 10 and 40 %, while the mean annual runoff present a deficit superior to 20 % and exceeding several times 60 %.

This study was interested in the limits of notions such as "the hydrological standards" and "duration of return" in a region which knows a context of deficit during more than 30 years.

The study of the recurrence of annual rainfall shows important differences of frequency values calculated according to established samples (observations over the period 1950-1997 and observations over the period 1971-1997).

Frequencies values of mean annual average of runoff, as well as variable of low and high runoff present similar results to those observed on annual rainfall.

The use of water balance models allowed us to proceed to a regionalization of the monthly and annual runoff and to lead the study of the impact of the climatic variability on water resources. Maps of the monthly and annual runoff based on grid of $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ have been established and show a decrease of the rate of discharge on the period 1971-1997.

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS.....	9
-------------------	---

INTRODUCTION.....	12
-------------------	----

1 CHAPITRE 1 : CONTEXTE HYDROCLIMATIQUE ET NORMES HYDROLOGIQUES.....	19
---	-----------

1.1 PHENOMENES DE SECHERESSE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET CENTRALE.....	19
1.1.1 Complexité de la notion de sécheresse.....	19
1.1.2 Contexte déficitaire en Afrique.....	20
1.1.3 Évolution des précipitations et des écoulements depuis le début du XX ^e siècle en Afrique.....	22
1.1.4 Caractéristiques de la récente sécheresse en Afrique de l'ouest et centrale.....	24
1.1.4.1 Durée du phénomène.....	24
1.1.4.2 Intensité du phénomène.....	27
1.1.4.2.1 Séquence 1972-1974.....	27
1.1.4.2.2 Séquence 1976-1977.....	28
1.1.4.2.3 Séquence 1981-1984.....	29
1.1.4.2.4 Séquence 1987-1993.....	30
1.1.4.3 Extension du phénomène.....	30
1.1.5 Les conséquences du phénomène de sécheresse en Afrique.....	32
1.1.5.1 Impacts socio-économiques.....	32
1.1.5.2 Conséquences hydrologiques et implications en matière de gestion des ressources en eau.....	33
1.2 VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE ET HYDROLOGIQUE.....	35
1.2.1 Variabilité pluviométrique.....	35
1.2.1.1 Méthodes d'étude des fluctuations climatiques.....	35
1.2.1.2 Variabilité de la pluviométrie annuelle.....	36
1.2.1.3 Variabilité de la pluviométrie mensuelle.....	39
1.2.1.4 Variabilité du nombre annuel de jours de pluie.....	43
1.2.1.5 Variabilité des dates de début et de fin de saison des pluies.....	44
1.2.1.6 Conclusion partielle.....	45
1.2.2 Variabilité hydrologique.....	49
1.2.2.1 Variabilité des débits moyens annuels.....	49
1.2.2.2 Variabilité des débits de hautes-eaux.....	51
1.2.2.3 Variabilité des débits de basses eaux.....	54
1.2.2.4 Conclusion partielle.....	55
1.3 NORMES HYDROLOGIQUES.....	56
1.3.1 Notion de norme.....	57
1.3.2 Pour une révision des normes hydrologiques.....	57
1.4 CONCLUSION.....	60

2 CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DU MILIEU ET PRESENTATION DES DONNEES DE L'ETUDE.....	67
---	-----------

2.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	67
2.1.1 Localisation et justification du choix de la zone d'étude.....	67
2.1.2 Aspects socio-économiques.....	68
2.1.2.1 Population.....	68
2.1.2.2 Économie.....	69
2.1.3 Relief, sols et végétation.....	70
2.1.3.1 Traits majeurs du relief.....	70

2.1.3.2	Principaux types de sol.....	70
2.1.3.3	Principaux types de végétation.....	72
2.1.4	<i>Aspects climatiques</i>	72
2.1.4.1	Unités climatiques.....	73
2.1.4.2	Précipitations.....	74
2.1.4.2.1	Les précipitations annuelles.....	74
2.1.4.2.2	Variations saisonnières des précipitations.....	75
2.1.4.3	Autres paramètres climatiques : températures, humidité, évaporation, vent.....	76
2.1.5	<i>Régimes hydrologiques</i>	77
2.1.6	<i>Conclusion partielle</i>	80
2.2	DONNEES DE L'ETUDE.....	81
2.2.1	<i>Données pluviométriques</i>	81
2.2.2	<i>Données hydrologiques</i>	83
2.3	CONSTITUTION DE LA BANQUE DE DONNEES SPATIALES NUMERISEES.....	84
2.3.1	<i>Nécessité de la constitution d'une banque de données spatiales</i>	84
2.3.2	<i>Données numérisées et sources</i>	86
2.3.2.1	Limites des bassins, frontières nationales.....	86
2.3.2.2	Le réseau hydrographique.....	87
2.3.2.3	Les altitudes et les pentes.....	88
2.3.2.4	Les données de végétation.....	88
2.3.2.5	Données de pluie.....	88
2.3.2.6	Données d'évapotranspiration potentielle.....	93
2.3.2.7	Données de températures.....	98
2.3.2.8	Sols.....	98
2.4	ORGANISATION DE LA BANQUE DE DONNEES.....	102
2.4.1	<i>Structuration des données de types hydrologique et climatologique</i>	102
2.4.2	<i>Structuration des données spatialisées</i>	106
2.5	CONCLUSION.....	106

3 CHAPITRE 3 : MISE EN EVIDENCE DE LA VARIABILITE HYDROCLIMATIQUE SUR LA ZONE D'ETUDE..... 111

3.1	METHODES.....	111
3.1.1	<i>Étude des tendances et de la persistance</i>	111
3.1.1.1	Autocorrélation.....	112
3.1.1.2	Test de corrélation sur le rang.....	112
3.1.1.3	Statistique (ou corrélation) de rang de Spearman.....	112
3.1.2	<i>Détection des ruptures : test de Pettitt</i>	113
3.1.3	<i>Calcul des déficits</i>	114
3.1.4	<i>Utilisation d'indices pluviométriques</i>	115
3.1.5	<i>Outils d'analyse spatiale</i>	115
3.2	CARACTERISATION D'UNE VARIABILITE DES PLUIES ANNUELLES.....	115
3.2.1	<i>L'évolution pluviométrique annuelle depuis 1950</i>	115
3.2.1.1	Analyse du caractère aléatoire des séries.....	115
3.2.1.2	Examen de l'homogénéité des séries.....	118
3.2.1.3	Croisement des résultats du test de rupture avec les données de pluie et de végétation.....	121
3.2.1.4	Calcul des indices.....	123
3.2.1.5	Calcul des déficits.....	126
3.2.1.6	Conclusion partielle.....	128
3.2.2	<i>L'évolution pluviométrique au cours du XXème siècle</i>	129
3.2.2.1	Analyse du caractère aléatoire des séries.....	130
3.2.2.2	Examen de l'homogénéité des séries.....	130
3.2.2.3	Calcul des indices.....	130
3.2.3	<i>Conclusion partielle</i>	132
3.3	CARACTERISATION D'UNE VARIABILITE DES PLUIES MENSUELLES.....	132
3.3.1	<i>Mois de juillet à septembre : saison des pluies en zone de climat soudanien et saison sèche en zone guinéenne</i>	133
3.3.1.1	Mois de Juillet.....	133
3.3.1.2	Mois d'Août.....	133
3.3.1.3	Mois de Septembre.....	134
3.3.2	<i>Octobre –Novembre : Mois de la petite saison des pluies en zone guinéenne</i>	135

3.3.3	<i>Mois de Décembre, Janvier et Février : petite saison sèche en zone guinéenne et saison sèche en zone soudanaise</i>	135
3.3.4	<i>Les mois de mars à juin : Mois de la grande saison des pluies en zone guinéenne</i>	136
3.3.5	<i>Conclusion partielle</i>	136
3.4	CARACTERISATION D'UNE VARIABILITE DES ECOULEMENTS	136
3.4.1	<i>L'évolution des débits moyens annuels</i>	137
3.4.2	<i>L'évolution des débits caractéristiques des hautes-eaux</i>	139
3.4.3	<i>L'évolution des débits caractéristiques des basses-eaux</i>	142
3.5	CONCLUSION	144

4 CHAPITRE 4 : ÉVOLUTION DES NORMES HYDROLOGIQUES 149

4.1	METHODOLOGIE	150
4.2	TRAITEMENT DES PLUIES ANNUELLES	151
4.2.1	<i>Comparaison des cartes de normales pluviométriques 1951-1980, 1961-1990 et 1971-2000</i>	151
4.2.2	<i>Comparaison des cartes pluviométriques réalisées sur les périodes 1950-1997 et 1971-1997</i>	155
4.2.3	<i>Analyse de la récurrence des pluies annuelles</i>	156
4.2.3.1	<i>Comparaison des données des périodes 1951-1980 et 1950-1997</i>	157
4.2.3.2	<i>Comparaison des données des périodes 1951-1980 à 1971-1997</i>	157
4.3	TRAITEMENT DES DEBITS MOYENS ANNUELS	163
4.4	TRAITEMENT DES CARACTERISTIQUES DES HAUTES-EAUX	169
4.5	TRAITEMENT DES CARACTERISTIQUES DES BASSES-EAUX	174
4.6	CONCLUSION	178

5 CHAPITRE 5 : VARIABILITE DES RESSOURCES EN EAU, APPORT DE LA MODELISATION 184

5.1	DE L'HYDROLOGIE REGIONALE ET DE LA REGIONALISATION	185
5.2	MODELISATION SPATIALISEE DES LAMES D'EAU ECOULEES	186
5.2.1	<i>Généralités sur la modélisation spatialisée</i>	186
5.2.2	<i>Justification du choix de la taille des mailles</i>	187
5.2.3	<i>Justification de la modélisation proposée</i>	187
5.2.4	<i>Les principes de l'évaluation de l'écoulement</i>	188
5.2.5	<i>Processus de fonctionnement général des modèles choisis</i>	188
5.2.6	<i>Présentation des modèles</i>	189
5.2.6.1	<i>Le modèle GR2M</i>	189
5.2.6.2	<i>Le modèle de Conway</i>	192
5.2.6.3	<i>Le modèle de Yates</i>	194
5.2.7	<i>Protocole d'identification et d'analyse des paramètres</i>	196
5.2.7.1	<i>Identification des paramètres des modèles GR2M et Conway</i>	196
5.2.7.1.1	<i>Échantillons de calage et de validation</i>	196
5.2.7.1.2	<i>Critère d'optimisation et critère de qualité de l'ajustement des modèles</i>	197
5.2.7.1.3	<i>Méthode numérique d'optimisation</i>	197
5.2.7.2	<i>Identification des paramètres du modèle de Yates</i>	199
5.2.8	<i>Analyse des résultats des modèles sur des bassins tests</i>	200
5.2.8.1	<i>Calage-validation du modèle GR2M</i>	201
5.2.8.2	<i>Calage-validation du modèle Conway</i>	202
5.2.8.3	<i>Application du modèle de Yates</i>	202
5.2.8.4	<i>Comparaison de la performance des modèles</i>	203
5.2.8.5	<i>Analyse de la pertinence des jeux de données</i>	205
5.2.8.6	<i>Influence du type de pluie</i>	206
5.2.8.7	<i>Influence du type d'ETP</i>	209
5.2.8.8	<i>Influence de la capacité de rétention en eau du sol</i>	211
5.2.9	<i>Cartographie des lames d'eau écoulées</i>	212
5.2.9.1	<i>Choix du modèle et des grilles de données pour la cartographie de lames d'eau</i>	212
5.2.9.2	<i>Cartographie des moyennes mensuelles et annuelles de lames d'eau écoulée sur la période 1950-1995</i>	215
5.2.9.2.1	<i>Lames d'eau mensuelles</i>	215
5.2.9.2.2	<i>Lame d'eau annuelle</i>	218
5.2.9.3	<i>Cartographie des moyennes annuelles de lames d'eau écoulée sur la période 1971-1995</i>	218

5.2.9.4	Comparaison entre les cartographies de lame d'eau annuelle sur les périodes 1950-1995 et 1971-1995	219
5.3	CONCLUSION.....	221
CONCLUSION.....		226
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		234
ABRÉVIATIONS ET SIGLES		246
LISTE DES TABLEAUX		251
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....		255

AVANT-PROPOS

Il y a de cela 5 ans, l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) a formulé un intérêt autour de la question de la révision des normes hydrologiques dans les zones où sévissent des conditions de sécheresse depuis plus de 30 ans maintenant. A l'époque, l'unité de recherche Grands Bassins Tropicaux de l'IRD entreprenait, au sein de son programme ICCARE, d'importantes études sur la variabilité climatique et ses conséquences sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale. Ce vaste programme, inscrit par ailleurs dans le projet FRIEND-AOC du Programme Hydrologique International de l'UNESCO, était dirigé par M. Eric Servat. Indépendamment des objectifs poursuivis par l'OSS, le débat suscité autour de la révision des normes hydrologiques présente des intérêts tant scientifiques qu'opérationnels.

J'ai été pressenti comme une personne ressource, pouvant mener cette étude avec des objectifs beaucoup plus orientés vers les aspects scientifiques de la question, mais qui puissent contribuer par ailleurs au débat organisé autour de la problématique de la révision des normes hydrologiques.

Je suis extrêmement reconnaissant à M. Eric Servat, pour la confiance qu'il a nourrie et entretenue à mon égard depuis notre première rencontre, à l'occasion d'un stage pour ma formation initiale d'ingénieur en génie-civil. Cette confiance, sans cesse renouvelée, a été un facteur stimulant pour la réussite de ce travail. Au-delà de l'encadrement scientifique, il a par ailleurs œuvré pour réunir les conditions financières et matérielles pour le bon déroulement de cette thèse. En 1994, à l'issue de mon stage, je disais à son égard que ma dette envers lui était particulièrement grande. Aujourd'hui, elle l'est encore plus et je ne saurais trouver les mots justes pour lui témoigner de ma reconnaissance.

Je remercie fortement le Prof. Michel Desbordes qui a accepté d'assurer, malgré l'éloignement de mes laboratoires d'accueil IRD successifs (Abidjan en Côte d'Ivoire puis Ouagadougou au Burkina Faso), la codirection de cette thèse. Lors de nos rencontres, j'ai pu profiter de ses réflexions sur l'orientation à donner au travail et de ses conseils avisés.

Au sein de mon laboratoire d'accueil, j'ai pu bénéficier de l'encadrement de l'équipe de chercheurs qui le composent. Je remercie tout particulièrement Messieurs Jean-Emmanuel Paturel et Gil Mahé, pour leur encadrement scientifique apprécié, leurs conseils et le soutien

qu'ils m'ont toujours manifestés. Ils ont su m'encourager et me stimuler à donner le meilleur de moi-même pour renouveler sans cesse l'élan des études.

Je remercie M. Declan Conway qui m'a accueilli au sein de son équipe pendant quelques jours à l'Université d'East Anglia. Sa collaboration a été d'une aide très précieuse pour l'avancement de mes travaux dans le domaine de la modélisation spatialisée. Je suis très honoré de ce qu'il ait accepté de participer à ce jury.

Je tiens également à remercier très sincèrement M. Bernard Chocat, Professeur à l'INSA de Lyon, et Pierre Ribstein, Directeur de recherche à l'IRD, qui m'ont fait l'honneur d'accepter la lourde charge de rapporter sur ce mémoire.

Je voudrais également remercier ici tous ceux qui, à Abidjan d'abord, à Ouagadougou ensuite, m'ont soutenu et aidé dans ce travail : Brou Kouamé, Jean François Boyer, Feu Michel Travaglio, Hélène Lubes-Niel, Akpa Aka, Télésphore Brou Yao, Diallo Sounsouna, Agnès Crès, Adama Traoré, Passari Oula.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Problématique

Les problèmes liés aux changements climatiques occupent une importante place parmi les préoccupations majeures de notre siècle. Plusieurs auteurs s'accordent à dire que les aspects liés à l'eau occuperont une place prépondérante parmi les impacts potentiels des changements climatiques (Gleick, 1986; Hulme, 1996b). Il y a donc un intérêt particulier des scientifiques à l'étude de la variabilité climatique et des ressources en eau.

Les précipitations représentent le facteur le plus important du climat tant pour les populations que pour les écosystèmes. Elles sont faciles à mesurer. Autant de raisons qui font que la plupart des études et analyses portent sur les précipitations beaucoup plus que sur d'autres paramètres du climat.

D'importantes études des fluctuations pluviométriques à l'échelle du continent africain comme celles de Nicholson (1994), Hulme (1996a), Servat et al. (1998) pour ne citer que celles-là montrent qu'une tendance à l'aridification du continent s'est manifestée à partir de 1970. Cette tendance qui n'a été ni continue, ni évidente dans toutes les régions, apparaît comme une extension générale des régions affectées par des précipitations en dessous de la normale (Hubert et al., 1989; Hubert et al., 1989; Mahé et Citeau (1993) Adejuwon et al., 1990; Nicholson, 1994). De nombreuses analyses (Carbonnel et Hubert., 1992; Sircoulon, 1990; Olivry et al., 1993; Nicholson, 1994; Mahé et Olivry, 1995; Paturel et al., 1997a; Servat et al., 1997a) s'accordent à dire que la pluviométrie a été remarquablement en dessous de la moyenne dans certaines régions d'Afrique au cours des décennies 70 et 80 alors que les deux décennies précédentes ont été relativement humides.

Le déficit pluviométrique observé sur plusieurs années consécutives s'est répercuté sur les écoulements des grands cours d'eau en provoquant un effondrement de leurs caractéristiques hydrologiques (débits moyens annuels, débits moyens journaliers maximums, débits d'étiage). Les déficits d'écoulement semblent même amplifiés dans certains cas (Sircoulon, 1990; Olivry et al., 1993; Mahé et Olivry, 1995; Paturel et al., 1997c; Servat et al., 1997b, Laraque et al., 2001).

Le diagnostic de l'évolution récente des précipitations et des écoulements en Afrique de l'ouest et centrale est symptomatique : depuis la fin des années 60 et au début des années 70 les précipitations sont en baisse, les écoulements aussi.

Ce déficit pluviométrique et hydrométrique observé sur une longue période pose un grand dilemme quant à la période de référence à considérer pour l'estimation des caractéristiques hydrologiques employées par les aménageurs dans le cadre de leurs projets. Quelle valeur accorder à la normale 1931-1960 par exemple, qui du reste est encore largement utilisée, quand on sait que dans la zone sahélienne et soudanaise, la pluviométrie n'a jamais dépassé la moyenne interannuelle depuis 1969 et que dans plusieurs zones d'Afrique de l'ouest et du centre, d'une manière générale, les pluies sont restées déficitaires? Dans ces conditions, la notion de moyenne revêt-elle encore son caractère descriptif puisqu'elle n'est pratiquement jamais atteinte pendant plus de 20 à 30 ans?

Objectifs de l'étude

Les travaux présentés dans cette étude s'inscrivent pleinement dans le cadre du projet FRIEND AOC de l'UNESCO. Ils se basent sur l'étude de la variabilité climatique ainsi que ses effets sur les ressources en eau sur une zone pilote couvrant trois pays d'Afrique de l'Ouest que sont le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire et le Mali.

L'étude menée sur cette zone pilote s'articule autour de quatre grands axes :

- ◆ ***base de données*** : il s'agit de la constitution d'une banque de données hydrométriques, pluviométriques et environnementales. L'ensemble des données collectées dans le cadre de cette étude est stocké et géré au sein d'une banque et d'un Système d'Information Géographique définis et organisés pour correspondre à l'optique de SIEREM mis en place actuellement par l'IRD dans le cadre du projet FRIEND-AOC et qui couvrira toute la zone d'Afrique de l'Ouest et Centrale. Cette étude apportera ainsi une importante contribution à la constitution de la grande banque de données régionale et centralisée qu'il apparaît de plus en plus nécessaire de constituer en Afrique de l'Ouest et Centrale.
- ◆ ***variabilité climatique*** : l'importante banque de données qui a été mise en place dans le cadre de cette étude servira de base à une analyse de la variabilité climatique à différents pas de temps. Cette étude de la variabilité climatique sera abordée sous deux angles en fonction de la disponibilité des données pour la variable étudiée. Le premier aspect concernera une analyse ponctuelle à partir des observations faites aux stations de mesure. Le second aspect abordera une analyse régionale à partir des données spatialisées.

- ◆ *normes hydrologiques* : la "norme" des variables hydrologiques définie comme une moyenne sur une période passée ne semble pas suffisante dans un contexte d'importante variabilité. La "norme" climatique trentenaire ne semble plus stable sur la période récente. Il est donc tout à fait crucial d'analyser la pertinence de cette notion de "norme" dans un contexte déficitaire prolongé comme celui observé depuis ces trente dernières années en Afrique de l'Ouest.
- ◆ *modélisation des ressources en eau* : la variabilité climatique implique une variabilité des régimes hydrologiques. La caractérisation des effets de cette variabilité hydrologique qui résulte de la variabilité du climat constitue un axe de recherche intéressant. L'approche développée consiste, de fait, à modéliser la production des ressources en eau à l'échelle des bassins versants de quelques km² à quelques milliers de km². L'objectif est d'arriver à modéliser la relation pluie-débit à l'aide d'algorithmes adéquats et à spatialiser les variables hydrologiques (lames d'eau écoulées) pour permettre une désagrégation de l'information à des échelles plus petites.

Organisation des travaux

Les travaux présentés dans cette étude ont pour ambition d'apporter une contribution hydrologique, tournée vers les ressources en eau, aux réflexions menées au sein de la communauté scientifique en terme de variabilité du climat. Ils s'articulent autour de cinq chapitres.

Un travail de synthèse, d'analyse et d'interprétation sur la base des études déjà réalisées semble indiqué pour cerner les différents aspects liés à la variabilité pluviométrique et hydrométrique en Afrique de l'ouest et centrale ainsi que les implications de cette variabilité sur les normes hydrologiques qui régissent l'estimation des ressources en eau. Ce qui sera l'objet du premier chapitre de cette étude.

Le deuxième chapitre rassemble l'ensemble des informations et données acquises pour cette étude. Dans ce chapitre, nous présentons le milieu physique de l'étude, le contexte socio-économique qui y prévaut, et les données qui ont pu être collectées pour mener cette étude.

Le troisième chapitre porte sur la mise en évidence de la variabilité climatique et des ressources en eau sur la zone d'étude.

Le quatrième chapitre aborde l'étude du problème des normes hydrologiques et pluviométriques face au caractère persistant de la sécheresse. Les résultats présentés concernent les différences occasionnées lorsqu'on intègre ou pas les données des années de sécheresse dans les séries chronologiques des variables hydrologiques et pluviométriques étudiées.

Dans le cinquième chapitre, nous étudions les effets induits par cette variabilité climatique sur les ressources en eau, par le biais de la modélisation.

CHAPITRE 1 : CONTEXTE
HYDROCLIMATIQUE ET NORMES
HYDROLOGIQUES

1 CHAPITRE 1 : CONTEXTE HYDROCLIMATIQUE ET NORMES HYDROLOGIQUES

1.1 PHENOMENES DE SECHERESSE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET CENTRALE

La sécheresse est généralement perçue plus en terme d'impacts que de genèse mais les données scientifiques et techniques ne semblent pas être suffisantes à elles seules pour rendre perceptibles les drames vécus par les populations des régions affectées par les aléas du climat. Ce premier chapitre a essentiellement un caractère qualitatif et s'intéresse tant aux aspects relatifs à la pluie qu'au débit. En ce sens, il vise à souligner la réalité et l'actualité du problème : qu'en est-il de la sécheresse, comment se traduit-elle, quelles sont ses conséquences, quelle est sa répartition à l'échelle du continent, quels problèmes pose-t-elle en matière d'organisation et de réalisation dans le domaine de la gestion des ressources en eau?

L'analyse effectuée concerne l'ensemble du continent africain en mettant plus particulièrement l'accent sur l'Afrique de l'Ouest et Centrale.

1.1.1 Complexité de la notion de sécheresse

Plusieurs auteurs ont souligné la difficulté à définir la sécheresse afin de répondre aux préoccupations des utilisateurs de l'eau (Sircoulon, 1974; Adefolalu, 1986; Le Borgne 1990; Leprun et al., 1995).

On peut effectivement être embarrassé quand on sait que, malgré un déficit pluviométrique, une bonne répartition des pluies peut engendrer une bonne campagne agricole. Inversement, des cumuls annuels pluviométriques proches de leur valeur moyenne mais mal répartis dans le temps peuvent entraîner de mauvaises récoltes.

Adefolalu (1986) distingue (i) la sécheresse météorologique qui correspond à des précipitations inférieures à la "normale", (ii) la sécheresse agricole qui correspond à une situation pendant laquelle la demande en eau des diverses cultures n'est pas satisfaite et (iii) la sécheresse hydrologique qui correspond à une situation déficitaire des ressources en eau superficielle et souterraine. La sécheresse hydrologique est certainement la plus redoutable à cause de ses effets irréversibles.

On peut mentionner une autre définition, plus précise, donnée par le comité mixte UNESCO/O.M.M. (1987) : la sécheresse désigne un déficit, sur un temps assez long et sur une grande étendue, des disponibilités naturelles en eau par rapport à la valeur moyenne de ces disponibilités (précipitations, écoulement superficiel, écoulement souterrain).

Les caractéristiques de la sécheresse sont ainsi définies en terme de conséquences.

Comme l'a bien remarqué Sircoulon (1974), la sécheresse revêt toutefois un caractère exceptionnel, quelle que soit la définition que l'on adopte.

1.1.2 Contexte déficitaire en Afrique

L'opinion publique internationale a reçu un fort écho médiatique des grandes sécheresses qui sévissent dans certaines régions d'Afrique. Les anomalies pluviométriques des 30 dernières années ont connu une résonance exceptionnelle dans la région sahélienne d'Afrique de l'ouest. Mais en réalité, l'ensemble de l'Afrique de l'ouest et centrale présente une vulnérabilité importante aux déficits pluviométriques. On note durant ces dernières années, des déficits pluviométriques dans les régions même plus humides situées en bordure du golfe de Guinée où les hauteurs pluviométriques substantielles font que les effets de la baisse des précipitations sont moins ressentis (Mahé, 1993; Olivry et al., 1993; Olivry et al., 1994; Wesselink et al., 1995; Mahé et Olivry, 1995; Paturel et al., 1995a; Paturel et al., 1997a; Servat et al., 1997a; Servat et al., 1998). La diminution des pluies en Afrique centrale est toutefois plus faible qu'en Afrique de l'ouest (Mahé et Olivry, 1995; Bricquet et al., 1997, Servat et al., 1998, Mahé et al., sous presse).

Quelques travaux récents ont montré que l'Afrique de l'est a connu elle aussi des périodes sèches au début et au milieu des années 1970, puis de nouveau au début des années 1980.

Une analyse de concomitance des sécheresses en Afrique de l'est et en Afrique de l'ouest montre quelques simultanités sans pour autant qu'une relation systématique puisse être dégagée. Il apparaît que ce sont les années de paroxysme de la sécheresse récente (1972-1974, 1983-1984) qui s'observent parallèlement en Afrique de l'ouest et en Afrique de l'est.

Beltrando (1990) fait remarquer que les précipitations en Afrique de l'est sont influencées par la mousson d'Afrique de l'ouest mais présentent également une corrélation significative avec

les précipitations de la mousson indienne. Cela pourrait expliquer la non-homogénéité des variations pluviométriques en Afrique de l'ouest et en Afrique de l'est.

D'autres travaux (Nicholson, 1994), montrent que globalement, l'Afrique de l'est a connu des années humides à partir de 1977 et plus particulièrement durant la décennie 1980. Cependant, aucune tendance nette à la baisse des précipitations ne se remarque sur les séries chronologiques de pluies annuelles en Afrique de l'est comme l'illustre l'étude des variations pluviométriques de stations de cette région (Nicholson, 1994 ; Beltrando, 1990).

En Afrique australe, Nicholson (1994) montre qu'une baisse des précipitations s'est produite dans les années 1960. Le début des années 1960 a été anormalement sec mais, au milieu de la décennie, on a enregistré des pluies excédentaires. Cette partie de l'Afrique a connu, depuis, d'importants déficits pluviométriques durant la décennie 1980. L'Afrique de l'ouest et centrale présente donc des anomalies pluviométriques similaires à celles observées en Afrique australe au cours de la décennie 1980. Par contre, les déficits pluviométriques observés en Afrique de l'ouest durant la décennie 1970 ne se sont pas étendus en Afrique australe.

L'examen des champs pluviométriques définis et identifiés par Nicholson (1994) montre que les anomalies pluviométriques décelées en Afrique de l'ouest et centrale sont de même signe au cours de la décennie 1980 mais de signes contraires au cours de la décennie 1970. Selon Nicholson (1994), une telle distinction des types d'anomalies pluviométriques semble se retrouver dans l'histoire climatique récente et plus ancienne de l'Afrique.

Les mesures des premières données climatologiques en Afrique de l'ouest (observations pluviométriques) remontent au milieu du XIX^e siècle mais ne sont sérieusement suivies qu'après 1920. Il faut attendre les années 1950 pour voir se développer les réseaux de mesures hydrométriques (Sircoulon, 1987). Le choix des sites et leurs changements fréquents, de même que la qualité des premiers relevés des premières stations jusqu'au début du XX^e siècle confèrent une qualité et une fiabilité douteuse aux données pluviométriques de l'époque. Même si le nombre de stations a continué à augmenter depuis lors, la qualité des relevés n'est pas toujours assurée à cause d'un manque de moyens des États qui ont la charge de gérer les réseaux de mesures. En général, les données des stations synoptiques du réseau officiel sont préférables aux relevés des simples postes pluviométriques. Seules quelques stations avant et au début du siècle ont été soigneusement suivies. Ce qui crée une difficulté dans l'étude des séries d'observations climatiques à l'échelle du siècle. L'histoire climatique

ancienne est donc difficile à retracer eu égard à la subjectivité des sources d'informations liée aux méthodes indirectes utilisées.

Grâce, entre autres, à la paléoclimatologie on peut parvenir à évaluer l'amplitude et la variabilité des anciennes fluctuations climatiques à l'échelle de plusieurs milliers d'années. Les réponses des investigations dans ce domaine montrent que d'importantes variations climatiques se sont produites sur le continent.

Moron (1994) propose, ainsi, le schéma suivant en Afrique tropicale au nord de l'équateur (les dates sont indiquées sur la base d'une datation par la méthode du Carbone 14) :

- de 19 000 à 15 000 ans BP (Before Present) : on assiste à une période aride avec une dégradation de la forêt et une avancée du désert vers le sud;
- de 12 000 à 7 000 ans BP : après l'aridité des années 19000 à 15000, les conditions sont plus humides durant cette période;
- de 6 000 à 4 000 ans BP : une nouvelle phase humide s'installe;
- depuis 3000 ans BP : cette période correspond à l'installation progressive des conditions climatiques sèches actuelles marquées par une disparition progressive des massifs forestiers et par un assèchement du Sahara.

D'importants changements dans l'environnement se retrouvent donc à l'échelle des millénaires, et des périodes humides et sèches se sont succédées dans le passé. Mais cette approche ne fournit pas les détails de l'évolution à l'échelle de l'année voire de quelques années.

1.1.3 Évolution des précipitations et des écoulements depuis le début du XX^e siècle en Afrique

Pour autant que l'on puisse en juger au travers des quelques indications qu'apporte l'analyse de la documentation historique et des témoignages et récits qui ont été rapportés, on peut dire qu'en zone sahélienne d'Afrique de l'ouest, les grandes sécheresses du XX^e siècle se situent au début (1913-16) et à la fin (1973-1974; 1983-1984). Ce sont elles qui ont engendré de grandes famines et attiré le plus d'attention. Plus localement, il est fait état d'une sécheresse qui eut également des conséquences dramatiques au milieu du siècle (1940-1944) : le nord du Nigeria a connu une grande famine qui a entraîné la mort de nombreuses personnes.

L'étude des longues séries d'observations pluviométriques enregistrées à un certain nombre de stations suivies depuis le début du XX^e siècle montre que la zone non sahélienne d'Afrique de l'ouest et centrale a aussi été affectée par trois sécheresses qui se situent aux alentours de 1910-1916, 1936-1950 et depuis 1969. Ces périodes sèches sont séparées par des phases plus humides, entre 1925 et 1935 et entre 1951 et 1968 (Delattre, 1996; Paturel et al., 1997b).

La concordance de ces périodes de sécheresse sur l'ensemble de l'Afrique de l'ouest et centrale est frappante et révélatrice de l'extension géographique des conditions de sécheresse dans cette région du continent.

L'analyse de quelques stations pluviométriques au début du siècle permet de se faire une opinion sur la première sécheresse du XX^e siècle, entre 1910 et 1916, qui, semble-t-il, a été très intense (Sircoulon, 1976, Le Borgne 1990). Selon Le Borgne (1990), la dizaine de stations se répartissant sur le Sénégal, le Burkina Faso, le Niger, le Togo et la Côte d'Ivoire, dont on disposait alors, présentait des déficits pluviométriques importants, de l'ordre de 30 à 60%.

Sircoulon (1976) fait état de la deuxième sécheresse, entre 1936 et 1950, qui a éprouvé les populations sahéliennes de 1940 à 1949 avec une phase plus aiguë de 1940 à 1944. La persistance de la sécheresse de 1940 à 1944 a eu des répercussions sur l'écoulement de certains fleuves comme le Sénégal et le Niger. Comparée à la première sécheresse, elle a été moins intense. Toutefois, elle a été très ressentie sur toute cette période en Afrique centrale, au Togo et au Bénin (Le Borgne, 1990).

La récente sécheresse qui a débuté aux alentours de 1969 semble toujours d'actualité. Elle sévit d'une manière particulièrement prononcée dans la région sahélienne d'Afrique de l'ouest mais elle se fait ressentir également dans les régions plus au sud, mieux arrosées. L'intensité de la première sécheresse du début du siècle lui confère une similarité à la sécheresse récente. Cependant, la plus récente se distingue des précédentes par trois caractéristiques remarquables qui méritent d'être soulignées: sa **durée**, son **intensité** et son **extension** (Olivry, 1983; Le Borgne, 1990; Sircoulon, 1990; Paturel et al., 1995a; Servat et al., 1997a).

1.1.4 Caractéristiques de la récente sécheresse en Afrique de l'ouest et centrale

1.1.4.1 *Durée du phénomène*

De nombreux auteurs s'accordent à faire débiter le déficit pluviométrique actuel à la fin des années 1960 (Servat et al., 1997a) en Afrique de l'ouest et centrale. Mais certains auteurs tels Sircoulon (1974) et Le Borgne (1990) font remarquer que des déficits pluviométriques s'observent déjà dès 1965 dans certaines régions de la zone sahélienne. C'est ainsi qu'à Tombouctou, Agadès, et Ouagadougou on a enregistré en 1965 des déficits, respectivement de 56, 65, et 27%.

Depuis la fin des années 1960 et le début des années 1970, on assiste à des conditions déficitaires des précipitations annuelles. Cette situation déficitaire est particulièrement prononcée dans les régions soudano-sahéliennes. Les hauteurs annuelles de précipitations ont le plus souvent des valeurs inférieures aux médianes des séries précédentes. Certains auteurs (Sircoulon, 1990; Olivry et al., 1993; Nicholson, 1994; Paturel et al., 1997a) montrent que cette situation a perduré depuis lors, tout du moins jusqu'en 1995, malgré quelques séquences de "rémission" qui jalonnent cette période 1970-1995. Nicholson (1993, 1998) montre que dans la zone sahélienne (pluviométrie annuelle comprise entre 100 et 400 mm) et soudanaise (pluviométrie annuelle comprise entre 400 et 1200 mm), la pluviométrie n'a jamais excédé la moyenne interannuelle depuis 1969. Une telle observation se répète dans la zone soudano-guinéenne plus arrosée (pluviométrie annuelle supérieure à 1200 mm) où 1978 est la seule année où on a enregistré une pluviométrie dépassant la moyenne interannuelle. La figure 1.1 où sont représentées des valeurs d'indices pluviométriques interannuels (variables pluviométrie annuelle, centrée et réduite), illustre bien le contexte déficitaire des pluies annuelles en Afrique.

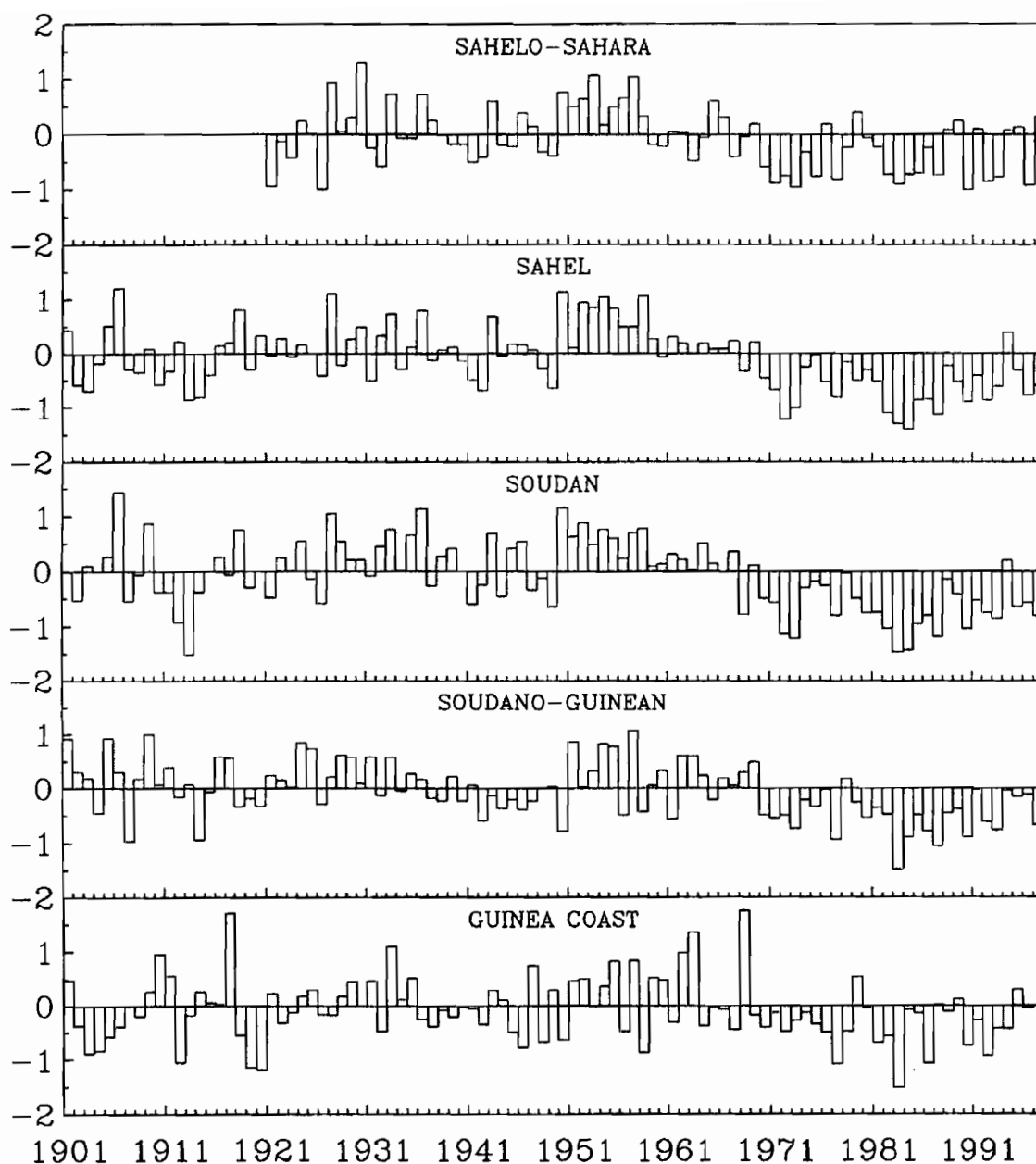


figure 1.1 : Indices pluviométriques interannuels des hauteurs de pluies annuelles par rapport à la période 1901-1990 (in Nicholson, 1998).

La baisse des précipitations sur une très longue période en Afrique de l'ouest et centrale a eu pour effet de diminuer les apports d'eau qui transitent dans certains cours d'eau de cette région du continent. On constate que, depuis les alentours des années 1970, les modules de bon nombre de cours d'eau sont inférieurs à la moyenne générale.

La figure 1.2 extraite de l'étude réalisée par Bricquet et al. (1997) sur l'évolution des écoulements en Afrique sèche (Chari, Niger, et Sénégal) et en Afrique humide (Oubangui et Sangha) illustre bien l'appauvrissement des ressources en eau en Afrique sèche et humide depuis la fin des années 1960

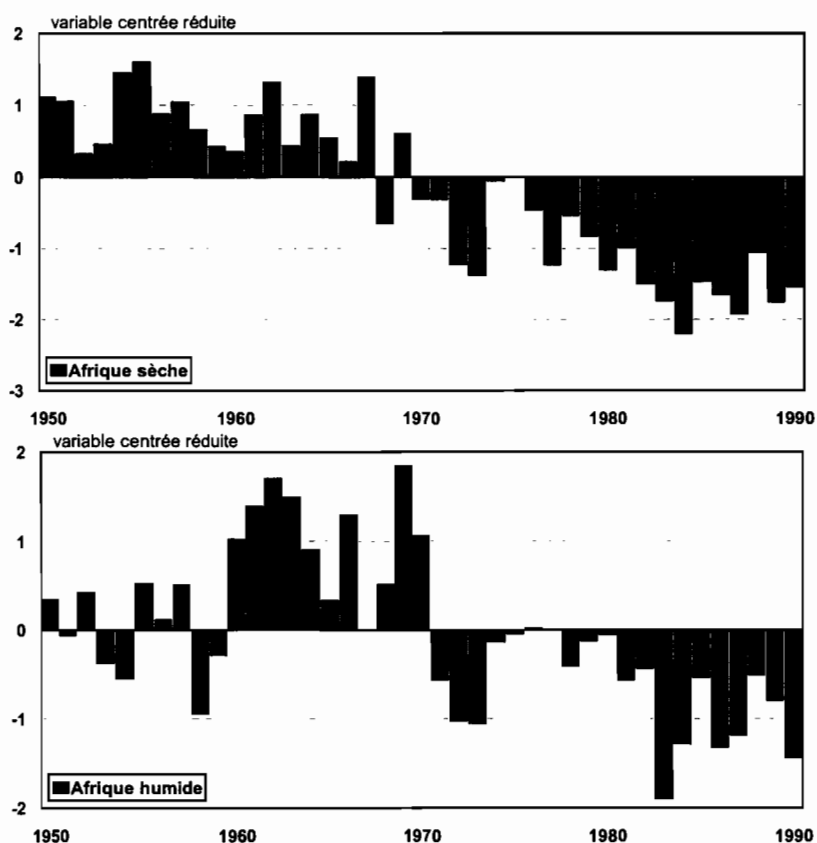


figure 1.2 : Variations de l'hydraulicité (variable centrée réduite) depuis 1950 pour l'Afrique sèche (Chari, Niger, et Sénégal) et l'Afrique humide (Oubangui et Sangha) (in Bricquet et al., 1997)

Cissé et Sawadogo (1986) montrent que depuis 1971, le module du Mouhoun à Samandéni (Burkina Faso) n'a jamais atteint la valeur de la moyenne interannuelle des modules calculés sur la période 1956-1984 et que, pendant les années de sécheresse extrême (1973, 1983, 1984), les modules du Mouhoun à Samandéni représentaient respectivement 46, 23 et 6% de la moyenne des modules.

L'étude des modules annuels étendue aux cours d'eau d'Afrique de l'ouest et centrale représentatifs de la zone non sahélienne montre une forte diminution de l'hydraulicité (50 à 70% parfois) de la plupart de ces cours d'eau depuis le début des années 1970 (Paturel et al., 1997a, Servat et al., 1998). Les résultats de tests statistiques de détection des ruptures (au sens de changements brutaux de moyenne de la série) dans des séries chronologiques de modules annuels concordent avec ceux observés sur la pluviométrie annuelle. Les dates de ruptures détectées se situent en général entre 1968 et 1972.

La persistance des déficits pluviométrique et hydrométrique depuis 1968 est donc confirmée . On remarque cependant que même si la sécheresse actuelle n'a jamais cessé, elle a varié temporellement et spatialement en intensité.

1.1.4.2 Intensité du phénomène

La sécheresse qui dure depuis plus de 30 ans est ponctuée de séquences très sévères et rigoureuses qui ont fortement marqué l'opinion. Quatre périodes se distinguent : 1972-1974, 1976-1977, 1982-1984, 1987-1993.

1.1.4.2.1 Séquence 1972-1974

Les médias ont contribué à faire connaître à l'opinion publique internationale le drame vécu par les populations affectées par les récentes sécheresses. La première sécheresse la plus spectaculaire, et qui a occasionné une très forte mobilisation des efforts internationaux, est celle de 1972-1974.

Selon Sircoulon et Olivry (1986), la période 1972-1974 constituait un paroxysme déficitaire sans précédent récent, hormis 1913, en Afrique de l'Ouest avec son cortège de drames. Les mémoires sont restées marquées par les nombreuses pertes de troupeaux, les graves pénuries de récoltes, une grave famine et les nombreux déplacements de populations.

Une forte réduction caractérise également les écoulements de nombreux cours d'eau d'Afrique de l'ouest durant cette période. Le Sénégal à Bakel présente un déficit de 64% et le Chari de 56% sur le module (Le Borgne, 1990). Le débit d'étiage en 1974 du Sénégal à Bakel ($0.6 \text{ m}^3/\text{s}$) est très insignifiant par rapport à la moyenne ($75 \text{ m}^3/\text{s}$). Le débit maximum du Sénégal présente quant à lui un déficit de 67%.

Le bilan de la sécheresse de 1972-1974 établi par Sircoulon (1976) fournit un panorama de l'intensité de cette sécheresse sur les écoulements (tableau 1).

Tableau 1.1 : Déficits d'écoulement moyen de certains cours d'eau d'Afrique de l'ouest pendant la période 1972-1974 (d'après Sircoulon, 1976)

Année	Station	Déficit
1972	Sénégal à Bakel	66%
	Niger à Koulikoro	26%
	Bani à Douna	74%
	Chari à N'Djamena	56%
	Chari à Sahr	63%
	Logone à Laï	53%
	Chari à N'Djamena	53%
1973	Sénégal à Bakel	53%
	Niger à Koulikoro	39%
	Bani à Douna	76%
1974	Sénégal à Bakel	15%
	Niger à Koulikoro	5%
	Bani à Douna	51%

1.1.4.2.2 Séquence 1976-1977

De nouveau en 1976-1977 on note une sévérité importante des déficits pluviométriques. Cette phase aiguë intervient après une rémission en 1975 qui a laissé augurer la fin de la sécheresse qui venait d'éprouver durement les populations. Même si elle n'a pas connu une extension géographique comparable à la précédente, son intensité n'en demeure pas moins équivalente dans certaines régions arides d'Afrique de l'ouest. L'année 1977 constitue le point culminant de cette séquence sèche avec plusieurs pays accusant d'importants déficits pluviométriques. Les pays de la côte ouest Atlantique (Mauritanie, Sénégal et Guinée-Bissau) sont durement touchés puisqu'ils enregistrent des déficits de l'ordre de 50 à 74%. Dans certaines régions sahéliennes d'Afrique de l'ouest (une partie du Mali, Niger et Tchad), le déficit varie de 23 à

34%. Cette période d'extrême sécheresse n'a que faiblement affecté l'Afrique centrale, sauf le Cameroun qui connaît un déficit pluviométrique de l'ordre de 17%.

Au niveau des écoulements, on a enregistré d'importants déficits, similaires à ceux observés sur la pluviométrie.

1.1.4.2.3 Séquence 1981-1984

Une recrudescence de la sécheresse est manifeste durant les années 82-84. Cette sécheresse a été très largement commentée sous diverses formes à travers les médias. Elle a déclenché un mouvement international sans précédent pour sauver les victimes de la famine.

Nicholson (1985) pense que le déficit pluviométrique de 1981 à 1984 équivaut ou est supérieur à celui du début des années 70 dans les zones d'Afrique de l'ouest où les pluviométries annuelles sont comprises entre 50 mm et 1200 mm. Par ailleurs, les déficits pluviométriques de 1983 qui ont été significativement plus importants que ceux de 1972, considérée jusque là comme une année de sécheresse extrême sans précédent, montrent la sévérité de cette séquence. Une des caractéristiques remarquables de la séquence est l'uniformité et l'extension spatiale des conditions de sécheresse dans les 3 régions sahélo-saharienne (50 - 100 mm de pluie annuelle), sahélienne (100 - 400 mm de pluie annuelle), soudanienne (400 - 1200 mm de pluie annuelle). Seules deux stations ont enregistré des pluies annuelles supérieures à la moyenne en 1982. En 1983-1984, une seule station a enregistré une pluviométrie annuelle supérieure à la moyenne. Durant les quatre années de 1981 à 1984, la sécheresse a connu une extension vers les régions équatoriales puisque l'année 1983 apparaît également comme une année de sécheresse aiguë dans ces régions humides.

L'étude des régimes hydrologiques fournit, elle aussi, une bonne indication de la rigueur de cette sécheresse.

Sircoulon et Olivry (1986) en étudiant l'abondance annuelle des fleuves tropicaux parvenant au Sahel (Sénégal, Niger, Bani (affluent du Niger), Logone et Chari) montrent que c'est en 1984 que sont enregistrés les modules les plus bas depuis le début des observations. En outre, l'analyse de l'écoulement sur plusieurs années consécutives (3 et 5 ans) montre que la période 1982-1984 est la plus rigoureuse puisque les plus faibles modules de toutes les sécheresses s'observent durant cette séquence. Les auteurs décrivent également un amenuisement

considérable des réserves souterraines qui assurent normalement l'alimentation des cours d'eau en période de tarissement. Cela a conduit à des étiages extrêmement faibles en 1982 et 1983, aboutissant même à un arrêt total d'écoulement du Baoulé à Pankourou (affluent du Niger au Mali) en 1984, du Bani à Douna et du Niger à Niamey en 1985. C'est en 1985 que le débit d'étiage du Chari à N'Djamena correspond à la plus faible valeur jamais enregistrée.

Les calculs de Le Borgne (1990) montrent que les écoulements du Sénégal à Bakel, du Niger à Koulikoro et du Chari à N'Djamena présentent un déficit de 54% en 1983-1984 et de 70% en 1984-1985 par rapport aux apports observés en année normale. Quand aux module et débit maximum du Sénégal à Bakel, ils connaissent respectivement des déficits de l'ordre de 70 et 79%.

Pour d'autres cours d'eau tropicaux ou équatoriaux, la situation n'est guère meilleure. On observe, par exemple, un mauvais remplissage des retenues de Kossou (Bandama) et d'Ayamé (Bia), en Côte d'Ivoire, en 1982 et 1983, provoquant ainsi de graves conséquences sur la fourniture d'eau et d'hydroélectricité pour l'ensemble du pays.

1.1.4.2.4 Séquence 1987-1993

Peu d'études sur la pluviométrie n'ont été menées sur les périodes postérieures à 1990. Cette situation semble être liée aux difficultés à accéder aux données. Cependant, sur la base des quelques études menées en intégrant des années récentes (Bricquet et al., 1995), il s'avère qu'après la reprise des pluies en 1985-1986, la période 1987-1993 est très sèche.

1.1.4.3 Extension du phénomène

Les importants déficits observés sur les écoulements de cours d'eau (Sénégal, Niger, Bani, Chari et Logone) qui prennent leur source dans des régions où la pluviométrie est plus abondante qu'au Sahel montrent, à n'en pas douter, l'extension géographique considérable de la sécheresse actuelle. La baisse des précipitations et des écoulements observée durant les 30 dernières années déborde largement du cadre de la zone sahélienne proprement dite. Même si quelques nuances doivent être faites sur l'extension géographique de la récente sécheresse, on peut dire que des manifestations de celle-ci se font ressentir dans l'ensemble de l'Afrique de l'ouest et centrale (Olivry et al., 1993; Mahé et Olivry, 1995; Paturel et al. 1997a; Servat et al., 1997a).

La sécheresse actuelle affecte les régions nord du golfe de Guinée : la Côte d'Ivoire et le Ghana sont particulièrement touchés; par contre, le centre et les zones côtières du Togo et du Bénin ne sont que faiblement affectés. Par ailleurs, le sud et la région côtière du Nigeria ne semblent pas avoir été éprouvés (Mahé, 1993; Mahé et Citeau, 1993). Adejowun et al. (1990) ont souligné aussi que la baisse des précipitations est relativement plus importante au nord du Nigeria qu'au sud où elle n'est pratiquement pas décelable. Cette variabilité d'intensité dans l'espace a été observée par Paturel et al. (1997a) qui montrent que les zones situées au sud du Nigeria, tout comme celles de l'extrême ouest de la Côte d'Ivoire ne semblent pas avoir subi de modification de leur régime pluviométrique.

Olivry et al. (1993) abonde dans le même sens en faisant remarquer que l'Afrique humide est également affectée par la baisse des précipitations. Les zones côtières de la Guinée au Nigeria montrent des déficits pluviométriques en phase avec ce qui s'observe plus au nord dans la zone soudano-sahélienne. Par contre, en Afrique centrale, la zone bordant l'océan Atlantique semble épargnée. Dans la zone continentale d'Afrique centrale, apparaissent des déficits pluviométriques mais d'une moindre sévérité que ceux observés dans les régions nord du golfe de Guinée.

L'ensemble de l'Afrique intertropicale humide et la façade atlantique du continent subissent un déficit d'écoulement annuel durant les décennies 1970 et 1980 (Olivry et al., 1993; Bricquet et al., 1997). L'aggravation est remarquable sur la décennie 1980 où le déficit des apports moyens par rapport à la moyenne calculée de 1951 à 1990 est estimé à 16% alors qu'il était de 7% durant la décennie 1970. Les débits du fleuve Congo-Zaïre sont proches de la normale durant la décennie 1970. On y décèle toutefois la séquence déficitaire de 1972-1973. Pendant la décennie 1980, le fleuve connaît un appauvrissement général des écoulements. Par ailleurs, la station de l'Oubangui à Bangui, suivie depuis 1930, présente des déficits hydrométriques depuis 1970 qui sont même accentués durant la décennie 1980. D'autre part, la Sangha (affluent du Congo-Zaïre au Cameroun) présente une évolution similaire avec les modules les plus faibles de toute la période de mesures observés au cours de la décennie 1980.

1.1.5 Les conséquences du phénomène de sécheresse en Afrique

La sécheresse implique de nombreux problèmes socio-économiques dont les effets sont souvent difficiles à résorber. La sécheresse pose en effet des problèmes d'approvisionnement en eau, affecte négativement la capacité de production des régions touchées et met en péril les ressources naturelles (eau souterraine, végétation, faune, etc.).

1.1.5.1 *Impacts socio-économiques*

Ce sont les régions déjà les moins favorisées par rapport à l'abondance pluviométrique qui sont les plus vulnérables à la sécheresse.

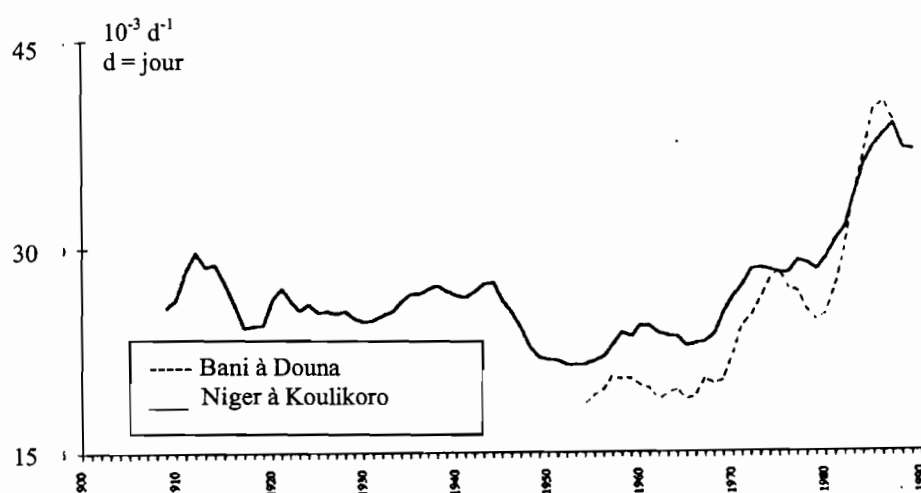
La sécheresse provoque en Afrique de l'ouest le plus de dommages et affecte plus de personnes que tout autre type de catastrophes. Des données statistiques (Askew et Rodda, 1995) révèlent que la sécheresse est un phénomène désastreux dans cette région du continent. A titre d'exemple sur le plan sanitaire, en 1989 et 1990, il est fait cas d'une maladie courante en Afrique de l'ouest, la borreliose, qui s'est étendue au sud du 14^{ème} parallèle au Sénégal alors qu'elle n'était connue jusqu'alors que dans les régions sahéliennes et sahariennes au nord de celui-ci. Cette limite correspondait auparavant à des zones où la pluviométrie annuelle n'excédait pas 750 mm car le vecteur de la bactérie, une tique vivant sur certains petits rongeurs, ne peut supporter davantage d'eau (A.F.P., 1996). La progression de la maladie dans les régions au sud du 14^{ème} parallèle est due à la sécheresse car la pluviométrie annuelle y est inférieure à 750 mm depuis 1970.

Les conséquences de la récente sécheresse sont particulièrement alarmantes dans la zone sahélienne d'Afrique de l'ouest où l'eau est le bien le plus convoité et dont la recherche constitue la principale préoccupation. Une responsable d'association de femmes d'un village de Ouahigouya au Burkina Faso résume l'importance de l'eau en s'exprimant ainsi " si on a l'eau, on a tout " (Wattier, 1986a).

Au sahel, en Afrique de l'ouest, la sécheresse est devenue une caractéristique permanente qui affecte des millions de personnes. Il est très fréquent que les paysans en arrivent à consommer leurs semences pour ne pas mourir de faim à cause des pluies qui sont très tardives. Selon quelques témoignages (Wattier, 1986b), les pluies sont de plus en plus courtes et le mil se dessèche avant d'avoir eu le temps de pousser. Il en résulte un déplacement massif de populations et de familles entières s'expatriant à la recherche de terres plus clémentes.

1.1.5.2 Conséquences hydrologiques et implications en matière de gestion des ressources en eau

L'impact de cette fluctuation climatique a eu des conséquences sur le fonctionnement hydrologique des cours d'eau. Les déficits d'écoulement sont généralement bien supérieurs à ceux des précipitations. Par ailleurs, malgré un retour à des conditions normales de pluviométrie pendant les quelques séquences de rémission qui jalonnent la longue période déficitaire, les écoulements n'ont pas repris et sont demeurés déficitaires (Sutcliffe et Knott, 1987; Sircoulon, 1990; Olivry et al., 1993; Olivry et al., 1994; Wesselink et al., 1995). Des études sur l'évolution des coefficients de tarissement de certains cours d'eau en Afrique tropicale humide et sèche montrent, comme l'illustre la figure 1.3, que ceux-ci n'ont cessé d'augmenter depuis le début de la sécheresse actuelle et d'une manière particulièrement prononcée depuis 1980 (Olivry et al., 1993; Olivry et al., 1994; Bamba et al., 1996).



**figure 1.3 : Évolution des coefficients de tarissement sur le Niger et le Bani
(in Olivry et al., 1994)**

Cette variation du coefficient de tarissement suggère l'idée d'un amenuisement considérable des ressources en eau souterraine et expliquerait alors la forte ampleur de la récente sécheresse sur la baisse des écoulements..

Si dans toute l'Afrique de l'ouest et centrale le problème de l'eau ne se pose pas avec la même acuité partout, la baisse considérable des précipitations et des écoulements observée dans cette région doit être prise en considération pour la gestion et la planification des ressources

en eau. Les limites induites par la sécheresse actuelle sur les performances des aménagements est un fait observé dans l'ensemble de l'Afrique tropicale sèche et humide (Servat et Sakho, 1995; Cissé et Sawadogo, 1986; Gonni, 1986a; Pouyaud, 1986a). La faiblesse des écoulements durant la récente période de sécheresse a conduit à la remise en cause d'un aménagement hydroélectrique projeté à Noubiel au Burkina Faso (Pouyaud, 1986a). L'écart considérable entre les valeurs de données utilisées lors de la conception du projet et celles des observations récentes aurait été de nature à pénaliser le bon fonctionnement du barrage hydroélectrique projeté.

L'extrême précarité des ressources en eau de surface, particulièrement dans la zone sahélienne, implique la nécessité d'une politique rationnelle de gestion de ces maigres ressources. La réalisation d'aménagements pour stocker l'eau est le recours le plus répandu d'ailleurs dans cette zone. Malheureusement, la très longue période de la sécheresse actuelle limite le bon fonctionnement des ouvrages hydrauliques. Les étiages étant de moins en moins soutenus et de plus en plus prolongés, les réservoirs s'assèchent le plus souvent. Au Burkina Faso, Cissé et Sawadogo (1986) font état du mauvais remplissage des petits barrages. Ils décrivent également le problème d'approvisionnement en eau de Ouagadougou face aux besoins croissants de la ville. Cette difficulté d'alimentation en eau de la ville s'est accrue durant les récentes années pendant lesquelles on observe une grande irrégularité du remplissage des barrages alimentant la ville. Un temps, il fut envisagé d'alimenter en eau potable la ville de Ouagadougou à partir du Mouhoun (Volta Noire). Mais une étude montrant que les débits d'étiages de 1974 à 1985 du Mouhoun à Boromo (Gonni, 1986b) étaient tous inférieurs à la valeur décennale sèche calculée avant 1970, les techniciens ont remis en cause ce projet d'adduction d'eau potable.

D'une manière générale, le manque d'eau potable est un des problèmes fondamentaux dans les pays sahéliens. La pénurie d'eau constitue ainsi une contrainte majeure au développement économique et social de ces pays.

1.2 VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE ET HYDROLOGIQUE

Cette partie bibliographique s'appuie principalement sur les résultats du programme de recherche ICCARE mené par l'IRD, et auquel j'ai pris part, dans le cadre du projet FRIEND AOC de l'UNESCO (Servat, 1994). Elle a pour objet de mieux quantifier le phénomène de sécheresse observé depuis le début des années 1970 en Afrique de l'ouest et centrale.

1.2.1 Variabilité pluviométrique

On présentera brièvement les méthodes d'analyse de la variabilité pluviométrique les plus fréquemment employées et les résultats obtenus.

1.2.1.1 Méthodes d'étude des fluctuations climatiques

Les études des fluctuations pluviométriques en Afrique de l'ouest et centrale se sont souvent basées sur des indices pluviométriques comme celui utilisé par Nicholson (1979) et Lamb (1983). Cet indice mesure un écart par rapport à une moyenne établie sur une longue période. L'écart centré calculé est réduit pour minimiser les variations internes aux séries de chaque station. Lorsque cet indice est calculé à l'échelle ponctuelle en se référant aux données des stations, il permet de distinguer les années humides ou excédentaires, des années sèches ou déficitaires. Le diagnostic à l'échelle régionale de la variabilité interannuelle des précipitations est souvent déduit des indices calculés pour chaque station en synthétisant l'information contenue à un certain nombre de stations pluviométriques supposé appartenir à une zone climatique homogène.

Plus classiquement, une simple analyse comparative de l'évolution des courbes isohyètes annuelles peut permettre de suivre les fluctuations climatiques.

Ces différentes analyses peuvent être appliquées à d'autres variables liée à la pluviométrie comme le nombre annuel de jours de pluies, les dates de début et de fin des saisons pluvieuses.

Jusqu'à une période très récente, ces analyses se sont particulièrement concentrées sur la zone sahélienne pour des raisons relevant des allures catastrophiques que prennent les sécheresses dans cette région. Le programme ICCARE a, pour sa part, étendu l'étude de la variabilité pluviométrique aux régions plus humides de l'Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne.

La caractérisation des fluctuations climatiques peut aussi être menée par l'analyse statistique des séries chronologiques de variables liées à la pluie ou à l'écoulement en différents points de mesure. Les méthodes utilisées visent principalement à détecter d'éventuelles séquences qui seraient statistiquement différentes. Leur application par certains auteurs (Hubert et Carbonnel, 1987; Demarée et Nicolis, 1990; Paturel et al., 1997a; Servat et al., 1997a) leur ont suggéré l'idée d'une rupture aux alentours de 1970 séparant nettement, d'un point de vue statistique, une situation excédentaire antérieure et une situation déficitaire postérieure.

La variabilité des précipitations a aussi été abordée en ayant recours à la méthode des moyennes mobiles. Mais les résultats obtenus en appliquant cette méthode méritent d'être interprétés avec circonspection parce que les moyennes mobiles introduisent un artefact de périodicité connu sous le nom " d'effet Slutsky " (Bernier, 1965).

1.2.1.2 Variabilité de la pluviométrie annuelle

La pluviométrie annuelle est une variable très couramment étudiée pour caractériser l'évolution climatique en Afrique. Toutes les études sont unanimes à dire que les cumuls pluviométriques annuels des décennies 1970 et 1980 se singularisent par une diminution sensible de la pluviométrie en Afrique de l'ouest et centrale.

Selon Sircoulon et Olivry (1986), la sécheresse a entraîné au Sahel une migration vers le sud des isohyètes 300, 400 et 500 mm. Le déplacement de ces courbes isohyètes s'est effectué sur près de 100 à 200 km, par rapport aux isohyètes établies à partir de la normale 1931-1960.

De même, la représentation cartographique des courbes isohyètes depuis 1950 jusqu'en 1989 (figure 1.4) montre un glissement vers le sud/sud-ouest des courbes isohyètes dans les régions " humides " d'Afrique de l'ouest et centrale, traduisant ainsi une réduction de la pluviométrie (L'Hôte et Mahé, 1996; Paturel et al. 1997a; Servat et al., 1997a).

La baisse de la pluviométrie est remarquable de par l'importante extension des zones à pluviométrie inférieure à 1200 mm durant les décennies 1970 et 1980 en Afrique tropicale humide : alors que les zones à pluviométrie inférieure à 1200 mm ne couvraient que de faibles superficies, elles recouvrent maintenant largement des zones à pluviométrie autrefois comprise entre 1200 et 1800 mm. Même dans les zones à forte pluviométrie (supérieure à

1800 mm), les deux dernières décennies se caractérisent par un glissement vers le sud-sud-ouest de l'isohyète 1800 mm.

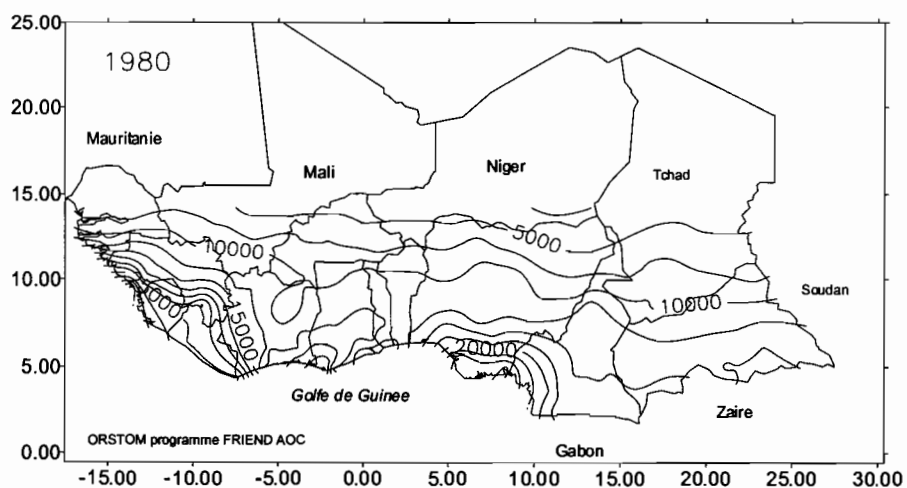
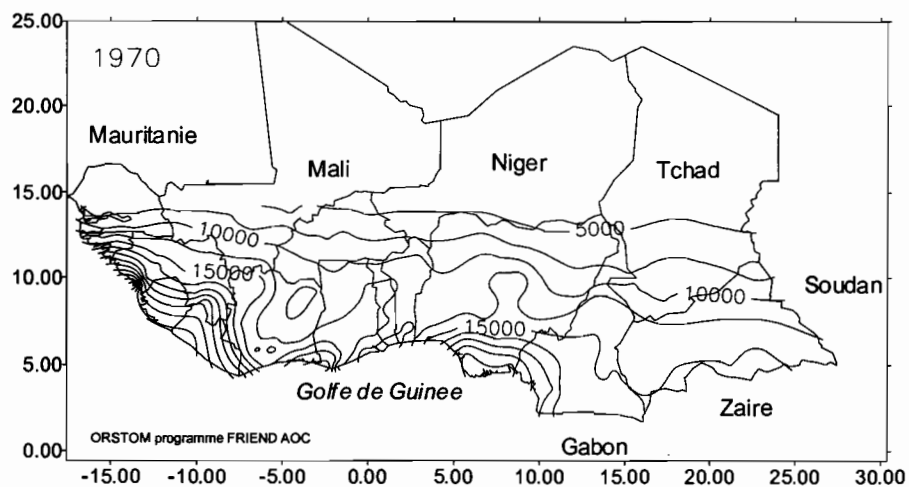
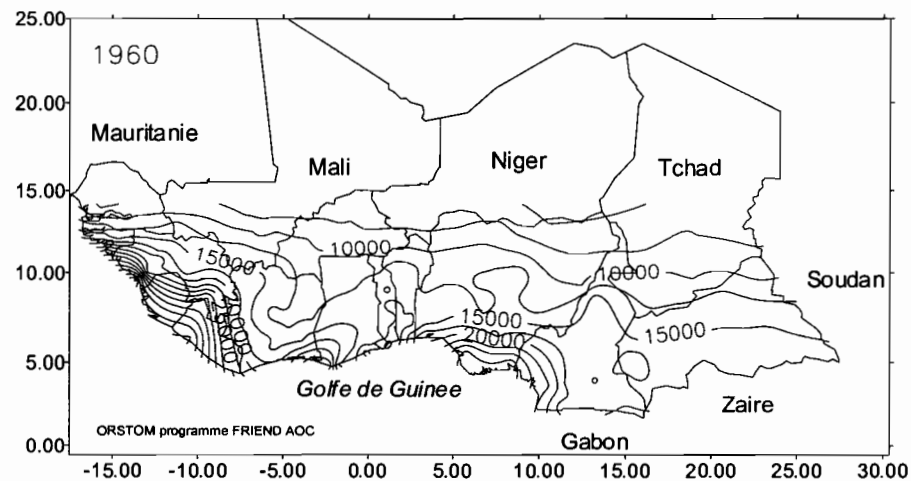
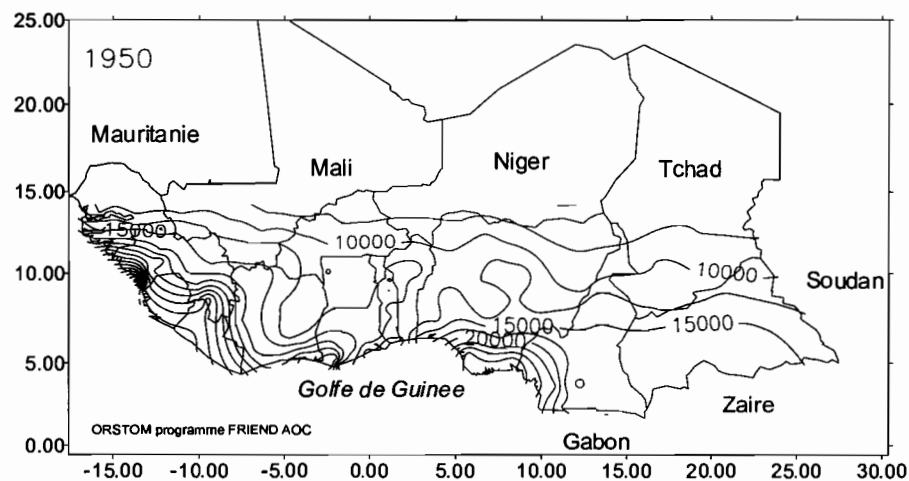


figure 1.4 : Afrique de l'Ouest et Centrale : Isohyètes interannuelles sur les décennies 1950 à 1980 (in Servat et al., 1998)

La cartographie des indices pluviométriques calculés aux postes pluviométriques sur la période 1950-1989 (figure 1.5) révèle le contraste entre les deux décennies humides de 1950 et 1960 pendant lesquelles les quelques "poches" de déficit qu'on observe ne sont que très localisées, et les deux décennies suivantes qui sont sèches. Durant ces deux dernières décennies les déficits pluviométriques sont généralisés et dépassent quelques fois 0.5 fois l'écart type des hauteurs annuelles précipitées sur la période 1950-1989 (Paturel et al. 1997a; Servat et al., 1997a; Servat et al., 1998).

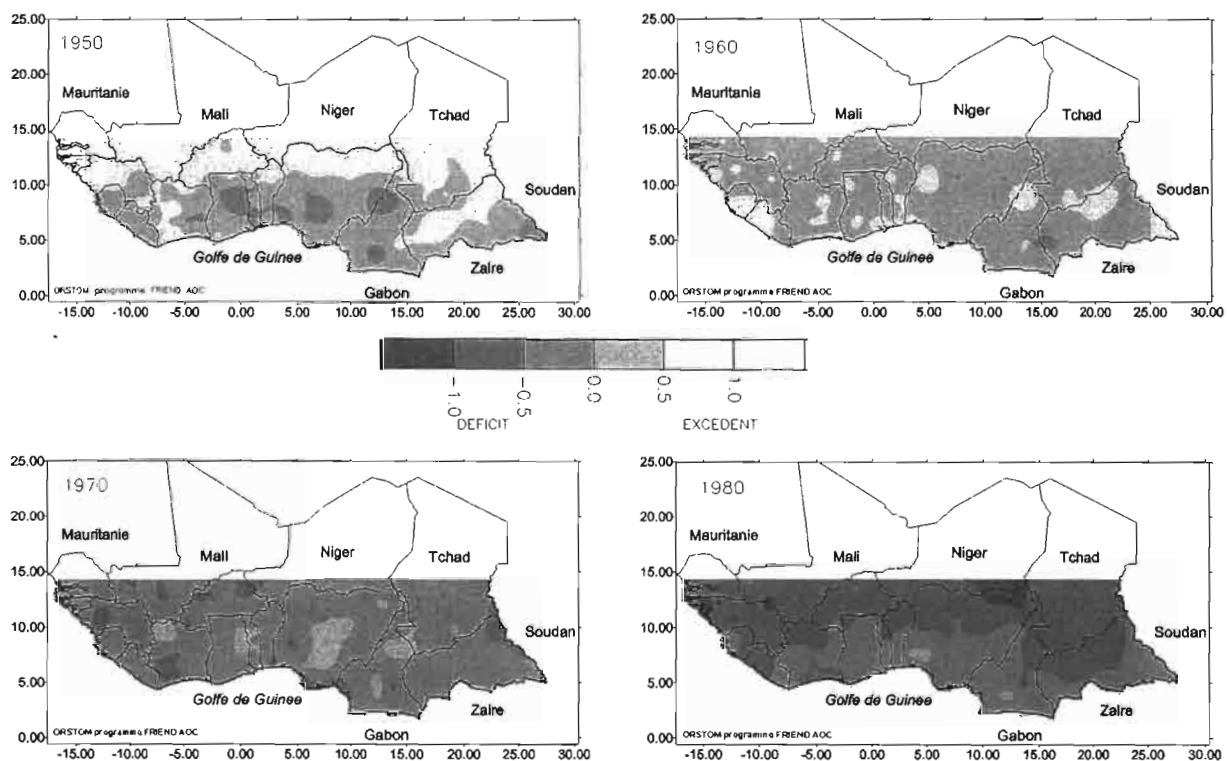


figure 1.5 : Tracé des indices pluviométriques pour les décennies 1950, 1960, 1970 et 1980 (in Servat et al., 1998)

1.2.1.3 Variabilité de la pluviométrie mensuelle

En zone sahélienne, la baisse des précipitations est plus importante au mois d'août (mois le plus pluvieux) et, à un degré moindre, au mois de septembre (Denett et al., 1985). On évalue à près de 27% le déficit moyen des pluies des mois de juillet, août et septembre depuis 1968 par rapport à la normale 1931-1960. Le calcul de l'indice pluviométrique centré réduit des pluies mensuelles par rapport à la normale 1931-1960 fait ressortir que les mois de juillet, août et septembre sont les plus affectés par la diminution des cumuls pluviométriques depuis 1965 au Sahel (Denett et al., 1985).

Nicholson et Palao (1993) montrent que dans les régions sahéliennes d'Afrique de l'ouest, les mois d'août et de septembre seraient les plus affectés par la baisse des précipitations. Il est intéressant de remarquer que ce sont les mois les plus pluvieux et que le cumul pluviométrique de ces deux mois est fortement corrélé aux pluies annuelles. En outre, la persistance de ce phénomène est beaucoup plus nette durant la période août-septembre que pendant toute autre période de la saison des pluies (Nicholson et Palao, 1993).

Les résultats du programme ICCARE confirment que la pluviométrie mensuelle a changé au cours des dernières décennies aussi bien sur les zones sahéliennes que sur les zones non sahéliennes de l'Afrique de l'ouest et centrale. Cependant, le changement ne s'est pas effectué uniformément sur toute l'année même si globalement sur chacun des mois la pluviométrie a diminué.

Pour les pays situés sur la façade atlantique (Sénégal, Gambie, Guinée Bissau, une partie de la Guinée Conakry, la Sierra Leone et le Liberia), de Décembre à Mars où les pluies sont normalement faibles, on observe des pluies encore plus faibles, excepté au Sénégal au mois de Mars.

D'Avril à Mai, mois habituels de début de la saison des pluies, on observe une pluviométrie moins importante que la normale.

Au cours des mois suivants de saison des pluies, le déficit avec la normale s'amplifie encore plus. Les mois d'Août et Septembre sont particulièrement déficitaires par rapport à la période de référence (1950-1989).

Les mois qui suivent la fin de la saison des pluies (Octobre et Novembre) connaissent également une pluviométrie inférieure à la normale.

Pour les pays situés en bordure du golfe de Guinée, qui connaissent un régime à 4 saisons (une partie de la Guinée Conakry, la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Togo, le Bénin et une partie du Nigeria), de Décembre à Mars, on observe une réduction généralisée de la pluviométrie dont l'importance est variable selon les régions.

Pendant les mois de la grande saison des pluies (Avril à Juillet) qui touche le Sud de la zone, la décennie 1980 est déficitaire par rapport à la période de référence (1950-1989) sur l'ensemble de la zone. Pendant la petite saison sèche (centrée sur le mois d'Août), les régions

concernées connaissent une pluviométrie plus importante qu'auparavant. La petite saison sèche tend à disparaître et la différenciation entre les 2 saisons des pluies n'est alors plus aussi nette. Une représentation spatiale de la zone où on peut encore observer nettement 4 saisons montre une réduction de son aire au cours des dernières décennies.

La petite saison des pluies est moins touchée que la grande saison des pluies par ce phénomène de diminution de la pluviométrie. Toutefois, le dernier mois (Novembre) est moins pluvieux qu'auparavant pouvant indiquer en cela une fin de la saison des pluies plus précoce.

Les pays situés au Nord du 10ème parallèle et qui bordent le Sahel (une partie de la Guinée Conakry, le Mali, le Burkina Faso, une partie du Nigeria, du Cameroun et du Tchad) connaissent une réduction de la pluviométrie sur l'ensemble de la zone et ce, durant toute l'année. Elle est particulièrement importante pendant la saison des pluies et l'est moins pendant la saison sèche. Rappelons que pendant cette dernière, la pluviométrie est de toutes façons très faible.

Les pays de l'Afrique centrale de la zone d'étude (une partie du Cameroun et du Tchad, et la Centrafrique) subissent également une réduction de la pluviométrie tout au long de l'année mais elle n'a pas l'intensité que l'on a observé sur l'Afrique de l'ouest. La réduction est importante en Avril à la frontière tchadienne et Centrafricaine. Les mois les plus humides sont alternativement excédentaires et déficitaires dans les régions les plus équatoriales.

La figure 1.6 et la figure 1.7 illustrent respectivement les pluies moyennes interannuelles des mois de février (mois sec) et des mois de juillet (mois humide) au cours des décennies 1950 à 1980 en Afrique de l'Ouest et Centrale.

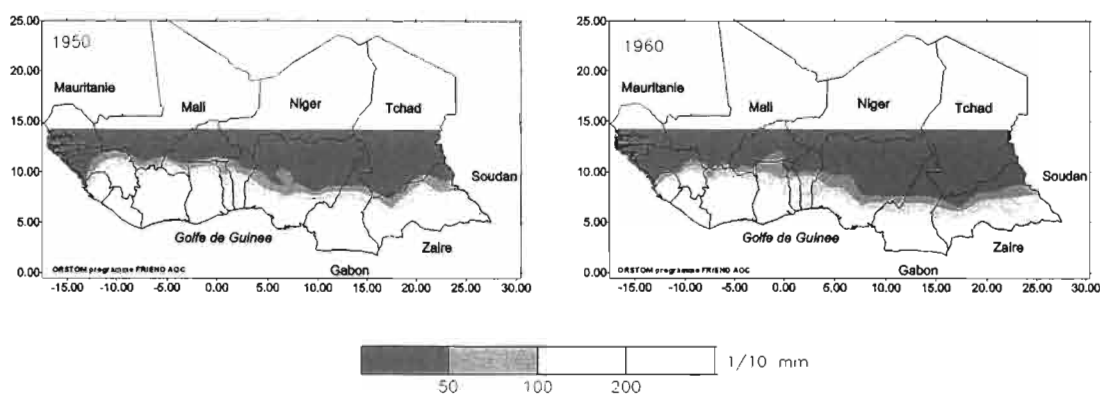


figure 1.6 : Afrique de l'Ouest et Centrale – Pluviométrie des mois de Février sur les décennies 1950 à 1980 (in Servat et al., 1998)

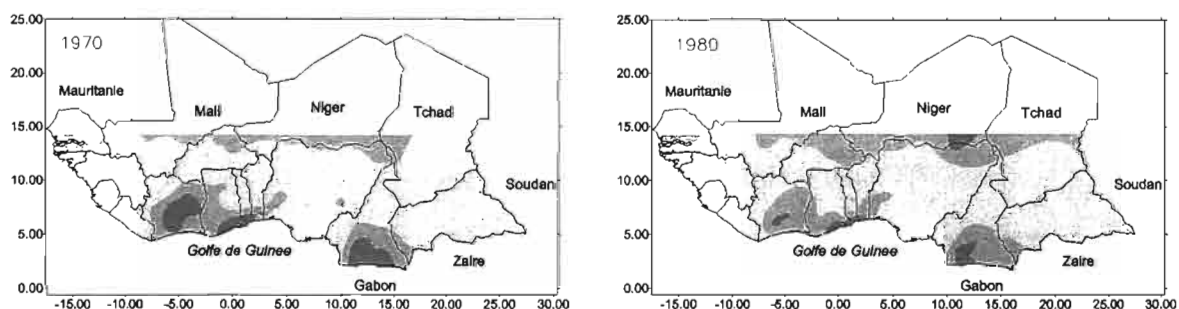
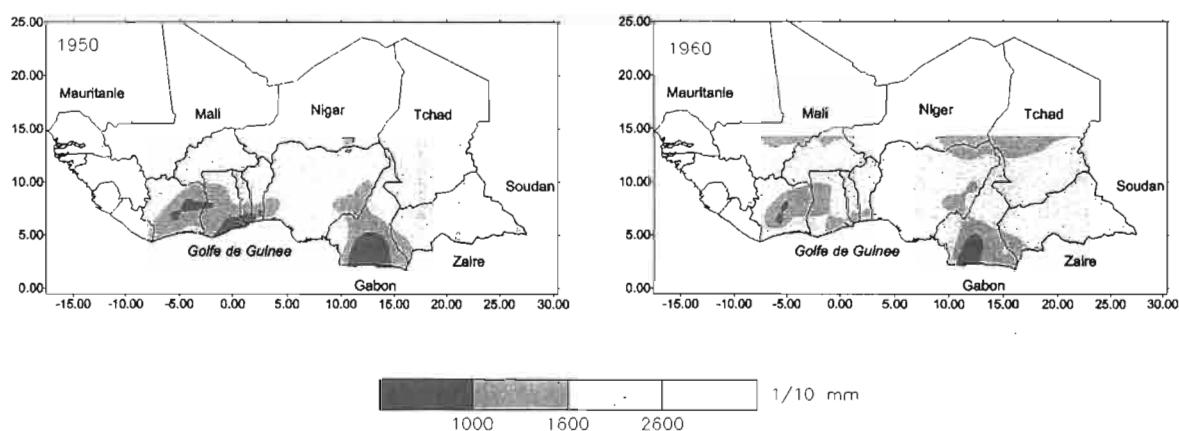


figure 1.7 : Afrique de l'Ouest et Centrale – Pluviométrie des mois de Juillet sur les décennies 1950 à 1980 (in Servat et al., 1998)

1.2.1.4 Variabilité du nombre annuel de jours de pluie

L'étude de la variabilité du nombre annuel de jours de pluie a été très peu abordée. Cela est lié à la difficulté à acquérir des données de mesures quotidiennes, fiables et ne comportant que peu de lacunes. Le programme ICCARE a fourni des résultats intéressants qui se rapprochent de ceux décrits sur la pluviométrie annuelle (Paturel et al., 1997a; Servat et al., 1998).

La diminution du nombre annuel de jours de pluie durant la sécheresse actuelle peut s'observer sur la figure 1.8 pour les quatre décennies de la période 1950-1989. Les différentes cartes montrent que la variable étudiée a diminué au cours des décennies en Afrique de l'ouest alors qu'elle semble être plus stable sur l'Afrique centrale. Le nombre de jours de pluie semble avoir diminué à partir de la décennie 1970. Les pays situés au nord (Sénégal, Mali, Burkina Faso et Tchad), ainsi que les massifs forestiers de Guinée et de Côte d'Ivoire sont les premiers concernés par ce phénomène. Au cours de la décennie 1980, celui-ci s'accroît et touche alors le Bénin.

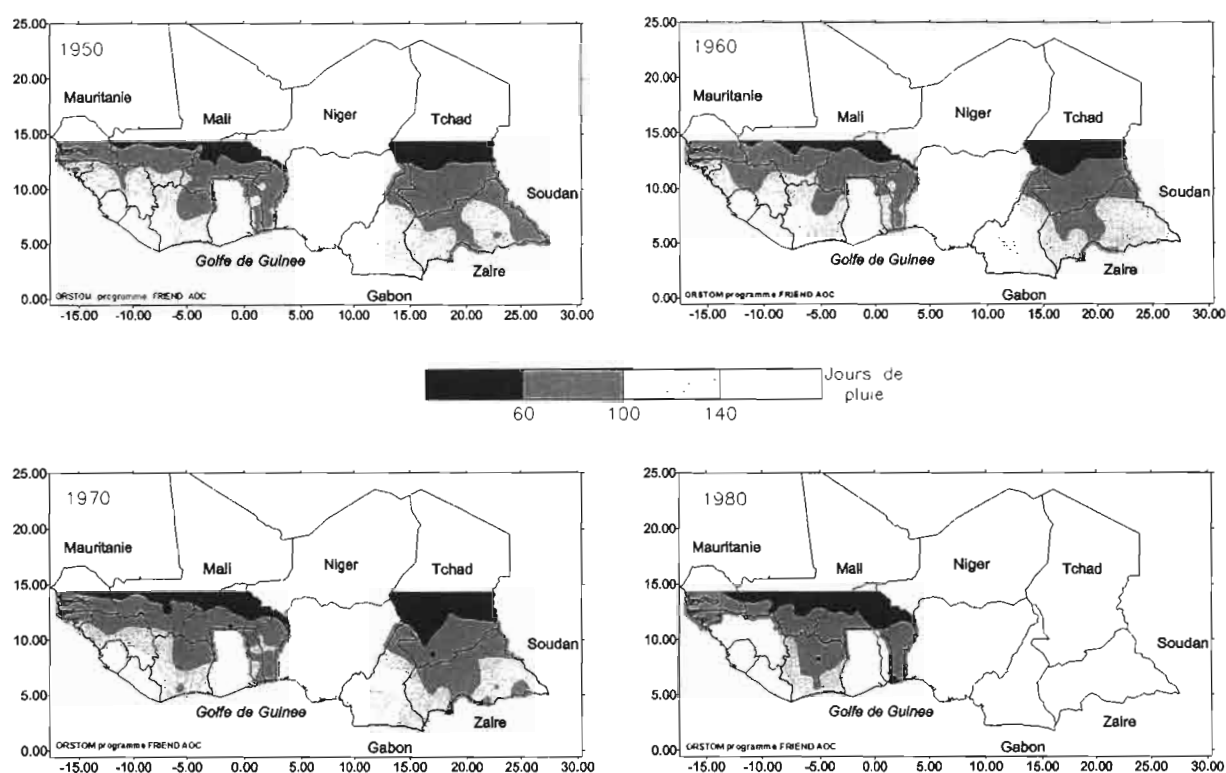


figure 1.8 : Afrique de l'Ouest et Centrale : Nombre de jours de pluie interannuel sur les décennies 1950 à 1980 (in Servat et al., 1998)

Plus localement, (Houndenou et Hernandez, 1998) montrent que, d'une façon générale, la région de l'Atakora est confrontée à une diminution généralisée du nombre de jours de pluie sur la période 1961-1990 qui a débuté à partir de 1963-1964 et est devenue persistante après 1968.

Hubert et al. (1989) en étudiant l'évolution des séries chronologiques de 33 stations pluviométriques d'Afrique de l'ouest en zone sahélienne réparties sur le Sénégal, le Mali, le Burkina Faso et le Niger mettent en évidence d'importantes ruptures situées la plupart du temps entre 1968 et 1969 sur les séries de nombre annuel de jours de pluie. Ces ruptures correspondent également à une diminution de cette variable.

1.2.1.5 Variabilité des dates de début et de fin de saison des pluies

Il semblerait que la modification constatée sur les cumuls de hauteurs pluviométriques durant la sécheresse actuelle s'accompagne aussi d'une modification de la répartition temporelle des pluies.

Adefolalu (1986) constate un retard du début des saisons de pluie de 25 jours au moins dans la zone soudano-sahélienne du Nigeria pendant la sécheresse 1983 qui, rappelons-le, est une année extrême. Ce retard atteint même 40 à 50 jours dans certaines régions du Nigeria durant cette même année.

Adejuwon et al. (1990) décrivent aussi un retard dans le début des saisons de pluie et un arrêt précoce de la saison des pluies à partir de l'étude de quelques stations réparties sur différentes zones climatiques du Nigeria.

(Houndenou et Hernandez, 1998) montre que le Nord-Ouest du Bénin est caractérisé par une variabilité significative des dates de début et de fin de la saison des pluies et donc de sa durée.

Dans le cadre du programme ICCARE qui couvre des zones à 1 mais aussi à 2 saisons des pluies, les résultats sont moins affirmatifs.

En ce qui concerne les régions à une seule saison des pluies, les changements que l'on peut observer ne sont pas très nets : la saison des pluies aurait tendance à durer moins longtemps qu'auparavant. Cependant, il est difficile de déterminer clairement si, dorénavant, elle débute plus tard ou si elle se termine plus tôt. En effet, on trouve tous les cas de figures à l'intérieur même d'un pays. Ces changements se sont déroulés à des dates souvent bien différentes.

Pour les quelques pays de la région étudiée, riverains du Golfe de Guinée et connaissant un régime à deux saisons des pluies, les résultats sont, là encore, flous. Une tendance au raccourcissement des saisons des pluies semble quand même se dégager. Plus précisément, en Côte d'Ivoire, la seconde saison des pluies a une durée plus courte qu'auparavant, la première saison des pluies connaissant la même tendance, mais de manière moins importante ; au Togo comme au Bénin le raccourcissement de la durée touche surtout la première saison des pluies ; au Cameroun, c'est l'inverse. Les dates d'occurrence de ces phénomènes sont très différentes d'un pays à l'autre, d'un poste à l'autre.

1.2.1.6 Conclusion partielle

L'analyse bibliographique de la variabilité pluviométrique en Afrique de l'Ouest et centrale confirme l'existence d'une péjoration pluviométrique. La sécheresse en Afrique de l'ouest et centrale se caractérise par une diminution remarquable des cumuls pluviométriques annuels. Cette variation semble être apparue entre la fin de la décennie 1960 et le début de la décennie 1970 (Tableau 1.2). Ses effets se sont amplifiés durant la décennie 1980.

Tableau 1.2 : déficits pluviométriques moyens observés par rapport à la date de rupture pour des pays d'Afrique de l'Ouest et Centrale (in Servat et al., 1998)

Pays	Déficit (en %)	Période de rupture
Bénin	19	1968-1970
Burkina Faso	22	1968-1971
Cameroun	16	1969-1971
Centrafrique	17	1968-1969
Côte d'Ivoire	21	1966-1971
Ghana	19	1968-1969
Guinée	20	1969-1970
Guinée Bissau	22	1967-1969
Mali	23	1967-1970
Nigeria	19	1967-1970
Sénégal-Gambie	25	1967-1969
Tchad	20	1970-1971
Togo	16	1968-1970

La variabilité pluviométrique se manifeste également par une modification importante de la pluviométrie mensuelle au cours des dernières décennies en Afrique de l'ouest et centrale vers 1970. Mais le changement ne s'est pas effectué uniformément sur toute l'année même si, globalement, sur chacun des mois la pluviométrie a diminué. A l'exception notable du mois d'Août de la zone à 2 saisons des pluies qui correspond habituellement au mois de petite saison sèche et qui connaît une pluviométrie plus importante qu'auparavant.

Le nombre annuel de jours de pluie a aussi varié. Des diminutions importantes s'observent en Afrique de l'ouest mais sont moindres en Afrique centrale. Cette diminution du nombre annuel de jours de pluie survient très fréquemment autour de l'année 1970.

Il semble que les saisons des pluies aient désormais un déroulement un peu différent de ce qu'il était précédemment. Dans les zones à une comme à deux saison des pluies, l'une de ces saisons, voire les deux, a une durée plus courte qu'auparavant. C'est parfois lié au fait que la saison des pluies débute plus tardivement, parfois au fait qu'elle s'arrête plus précocement, mais il est difficile de généraliser à l'ensemble de la zone.

Il importe de souligner le fait que les conditions de déficit pluviométrique perdurent jusqu'à nos jours même si très peu d'études ont pris en compte les valeurs de la décennie 1990. Au Burkina Faso (figure 1.9), il apparaît que la décennie 1990 semble être assez proche, d'un point de vue cumul pluviométrique annuel, de la décennie 1970 (Paturel et al., 2001). Cela infirme l'opinion de plus en répandue qui laisse croire à une reprise des précipitations : les pluies moyennes de la décennie 1990 restent toujours bien inférieures à celles observées au cours des décennies 1950 et 1960, mais sont supérieures aux pluies moyennes de la décennie 1980.

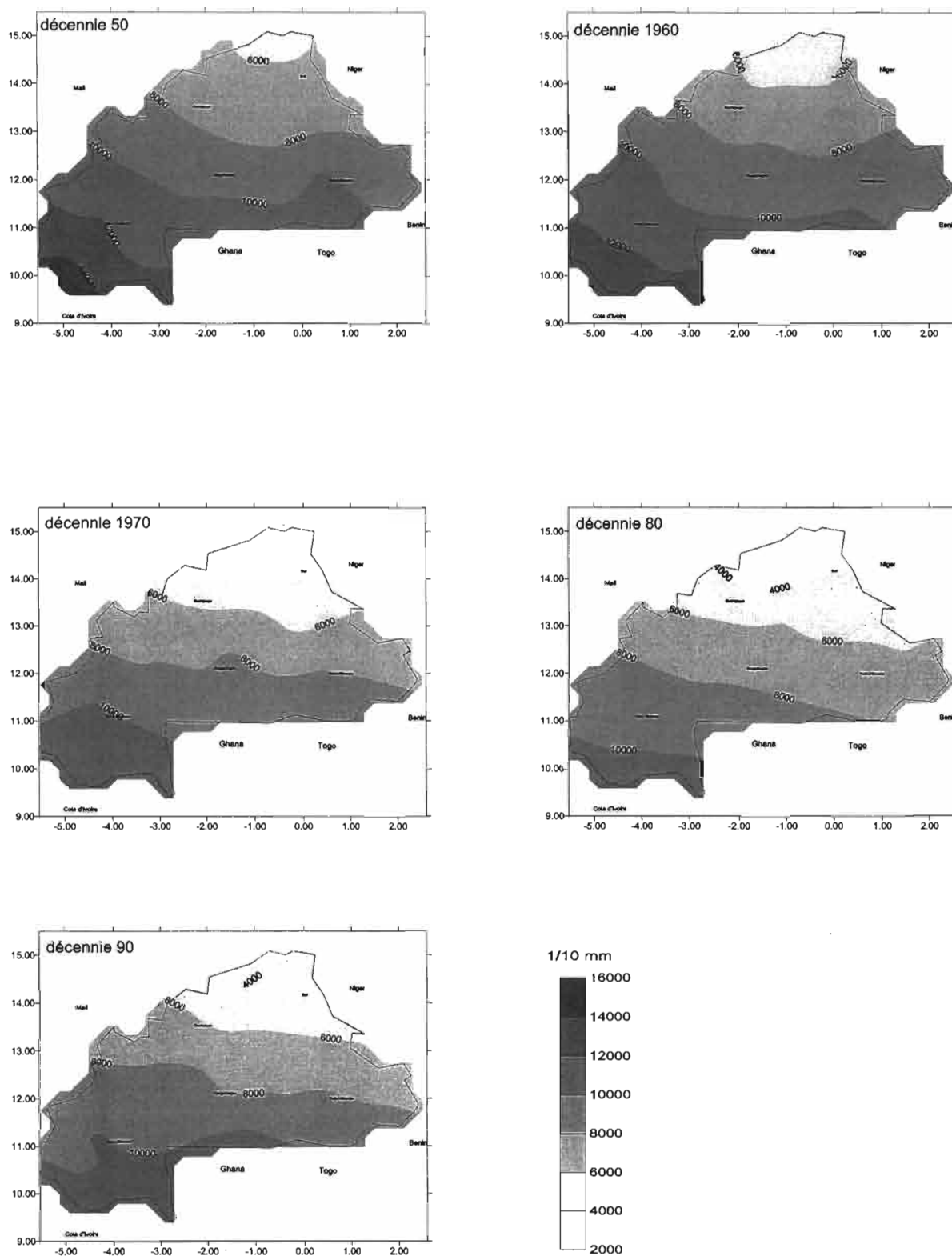


figure 1.9 : Pluies moyennes interannuelles au cours des décennies 1950 à 1990 au Burkina Faso (in Paturel et al., 2001)

1.2.2 Variabilité hydrologique

La variabilité pluviométrique étant établie, des interrogations se posent sur son incidence sur les régimes hydrologiques des cours d'eau.

Les résultats présentés concernent plusieurs types de variables :

- débit moyen annuel (module); cette variable est représentative des volumes qui transitent annuellement dans le cours d'eau. Elle est donc le témoin, par excellence, de toutes les variations en matière de ressources en eau disponibles.
- débits de hautes-eaux.
- débits de basses eaux et tarissements. Ces variables ont une importance considérable dans la mesure où elles conditionnent la réalisation de nombreux ouvrages, les calculs des débits réservés aval, etc.

1.2.2.1 Variabilité des débits moyens annuels

En zone sahélienne de l'Afrique de l'ouest et centrale, les études des effets de la sécheresse sur les écoulements se sont particulièrement intéressées aux grands fleuves tropicaux comme le Sénégal, le Niger, le Bani, Le Logone, et le Chari qui prennent tous naissance en région tropicale plus humide.

A partir de l'étude de l'évolution des modules du Sénégal, du Niger et du Chari, Olivry et al. (1993) indiquent que les ressources en eau de surface de ces cours d'eau sont en baisse depuis le début de l'année 1970 et ont diminué de moitié sur la décennie 80. Depuis 1970 et ce, jusqu'en 1984, le total des apports des fleuves Sénégal, Niger, Bani, Chari, et Logone est systématiquement déficitaire chaque année. Le déficit moyen annuel des apports de ces fleuves sur la période 1968 à 1984 est de 25% environ depuis le début des observations.

D'après Sircoulon (1987) ; par rapport à des moyennes établies depuis le début des observations jusqu'en 1967 inclus, le déficit des apports annuels de la période 1968-1985 atteint 44% sur le Sénégal à Bakel, 22% sur le Niger à Koulikoro, et 39% sur le Chari à N'Djamena (figure 1.10).

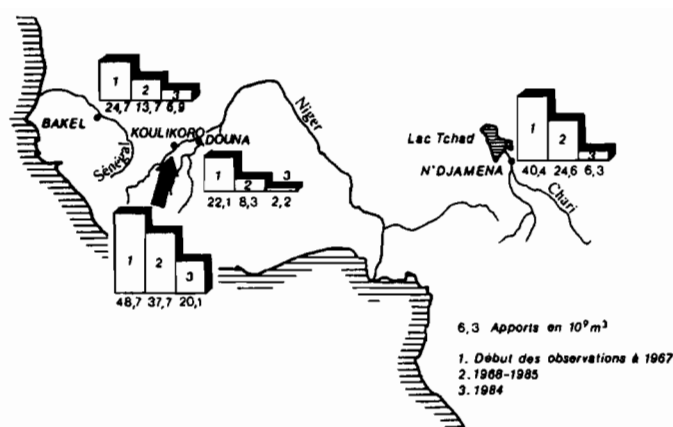


figure 1.10 : Variation des apports annuels de grands fleuves (in Sircoulon, 1987)

En considérant les modules du Mouhoun (Volta Noire) à Dapola au Burkina Faso sur deux périodes distinctes 1951-1971 et 1972-1985, Pouyaud (1986a) constate une diminution de près de 50% des modules sur la dernière période. Par ailleurs, en prenant en compte les récentes années de sécheresse (1972-1985) dans l'échantillon des modules du Mouhoun à Dapola, on aboutit à une diminution de 20% de la moyenne de l'échantillon total par rapport à la moyenne calculée sur la période 1951-1971. De même, bien que l'influence des années après 1970 sur le Nakambé (Volta Blanche) à Yakala paraisse moindre par rapport à celle constatée sur le Mouhoun, le déficit est tout de même important puisqu'on observe une diminution de 32% des modules sur la période 1971-1985 par rapport à la période 1956-1971. Et si l'on considère l'ensemble de l'échantillon des modules du Nakambé à Yakala, de 1956 à 1985, la baisse par rapport à la période 1956-1971 est de 15%.

En Afrique centrale, Wesselink et al. (1995) ont identifié trois séquences (1935-1959, 1960-1970, 1971-1995) dans l'évolution des modules de l'Oubangui à Bangui. Ils font remarquer que la période 1971-1995 représente la séquence la plus sèche des modules de l'Oubangui à Bangui depuis le début des observations en 1935. Durant cette période, le débit moyen interannuel présente une diminution de 34% par rapport à la période 1960-1970, période très humide, avec un débit moyen interannuel égal à $4890 m^3/s$. Les auteurs pensent que la baisse des débits observée sur l'Oubangui a un caractère régional, d'importants déficits

hydrométriques caractérisant les écoulements de bon nombre autres cours d'eau d'Afrique centrale.

Dans le cadre du programme ICCARE, dans les zones plus humides de l'Afrique de l'ouest et centrale, Servat et al. (1997b) ont étudié l'évolution des débits moyens annuels sur 88 stations et ont mis en évidence des diminutions nettes au sein des séries chronologiques des débits moyens annuels. Les dates de ruptures se concentrent entre 1969 et 1971. Les déficits calculés sont d'un ordre de grandeur généralement supérieur à 30%. Les bassins du fleuve Sénégal, des fleuves ivoiriens et du Chari-Logone sont les plus touchés par la baisse des écoulements. Par contre, quelques bassins du Togo, du Bénin et du Cameroun qui présentaient par ailleurs de faibles déficits pluviométriques semblent être épargnés par le phénomène.

Quelques ordres de grandeurs de diminution d'écoulements fournis par Paturel et al. (1997c) sont repris dans le Tableau 1.3.

Tableau 1.3 : Ordres de grandeur (en %) de certains déficits d'écoulement annuel calculés depuis la date de rupture observée dans les séries chronologiques par rapport à la période de référence 1950-1989 (d'après Paturel et al., 1997c)

Fleuve ou pays	Diminution d'écoulement (%)
Fleuve Niger (stations du Mali et de Guinée)	40
Fleuve Sénégal (stations du Sénégal et du Mali)	60
Bénin	52
Burkina	48
Centrafrique	29
Côte d'Ivoire	47
Guinée	39
Tchad	47
Togo	44

1.2.2.2 Variabilité des débits de hautes-eaux

Dans l'ensemble de l'Afrique de l'ouest et centrale, la baisse des débits de pointe semble intervenir à partir de 1968-1970. On assiste depuis 1970 à un effondrement des crues

maximales (Sircoulon, 1992) qui atteint son paroxysme au cours de la sécheresse de 1983-1984. C'est sur ces 2 années que l'on observe les plus faibles valeurs de débits moyens journaliers maximums annuels sur le Sénégal à Bakel, le Niger à Koulikoro, le Bani à Douna et le Chari à N'Djamena avec des déficits par rapport à la moyenne interannuelle dépassant 50% pour l'ensemble de ces cours d'eau (Sircoulon, 1990). Cette baisse de la puissance des crues s'accompagne d'une modification de l'hydrogramme. Comme Sircoulon (1990) l'a illustré, en année humide, on observe une pointe unique, tandis que les hydrogrammes des années sèches présentent plusieurs pointes de crue nettement plus faibles. Les Figure 1.11, Figure 1.12, Figure 1.13, Figure 1.14 qui reproduisent les hydrogrammes annuels de cours d'eau (Sircoulon, 1990) illustrent les modifications observées.

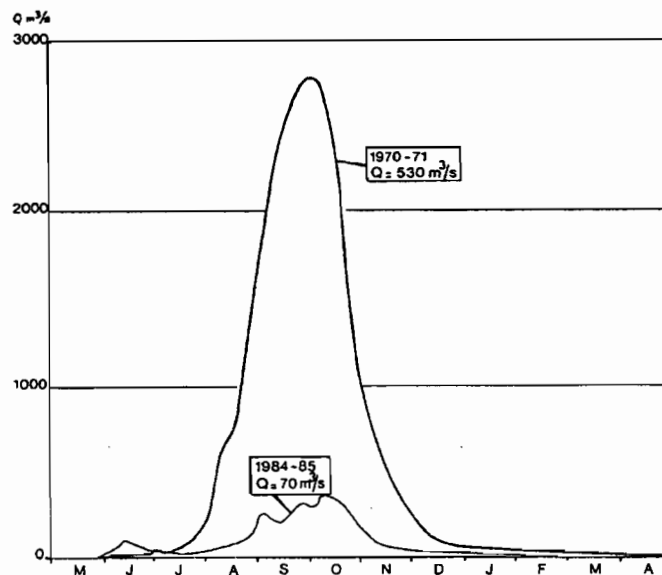


Figure 1.11 : Hydrogrammes annuels du Bani à Douna en année proche de la médiane 1970-1971 et en année minimum 1984-1985 (in Sircoulon, 1990)

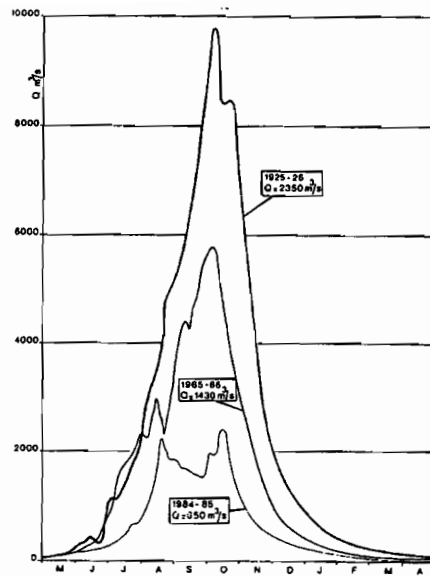


Figure 1.12 : Hydrogrammes annuels du Niger à Koulikoro en années maximum 1925-1926, médiane 1965-1966 et minimum 1984-1985 (in Sircoulon, 1990)

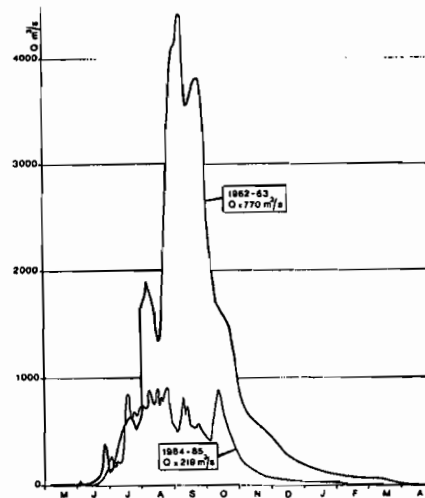


Figure 1.13 : Hydrogrammes annuels du Sénégal à Bakel en année proche de la médiane 1962-1963 et en année minimum 1984-1985 (in Sircoulon, 1990)

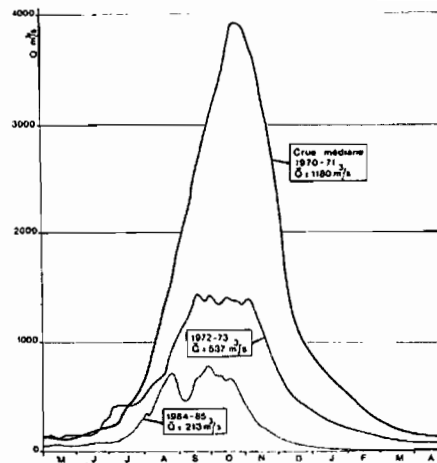


Figure 1.14 : Hydrogrammes annuels du Chari à N'Djamena en année proche de la médiane 1970-1971, en année sèche 1972-1973 et en année minimum 1984-1985 (in Sircoulon, 1990)

L'étude d'autres variables caractéristiques des débits de hautes eaux comme les VCXn (avec $n = 1, 5, 10, 20, 30, 60, 90$, débits moyens maximum de n jours consécutifs) montre que ces variables dans leur ensemble ont connu des modifications se rapprochant de celles observées sur les débits moyens annuels depuis 1970 environ (Servat et al., 1997b).

1.2.2.3 Variabilité des débits de basses eaux

Les basses eaux sont particulièrement touchées par le phénomène de sécheresse actuelle.

Selon Olivry et al. (1993), les étiages des fleuves soudano-sahéliens sont systématiquement les plus faibles des chroniques observées puisque l'on note une forte concentration des années à plus faibles valeurs de débits mensuels d'étiage entre 1970 et 1990.

Durant 33 années d'observations précédant 1970, les étiages du Niger à Niamey sont tous supérieurs à $13 \text{ m}^3/\text{s}$. Après cette date, la mesure des étiages du Niger à Niamey (Gonni, 1986b) montre que jusqu'en 1985, 9 années ont des valeurs nettement en dessous de $13 \text{ m}^3/\text{s}$, entre 0 et $7.6 \text{ m}^3/\text{s}$. Sur cette dernière période, les étiages sont tous inférieurs à $22 \text{ m}^3/\text{s}$, alors que précédemment ils pouvaient atteindre $100 \text{ m}^3/\text{s}$. De surcroît, la moyenne des étiages calculée sur la période 1971-1985 ($7.6 \text{ m}^3/\text{s}$) est largement en dessous de la valeur décennale sèche calculée sur la période antérieure à 1970 ($15 \text{ m}^3/\text{s}$).

La moyenne des débits minimums journaliers du Niger à la station du Nigelec (Niamey) établie sur la période 1969-1994 a diminué de 83% par rapport à la moyenne calculée sur la période 1929-1968 (Bechler et al., 1997).

L'étude des variations des débits mensuels d'étiages depuis le début des observations sur des cours d'eau d'Afrique centrale, Oubangui et Sangha, montre une baisse des débits d'étiage par rapport à la moyenne générale depuis 1972 (Olivry et al., 1993; Orange et al., 1997; Mahé et Olivry, 1999). De surcroît, les débits d'étiages décroissent de manière régulière depuis 1978. Ce phénomène caractérise également les fleuves des régions du golfe de Guinée.

1.2.2.4 Conclusion partielle

L'incidence du déficit pluviométrique observé est manifeste sur la disponibilité des ressources en eau. L'étude des modifications intervenues au sein des régimes hydrologiques montre que les écoulements annuels en Afrique de l'ouest et centrale ont fortement diminué au début de la décennie 1970. Il convient de souligner l'ampleur des déficits atteints en matière de modules, et donc de volumes écoulés annuels comme l'ont montré les résultats du programme ICCARE (figure 1.15).

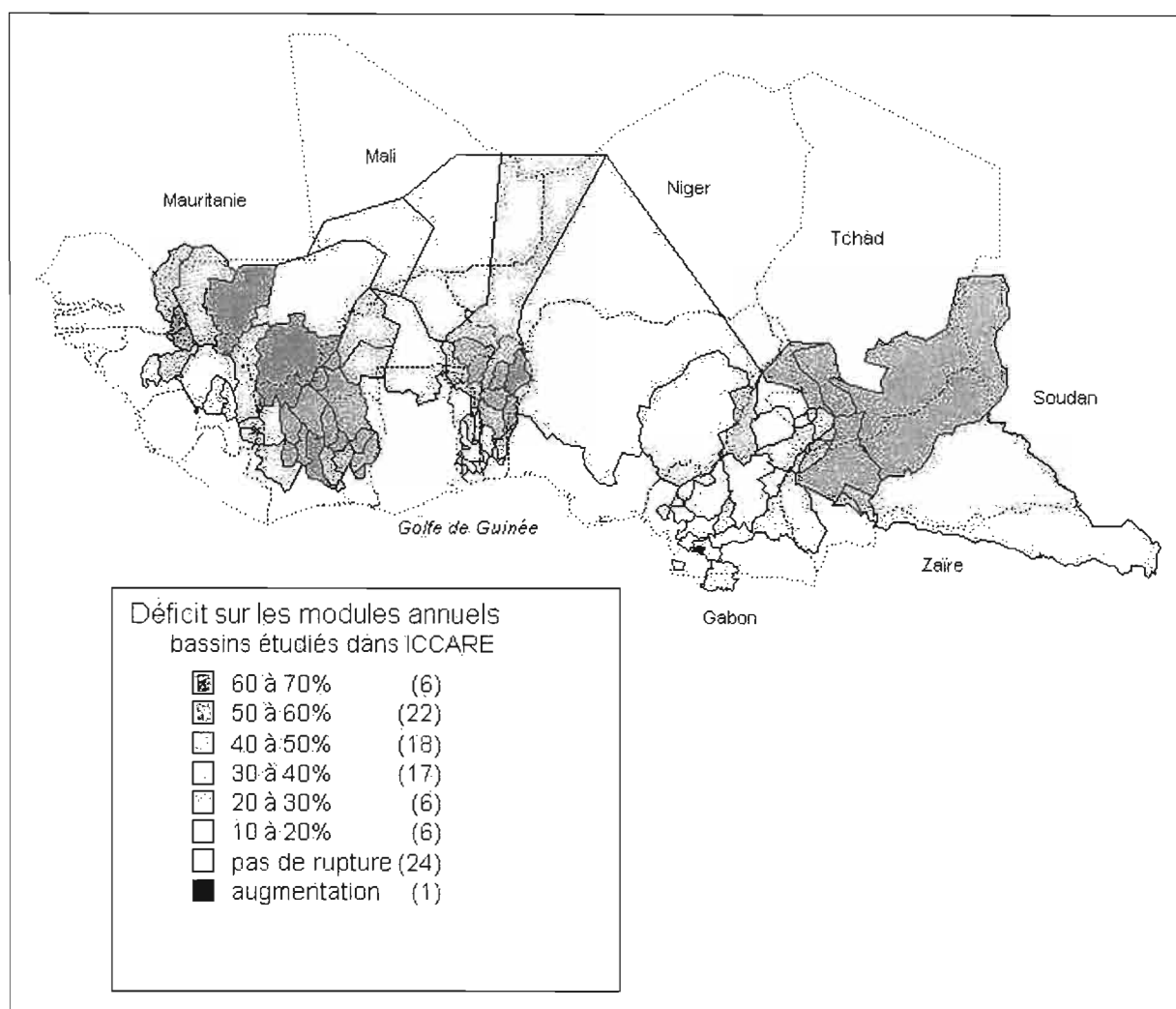


figure 1.15 : Déficit hydrométrique de cours d'eau en Afrique de l'Ouest et centrale (in Servat et al., 1998)

Les résultats concernant l'analyse des caractéristiques des hautes eaux et de basses eaux sont similaires à ceux observés sur les débits moyens annuels.

1.3 NORMES HYDROLOGIQUES

Le diagnostic de l'évolution récente des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale montre que sur une période de référence de 1950 à 1990, les précipitations ont baissé en moyenne de 15 à 20% et les écoulements de plus de 50%.

Ce déficit pluviométrique et hydrométrique observé sur une longue période soulève le problème de la période de référence à considérer pour l'estimation des caractéristiques hydrologiques employées par les aménageurs dans le cadre de leurs projets. La persistance de

la baisse des précipitations et des écoulements remet en cause certains automatismes et usages sur l'utilisation de séries chronologiques de référence.

A la lumière de l'évolution récente des précipitations et des écoulements, on conçoit aisément que la prise en compte ou non des valeurs récentes des séries chronologiques de pluie et de débit puissent conduire à des décisions différentes en matière de planification et de gestion des ressources en eau.

1.3.1 Notion de norme

Une définition simple de la norme est "la moyenne des valeurs observées". La moyenne est parfois remplacée par la médiane ou le mode pour tenir compte de l'irrégularité interannuelle.

Morel (1986) distingue la norme hydrologique qui est la moyenne d'une série la plus longue possible pour pouvoir valider les occurrences cinquantennales ou centennales, de la norme météorologique qui désigne une moyenne sur 30 ans. Cette dernière permet le calcul des normales pluviométriques qui sont des moyennes glissantes se succédant les unes aux autres tous les trente ans (1931-1960, 1941-1970, 1951-1980, etc.).

1.3.2 Pour une révision des normes hydrologiques

De nombreuses publications des caractéristiques de crue, d'étiage ou de module des fleuves ont été réalisées en prenant comme postulat la stabilité du climat. L'observation des caractéristiques climatiques sur un certain nombre d'années permettrait de décrire le climat de manière convenable. L'O.M.M. recommande une période de 10 années de mesures d'une station hydrologique. Pouyaud (1986b) pense que compte tenu de la persistance interannuelle des phénomènes de sécheresse, cette recommandation semble insuffisante pour caractériser le régime hydrologique en Afrique soudano-sahélienne.

Ozer et Erpicum (1995) pensent que l'adoption d'une période de trente ans pour la cartographie des courbes isohyètes relève de la tradition et le choix de cette période de référence nous confronte à des problèmes de représentativité. Pour illustrer leurs propos, les auteurs prennent en exemple la période trentenaire de référence 1961-1990. Selon les auteurs, la période très humide du début des années 1960 de même que les fortes sécheresses qui ont affecté le Sahel pendant les périodes 1968-1973 et 1981-1987 vont influencer de manière notable les moyennes calculées sur la période 1961-1990. Les moyennes ainsi calculées

masquent le caractère non-stationnaire de la pluviométrie. Les auteurs pensent que pour une meilleure représentation des conditions climatiques qui ont prévalu depuis 1950, il est raisonnable de scinder les séries chronologiques des observations pluviométriques en deux échantillons, l'un qui correspondrait à la phase humide antérieure à l'apparition de la baisse de la pluviométrie, et l'autre à la phase sèche qui suit.

Todorov (1985) montre aussi l'incidence de la prise en compte de 16 années de 1968 à 1983 dans la série chronologique de données pluviométriques. A l'exception d'une seule station, toutes les moyennes pluviométriques établies antérieurement par l'O.M.M. sont supérieures aux moyennes qui intègrent les 16 années récentes dans les échantillons de données. L'auteur qui a constaté d'importantes modifications pour d'autres caractéristiques des régimes pluviométriques (dates de début et fin de la saison des pluies, durée de la saison des pluies) estime que les moyennes ou normales pluviométriques calculées sur les périodes antérieures à 1968 sont dépassées et ne devraient plus être utilisées à des fins opérationnelles en agrométéorologie. Selon lui, 16 années sèches consécutives est une période suffisamment longue pour affecter la végétation et les pratiques agricoles et il recommande l'établissement de nouvelles valeurs de moyennes ou normales pluviométriques qui incluraient toutes les années récentes. Il ajoute toutefois que la longueur de la période sur laquelle les valeurs des moyennes ou normales pluviométriques seraient calculées devra dépendre de l'utilisation projetée.

Olivry et al. (1994) ont procédé à des prédéterminations des débits moyens journaliers maximums annuels du Niger à Koulikoro en scindant l'échantillon total des observations en deux parties, avant et après 1970. L'ajustement sur la période de 1971 à 1992 montre une sous-estimation de 24% par rapport aux résultats obtenus en considérant toute la période d'observation.

Hubert et al. (1989) après avoir mis en évidence des ruptures situées avec le maximum de probabilité entre 1968 et 1970 dans les séries de précipitations et de débits en Afrique de l'ouest recommandent que les normes hydrologiques soient désormais établies sur des données de la phase climatique récente. Les données de certaines phases climatiques antérieures, similaires à la phase climatique actuelle pourraient venir augmenter la taille de l'échantillon des données de la période récente. Les auteurs pensent que l'on devrait

s'orienter vers une conception dynamique des ouvrages hydrauliques (les réservoirs en particulier) de sorte qu'ils intègrent d'éventuelles fluctuations climatiques. La stratégie de conception devrait se baser sur le principe de la constitution de systèmes d'eau capables de résister aux effets de plusieurs années de sécheresse.

Farmer (1986) pense que la plupart, sinon l'ensemble, des publications et pratiques en usage dans le domaine de la planification utilise des informations pluviométriques ou des statistiques basées sur des données des fameuses périodes de référence de 1931-1960 ou 1941-1970. La dégradation actuelle de la pluviométrie montre que de telles données ne sont plus représentatives des conditions récentes. Comme les anciennes données apparaissent plus optimistes au regard de la récente et contemporaine disponibilité des ressources en eau, il affirme qu'il y a un danger à utiliser les moyennes pluviométriques anciennes qui ne prennent pas en compte les fluctuations récentes. Le contraste entre les pluies excédentaires enregistrées au cours des décennies précédant 1970 et les pluies déficitaires observées après cette date pourrait conduire à d'importantes conséquences en matière de planification. Il cite l'exemple d'un projet d'irrigation à partir du lac Tchad qui n'a jamais atteint les prévisions faites parce que le niveau du lac Tchad est tombé plus bas que les plus faibles valeurs de données utilisées lors de la conception du projet. Le pompage a été ainsi réduit à un niveau de non faisabilité. Par conséquent, il conclut qu'il serait prudent de baser les décisions en matière de planification en fondant les attentes sur le fait que le régime pluviométrique des années récentes est la norme.

1.4 CONCLUSION

De l'analyse bibliographique sur la variabilité pluviométrique et hydrométrique en Afrique de l'ouest et centrale, un consensus semble se dégager : la sécheresse actuelle qui est intervenue à la fin des années 60 et au début des années 70 apparaît comme un phénomène "anormal" qui se distingue des autres sécheresses qui se sont déjà produites depuis le début du siècle.

Trois caractéristiques de la récente sécheresse font qu'elle semble être sans équivalent depuis le début du siècle : sa durée, son intensité et son extension.

Autant d'éléments qui ont conduit certains auteurs à parler de fluctuation ou de rupture climatique, voire même de l'installation d'un nouveau régime climatique . Quelle que soit la façon dont il est défini, le changement des conditions climatiques moyennes est remarquable à travers l'étude des variations de certaines variables telles que la pluviométrie et les écoulements.

Comme on pouvait s'y attendre, la diminution de la pluviométrie a une incidence sur les écoulements des cours d'eau de l'Afrique de l'ouest et centrale. Ceux-ci ont, d'une manière générale, baissé plus fortement que les pluies qui les ont engendrés (Tableau 1.4).

Tableau 1.4 : Comparaison des déficits annuels de la pluviométrie et des écoulements sur quelques pays de l'Afrique de l'ouest et centrale

Bassins versants	Diminution de la pluviométrie annuelle (%)	Diminution de l'écoulement annuel (%)
Bénin	19	52
Burkina	22	48
Centrafrique	17	29
Côte d'Ivoire	21	47
Guinée	20	39
Tchad	20	47
Togo	16	44
Fleuve Niger (stations du Mali et de Guinée)	21	40
Fleuve Sénégal (stations du Sénégal et du Mali)	24	60

Ce phénomène ne s'observe pas sur toute l'Afrique de l'ouest et centrale comme l'ont montré les travaux de Albergel (1987) et Mahé et al. (2001) sur des petits bassins versants sahéliens du Burkina Faso où on note une augmentation des coefficients de ruissellement pendant la période de sécheresse actuelle. Ces 2 auteurs lient ces observations à une modification des états de surface, changeant en cela la fonction de production.

L'ampleur du phénomène a eu de graves répercussions sur les populations de certaines régions particulièrement vulnérables aux effets de la sécheresse. Dans le Sahel en particulier, et dans toutes les régions où la diminution des précipitations et des écoulements a été décelée, les problèmes que posent la sécheresse vont bien au-delà d'une simple vision de manque d'eau. Les problèmes socio-économiques que posent la sécheresse alliés à la dégradation considérable de l'environnement font de la sécheresse une contrainte au développement des pays qu'elle affecte.

Dans cette étude, nous n'avons pas mis l'accent sur les explications de la sécheresse en Afrique de l'ouest. Quelques publications permettent de comprendre l'apparition des phénomènes de sécheresse en Afrique de l'ouest.

Le lien entre la variabilité climatique et les mécanismes de circulation générale a été décrit par Tanaka et al. (1975) qui suggère deux explications possibles de l'apparition des sécheresses au Sahel :

- une position plus méridionale de la ZCIT limiterait l'apport de la vapeur d'eau vers les régions sahéliennes,
- une diminution générale de la convection entraînerait une diminution généralisée des précipitations sur l'ensemble de l'Afrique de l'ouest.

Nicholson (1980, 1981) aboutit à la même conclusion en montrant que le déplacement méridien de la ZCIT ne semble pas être le seul facteur impliqué dans la variabilité pluviométrique au Sahel. Certaines années anormalement sèches peuvent être dues à une diminution de l'intensité de la saison des pluies sur l'ensemble de l'Afrique de l'ouest à travers la dynamique atmosphérique.

Shinoda (1989) montre que la dernière situation décrite par Nicholson se retrouve pendant les décennies 1970 et 1980.

Fontaine et Bigot (1991) montrent qu'une année pluvieuse sur la bande soudano-sahélienne correspond à une migration précoce et haute vers le nord de la ZCIT ; inversement, une année sèche au Sahel correspond plutôt à une migration tardive et basse. La vitesse avec laquelle s'effectue la migration de la ZCIT influence également l'intensité de la saison des pluies : lorsqu'elle est lente, la saison de pluie à venir est déficitaire ; lorsqu'elle est rapide la saison de pluie est généralement meilleure. En analysant les relations statistiques entre les sécheresses de l'Afrique de l'ouest et les températures mensuelles de surface océanique, les auteurs montrent que les sécheresses qui affectent l'Afrique de l'ouest sont associées à des anomalies chaudes sur le Pacifique est équatorial et des anomalies froides sur l'Atlantique équatorial.

La persistance de la baisse des précipitations et des écoulements remet en cause bon nombre d'idées reçues. Les défaillances des performances de plus en plus fréquentes des aménagements sous les conditions climatiques actuelles soulèvent le problème des normes hydrologiques à retenir par les aménageurs dans le cadre de la conception de leurs projets. Parmi les critères qui sous-tendent la conception des ouvrages, la capacité à résister aux effets

d'une sécheresse persistante comme celle qui sévit actuellement apparaît désormais comme une exigence si l'on veut assurer le bon fonctionnement de ces ouvrages. On s'orienterait ainsi vers une réflexion sur la révision des normes hydrologiques.

Le problème de la révision des normes hydrologiques est si délicat qu'il est difficile de proposer une solution définitive à l'état actuel de nos connaissances. Si les limites des normes hydrologiques, suite aux conditions prolongées de déficits pluviométrique et hydrométrique sont bien connues et largement commentées, les aspects méthodologiques et institutionnels sont loin d'être abordés de manière satisfaisante.

Plusieurs auteurs ont souligné le besoin pressant de la révision des normes hydrologiques. La longue période de sécheresse qui a eu des effets durables (le retour aux conditions antérieures à la sécheresse sera encore plus long) sur les systèmes hydrologiques et l'environnement a achevé de montrer la nécessité à prendre en compte les données récentes dans ces régions particulières. Au regard de l'analyse de la variabilité pluviométrique et hydrométrique précédente, l'influence des données des années récentes appartenant à la période de sécheresse sur les résultats de calculs de certaines variables hydrologiques est en effet évidente. L'interrogation majeure qui émerge de ce constat est de savoir **quelle norme faut-il retenir** dans les régions touchées ces dernières années par le phénomène de sécheresse? Convient-il d'intégrer purement et simplement les années récentes dans la continuité des séries hydrologiques ou doit-on faire l'hypothèse d'une modification plus durable et ne prendre en compte que les données des années postérieures à la date de début de la sécheresse?

Ce travail préparatoire bibliographique nous permet , maintenant, d'introduire le travail fait au cours de cette thèse.

Nous présenterons d'abord les caractéristiques physiques de la zone pilote ainsi que les données que nous avons utilisées pour l'étude (chapitre 2).

Par la suite, nous réaliserons une analyse complète et fine de la variabilité pluviométrique et hydrologique de cette zone d'étude (chapitre 3).

Cette analyse nous permettra d'apporter nos observations et réflexions au débat des normes hydrologiques (chapitre 4).

Nous terminerons enfin par une analyse des conséquences de la variabilité pluviométrique sur les écoulements par le biais de la modélisation hydrologique (chapitre 5).

**CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DU MILIEU ET
PRESENTATION DES DONNEES DE
L'ETUDE**

2 CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DU MILIEU ET PRESENTATION DES DONNEES DE L'ETUDE

2.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

2.1.1 Localisation et justification du choix de la zone d'étude

La zone retenue pour cette étude couvre le Mali, la Côte d'Ivoire et le Burkina Faso (figure 2.1). L'ensemble de ces trois pays est situé dans l'hémisphère Nord du continent africain, entre les latitudes 4°N et 25°N et les longitudes 12°O et 4°E.

Le Mali couvre une superficie de 1 241 300 km², soit 1/25 de la superficie totale de l'Afrique et n'a pas de façade maritime. Le Burkina Faso tout comme le Mali n'a pas de débouché sur la mer et s'étend sur une superficie de 274 200 Km². La Côte d'Ivoire quant à elle couvre une superficie de 322 462 Km².

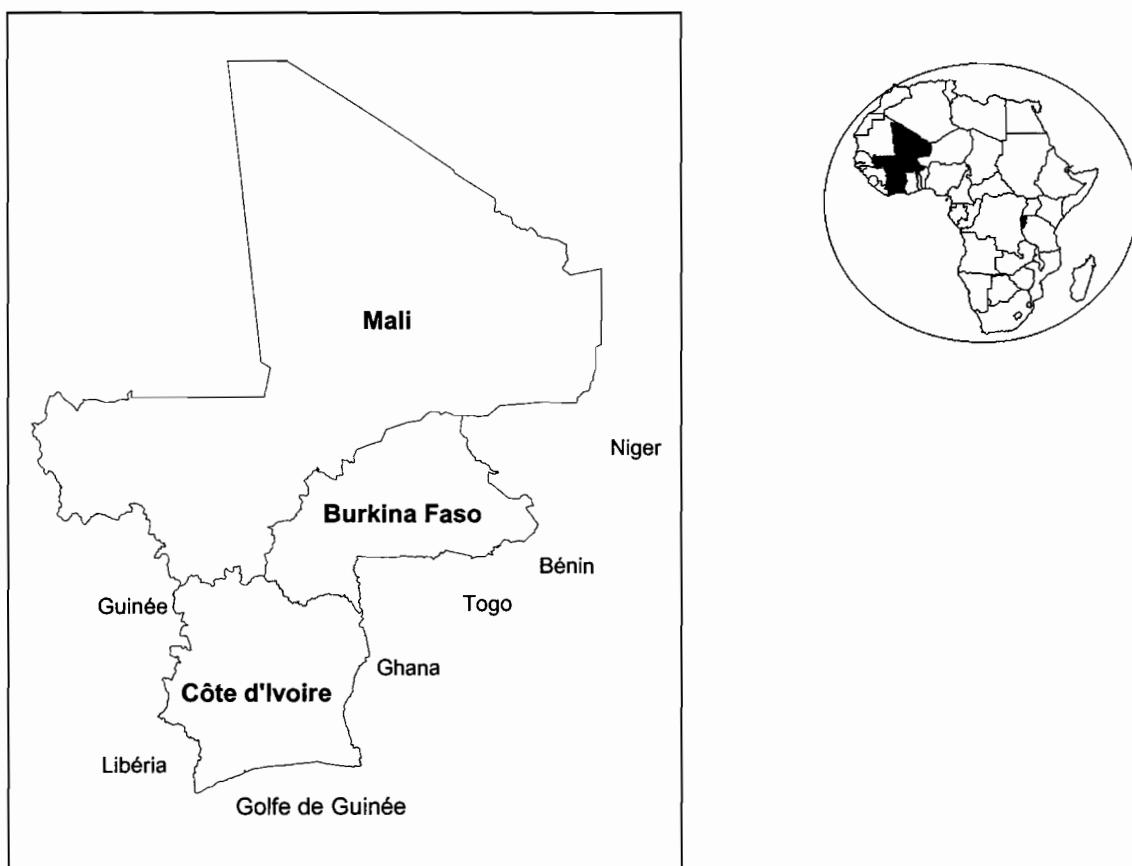


figure 2.1 : Zone d'étude

La zone choisie définit un transect sud-nord qui couvre aussi bien les régions très humides de la Côte d'Ivoire que les régions très sèches du Mali et du Burkina Faso. Ce transect est également, globalement, perpendiculaire aux isohyètes annuels que l'on peut y calculer.

Ces critères nous ont guidé dans le choix de ces trois pays même si la diversité climatique que l'on y rencontre peut compliquer l'analyse des résultats, en particulier, des régimes saisonniers.

Un autre critère primordial nous est très vite apparu : en Afrique de l'ouest et centrale, il est très difficile de disposer de données de bonne qualité et récentes. Seuls, ces 3 pays pouvaient nous offrir une telle opportunité en vue d'un travail d'analyse de la variabilité pluviométrique et hydrologique à une échelle régionale. Cependant, ce critère nous a obligé à restreindre quelque peu notre zone d'étude à la Côte d'Ivoire et à une partie du Mali et du Burkina Faso comme nous le verrons plus loin.

2.1.2 Aspects socio-économiques

2.1.2.1 *Population*

La population des trois pays dépasse 35 millions d'habitants.

En 1997, la population du Burkina Faso est estimée à 11,3 millions d'habitants, celle du Mali à 9,6 millions d'habitants et la population ivoirienne à 15,3 millions.

Une caractéristique commune de la démographie de ces trois pays est la jeunesse des populations. Presque la moitié de la population est âgée de moins de 15 ans.

Cette population est inégalement répartie à travers les territoires nationaux, reflétant en fait le déséquilibre économique entre les grands centres urbains à forte densité d'habitants et les autres régions moins nanties.

Malgré ces traits communs de la population des pays de la zone d'étude, les enjeux ne sont pas les mêmes pour chaque pays compte tenu de la situation géographique du Mali et du Burkina Faso qui rend ces pays particulièrement vulnérables aux facteurs climatiques. Une bonne partie du Burkina Faso et du Mali se trouve dans la zone sahélienne qui est une zone sèche, menacée par la désertification. Les populations qui y vivent sont généralement pauvres, leurs sources de revenus étant uniquement basées sur l'exploitation des maigres ressources

naturelles. Les zones sahéliennes où règnent des conditions semi-arides sont caractérisées par une incompatibilité croissante entre une pluviométrie capricieuse et les systèmes d'exploitation agricole encore rudimentaires et tributaires des aléas naturels. Ces régions connaissent donc une réorganisation démographique autour de zones climatiquement plus favorables au développement des activités anthropiques. L'exode est une des caractéristiques de la géographie humaine de ces zones.

2.1.2.2 *Économie*

Le secteur agricole demeure le moteur du développement économique et social de ces pays. Étant un secteur vital de l'économie dans cette région, l'agriculture constitue la principale source de revenus.

Au Burkina Faso, le secteur agricole emploie près de 92 % de la population active, et procure plus de 50 % des recettes totales d'exportations. Au Mali, l'agriculture qui emploie près de 80 % de la population active, génère les trois quarts de la valeur des exportations du pays et la moitié du PIB national. En Côte d'Ivoire, le secteur agricole emploie plus de 2/3 de la population active et représente plus de 30% du PIB national.

Deux types de production se partagent le marché : les cultures vivrières et les cultures d'exportation ou de rentes.

- Les cultures vivrières sont, en grande partie, destinées à la satisfaction de la demande intérieure :
 - Au Mali, le mil et le sorgho sont cultivés à l'ouest du pays, le maïs est produit dans le sud et la culture du riz, concentrée dans le delta du Niger.
 - Au Burkina Faso, les cultures vivrières se composent essentiellement de mil, de sorgho, de maïs, de fonio et de riz.
 - En Côte d'Ivoire, les principaux produits vivriers sont le riz, le maïs, le sorgho pour les céréales, et l'igname, le manioc, la banane plantain, le taro et la patate douce pour les féculents.
- Les cultures de rentes sont réservées à l'exportation :
 - Le coton est la principale culture de rente au Mali et au Burkina Faso. Le coton représente la moitié de la valeur des exportations et place le Mali au premier rang des producteurs africains. L'exportation du coton et de l'arachide fournit 80 % des revenus agricoles maliens.

- En Côte d'Ivoire, c'est la production et l'exportation du café, du cacao, des bananes et ananas qui occupent la première place des cultures d'exportation. Viennent ensuite le sucre, la culture du palmier à huile, le riz et le coton qui occupent une place plus marginale sur le marché international.

Le secteur industriel est encore embryonnaire dans les pays de la zone d'étude. Le secteur agro-alimentaire est la composante principale des activités industrielles. On y trouve, les minoteries, les activités de transformation du café et du cacao en Côte d'Ivoire, les brasseries, les conserveries, etc.

2.1.3 Relief, sols et végétation

2.1.3.1 Traits majeurs du relief

Le trait majeur du relief de l'Afrique Occidentale est son homogénéité. Les immenses superficies du "vieux continent", peu associées aux orogénèses récentes, sont soumises aux effets de l'érosion qui, peu à peu, les a transformé en pénéplaine.

A l'instar du relief de l'Afrique de l'ouest, le relief de la zone d'étude est peu contrasté. L'altitude moyenne est inférieure à 500m et le relief est organisé selon une succession de parties déprimées (cuvette du Niger, bassin de la Volta) séparées par des lignes de faite discontinues (dorsale guinéenne).

2.1.3.2 Principaux types de sol

La description des principaux sols de la zone d'étude est basée sur les travaux de Casenave et Valentin (1988).

Les couvertures pédologiques n'ont pas toutes le même âge compte tenu des très nombreuses variations climatiques. La répartition géographique des principales catégories de sol est illustrée sur la figure 2.2. On note 8 catégories de sols recensées qui se répartissent du nord au sud :

- les sols minéraux bruts des déserts,
- les sols peu évolués : subdésertiques,
- les sols isohumides,
- les sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés,

- les sols ferrugineux lessivés,
- les association de sols ferrugineux tropicaux lessivés et de sols ferrallitiques,
- les sols ferrallitiques faiblement ou moyennement désaturés,
- les sols hydromorphes : ce type de sol dont le caractère est déterminé par un excès d'eau joue un rôle important sur le plan hydrologique.

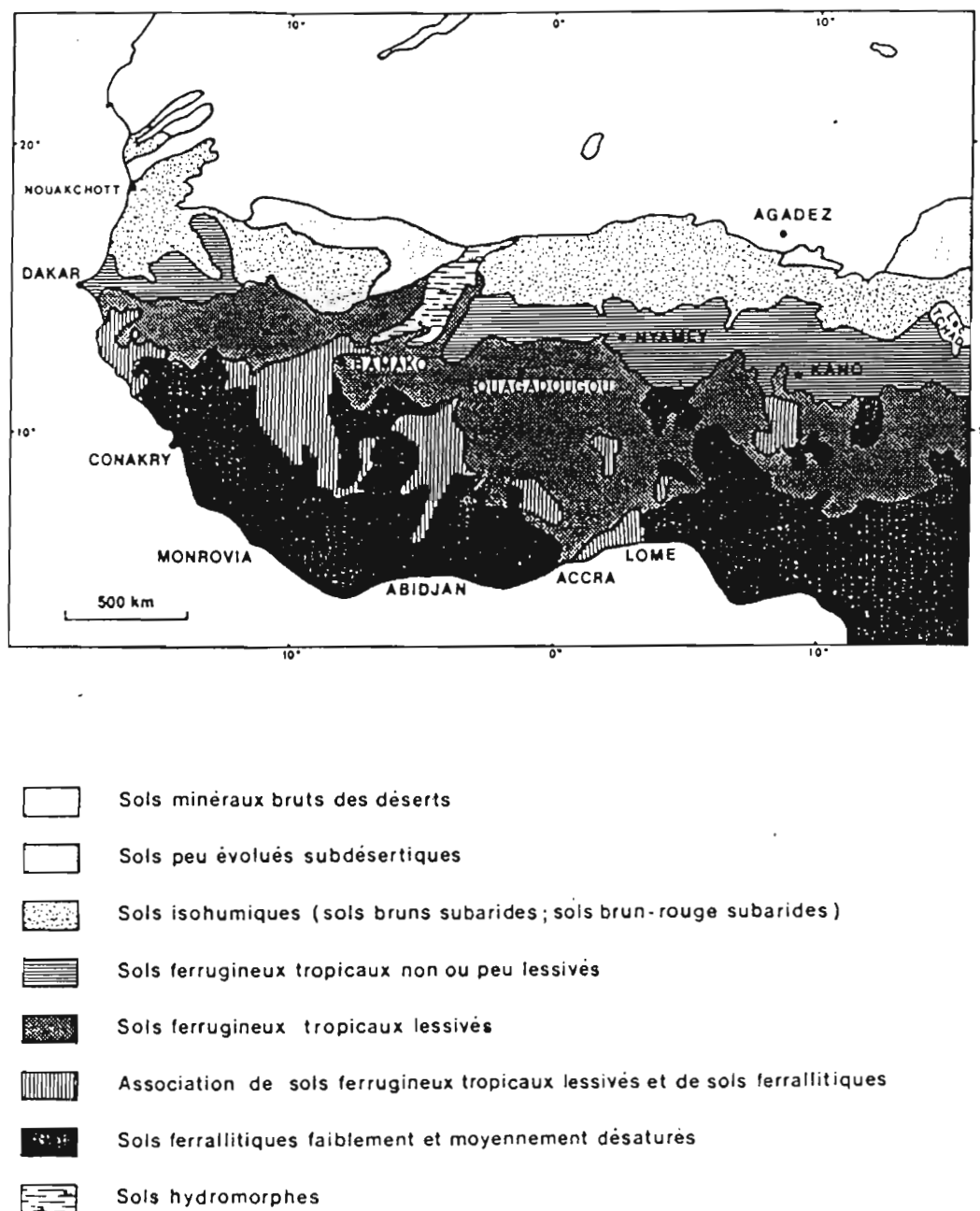


figure 2.2 : Esquisse des sols de l'Afrique de l'ouest (in Casenave et Valentin, 1988)

2.1.3.3 Principaux types de végétation

La configuration des différents paysages végétaux s'organise en fonction de la latitude et de l'altitude. Cette zonalité correspond assez bien à celle du climat. Du sud vers le Nord on distingue :

- la forêt dense sempervirente : elle occupe la bande côtière de la Côte d'Ivoire,
- la zone de forêt caducifoliée,
- la zone de savane humide,
- la zone de savane sèche,
- la steppe désertique.
- le désert.

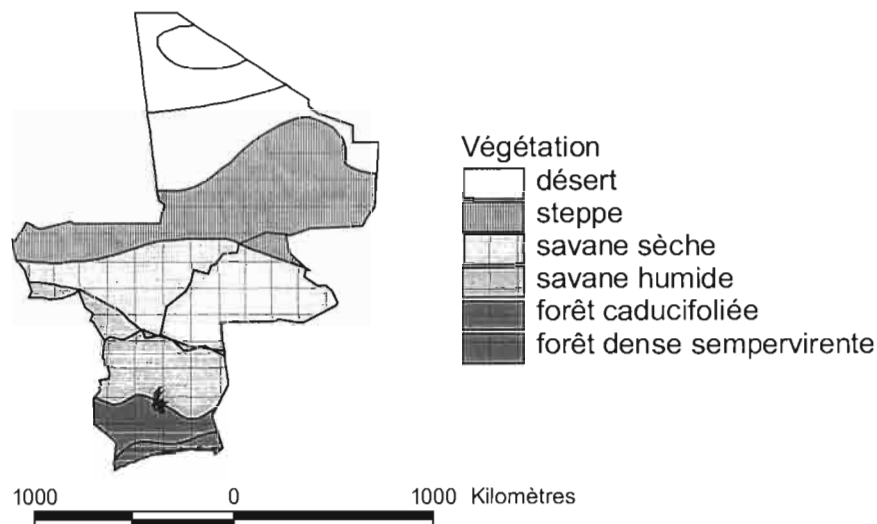


figure 2.3 : Les grandes zones de végétation

2.1.4 Aspects climatiques

La zone d'étude s'étend sur différentes régions climatiques et définit un transect sud-nord qui va des zones de forêt en bordure du golfe de Guinée au sud de la Côte d'Ivoire, jusqu'aux confins du désert au Nord du Mali.

La plus ou moins grande abondance des précipitations et leurs répartitions saisonnières constituent des caractéristiques déterminant différentes zones climatiques.

2.1.4.1 Unités climatiques

L'individualisation des unités climatiques se fait généralement sur la base du régime des précipitations et de la succession des saisons. La zone d'étude est soumise à deux régimes climatiques principaux :

- Le climat tropical sec (ou soudanien) se caractérise par une saison sèche très longue entre novembre et avril. Ce type de climat couvre la partie nord de la zone d'étude, globalement, au-dessus de la latitude 10°N.
- Le climat tropical humide (ou guinéen) proche du climat équatorial. Les précipitations sont abondantes mais elles sont entrecoupées de 2 saisons sèches. La saison sèche la plus longue ou "grande saison sèche" a lieu entre Décembre et Avril. Une autre saison sèche, appelée "petite saison sèche", plus courte, se produit en Août-Septembre.

La mise en place de ces deux types de régimes climatiques s'explique par le mouvement apparent saisonnier du soleil, par la rotation de la terre, par la position latitudinale de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) et l'intensité de la convection au sein de la ZCIT. L'ensemble des mécanismes expliquant le déterminisme du climat en Afrique de l'ouest a été largement décrit par plusieurs auteurs (Dhonneur, 1985; Moron, 1994).

Les grands moteurs du temps qu'il fait en Afrique sont les masses d'air tropicales ou équatoriales, maritimes ou continentales qui actionnent les vents et le circuit des nuages. Deux centres de hautes pressions (anticyclones) se situent en Atlantique Nord (Açores) et en Atlantique Sud (Sainte Hélène). Sur le continent, deux autres leur font presque face sur le Sahara et le Kalahari ; contrairement aux deux premiers qui sont permanents, les anticyclones continentaux sont actifs surtout pendant l'hiver. L'anticyclone des Açores est à l'origine des alizés qui affectent une frange du littoral saharien jusqu'au Cap Vert, au large du Sénégal. Pendant ce temps, l'anticyclone saharien fournit des vents secs qui se réchauffent en descendant vers le golfe de Guinée : c'est l'harmattan qui déshydrate "tout sur son passage" dans l'Afrique de la savane et du Sahel. Le contact des deux masses d'air boréales, l'une maritime, l'autre continentale, forme le front des alizés qui explique de fréquentes inversions de température en altitude. La masse d'air australe est issue de l'anticyclone de Sainte Hélène. Les champs de pression, le contraste continent-océan différent entre les deux hémisphères et les effets induits par la rotation de la terre provoquent la migration de cette masse d'air à travers l'équateur. L'alizé austral est un vent de secteur sud-est à est qui est dévié au passage

de l'équateur par la rotation de la terre et prend alors le nom de mousson de secteur sud-ouest. Au nord de l'équateur, la masse d'air concernée par la mousson, tiède et humide, devient de plus en plus instable en pénétrant sur le continent. La zone de contact entre les deux alizés originaires des deux hémisphères est appelée équateur météorologique. La trace au sol de l'équateur météorologique, matérialisée par la dépression intertropicale prend le nom de Front Inter Tropical (FIT) ou de Zone de Convergence Intertropicale. En Afrique de l'Ouest, le FIT prend sa position extrême septentrionale vers 20°N (Tombouctou) en juillet-août et sa position méridionale vers 5°N (sur la mer) en janvier-février.

Ce schéma de circulation générale atmosphérique décrit les mouvements saisonniers observés des deux masses d'air en présence, mais certains facteurs géographiques tels que les courants marins, le relief et l'orientation des côtes, peuvent jouer un rôle local affectant le climat.

2.1.4.2 Précipitations

2.1.4.2.1 Les précipitations annuelles

La figure 2.4 illustre la répartition spatiale de la moyenne annuelle des précipitations sur la période allant de 1950 à 1997. Nous avons représenté les courbes isohyètes construites par krigeage à partir des moyennes des pluies annuelles sur 140 postes pluviométriques sélectionnés sur le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire et le Mali.

L'ensemble de la zone d'étude s'inscrit entre l'isohyète 100 mm au nord du Mali et l'isohyète 2400 mm au sud-ouest de la Côte d'Ivoire.

Au dessus de la latitude 10°N, on observe que les isohyètes sont subzonales avec une diminution des pluies annuelles du sud vers le nord. Sous la latitude 10°N, le phénomène est beaucoup plus complexe. On observe une déformation des isohyètes qui présentent un gradient pluviométrique sud-ouest nord-est, lié, entre autres, aux reliefs de la dorsale guinéenne.

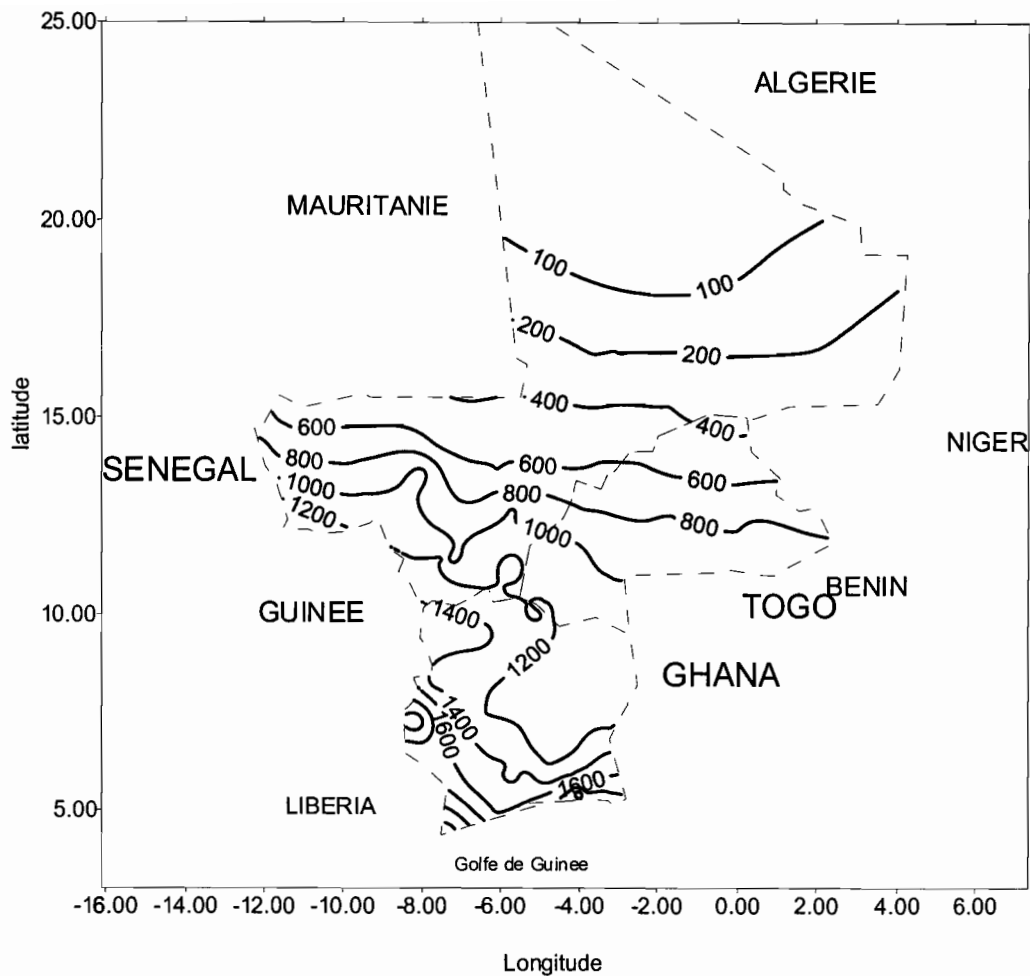


figure 2.4 : Isohyètes interannuelles calculées sur la période 1950-1997

2.1.4.2.2 Variations saisonnières des précipitations

Les variations saisonnières des précipitations peuvent être perçues à travers les hauteurs moyennes mensuelles. En fonction du découpage en unités climatiques de la zone d'étude, quatre grandes périodes se distinguent dans l'année :

- décembre – février : période de la grande saison sèche guinéenne : durant ces mois, les pluies sont très faibles en zone guinéenne et inexistantes en zone soudanaise.
- mars – juin : période de la première saison des pluies guinéenne : dans la zone guinéenne, ces mois se caractérisent par une augmentation de la pluviosité, notamment en mai-juin.
- juillet – septembre : période de la saison des pluies soudanaise et de la "petite saison sèche guinéenne" : pendant ces mois, c'est la saison des pluies en zone soudanaise où les pluies sont plus abondantes et plus fréquentes. Par contre, la zone guinéenne connaît une diminution des pluies ; c'est la "petite saison sèche"

- octobre – novembre : période de la seconde saison des pluies guinéenne : les pluies diminuent de manière rapide dans la zone soudanaise, tandis qu'au sud, on observe une nette augmentation des pluies durant ces mois. Selon les années, quelques pluies tardives tombent durant le mois d'octobre dans la zone soudanaise mais les pluies sont pratiquement inexistantes durant le mois de Novembre. En terme d'abondance, le cumul des pluies durant cette période reste inférieur au cumul des pluies de mai-juin.

2.1.4.3 Autres paramètres climatiques : températures, humidité, évaporation, vent

La température, l'humidité, l'évaporation et le vent ont une influence sur le cycle de l'eau. La description générale de ces paramètres climatiques se base sur une synthèse des comportements moyens des ces paramètres, qui peuvent toutefois être modifiés localement par des perturbations dues au relief ou à la végétation par exemple.

Les moyennes annuelles des températures de notre zone d'étude présentent une certaine homogénéité, avec une température moyenne annuelle supérieure à 20°C. La température moyenne annuelle a tendance à croître du sud au nord. Les amplitudes thermiques journalières ou annuelles sont généralement faibles sauf dans la zone désertique. Pendant la saison sèche, les amplitudes thermiques entre le jour et la nuit peuvent y atteindre 30°C.

L'humidité relative moyenne annuelle décroît régulièrement en allant vers le nord. L'humidité passe de plus de 80% sur la côte à moins de 50% dans le nord (20° de latitude nord).

Les variations saisonnières des directions du vent s'accordent avec le schéma de circulation générale décrit par plusieurs auteurs (Leroux, 1980; Dhonneur, 1985). Dans la zone soudanienne, il y a opposition entre le vent de secteur est et nord-est pendant la saison sèche, et le vent de secteur ouest et sud-ouest pendant la saison des pluies. Les vitesses du vent mesurées à 2 m du sol sont faibles en moyenne, avec des valeurs excédant rarement 5m/s.

L'évapotranspiration réelle est un terme important du bilan hydrologique qui intègre l'action combinée et complexe des autres facteurs décrits précédemment mais son estimation n'est pas aisée. En valeur absolue, elle croît assez régulièrement lorsqu'on se déplace du sud vers le nord. Parallèlement, son importance relative dans ce bilan par rapport à la pluie croît également du sud vers le nord.

2.1.5 Régimes hydrologiques

Les cours d'eau de la zone d'étude se répartissent en plusieurs unités hydrographiques de plus ou moins grande taille.

Les principaux fleuves sont :

- le Niger : Le Niger est un cours d'eau transnational qui prend sa source depuis les montagnes de Guinée et s'écoule jusqu'à l'Atlantique. Le cours du fleuve est subdivisé en quatre parties :
 - le cours supérieur qui se limite vers l'aval à la région de Ségou,
 - la zone lacustre ou le delta intérieur,
 - le cours moyen limité par la frontière du Nigeria,
 - le cours inférieur.
- le Bandama : Le Bandama est un fleuve ivoirien. Au Nord-Ouest de Yamoussoukro, le Bandama est formé par la rencontre du Bandama blanc qui prend sa source au Nord de Korhogo et se jette dans le lac de Kossou formé par le barrage du même nom et le Bandama rouge ou Marahoué qui prend sa source dans le pays Malinké. Le Bandama poursuit son cours ensuite au Sud en formant le lac de Taabo (lac artificiel) puis atteint le Golfe de Guinée à Grand-Lahou en longeant le Parc National d'Asagny.
- le Cavally : il prend sa source en Guinée et entre en Côte d'Ivoire en traversant le pays Dan. Plus au Sud il marque la frontière ivoirienne avec le Libéria.
- le Sassandra : Fleuve ivoirien, il est formé au Nord du Parc National du Mont Sangbé par deux affluents principaux, la Boa et la Tiemba et descend au Sud en marquant la frontière orientale de ce parc puis se jette dans le lac formé par le barrage de Buyo. Il prend ensuite une direction Sud-Est, en passant par Soubré et va se jeter dans l'Atlantique à Sassandra.
- la Comoé : elle prend sa source au Burkina Faso et traverse la Côte d'Ivoire du Nord au Sud en traversant le Parc National de la Comoé, puis en longeant la frontière du Ghana pour aller se jeter dans l'Atlantique au niveau de Grand-Bassam;
- le Mouhoun (Volta Noire) prend naissance sur le plateau du sud-ouest du Burkina Faso, à 550 m d'altitude. Le régime de la Volta noire est particulier car la dépression du Sourou joue un rôle régulateur : en saison des pluies, elle absorbe une partie des apports des hautes eaux et retarde ainsi sa pointe ; en saison sèche, c'est l'inverse car elle lui en restitue une bonne part.

- Le Nakambé (Volta Blanche) prend sa source dans la plaine centrale du Burkina Faso. Son lit est à peine marqué dans le relief. Il a comme affluents principaux la Koulounga et le Massili.
- Le Nazinon (Volta Rouge) prend sa source au nord-ouest de Ouagadougou ; son cours a une pente plus élevée que celle du Nakambé et est plus encaissé.

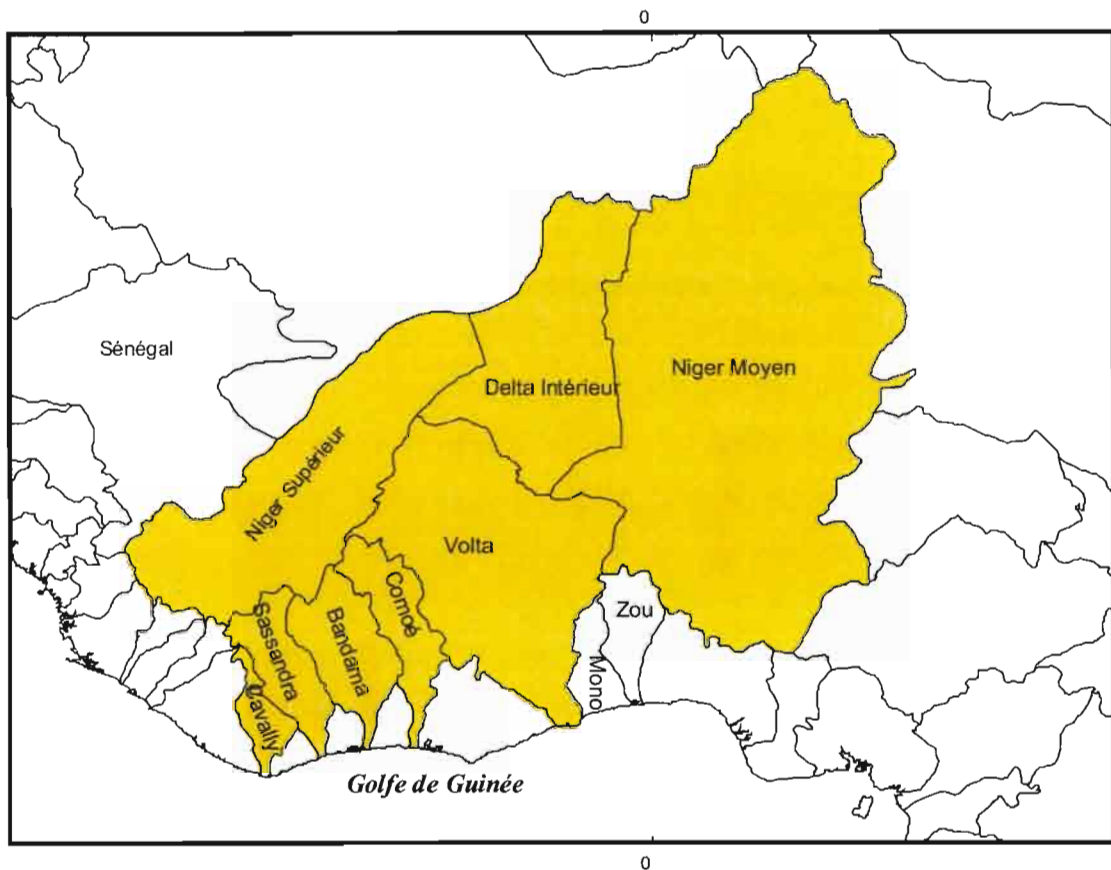


figure 2.5 : Carte des principaux bassins de la zone d'étude

Le régime d'un cours d'eau est déterminé par la répartition spatio-temporelle des précipitations et par les caractéristiques naturelles du bassin. A l'instar de la plupart des bassins en Afrique, les bassins de la zone d'étude sont souvent imperméables (Rodier, 1964). Ce qui fait que les évolutions saisonnières des débits correspondent assez bien à celles des précipitations correspondantes. La caractérisation des régimes hydrologiques se base donc principalement sur des critères climatiques.

Selon Rodier (1964), un trait caractéristique des régimes en Afrique est la succession de périodes de hautes-eaux et basses-eaux bien marquées. Le schéma général de répartition saisonnière des périodes de hautes-eaux et de basses-eaux subit une déformation progressive du désert à la bordure du Golfe de Guinée et définit donc 2 types de régimes hydrologiques analogues aux classes de climat décrites précédemment :

- **le régime tropical et ses variantes** : sur la zone d'étude, on distingue, du nord au sud, le régime désertique, le régime subdésertique et le régime sahélien qui sont des variantes du régime tropical pur, et plus au sud, le régime tropical de transition :
 - Le régime **subdésertique et désertique** : Il n'intéresse qu'une partie du bassin du Niger.
 - Le **régime sahélien** : C'est le régime du Niger. Il présente souvent une très longue saison sèche et des crues sporadiques donnant lieu à une durée totale d'écoulement faible. Pour les cours d'eau tropicaux débouchant en zone sahélienne, comme le Niger, la dégradation hydrographique devient très marquée, d'autant plus que très souvent ces fleuves abordent d'anciennes cuvettes lacustres.
 - Le **régime tropical pur** : Il se caractérise par une période des hautes eaux très brève (3 mois de mi-juillet à mi-octobre) suivie d'une période de tarissement qui s'achève en décembre/janvier et fait place à une absence totale d'écoulement. C'est le régime de la majeure partie des affluents du Niger et des branches-mères de la Volta (Mouhoun, Nakambé et Nazinon).
 - Le **régime tropical de transition** : il se distingue du régime tropical pur par une saison de hautes-eaux beaucoup plus longue et une saison de basses-eaux bien moins sévère. C'est le régime des branches-mères du Niger et de la partie amont des fleuves côtiers de Côte d'Ivoire.
 - Le **régime tropical de transition "variante dahoméenne"** couvre le nord-est de la Côte d'Ivoire (bassin moyen de la Comoé). Les hauteurs annuelles de précipitation sont beaucoup plus faibles que précédemment. L'abondance annuelle dans les cours d'eaux dépend plus de la répartition des précipitations que de leurs hauteurs annuelles. Cela explique la forte irrégularité interannuelle et des valeurs très différentes des débits maximaux d'une année sur l'autre. Les étiages sont très rigoureux et la période de hautes-eaux est plus longue que dans le cas du régime tropical de transition.

- La figure 2.6 présente un découpage de l'Afrique de l'ouest en fonction de ces différents régimes hydrologiques et de leurs variantes.



Cette synthèse des caractéristiques physiques du milieu de la zone d'étude a fourni une description régionale des différents paysages qui conditionnent les régimes des cours d'eau de

la zone d'étude. Pour certaines caractéristiques présentées, les paysages de la zone d'étude montrent une certaine homogénéité. Pour d'autres caractéristiques, des contrastes existent entre les phénomènes observés.

Les pays de la zone d'étude sont des pays en voie de développement dont l'économie est principalement basée sur l'agriculture. La maîtrise et la gestion des ressources naturelles, de l'eau en particulier est une préoccupation majeure pour ces pays. Il importe donc, pour les pays concernés, de pouvoir disposer d'outils d'aide à la décision. Et pour pouvoir gérer durablement les ressources en eau, il est nécessaire de disposer d'un certain nombre de données et d'informations, à partir desquelles des méthodologies appropriées, permettront d'atteindre les objectifs affichés.

2.2 DONNEES DE L'ETUDE

L'acquisition de données n'est pas une tâche aisée, particulièrement en Afrique où les informations sur le milieu sont souvent inexistantes ou insuffisantes. Cela nous amène à souligner le long travail de recherche, de collecte et de compilation des informations entrepris pour ce travail.

Les données de base disponibles pour cette étude ont des origines différentes suivant la nature même des données.

2.2.1 Données pluviométriques

Nous avons disposé de relevés quotidiens et/ou mensuels des pays de l'Afrique de l'ouest et centrale provenant de la base de données du projet FRIEND-AOC. Cette banque de données a été complétée par des données pluviométriques mensuelles fournies par la FAO.

Le réseau pluviométrique sélectionné pour cette étude compte 140 postes (figure 2.7). Le choix de ces postes a été dicté par la nécessité de la présence de séries les plus longues possibles et ne comportant que peu de lacunes. Nous avons choisi de ne retenir que les postes dont les enregistrements pluviométriques sont exempts de lacunes sur plus de deux ans consécutifs. Nous n'avons pas sélectionné de postes pluviométriques dont les observations ne débutent qu'après 1955.

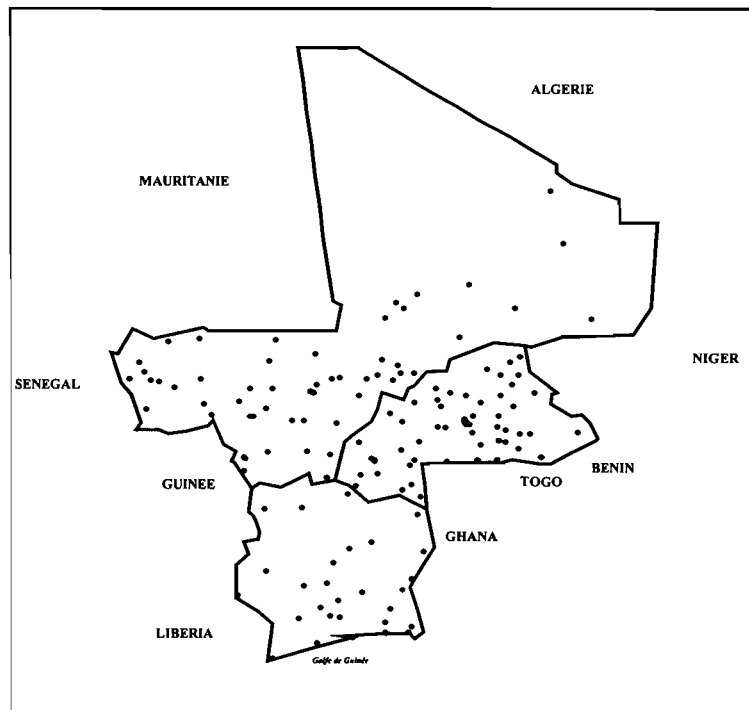


figure 2.7 : Réseau pluviométrique de l'étude

La figure 2.7 illustre la répartition irrégulière dans l'espace des postes pluviométriques sur la zone d'étude. On note que l'information pluviométrique est relativement dense au Burkina Faso où se situent 56 postes pluviométriques sur les 140 postes retenus. Au Mali on dénombre 55 postes pluviométriques qui se concentrent particulièrement dans la moitié sud du pays sous la latitude 15-16°N. En Côte d'Ivoire, l'information pluviométrique est moins dense puisque on n'y compte que 29 postes pluviométriques qui sont d'ailleurs irrégulièrement répartis. Le centre du pays regroupe le plus grand nombre de postes.

La densité des postes pluviométriques nous semble suffisante sous la latitude 15-16°N mais insuffisante au-delà. Les résultats que l'on présentera seront donc significatifs sous l'isohyète 400mm de la période 1950-1997.

A cette irrégularité de la répartition spatiale des postes pluviométriques, s'ajoute l'hétérogénéité des durées d'observation. L'analyse historique des caractéristiques des postes pluviométriques réalisée par Sircoulon (1976, 1992) montre qu'il faut attendre les années 1920 pour assister véritablement à des ouvertures de stations continentales, la création des postes se faisant surtout en bordure de mer ou le long des fleuves. En outre, la phase la plus importante dans la mise en place des postes se situe entre la période 1950 et 1980 pendant

laquelle on observe une multiplication d'implantation de postes de mesure. Après cette période, le réseau dans son ensemble va connaître une situation relativement stable qui va se maintenir plus ou moins jusqu'à nos jours. Les grands traits de cette chronologie de la mise en place du réseau pluviométrique sont illustrés sur la figure 2.8 où nous avons représenté le nombre cumulé de postes retenus pour cette étude en fonction de l'année d'implantation. Moins de 20 postes pluviométriques sur les 140 postes retenus pour cette étude ont été implantés avant 1920. Plus de la moitié des postes retenus ont été implanté entre 1920 et 1950. Les observations de 35% des postes retenus débutent entre 1950 et 1955.

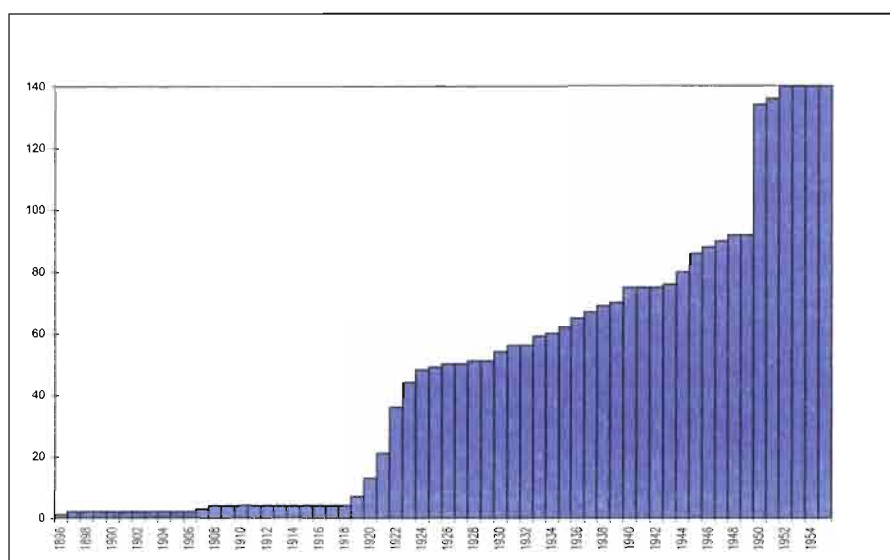


figure 2.8 : Nombre cumulé de stations pluviométriques retenus en fonction de l'année d'implantation

2.2.2 Données hydrologiques

Les données hydrométriques sont issues principalement de la base de données du projet FRIEND-AOC. Comme les données de cette banque s'arrêtent au plus tard en 1989, nous avons procédé à une mise à jour des données jusqu'aux années récentes grâce aux services hydrologiques nationaux.

Le réseau hydrométrique choisi pour notre étude est constitué de 43 stations hydrométriques (figure 2.9). On se rend compte à l'examen de cette figure, que l'information hydrométrique est beaucoup moins dense que l'information pluviométrique. En outre, les périodes d'observations hydrométriques sont également moins longues. Dans le meilleur des cas, les

observations hydrométriques ont commencé vers le milieu de la décennie 1950. Auparavant seules quelques stations étaient suivies sur les grands cours d'eau.

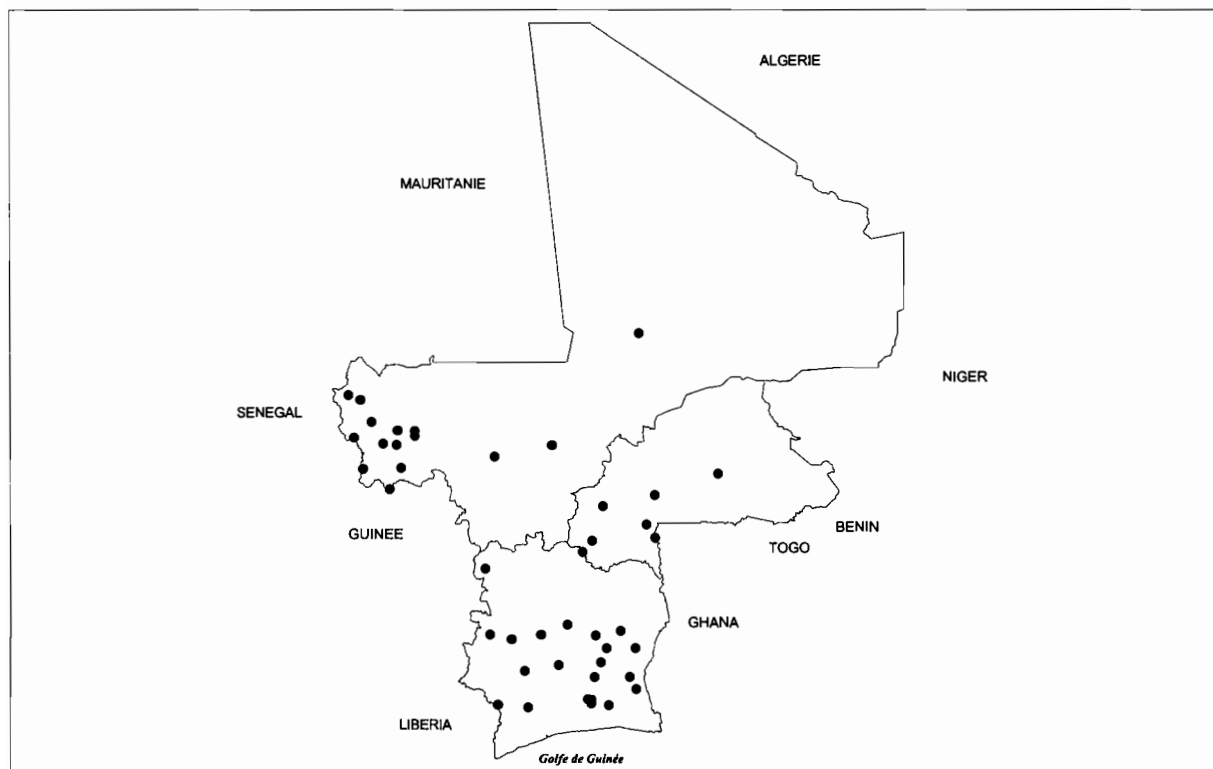


figure 2.9 : Réseau hydrométrique de l'étude

2.3 CONSTITUTION DE LA BANQUE DE DONNEES SPATIALES NUMERISEES

2.3.1 Nécessité de la constitution d'une banque de données spatiales

Le problème de la spatialisation des variables hydroclimatiques et environnementales au sein des systèmes naturels constitue de nos jours un enjeu majeur dans la compréhension des phénomènes. Les questions de spatialisation et/ou de régionalisation sont posées lorsqu'il s'agit de transférer des informations à caractère plus ou moins disparate depuis les échelles ponctuelles ou locales vers l'échelle régionale. Construire une information spatiale continue à partir de données expérimentales stationnelles, collectées par des réseaux d'observation de densité variable, conduit nécessairement à rechercher des lois de transposition, des propriétés statistiques permettant une interpolation ou encore des indices de similitude de fonctionnement. La régionalisation des variables hydrologiques peut être définie comme un ensemble de procédures visant à exploiter au maximum les informations existantes dans une

région donnée dans le but d'estimer ou améliorer l'information en un site particulier. La régionalisation s'inscrit donc dans une démarche de prédétermination. Elle nécessite des outils spécifiques d'étude et de traitement des aspects spatiaux des phénomènes et a recours à de nouvelles technologies comme les systèmes d'information géographique (SIG), les modèles numériques de terrain (MNT), la télédétection etc., pour tenter de cerner la dimension régionale en hydrologie.

Les travaux menés dans le cadre de cette étude doivent prendre en compte des variables autres que strictement hydrologiques ou climatiques. Il paraît, en effet, irraisonnable de concevoir des projets à l'échelle régionale orientés vers la gestion et la planification des ressources en eau sans être en mesure de prendre en compte les paramètres de sol, de végétation, de géologie, de relief, de démographie, etc.

La constitution d'une base de données spatialisées sur notre zone d'étude constitue donc un objectif majeur de cette étude. Sa réalisation s'est faite parallèlement aux travaux menés par l'équipe VAHYNE (analyse de la variabilité hydrologique et impacts sur les ressources en eau) de l'IRD, qui projette la mise en place d'une base de données "environnementales" spatialisées couplée à des données chronologiques hydroclimatiques de manière à constituer un "Système d'Information Environnemental sur les Ressources en Eau et leur Modélisation " (SIEREM) à l'échelle de l'Afrique de l'ouest et centrale.

L'ensemble des données collectées est stocké et géré au sein d'une banque couplée à un SIG. Le SIG qui a été retenu pour cette étude est ARCVIEW (ESRI, 1995) pour sa stabilité, sa large diffusion dans le monde, sa large gamme d'outils d'analyse et sa précision. ARCVIEW, tout comme les autres SIG, offre deux modes de représentation des données géographiques : le mode raster et le mode vecteur. Le mode raster correspond à une division régulière de l'espace sous forme de cellules rectangulaires ou carrées et est beaucoup plus lié à la notion d'image. Le mode vecteur quant à lui est une représentation des objets (points, arcs, polygones) et de leurs limites dans un référentiel géographique et cartésien. Ce dernier mode de représentation est donc plus lié à la notion de carte. Il est donc important de noter que chacun de ces deux modes de représentation présente des caractéristiques propres qui en font des outils plus ou moins adaptés aux différentes problématiques que l'on veut traiter. C'est dire donc que cette partie de notre étude n'est pas que la constitution d'une simple base de

données. Elle correspond à la mise au point d'un outil qui est aujourd'hui indispensable en tant qu'élément à part entière des approches menées par ailleurs. Elle offre l'occasion de contribuer à la réflexion et à la mise au point d'une méthodologie relative au couplage des SIG et des outils utilisés en hydrologie tant pour leur mise en œuvre que pour l'analyse de leurs résultats.

Nous présentons dans les paragraphes qui suivent, les sources et la description des données acquises pour alimenter cette banque de données.

2.3.2 Données numérisées et sources

A l'étape actuelle de l'étude, des données de base concernant les facteurs de l'environnement ont été assemblées sur les trois pays. Ces données sont disponibles au format vectoriel ou raster. Il s'agit des cartes de:

- limites de bassins et de frontières nationales,
- relief,
- tracé du réseau hydrographique,
- données mensuelles de précipitation,
- données mensuelles d'évapotranspiration potentielle,
- données mensuelles de températures moyennes,
- données de couvertures de sols.

La couverture des données sols est différente de la carte que nous avons montrée pour la présentation de notre étude au début de ce chapitre (carte issue des travaux de Casenave et Valentin, 1988). Cette carte n'a pas été reprise sous un format numérique utilisable par un SIG, comme d'ailleurs beaucoup de cartes que des chercheurs ont pu établir au cours de leur carrière. Cela est très certainement dommageable car nous perdons là une réalité terrain que les images-satellites ou autres ne pourront jamais remplacer.

Pour notre part, nous n'avons pas pu disposer à temps des outils nécessaires pour effectuer ce travail de numérisation. Les cartes de sol que nous avons utilisées et qui s'appuient sur des caractéristiques agronomiques ou hydrologiques des sols, ne sont donc probablement pas comparables à la carte "Casenave – Valentin" qui a trait à la pédogenèse des sols.

2.3.2.1 Limites des bassins, frontières nationales

La couverture des limites des frontières nationales a été fournie par le Global Resource Information Database (GRID) du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) à Nairobi.

Cet organisme nous a également fourni des couvertures de limites des principaux bassins d'Afrique dont un extrait sur notre zone d'étude est illustré sur la figure 2.10.

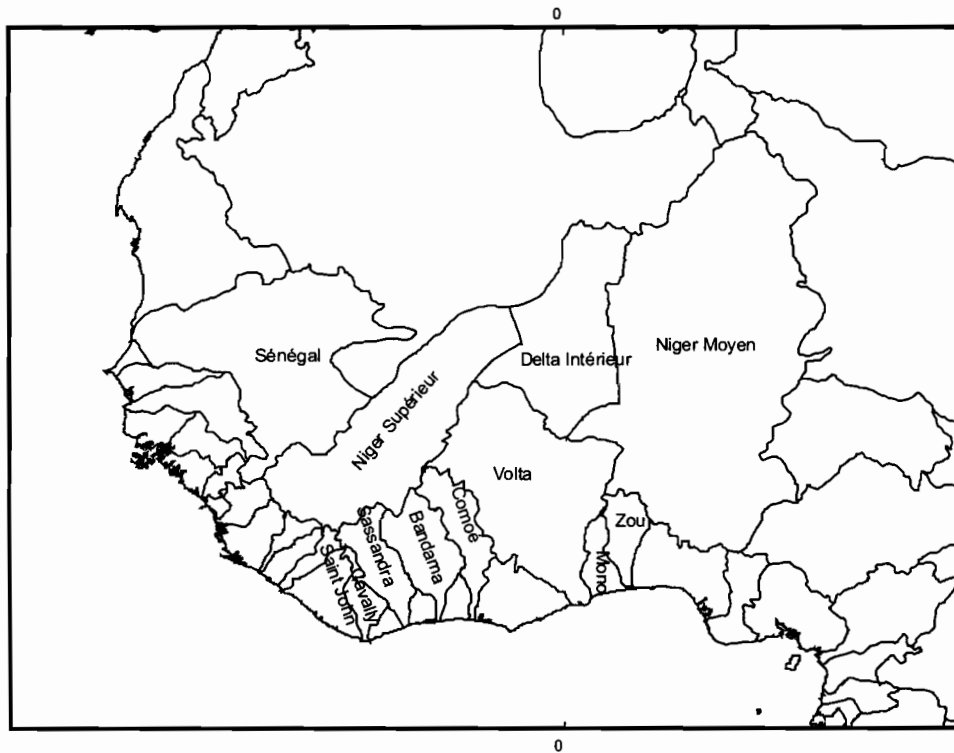


figure 2.10 : Contours de principaux bassins en Afrique de l'Ouest

Les limites des principaux bassins versants fournis par le GRID ne nous permettent pas de travailler sur la totalité des bassins pour lesquels nous disposons de données d'observations car il est trop grossier. Nous avons donc procédé à une autre délimitation automatique des contours des bassins retenus pour cette étude avec le MNT NTT développé par l'IRD (Depraetere, 1996). Nous avons apporté quelques corrections à cette délimitation en surimposant le réseau hydrographique à la couche des limites des bassins. Des attributs ont été assignés à cette couverture permettant ainsi de renseigner sur la station qui contrôle le bassin considéré, sa superficie, etc.

2.3.2.2 Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique à l'échelle 1 : 1 000 000 pour le continent africain a été obtenu à partir du CD-ROM du NOAA-EPA Global Ecosystem Database (GED).

2.3.2.3 Les altitudes et les pentes

La représentation des données sur le relief dans un SIG se fait généralement à l'aide d'un MNT qui comporte des données sur l'altitude des points par intervalles réguliers. De ce fait, ARCVIEW gère les données de relief comme des données de grille. Un modèle de 30'' d'arc a été obtenu auprès de l'United States Geographical Survey (USGS).

2.3.2.4 Les données de végétation

Une couverture de type de végétation a été obtenue sur le CD-ROM du Global Ecosystem Database élaboré par le NOAA-EPA. Cette couverture définit des unités cartographiques (figure 2.11) basées sur une classification essentiellement phytosociologique.

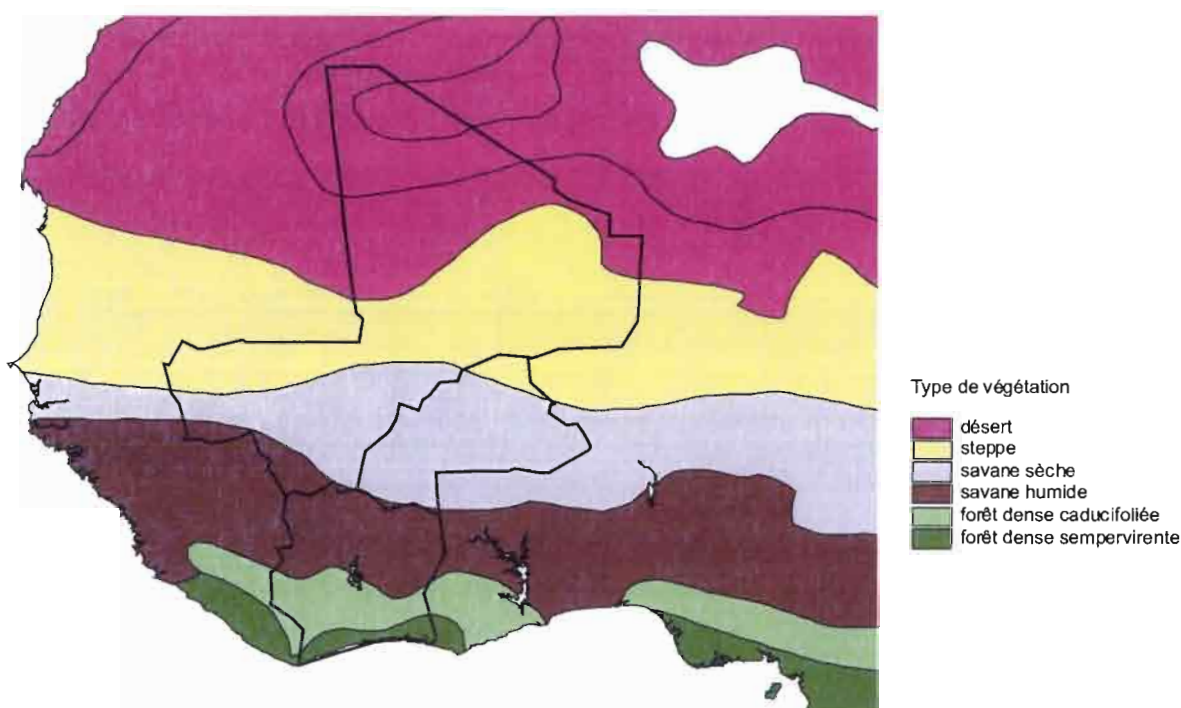


figure 2.11 : Principaux types de végétation en Afrique de l'ouest.

2.3.2.5 Données de pluie

Des données de pluies mensuelles ont été rassemblées sur les 140 postes pluviométriques sélectionnés et sur la période de référence 1950 -1997. Cette base de données pluviométriques a été utilisée pour constituer des séries temporelles de données mensuelles sur des grilles de 0,5°x0,5° couvrant l'ensemble de la zone d'étude et sur la période de référence. Les données

de grilles ont été calculées par interpolation en appliquant la méthode du krigeage aux données mensuelles des 140 stations. La grille élaborée sera désignée par l'appellation **grille TRAVAIL**.

La méthode d'interpolation utilisée est le krigeage. Cette méthode permet d'interpoler dans l'espace et de façon optimale, une variable connue par mesures ponctuelles (Delhomme, 1976).

L'étape la plus importante est l'identification du variogramme ou fonction de structure. Le variogramme est une représentation cartésienne dont l'abscisse est la distance h (le pas de calcul) entre les données et l'ordonnée est la moyenne des carrés des écarts entre des paires de données séparées de h . Connaissant le variogramme, la résolution du système du krigeage permet de connaître les poids en chaque point de mesure. Cette approche est une amélioration par rapport aux techniques déterministes car elle permet de prendre en compte la relation inhérente entre les données, ou d'intégrer les informations concernant le processus spatial qui dépendent du caractère du phénomène étudié.

Les interpolations ont été effectuées à l'aide du logiciel SURFER qui propose ce type de krigeage.

Nous avons pu nous procurer également deux autres fichiers de pluies mensuelles sur la période 1950-1995 à la même résolution spatiale de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ auprès de l'unité de recherches climatologique de l'université d'East anglia en Angleterre (New et al., 1997). Le premier (**grille CRU**) est obtenu à partir des fichiers de la Climate Research Unit de l'Université d'East Anglia qui regroupent des données sur une centaine de postes de notre zone d'étude ; la seconde (**grille CRU-IRD**) est obtenue par ajout à la grille CRU de données provenant de l'IRD, soient deux cents postes supplémentaires (figure 2.12). Ces grilles ne couvrent que partiellement la zone d'étude que nous nous étions préalablement fixée : elles couvrent l'ouest du méridien de Greenwich et le sud du $18^{\text{ème}}$ parallèle.

La représentativité spatiale des résultats obtenus sera fonction des données utilisées et de l'analyse effectuée :

- les analyses découlant des 140 postes que nous avons sélectionnés (donc la grille **TRAVAIL**) ont une signification sur la Côte d'Ivoire, le Burkina Faso et la partie du Mali sous le $18^{\text{ème}}$ parallèle même si nous reconnaissons que les données y sont plus éparées et que la régionalisation des résultats ponctuels y est peut-être parfois osée;

- les analyses, se basant sur les grilles de données CRU et CRU-IRD, et auxquelles on peut attribuer un caractère régional, ont une signification sur la Côte d'Ivoire et une partie du Mali et du Burkina Faso à l'ouest du méridien de Greenwich et au sud du 15-16^{ème} parallèle.

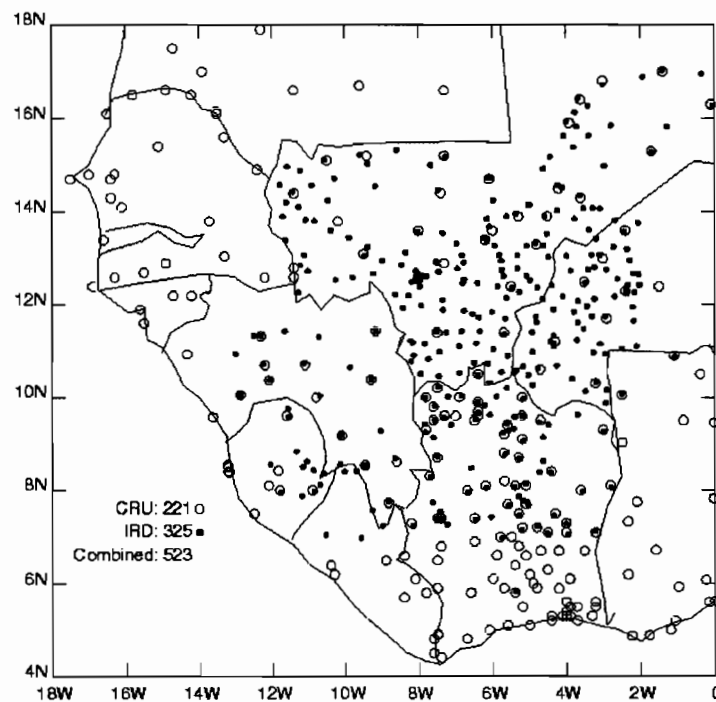


figure 2.12 : Postes pluviométriques utilisés pour la constitution des grilles de pluie CRU et CRU-IRD

Il est intéressant de procéder à une étude comparative des trois types de fichiers de pluies mensuelles dont nous disposons.

La plage des hauteurs des précipitations annuelles du fichier CRU s'étend de 125 mm à 3052 mm. Pour le fichier CRU-IRD, la plage de variation est très proche : de 124 mm à 3117 mm. Par contre pour la grille TRAVAIL, elle s'étend de 292 mm à 2229 mm. Cela est bien évidemment du aux postes retenus pour chacune des grilles. Pour les grilles CRU et CRU-IRD, ont été sélectionnées des stations sur des critères autres que les nôtres qui privilégient la quantité d'information et une couverture homogène de la zone d'étude.

Sur la figure 2.13, nous avons représenté les valeurs moyennes des pluies mensuelles pour chaque fichier, calculées en considérant les mêmes grilles. L'examen de cette figure montre une concordance de la répartition mensuelle des pluies pour l'ensemble des trois grilles de pluies. Si les plages de variation des hauteurs annuelle de pluie peuvent être sensiblement différentes, en moyenne, la pluviométrie est voisine sur notre zone d'étude.

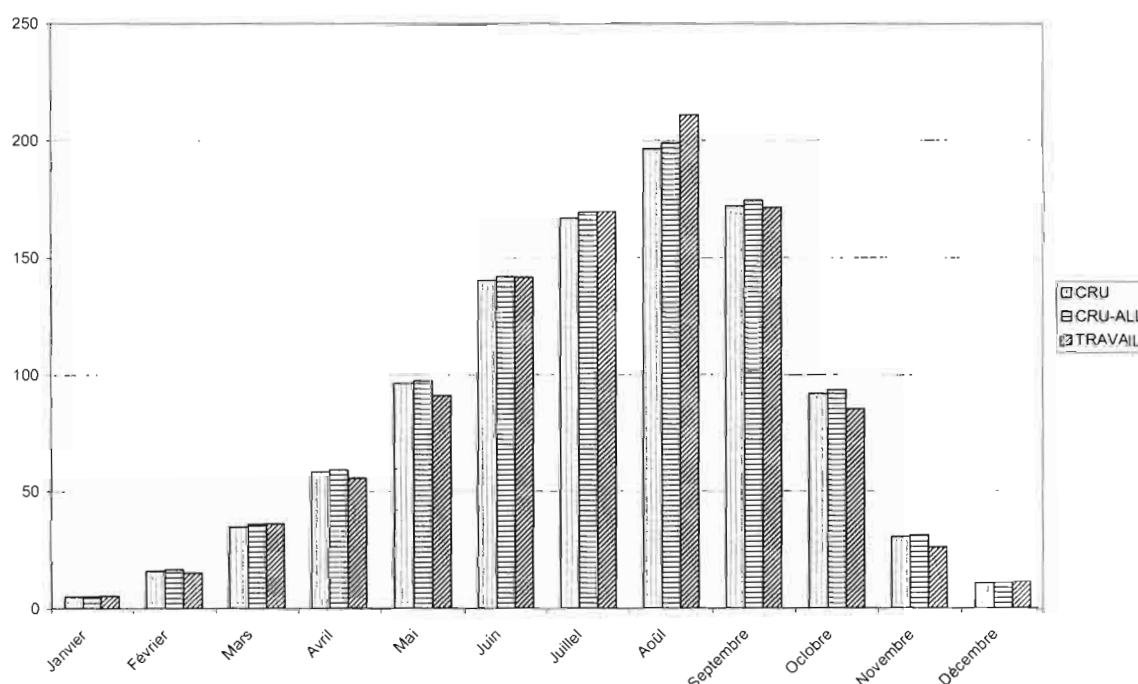


figure 2.13 : Moyennes mensuelles des hauteurs de pluies des grilles de pluie

Nous avons toutefois procédé à une comparaison de la répartition spatiale entre les grilles de pluie CRU-IRD et TRAVAIL en cherchant à vérifier si les différences entre les deux fichiers sont statistiquement significatives. Pour cela, nous avons utilisé le test t de Student qui teste l'égalité de la moyenne des échantillons.

Soient n_1 et n_2 les tailles des échantillons pour lesquels on veut établir la comparaison des moyennes respectives m_1 et m_2 . La statistique t de Student est calculée suivant la relation suivante :

$$t = \frac{m1 - m2}{\sqrt{\sigma_d^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

où σ_d^2 représente la variance pondérée du groupe entier des deux échantillons, définie par :

$$\sigma_d^2 = \frac{[(n_1 - 1)\sigma_1^2 + (n_2 - 1)\sigma_2^2]}{n_1 + n_2 - 2} \quad \text{où } \sigma_1^2 \text{ et } \sigma_2^2 \text{ désignent respectivement les } t \text{ des}$$

échantillon 1 et 2.

t suit une loi de Student à ν degrés de liberté ($\nu = n_1 + n_2 - 2$)

Les moyennes ont été calculées en considérant la période allant de 1950 à 1995. Les résultats de la comparaison entre les pluies annuelles des fichiers CRU-IRD et TRAVAIL, obtenus en adoptant un seuil de confiance de 5%, sont illustrés sur la figure 2.14. Des différences significatives s'observent principalement dans une bande située au dessus de 14°N et deux zones situées au sud du Mali et au centre de la Côte d'Ivoire. Quelques mailles situées au Burkina Faso présentent une différence significative entre les moyennes de pluies annuelles des fichiers CRU-IRD et TRAVAIL. Les différences observées pourraient être liées au nombre de stations utilisées pour la constitution des grilles de pluie. Le fichier CRU-IRD intègre un nombre plus important de stations pluviométriques ; ce qui a pour effet de conduire à des pluies probablement moins lissées que celles obtenues avec le fichier TRAVAIL.

La méthode d'interpolation employée pourrait également être à l'origine de la différence observée entre les 2 grilles de pluie.

Globalement, les différences entre les grilles de pluie TRAVAIL et CRU-IRD sont significatives au voisinage des limites de la zone d'étude. Les effets de bord pourraient biaiser les valeurs obtenues.

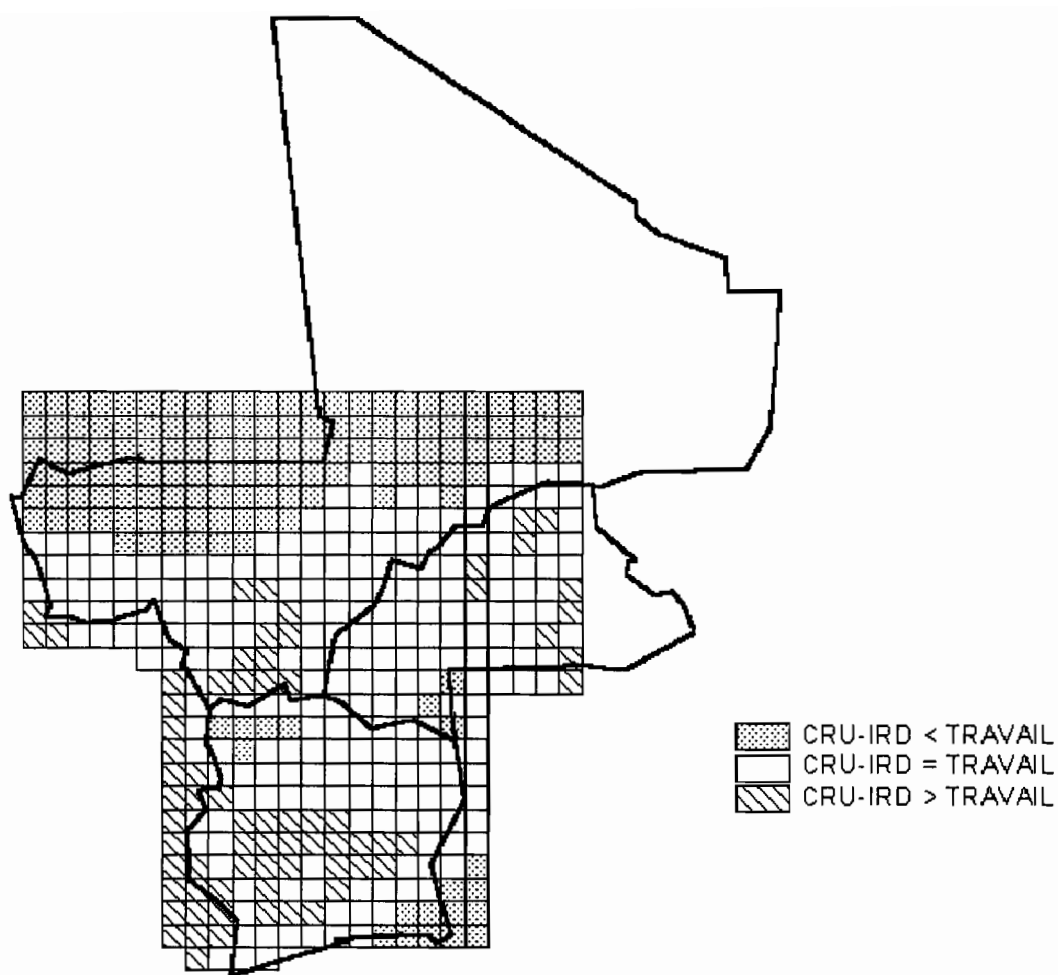


figure 2.14 : Résultats du test de Student de la comparaison des moyennes des pluies annuelles des fichiers CRU-IRD et TRAVAIL pour un seuil de confiance de 95%

2.3.2.6 Données d'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle apparaît comme une notion climatique valable à une échelle de temps et d'espace assez grande. Pour son estimation, on utilise souvent des méthodes de calcul, pour la plupart, empiriques.

La méthode décrite par Penman (1956) est certainement la plus satisfaisante parmi les méthodes que nous avons rencontrées dans la littérature. Basée sur une évaluation objective du bilan énergétique de la surface évaporante, cette méthode rend bien compte du processus physique réel en évaluant le volume des échanges d'eau entre une surface évaporante et l'atmosphère par le biais du "bilan énergétique". Ce dernier met en jeu les échanges de chaleur

par rayonnement, conduction, convection entre la surface évaporante et son environnement (air ou sol) ainsi que les chaleurs latentes de changement d'état de l'eau. L'équation de Penman intègre de nombreuses variables qui conditionnent l'ETP (température de l'air, durée d'insolation, albédo, vitesse du vent, humidité de l'air, rayonnement solaire). Mais cela entraîne une application numérique qui n'est pas aisée puisqu'il faut disposer de nombreuses mesures et calibrer correctement de nombreux paramètres.

Nous disposons de quatre grilles d'ETP à la résolution de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ sur la période allant de 1950 à 1995. Ces fichiers, obtenus auprès du CRU ont été constitués à partir d'observations climatologiques et de valeurs d'ETP calculées en utilisant quatre formulations qui s'inspirent toutes du processus physique réel tel que mis en évidence par Penman :

- L'ETP Reference Crop (RC) décrite par Shuttleworth (1994) : cette formulation fait référence à la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée par un couvert végétal abondant, couvrant le sol en phase active de croissance et alimenté en eau de façon optimale.
- La méthode décrite par Thom et Oliver (1977): Cette méthode s'appuie sur la formulation décrite par Penman (1956). Les modifications apportées à l'équation initiale de Penman sont faites pour améliorer l'évaluation de l'ETP en intégrant des coefficients qui prennent en compte un effet saisonnier dans l'évaluation de certains coefficients (Shuttleworth, 1994).
- la méthode de Penman-Monteith (Smith, 1992) qui est une méthode analogue à celle décrite par Penman. Cette formulation serait plus adaptée aux zones climatiques tempérées.
- L'ETP d'une surface d'eau libre (Open Water) (Shuttleworth, 1994) : c'est l'évaporation produite sur une surface d'eau libre.

La figure 2.15 illustre les valeurs moyennes des ETP mensuelles pour chaque grille. Les moyennes sont calculées pour chacune des grilles. Le cycle saisonnier est bien reproduit pour chacune des grilles. L'ETP RC se distingue de manière nette des autres valeurs d'ETP par des valeurs très importantes qui semblent même irréalistes. Les valeurs d'ETP Penman-Monteith présentent les plus faibles valeurs.

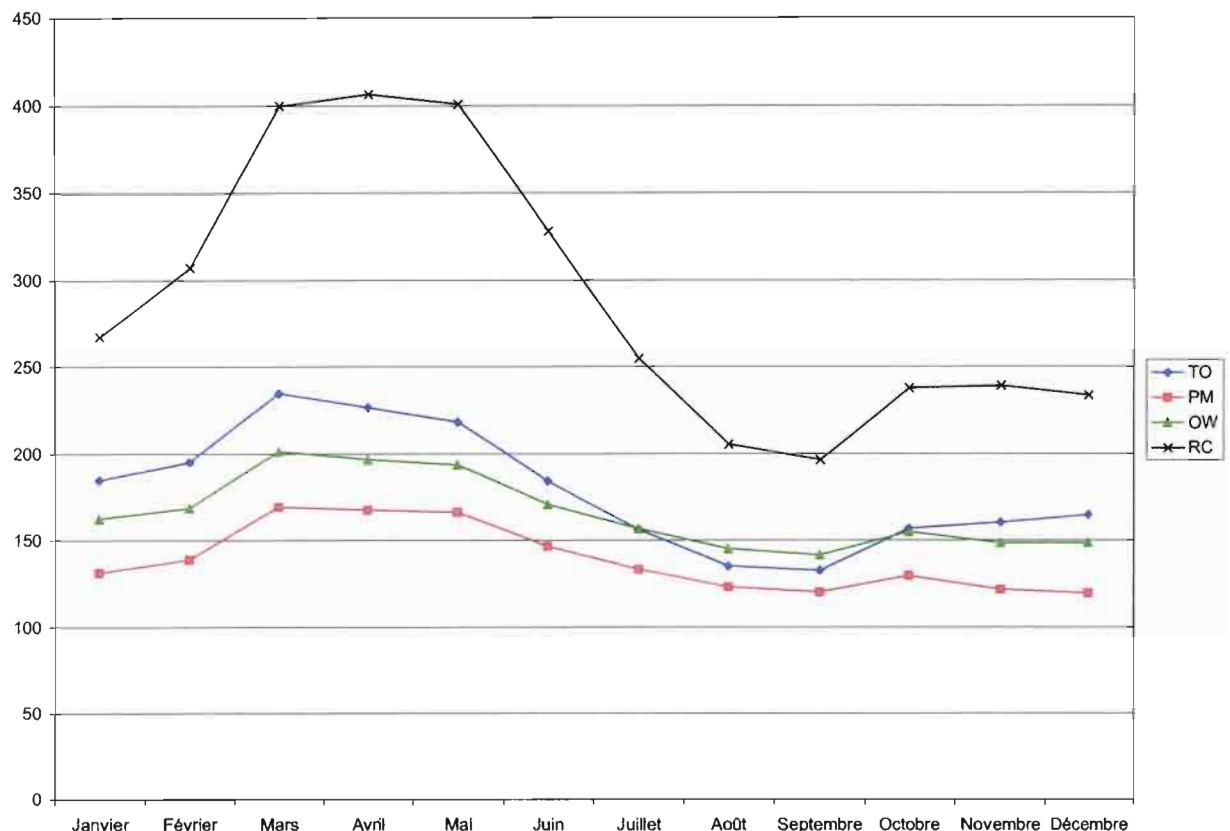


figure 2.15 : Moyennes mensuelles d'ETP

La figure 2.16 illustre une cartographie des moyennes interannuelles de l'ETP PM, RC et TO calculées sur la période 1950-1995 sur notre zone d'étude. Les trois méthodes de calcul de l'ETP conduisent à des valeurs différentes mais présentant le même gradient croissant du sud vers le nord :

- Avec la méthode Penman-Monteith, les plus faibles valeurs moyennes d'ETP sont comprises entre 1000 mm/an (majeure partie de la Côte d'Ivoire) et 2500 mm / an (aux confins du Sahara).
- Avec la méthode Thom & Oliver, on aboutit à des valeurs comprises entre 1000 et plus de 3000 mm par an, avec cependant un recul vers le sud des iso-classes d'ETP. Ce qui témoigne d'un accroissement des valeurs moyennes d'ETP par rapport aux valeurs obtenues avec la formulation de Penman – Monteith.
- La méthode Reference Crop conduit à des valeurs comprises entre 1000 et plus de 3000 mm par an. Le recul vers le sud des classes d'ETP est encore plus marqué avec cette

méthode. On observe que la quasi-totalité du Burkina Faso et du Mali se trouve dans la zone de valeurs d'ETP supérieures à 3000 mm / an.

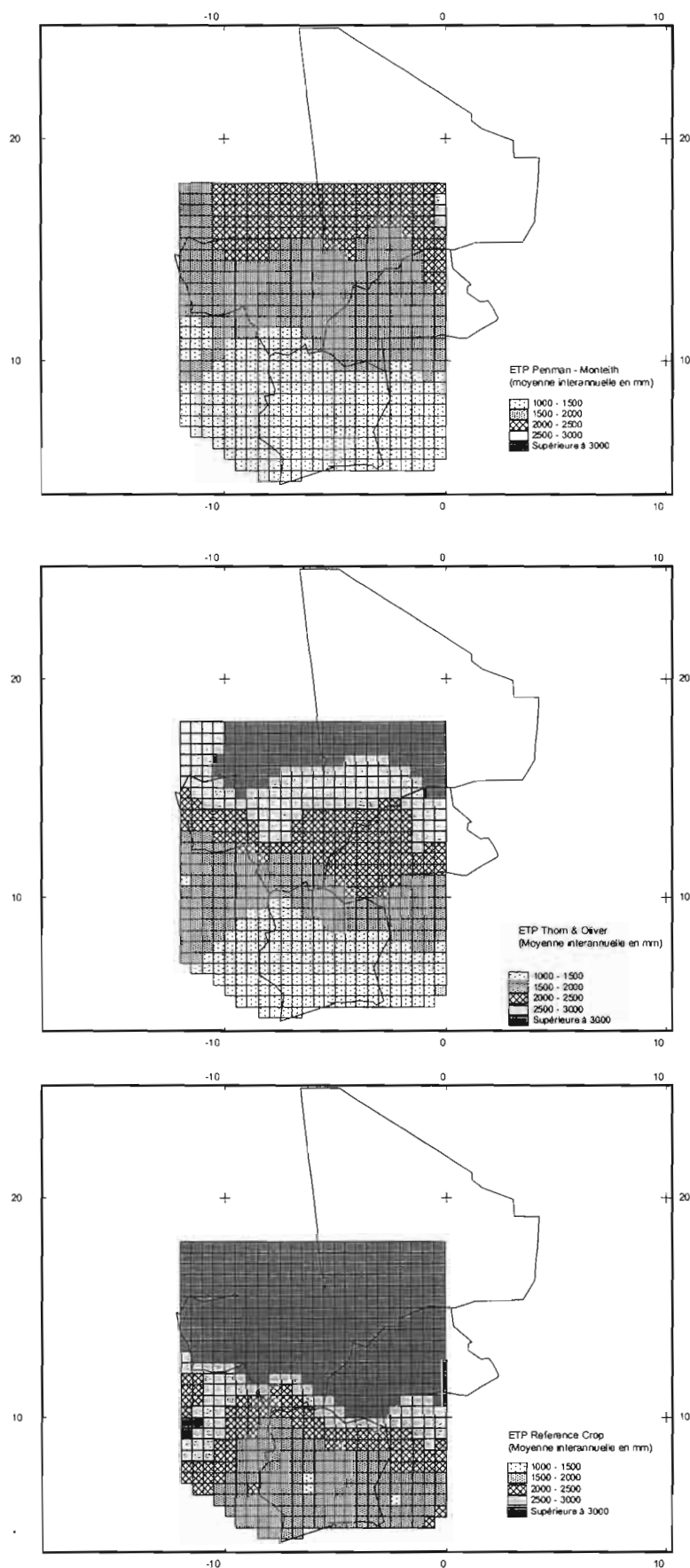


figure 2.16 : ETP moyennes interannuelles calculées sur la période 1950-1995

2.3.2.7 Données de températures

Des données de température ont été obtenues auprès du CRU à une résolution de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ sur la période 1950-1995. La carte des températures moyennes annuelles calculées sur la période 1950-1995 à partir du fichier de température à la résolution spatiale $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ montre une plage de température comprise entre 23°C et 30°C sur l'ensemble de la zone d'étude.

Température moyenne annuelle en $^\circ\text{C}$

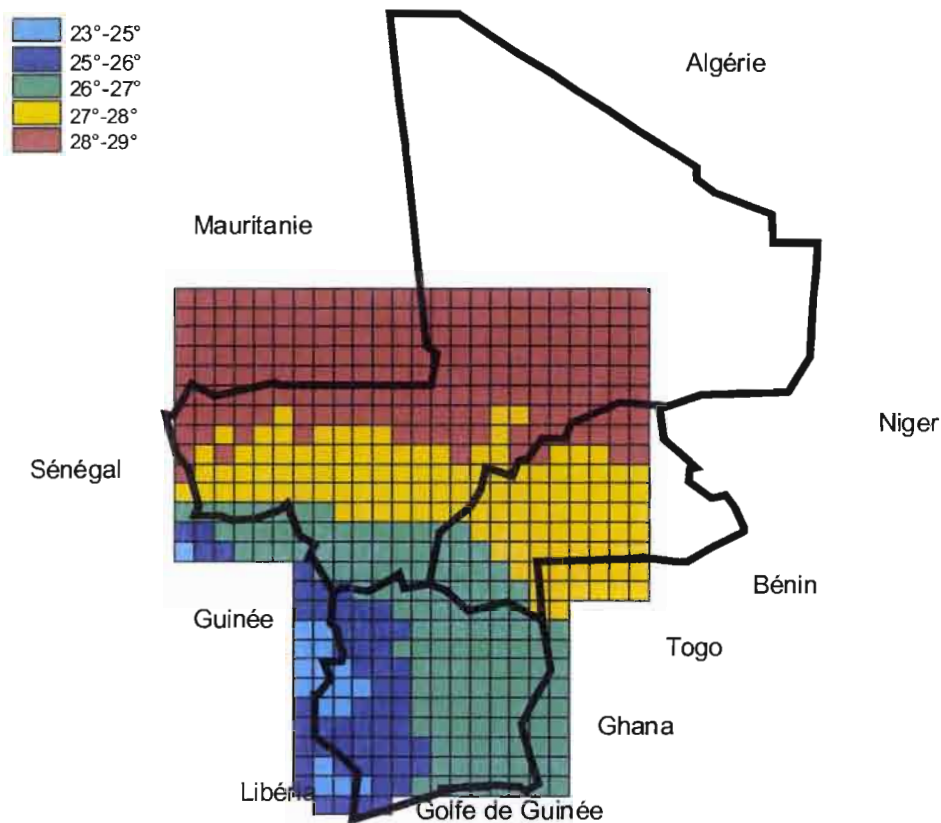


figure 2.17 : Température moyenne annuelle calculée sur la période 1950-1995

2.3.2.8 Sols

La couverture de données sur les sols a été extraite du Digital Soil Map of the World de la FAO. La FAO définit des unités de sols auxquelles sont associés des classes de capacité de rétention d'eau (Tableau 2.1). C'est cette classification qui nous a servi à estimer la capacité de rétention d'eau des sols, paramètre qui intervient dans les modèles utilisés ultérieurement.

La capacité de rétention des sols est liée à la nature même des sols et à leur couverture végétale. Elle dépend principalement des caractéristiques granulométriques du sol et de la profondeur de la couche de sol exploitée par les racines. La méthode développée par la FAO pour l'estimation de la capacité de rétention en eau du sol s'appuie sur des valeurs de profondeur racinaire du couvert végétal et des valeurs de limites de succion standardisées (liées à la définition de la réserve utilisable ou facilement utilisable par le couvert végétal).

Tableau 2.1 : Classification des sols selon la capacité de rétention en eau (source FAO)

Classe	Capacité de rétention en eau	Superficie couverte (Km ²)		
		Burkina Faso	Côte d'Ivoire	Mali
A	> 200 mm	0	0	0
B	150-200 mm	0	226557	319526
C	100-150 mm	49014	39551	236173
D	60-100 mm	182102	0	178452
E	20-60 mm	17548	28924	33429
F	< 20 mm	26248	18518	422122
W (Wetland)		703	8992	60526

En nous référant à la carte des unités de sols et aux classes de capacité de rétention en eau, nous avons évalué les capacités de rétention en eau pour chaque unité. Pour chaque classe, nous avons retenu comme valeur de la capacité de rétention d'eau du sol la moyenne arithmétique des limites supérieure et inférieure de la classe considérée. Nous avons établi la carte de capacité de rétention en eau qui se présente sous un format vectoriel en polygones (imposé par le format de la carte-source FAO). Nous avons désagrégé cette couverture de sols en couverture de grilles de 0,5°x0,5° (figure 2.18). Pour une maille donnée, l'opération de désagrégation consiste à attribuer à la maille une valeur de capacité de rétention en eau égale à la moyenne surfacique pondérée des polygones qui couvrent la maille.

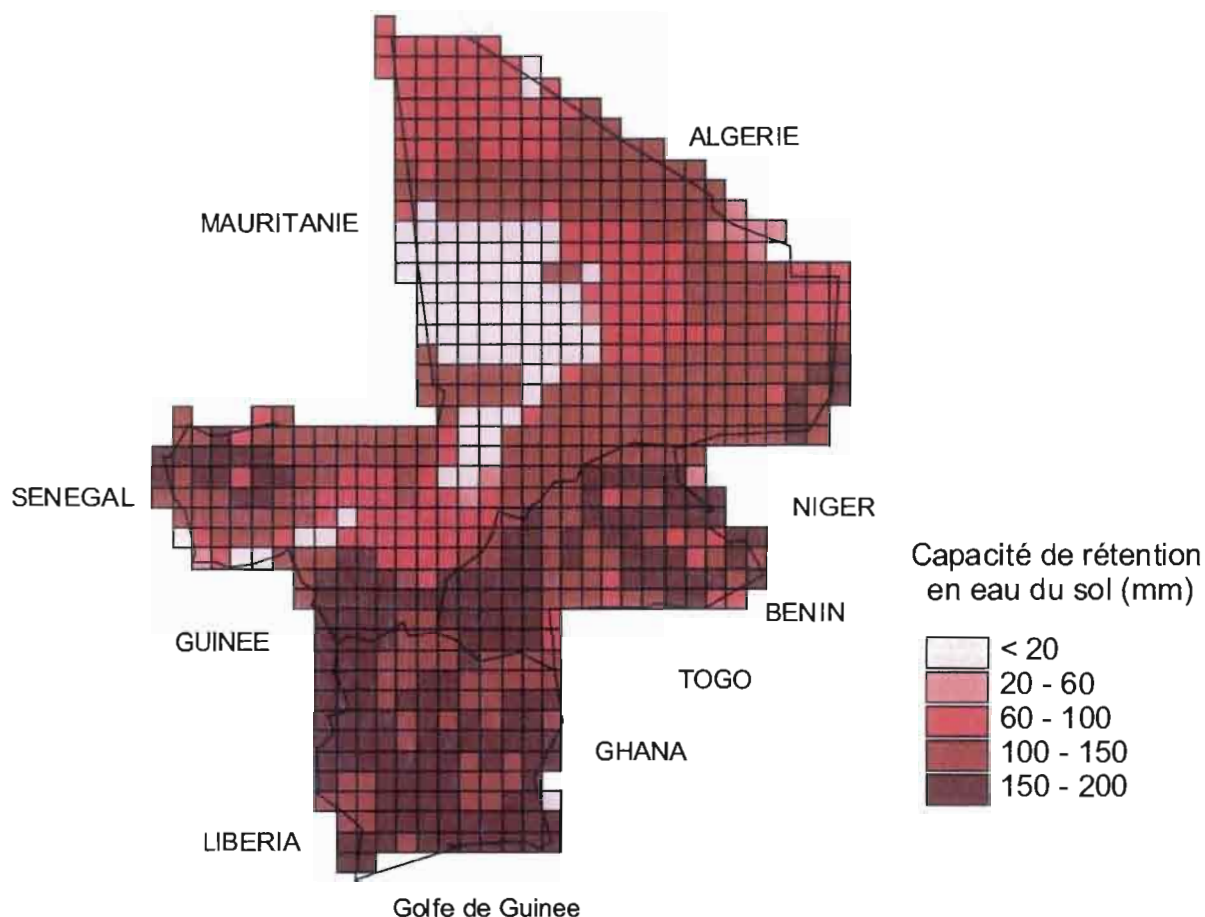


figure 2.18 Distribution des sols en fonction de leur capacité de rétention d'eau

Une autre base de données sol (capacité de rétention en eau du sol) a été obtenue auprès du CRU. Les valeurs de capacité de rétention d'eau du sol ont été estimées à partir de la carte d'unités de sols établie par la FAO suivant une méthodologie décrite par Dunne et Willmott (1996) qui, à la différence du fichier de la FAO, tient compte du type du couvert végétal pour définir la profondeur racinaire des plantes. La capacité en eau du sol, définie par Dunne et Willmott (1996), est la quantité d'eau qui peut être extraite du sol afin de satisfaire la demande évaporatoire. Classiquement, cette quantité est généralement considérée comme géographiquement invariante dans les modèles à grande échelle et elle est souvent fixée à 15 cm. Selon les auteurs, cette simplification est incorrecte en raison de la grande influence de la capacité en eau du sol sur les termes du bilan hydrologique. En effet une étude sur l'ensemble des continents (Milly et Dunne., 1994) révèle qu'une augmentation de 4 à 60 cm de la capacité en eau du sol entraîne une augmentation de 36% de l'évapotranspiration

continentale, une diminution de 35% du ruissellement et une augmentation de 12% des précipitations continentales. De nombreuses études ont examiné l'influence de la capacité en eau du sol sur l'atmosphère et en ont déduit des effets importants sur les variables climatiques telles que la température, l'évapotranspiration, les précipitations.

La capacité en eau du sol est obtenue grâce à la capacité en eau utile du sol ($\Delta\theta$) exprimée en cm d'eau par cm de sol et représentant la différence entre la capacité au champs (θ_f) et la capacité au point de flétrissement permanent (θ_w). La capacité au champs est la quantité d'eau contenue dans un sol initialement saturé après une période de ressuyage de 2-3 jours ; le point de flétrissement permanent correspond à la quantité d'eau en dessous de laquelle les racines ne peuvent plus extraire l'eau du sol. Ces capacités sont fonction des pourcentages de sable, d'argile et de matière organique du sol. L'intégration de $\Delta\theta$ sur toute la profondeur du sol permet d'obtenir la capacité en eau du sol.

A la différence de la méthode employée par la FAO, celle proposée par Dunne et Willmott (1996) intègre la teneur en matière organique du sol, estimée empiriquement à partir du ratio précipitation/évapotranspiration potentielle et la profondeur racinaire fonction de la couverture végétale. La moyenne des estimations de profondeur racinaire sur tout le globe est de 86 mm.

Une comparaison de la distribution spatiale entre les données de capacités de rétention d'eau du sol de la FAO et du CRU est illustrée sur la figure 2.19 où nous avons représenté pour chaque grille, la différence entre les valeurs respectives des capacités de rétention d'eau de la FAO et du CRU. La plupart du temps, les valeurs de capacité de rétention en eau du sol de la FAO sont supérieures à celles du CRU.

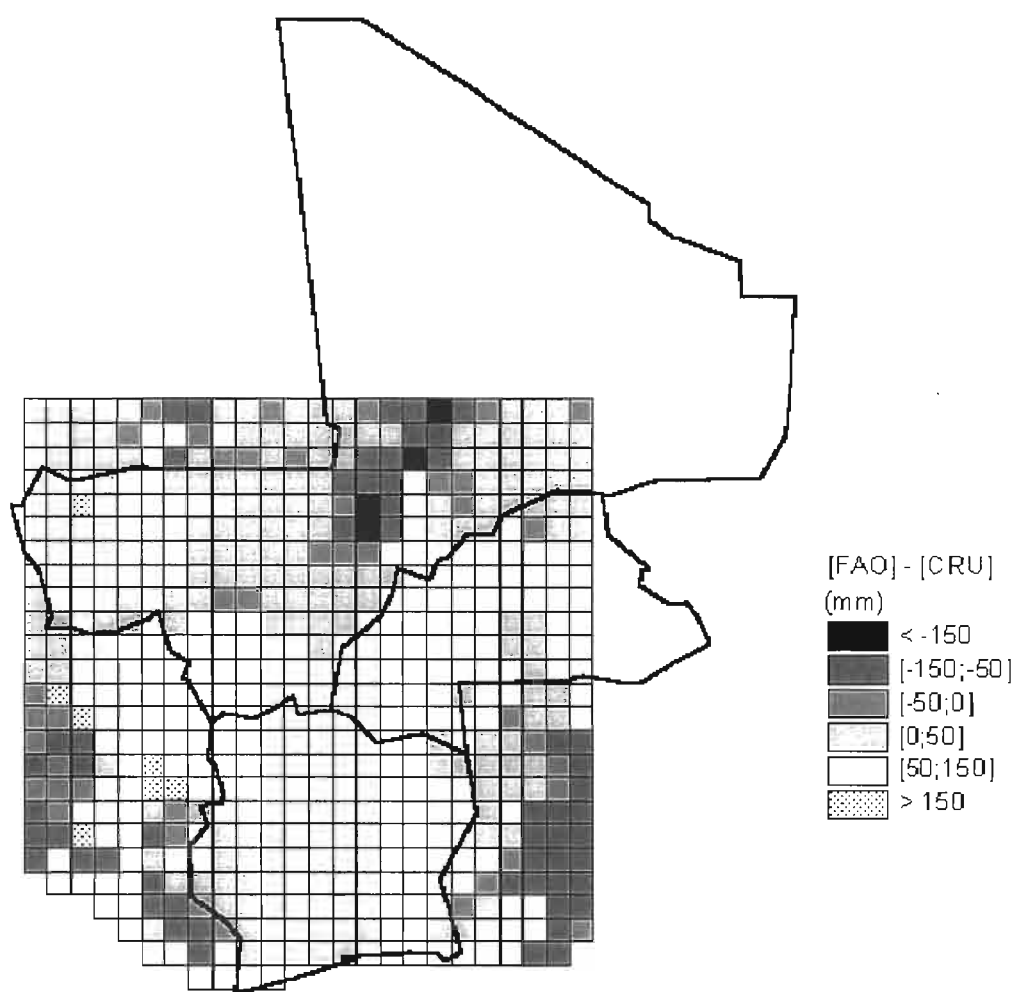


figure 2.19 : Différence des capacités de rétention d'eau du sol de la FAO et du CRU

2.4 ORGANISATION DE LA BANQUE DE DONNEES

2.4.1 Structuration des données de types hydrologique et climatologique

La base de donnée que nous avons constituée dans le cadre de cette étude s'intègre pleinement au projet SIEREM (Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eaux et leur Modélisation) mené par l'IRD et qui s'appuie sur une base de données chronologiques. Ces données sont de type hydrologique et climatologique et sont collectées, principalement, auprès des réseaux nationaux. La zone d'étude de SIEREM couvre les trente pays représentés sur la figure 2.20.

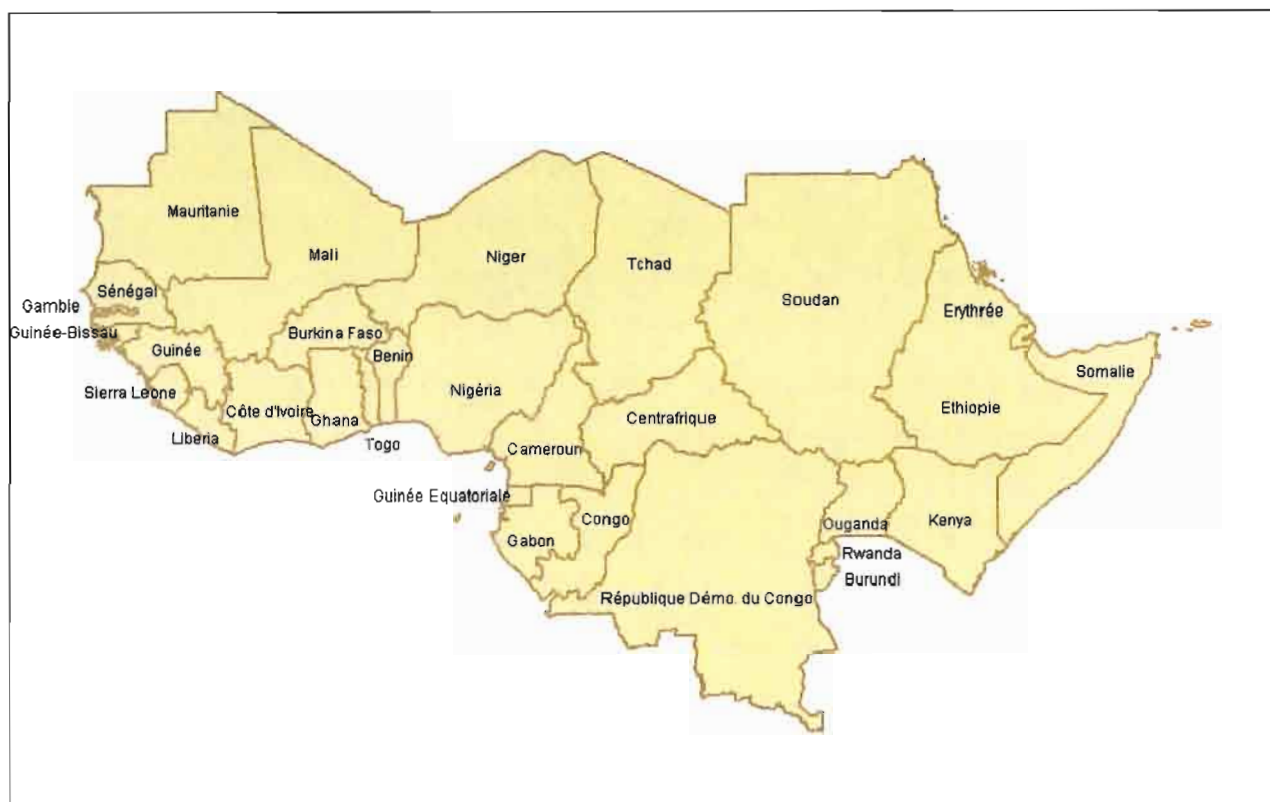


figure 2.20 : Pays pris en compte dans le projet SIEREM

Les pays sont identifiés par un code et un nom. Ce code et ce nom suivent la norme ISO3116. Des informations plus générales sur les pays, comme la superficie totale, la population et la population rurale d'après les derniers recensements connus sont aussi gérées.

Les cours d'eau sont hiérarchisés. Chacun d'eux appartient à un bassin hydrographique et est référencé en fonction de son ordre dans le chevelu. De plus, chaque cours d'eau référence le cours d'eau dans lequel il se jette. Enfin, une variable doit décrire le fait que le régime du cours d'eau est pérenne ou pas.

Chaque type de données est géré au pas de temps journalier et mensuel. Les données donnant lieu à plusieurs mesures journalières à des heures fixes, ou pour lesquelles sont pris en compte les extrêmes journaliers, sont gérées dans des enregistrements journaliers.

Les données de débits sont mesurées à une station hydrométrique et sont exprimées en m³/s. Les stations hydrométriques sont décrites par plusieurs variables. Ces variables, comme le

code station ou le nom de la station, identifient la station de façon unique. D'autres variables, telles que la latitude, la longitude et l'altitude, situent la station. Des variables précisent aussi l'appartenance d'une station à un pays, à un bassin hydrographique ainsi qu'à un cours d'eau au bord duquel elle est située. D'autres variables descriptives sont prises en compte ainsi que celles exprimant des niveaux de droits d'accès à l'information de la station.

Les données climatiques sont rattachées à des postes climatologiques identifiés par un code, un nom propre et caractérisés, à l'instar des stations hydrométriques, par des variables de situation géographique ainsi que des variables descriptives. Les données climatiques rattachées aux postes sont les hauteurs de pluie, les valeurs d'évapotranspiration et les observations météorologiques au sol. Les valeurs de hauteur de pluie sont exprimées en millimètres. Les valeurs d'évapotranspiration sont exprimées en millimètres. De plus l'évapotranspiration peut être calculée suivant la méthode de Penman ou suivant celle de Turc.

Les données météorologiques concernent essentiellement les mesures trihoraires effectuées dans les postes climatologiques. Leur mise en œuvre, leur présentation ainsi que leur mode d'élaboration suivent les Règlements techniques de l'O.M.M.

Ces données sont présentées dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Données climatiques gérées par la base de données SIEREM

Le vent :	La direction est donnée en dizaines de degrés, la vitesse est exprimée en mètres/seconde; un vent calme est indiqué par une direction et une vitesse égale à 0. Le vent résultant moyen est le vecteur obtenu par addition vectorielle de tous les vecteurs vents considérés et divisés par le nombre d'observations. Le coefficient de stabilité représente le quotient exprimé en pourcentage, de la vitesse du vent résultant moyen par la moyenne arithmétique des vitesses considérées.
L'évaporation :	Elle est donnée en millimètres et peut être mesurée à l'évaporomètre Piche ou au bac à l'air libre. Le type de bac est un des paramètres descriptifs du poste climatologique ou de la source de données.
La pression Atmosphérique :	Elle est exprimée en millibars.
L'humidité :	Elle est exprimée en pourcentage. La valeur est obtenue en divisant la tension de vapeur d'eau par la tension de vapeur saturante correspondant à la température moyenne (Règlement Technique de l'O.M.M.).
L'insolation :	elle est exprimée en heures décimales.
La tension de vapeur d'eau :	Elle est exprimée en millibars.
La température :	Elle est mesurée sous abri et exprimée en degrés Celsius.

Toutes les données sont caractérisées par une source qui identifie le producteur de données. Cette source peut être par exemple, l'IRD, l'ASECNA ou un service national. A chacune des différentes sources correspond un contact qui est la personne s'occupant de la distribution de données.

Toutes les valeurs peuvent aussi être qualifiées par un code qualité. Les valeurs de ce code ne sont pas prédéfinies mais dépendent du codage choisi par les responsables de la source de données. Les significations des éventuels codes seront donc associées aux sources de données et décrites dans le champ commentaire de cette entité.

2.4.2 Structuration des données spatialisées

La banque de données spatialisées est mise en place pour deux objectifs principaux :

- la modélisation de la relation pluie-débit en intégrant l'hétérogénéité des éléments du bassin versant (pluie, ETP, sols, etc.)
- l'analyse et l'interprétation des résultats numériques obtenus dans l'étude de la variabilité climatique et des résultats de la modélisation par la prise en compte de certains facteurs géographiques (végétation, sols, relief, occupations du sol, etc....).

En fonction des objectifs affichés, la plupart des données dont nous disposons dans la banque de données se présentent au format raster de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$.

2.5 CONCLUSION

L'esquisse du contexte géographique et climatique de la zone d'étude souligne la diversité des différents éléments qui la composent. On rencontre en effet une variété de conditions hydroclimatiques sur la zone d'étude. On trouve ainsi des conditions tropicales humides dans le sud de la Côte d'Ivoire et des conditions semi-arides ou arides dans le nord du Burkina Faso et le Mali, avec des cours d'eau connaissant, parfois, un écoulement de seulement quelques jours dans l'année. Les interrelations et la diversité des éléments constituant le paysage de la zone d'étude proviennent de l'influence du climat, lequel présente aussi une importante variabilité. Cette grande variabilité du climat constitue une contrainte pour les populations de la zone d'étude dont l'économie est essentiellement basée sur l'agriculture.

L'ampleur de la sécheresse qui sévit depuis plus de 30 ans sur les pays de la zone d'étude revêt un caractère très préoccupant. Les effets de la raréfaction des pluies, et par là même des autres ressources en eau, ont pris, en particulier dans les pays bordant le sud du Sahara, une tournure catastrophique en affectant durement l'économie de ces pays et en menaçant directement la vie des populations. Les implications de la variabilité du climat sur celle des ressources en eau sont particulièrement fortes et les répercussions de celle-ci touchent à leur tour de très

nombreux secteurs d'activité : agriculture, énergie, santé, alimentation en eau potable, navigation, etc.

En fonction des données que nous avons pu rassembler (pluie, ETP, sol, température et végétation) et des analyses que nous effectuerons, notre zone d'étude se limitera à la Côte d'Ivoire, au Mali et au Burkina Faso ou à la Côte d'Ivoire et à une partie du Mali et du Burkina Faso.

Sur cet espace, nous avons constitué une base de données pluviométriques et hydrométriques rattachées à un site de mesure sur une période s'étendant, globalement, de 1950 à 1997. 140 postes pluviométriques et 40 stations hydrométriques ont été intégrés.

Parallèlement, une base de données numériques et spatialisées, gérée par le SIG ArcView a été construite et intègre des données thématiques comme les limites des bassins versants, le réseau hydrographique, des données de sols, des données de végétation mais aussi des données chronologiques comme des pluies mensuelles, des ETP mensuelles et des températures mensuelles, toutes 3 spatialisées.

Nous disposons de 3 grilles de données de pluie spatialisées : TRAVAIL (obtenue par interpolation des données ponctuelles de la base de données pluviométriques), CRU et CRU-IRD (grilles déjà spatialisées). La comparaison des données de ces 3 grilles montre quelques différences entre les valeurs des pluies mensuelles estimées. Les différences sont liées au mode de sélection des stations pluviométriques qui ont servi à l'interpolation et/ou à la méthode d'interpolation elle-même. A priori, la grille de pluie CRU-IRD qui intègre un plus grand nombre de postes pluviométriques doit être meilleure que les 2 autres grilles de pluies.

Les données d'ETP disponibles sont obtenues à l'aide de 3 formulations différentes. La grille d'ETP RC conduit à des valeurs qui paraissent surréalistes, parce que trop élevées. La grille d'ETP PM fournit des valeurs qui semblent plutôt faibles sur la zone d'étude. La formulation TO semble mieux adaptée pour estimer l'ETP dans la zone d'étude.

Parmi les grilles sol, CRU et FAO, la grille CRU doit être plus complète que la grille FAO puisqu'elle intègre une mesure de la profondeur racinaire de la végétation pour la détermination de la capacité de rétention en eau qui nous intéresse.

Les grilles de pluie et d'ETP constituent une chronique qui s'étend de 1950 à 1995; Elles couvrent la Côte d'Ivoire et une partie du Burkina et du Mali.

Les grilles sol sont fixes dans le temps et couvrent les 3 pays de la zone d'étude.

Cette base de données qui offre une couverture spatiale et temporelle satisfaisante nous donne l'opportunité d'analyser et de préciser les manifestations de la variabilité du climat dans la zone d'étude.

**CHAPITRE 3 : MISE EN EVIDENCE DE
LA VARIABILITE HYDROCLIMATIQUE
SUR LA ZONE D'ETUDE**

3 CHAPITRE 3 : MISE EN EVIDENCE DE LA VARIABILITE HYDROCLIMATIQUE SUR LA ZONE D'ETUDE

Dans ce chapitre, nous allons caractériser et mesurer d'éventuelles fluctuations au sein des séries chronologiques des différentes variables pluviométriques et hydrologiques sur la zone d'étude que nous avons prédéfinie :

- le cumul de pluies annuelles sur l'année entière,
- les pluies mensuelles,
- le débit moyen annuel,
- le maximum sur chaque année du débit moyen de n jours consécutifs (VCX n),
- le seuil minimal en dessous duquel les débits sont restés pendant n jours consécutifs (QCN n).

L'objectif est de préciser la variabilité climatique sur la zone d'étude, déjà observée dans le programme ICCARE sur la période 1950-1989, en intégrant des données de la décennie 1990. En outre, dans ce chapitre nous mettons en parallèle des résultats de l'analyse de la variabilité climatique avec des données de sol, végétation, etc.

3.1 METHODES

Parmi les méthodes statistiques que nous avons utilisées, 2 familles de test ont retenu notre attention :

- les tests de tendance ou de persistance,
- les tests de détection de rupture au sens de détection d'un changement des caractéristiques de la loi de distribution des variables.

D'autres outils non statistiques nous ont également permis d'analyser la variabilité hydroclimatique.

3.1.1 Étude des tendances et de la persistance

L'analyse des séries temporelles peut consister à étudier le caractère purement aléatoire (non-persistance) des séries à l'aide de différents tests statistiques comme le test d'autocorrélation, le test de corrélation sur le rang et la statistique de rang de Spearman.

L'élément tendanciel des séries peut être étudié à l'aide d'une régression linéaire simple au sens des moindres carrés.

3.1.1.1 Autocorrélation

Le test d'autocorrélation permet d'apprécier la dépendance linéaire successive de la variable étudiée (Hubert et Carbonnel, 1987 ; Lubès et al., 1994).

Soit la série $x_1, x_2, \dots, x_n$, désignant les réalisations de la variable X observée aux pas de temps successifs égaux i ($i=1, 2, \dots, n$). Le coefficient d'autocorrélation r_k est calculé en fonction du retard k suivant la relation :

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x}_1)(x_{t+k} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x}_1)^2 \sum_{t=1}^{n-k} (x_{t+k} - \bar{x}_2)^2}} \quad (\text{éq. 3.1})$$

3.1.1.2 Test de corrélation sur le rang

Ce test couramment utilisé dans la littérature a une hypothèse alternative qui est celle d'une tendance (Kendall et Stuart, 1943 ; WMO, 1966, Lubes et al., 1994). La mise en œuvre du test repose sur un comptage du nombre de paires P pour lesquelles $x_j > x_i$ avec $j > i$ pour $i = 1, 2, \dots, n-1$. La variable du test τ se formule comme suit :

$$\tau = \frac{4P}{N(N-1)} - 1 \quad (\text{éq. 3.2})$$

Pour un grand nombre d'observations N et sous l'hypothèse nulle la variable τ suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance σ_τ^2 égale à :

$$\sigma_\tau^2 = \frac{2(N+5)}{9N(N-1)} \quad (\text{éq. 3.3})$$

3.1.1.3 Statistique (ou corrélation) de rang de Spearman

Dans la littérature, il est largement fait référence à ce test dont l'hypothèse alternative est celle d'une tendance (WMO, 1966, Lubes et al., 1994).

Soit x_i une réalisation de la variable aléatoire X . L'objectif poursuivi est de savoir si les x_i peuvent être considérés comme des réalisations indépendantes les uns des autres. Pour cela, Spearman propose le raisonnement suivant : si les réalisations sont indépendantes, l'échantillon ne présente pas d'ordre privilégié. Il propose donc de tester la présence de dépendance en comparant l'ordre de l'échantillon recueilli avec celui issu d'une procédure de tri. Cette comparaison se fait grâce au coefficient de corrélation. Sous l'hypothèse nulle d'indépendance, le coefficient de corrélation doit être nul. Soit $R(x_i)$ le rang occupé par les réalisations x_i dans la série ordonnées des x_i . Si on désigne par ρ_s le coefficient de corrélation de Spearman, ρ_s s'écrit :

$$\rho_s = \frac{\text{Cov}(R(X_i), i)}{\sqrt{V(R(X_i))V(i)}} = 1 - \frac{6D}{n(n^2 - 1)} \quad (\text{éq. 3.4})$$

$$\text{où } D = \sum_{i=1}^n (R(X_i) - i)^2 \quad (\text{éq. 3.5})$$

Pour n grand ($n > 30$), sous l'hypothèse nulle, la variable :

$$t = \rho_s \sqrt{\frac{n-2}{1-\rho_s^2}} \quad (\text{éq. 3.6})$$

suit une distribution t de Student à $n-2$ degrés de liberté.

Pour un risque α de première espèce donné, la région d'acceptation de l'hypothèse nulle est comprise entre les valeurs théoriques de la variable de Student de probabilité de non dépassement respectivement égale à α et $1-\alpha/2$

3.1.2 Détection des ruptures : test de Pettitt

Une rupture peut être définie de façon générale par un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu.

Le test de Pettitt est réputé pour sa robustesse à détecter une rupture dans une série chronologique (Lubès et al., 1994). Ce test a déjà été utilisé pour l'étude de fluctuations de variables hydrométéorologiques (Demarée et Nicolis, 1990; Lubès et al., 1994, Servat et al.,

1997a). Ce test est non paramétrique, c'est-à-dire qu'il ne formule aucune hypothèse sur la fonction de distribution des événements qui constituent la série de la variable étudiée. Le test de Pettitt qui dérive du test de Mann-Whitney (Pettitt, 1979), réalise un comptage de Mann-Whitney afin de tester deux échantillons d'une même série.

Si on considère deux échantillons $x_1, x_2, \dots, x_t$, et $x_{t+1}, x_{t+2}, \dots, x_n$ d'une même série $x_1, x_2, \dots, x_n$, la statistique U compte le nombre de fois où un membre du premier groupe excède un membre du second groupe. La statistique du test s'écrit alors :

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n D_{ij} \text{ où} \quad (\text{éq. 3.7})$$

$D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j)$ avec $\text{sgn}(x) = 1$ si $x > 0$, 0 si $x = 0$, -1 si $x < 0$.

Soit K_N la variable définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,n}$ pour t variant de n à $n-1$.

Si $K_{\max}$ désigne la valeur de K_n prise pour la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur $K_{\max}$ est donnée approximativement par :

$$\text{Prob}(K_n > K_{\max}) = 2 \exp\left(-\frac{6(K_{\max})^2}{n^3 + n^2}\right) \quad (\text{éq. 3.8})$$

Pour un risque de première espèce donné, si la probabilité est inférieure à α , l'hypothèse nulle est rejetée. Dans ce cas, t indique la rupture mais cette date est purement indicatrice.

3.1.3 Calcul des déficits

Pour différentes variables hydrométéorologiques, il semble intéressant de calculer le déficit de la période de sécheresse récente par rapport à la période de antérieure, en appliquant la formule suivante :

$$\text{Deficit} = (\text{moyenne après rupture} / \text{moyenne avant rupture}) - 1 \quad (\text{éq. 3.9})$$

Dans le cas où aucune rupture n'est détectée par les tests statistiques, le déficit a tout de même été calculé en prenant l'année 1970 comme année-pivot. Les tests ne révèlent pas toujours correctement une diminution faible d'une variable. Cela est lié à l'efficacité du test et au niveau de confiance qu'on leur attribue.

3.1.4 Utilisation d'indices pluviométriques

Nous avons utilisé des indices qui mesurent un écart par rapport à une moyenne établie sur une longue période à l'échelle ponctuelle en se référant aux données des stations. L'indice utilisé dans cette étude est un indice centré réduit qui se formule comme suit :

$$(X_i - M) / S \quad (\text{éq. 3.10})$$

avec X_i : pluviométrie de l'année i ,

M : pluviométrie moyenne interannuelle sur la période de référence,

S : écart-type de la pluviométrie interannuelle sur la période de référence.

Cet indice peut être cartographié permettant ainsi de distinguer de manière commode les années humides ou excédentaires, des années sèches ou déficitaires.

3.1.5 Outils d'analyse spatiale

On a cherché autant que cela était possible à cartographier les résultats des études de variabilité des régimes pluviométriques et hydrométriques afin de les mettre elles-mêmes en parallèle mais aussi avec d'autres cartes comme celles des données sols, des données végétation ou celles des isohyètes interannuelles pour mieux appréhender la variabilité spatiale des variables hydrométéorologiques.

3.2 CARACTERISATION D'UNE VARIABILITE DES PLUIES ANNUELLES

La variable analysée est le cumul pluviométrique sur une année civile.

Cette analyse de la variabilité des pluies annuelles sera abordée sous deux aspects :

- une analyse sur la période couvrant les cinq dernières décennies (jusqu'en 1997)
- une analyse qui remonte au début du siècle.

3.2.1 L'évolution pluviométrique annuelle depuis 1950

3.2.1.1 Analyse du caractère aléatoire des séries

Le calcul des coefficients d'autocorrélation d'ordre 1 sur les séries de pluies annuelles des 140 postes pluviométriques fournit des valeurs généralement supérieures à la valeur limite au seuil de 95%. Ce qui traduit une dépendance forte entre les valeurs successives des pluies annuelles.

Sur les 140 séries, 128 présentent un caractère non aléatoire au seuil de confiance de 95% (soit un seuil d'erreur de 5%), détecté par le test de corrélation sur le rang et la statistique de rang de Spearman.

L'hypothèse alternative reconnue pour ce test étant une tendance strictement linéaire, pour ces 128 stations, on a estimé les tendances (sans préjuger de la qualité de l'ajustement aux moindres carrés fait) qui correspondent à une baisse des précipitations annuelles comme l'illustre la figure 3.1 qui présente l'évolution des hauteurs annuelles de précipitation pour 3 postes pluviométriques de la zone d'étude.

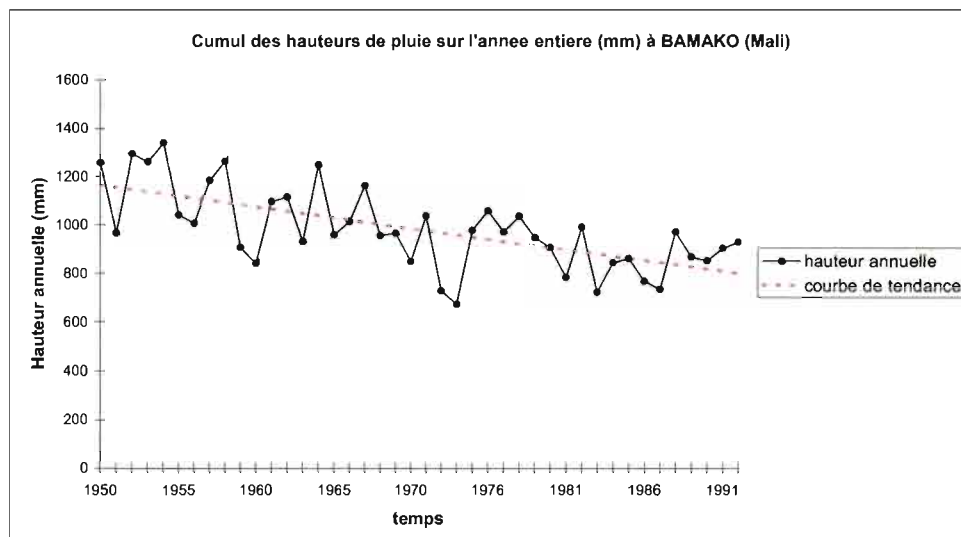
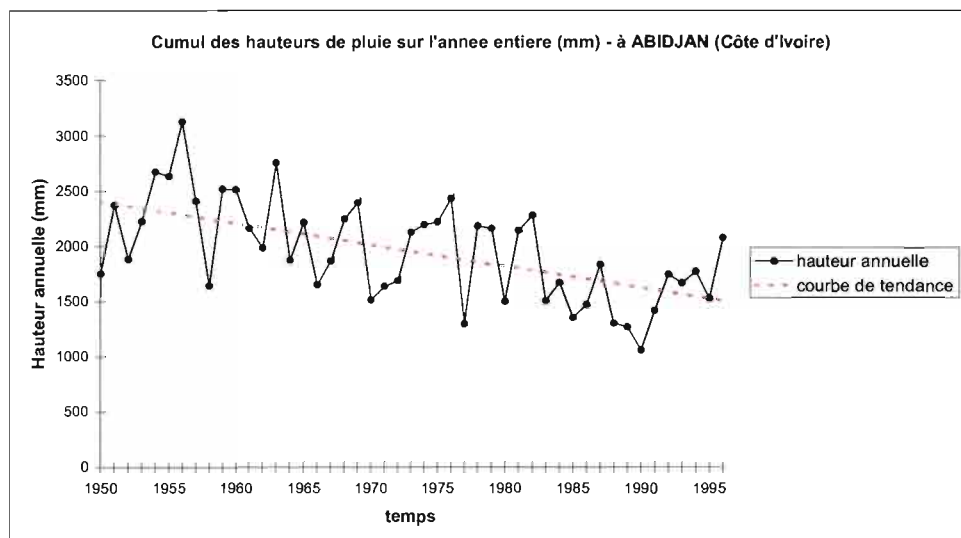
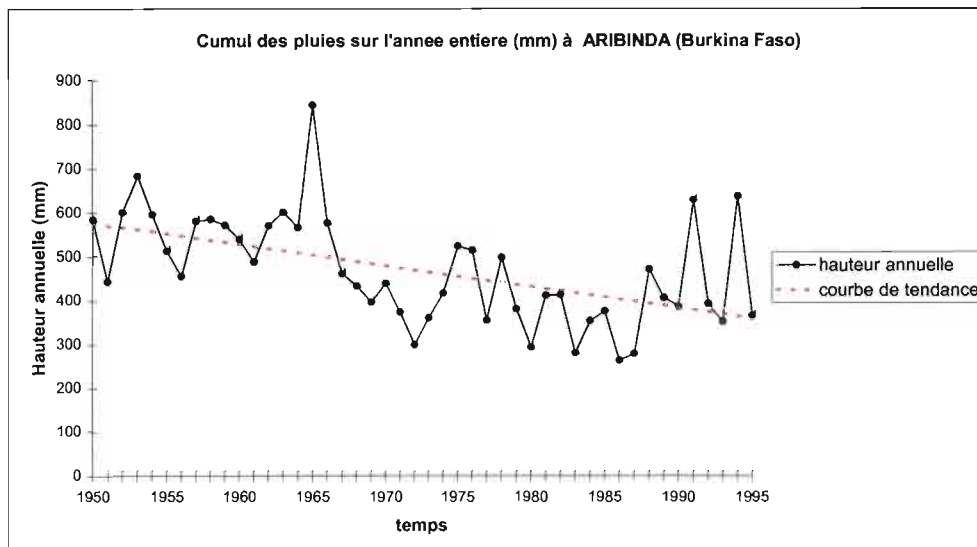


figure 3.1 : Précipitations annuelles à Arribinda, Abidjan et Bamako.

Une cartographie des pentes des droites de régression (donc de l'importance des diminutions de la pluviométrie annuelle) rapportées à leur écart type respectif est présentée sur la figure 3.2. Ce rapport permet de tenir compte des variations internes au sein de séries en chaque station. Ce rapport représente la valeur de la statistique t_α de Student qui sert à tester si la pente de la droite de régression est significativement différente de zéro (Kottegoda, 1980). L'examen de la figure 3.2 nous montre que toutes les pentes sont négatives confirmant ainsi une diminution des précipitations. Aucun regroupement homogène ne semble se dégager dans la répartition géographique des pentes.

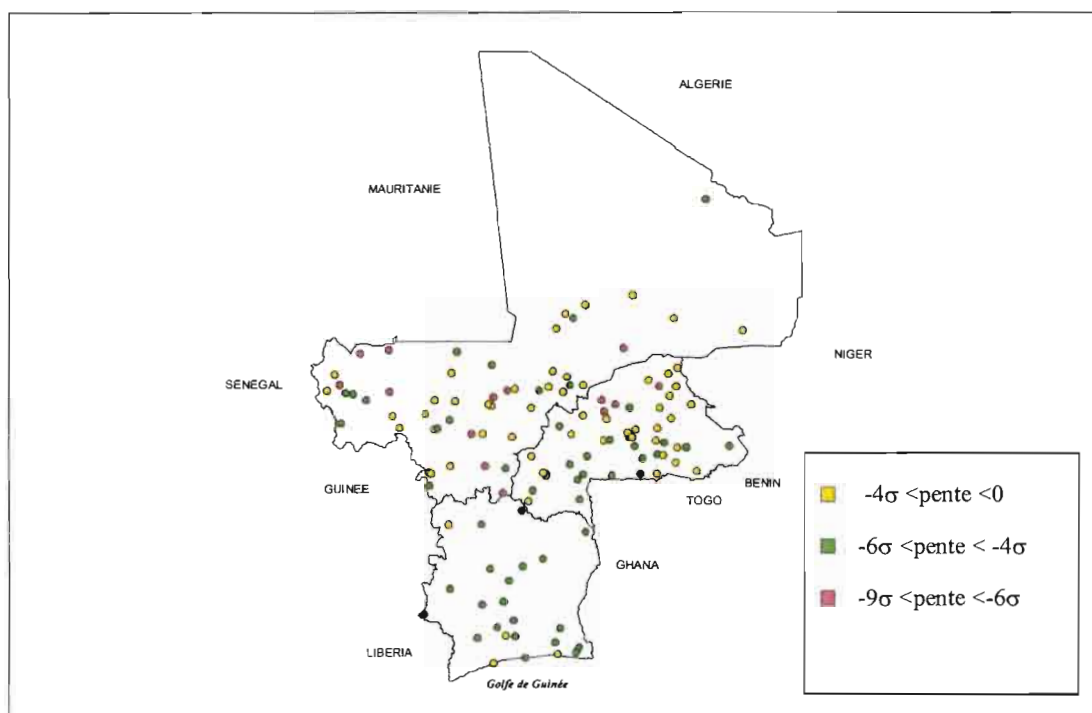


figure 3.2 : Pentes des droites de régression rapportées à l'écart type

3.2.1.2 Examen de l'homogénéité des séries

Les résultats du test de Pettitt confirment les résultats précédents des tests de vérification du caractère aléatoire. 128 postes pluviométriques sur les 140 postes analysés présentent une rupture au seuil de confiance de 90% avec des dates de ruptures comprises majoritairement entre 1967 et 1972 (82 séries sur les 128). Les ruptures décelées correspondent à une baisse significative de la moyenne des précipitations après cette date.

Parallèlement, pour avoir une vision plus régionale des ruptures détectées au sein des séries chronologiques de cumul de pluie sur l'année entière, nous nous sommes intéressés à la détection des dates de ruptures sur l'ensemble de la zone d'étude appliquant le test de Pettitt (niveau de confiance fixé à 90%) à tous les éléments des grilles de pluie annuelle TRAVAIL et CRU-IRD (mailles de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$). Ces grilles présentent l'intérêt d'offrir la possibilité d'accéder à une réalité régionale, non directement perceptible par les analyses ponctuelles comme celles menées précédemment.

La figure 3.3 présente une cartographie des résultats ainsi obtenus avec la grille de pluie TRAVAIL. Les commentaires suivants peuvent être faits :

- les dates de rupture se situent majoritairement entre 1967 et 1972;
- à l'est du Mali et par endroits dans le pays, la sécheresse semble avoir débuté plus tôt que dans les autres régions. Des dates de ruptures s'observent dès le début ou au milieu des années 1960 pour la plupart des séries étudiées de ces régions;
- dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire de même qu'à l'est du pays aucune rupture n'a été détectée.
- une bande située à l'ouest du Mali montre un caractère aléatoire : ce résultat semble un peu surprenant au regard des quelques résultats précédents et d'autres études antérieures qui ont montré que cette zone est déficitaire. Une mauvaise interpolation des données pluviométriques dues à l'absence de postes pluviométriques dans le sud de la Mauritanie et en Guinée pourrait expliquer ce résultat.

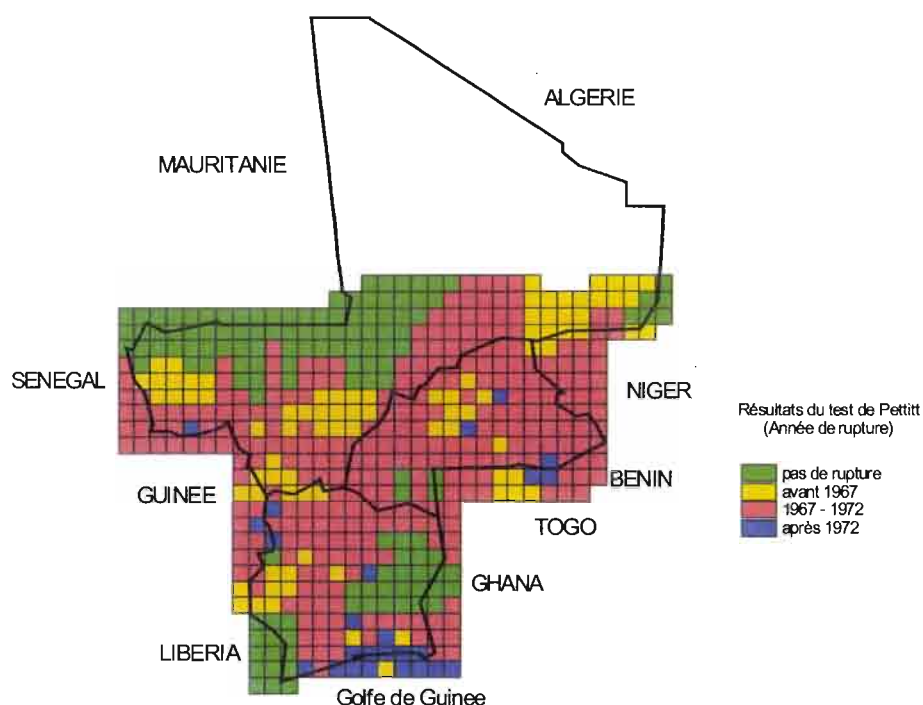


figure 3.3 : Cartographie des dates de rupture des séries temporelles de précipitations annuelles (période de référence: 1950 à 1997) (fichier de pluie TRAVAIL)

Les résultats obtenus (test de Pettitt, niveau de confiance à 90%) avec la grille de pluie CRU-IRD sont représentés sur la figure 3.4. Les postes utilisés sont plus nombreux et une extension de la zone d'étude vers le nord est alors possible.

Ces résultats sont similaires à ceux obtenus avec le fichier de pluie TRAVAIL sauf sur une zone située à l'ouest du Mali vers la frontière entre le Mali et la Mauritanie. Pour cette zone, les ruptures détectées avec le fichier de pluie CRU-IRD sont situées entre 1967 et 1972, alors que le fichier de pluie TRAVAIL indique des séries homogènes. L'autre différence concerne la région sud-ouest de la Côte d'Ivoire, sur laquelle les ruptures détectées avec le fichier de pluie CRU-IRD sont antérieures à 1967. Ces ruptures correspondent à une augmentation des précipitations au cours de la décennie 60 qui a été particulièrement humide dans notre zone d'étude.

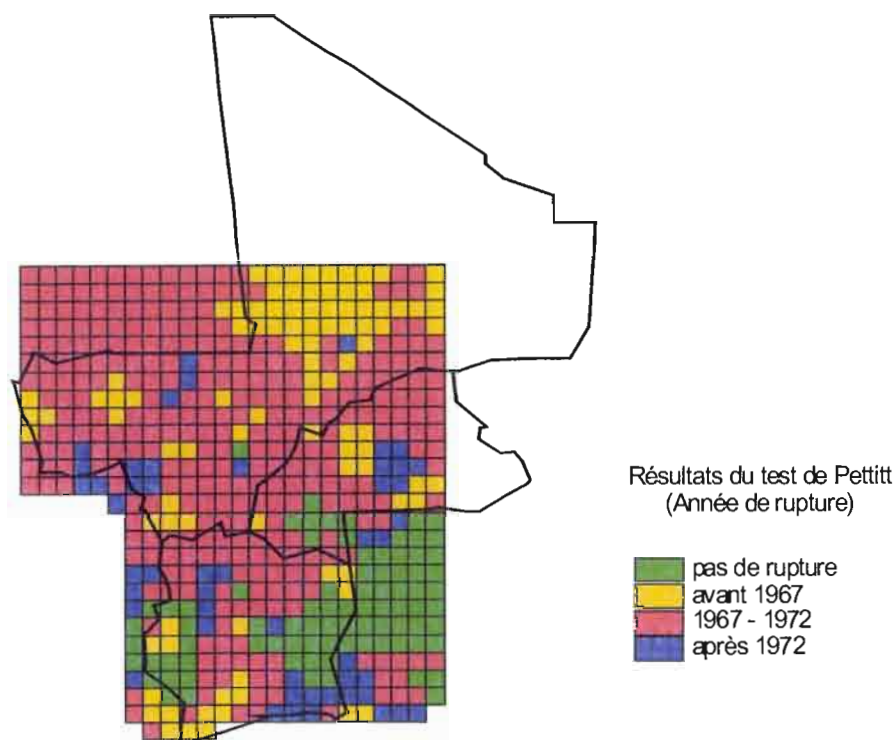


figure 3.4 : Cartographie des dates de rupture des séries temporelles de précipitations annuelles (période de référence: 1950 à 1995) (fichier de pluie CRU-IRD)

3.2.1.3 Croisement des résultats du test de rupture avec les données de pluie et de végétation

En croisant la carte des résultats du test de détection de ruptures des fichiers de pluie annuelle CRU-IRD (figure 3.4) et la carte des isohyètes annuelles sur la période 1950-1995 de ces mêmes fichiers de pluie, on doit pouvoir faire apparaître la dynamique spatiale (quelles sont les zones de pluviométrie annuelle les plus touchées?) et la dynamique temporelle (à quel moment?) du phénomène de diminution de la pluviométrie annuelle (figure 3.5).

On constate que des ruptures ont été détectées sur toutes les mailles des zones à faible pluviométrie (pluies annuelles inférieures à 800 mm/an). A l'inverse, on peut rencontrer des mailles des zones comprises entre 800 mm et 1800 mm où aucune rupture n'a été détecté au niveau de confiance choisi.

Les ruptures détectées se situent majoritairement entre 1967 et 1972 et ce, pour toutes les zones de pluie.

La figure 3.5 laisse entrevoir une certaine dynamique temporelle du phénomène. Il semble que les zones à plus faible pluviométrie ont été touchées avant les zones à plus forte pluviométrie :

- les dates de rupture se situent majoritairement avant 1972 pour les mailles des zones de pluie inférieure à 1200 mm et après 1967 pour les mailles des zones de pluie supérieure à 1200 mm;
- les mailles de la zone sahélienne (classe 200-500 mm) n'ont pas de rupture au delà de 1972.

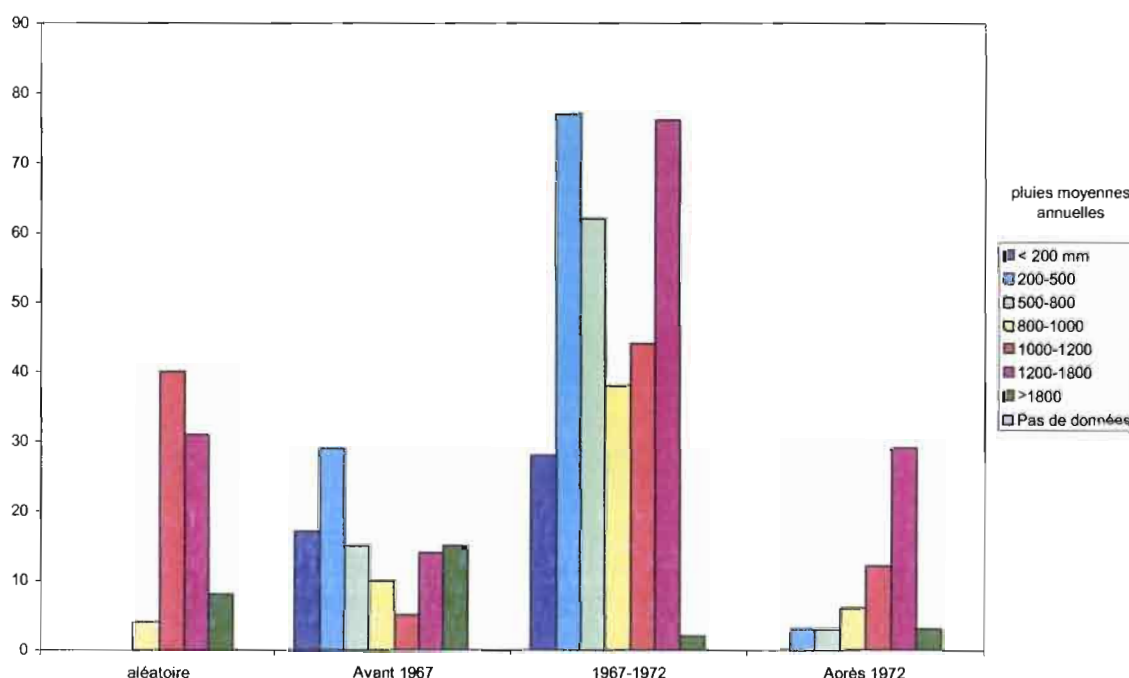


figure 3.5 : Dynamique spatiale (zone délimitée par les isohyètes) et temporelle du phénomène de diminution de la pluviométrie annuelle (fichier CRU-IRD)

On peut peut-être mieux visualiser la dynamique spatiale du phénomène si on inverse les axes de la figure 3.5. Nous avons choisi, cette fois-ci, non plus de représenter les zones de pluie mais les zones de végétation d'après la carte du GED (figure 3.6) puisqu'elles sont très fortement corrélées entre elles.

On obtient une distribution des classes de rupture selon le test de Pettitt au seuil de confiance de 90% pour les différents types de végétation. Le résultat montre que pour 3 type de

végétation (savane humide, savane sèche et désert), la classe des dates de rupture comprises entre 1967 et 1972 représente la plus forte proportion.

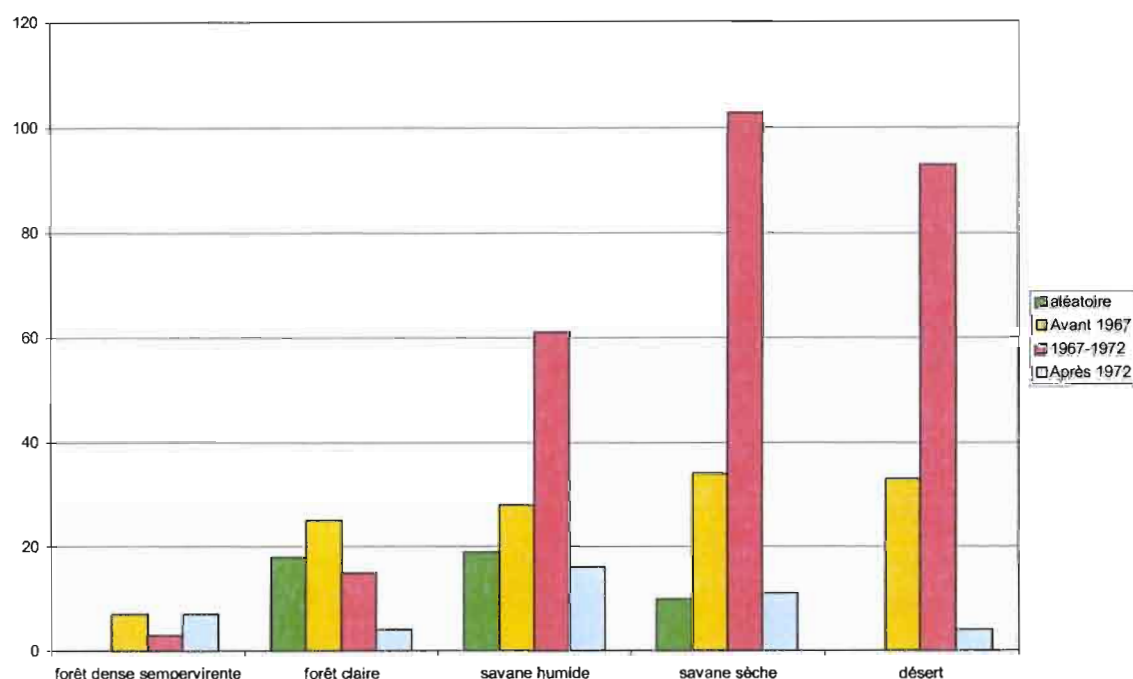


figure 3.6 : Dynamique spatiale (zone de végétation) et temporelle du phénomène de diminution de la pluviométrie annuelle (fichier CRU-IRD)

Cette analyse vient confirmer deux caractéristiques essentielles de la récente sécheresse :

- sa durée : la plage de date de rupture comprise entre 1967 et 1972 se retrouve majoritairement au sein de toutes les classes de pluies et tous les types de végétation. Quelques ruptures précoces comprises entre 1965 et 1967 se retrouvent dans la zone sahélienne.
- son extension : la sécheresse a affecté toutes les classes de pluie et tous les types de végétation.

3.2.1.4 Calcul des indices

Il est souhaitable pour le calcul et la régionalisation des indices pluviométriques, d'avoir le même nombre de stations tout au long de la période de référence, afin de conserver à l'indice une homogénéité statistique (Moron, 1994). Le calcul des indices pluviométriques a donc été abordé en considérant 109 stations, parmi les 140 que nous avons préalablement

sélectionnées, sur la période de référence 1950-1997. Les 31 autres stations correspondent à des stations pour lesquelles une mise à jour sur la période récente 1990-1997 n'a pu être effectuée qu'imparfaitement.

Sur la figure 3.7 nous avons reporté le pourcentage de stations déficitaires (indice pluviométrique négatif) en fonction du temps :

- on remarque une tendance à l'augmentation des postes déficitaires entre 1950 et 1967 . Notons toutefois que durant cette période moins de 50% des stations étudiées connaissent un déficit ;
- la tendance s'accélère entre 1967 et 1974 ;
- la tendance se stabilise entre 1974 et 1992 ;
- le maximum des postes déficitaires est observé au cours des années 1983, ce qui souligne la particularité des conditions de sécheresse de cette année;
- à aucun moment, les 109 postes n'ont eu un indice de même signe.

Le phénomène s'est donc bien installé assez brutalement à la fin des années 1960 pour continuer encore en 1997 même si on a pu croire à une reprise "normale" de la pluviométrie en 1994. Ce phénomène n'a pas touché tous les postes donc toute notre zone d'étude comme nous le verrons après.

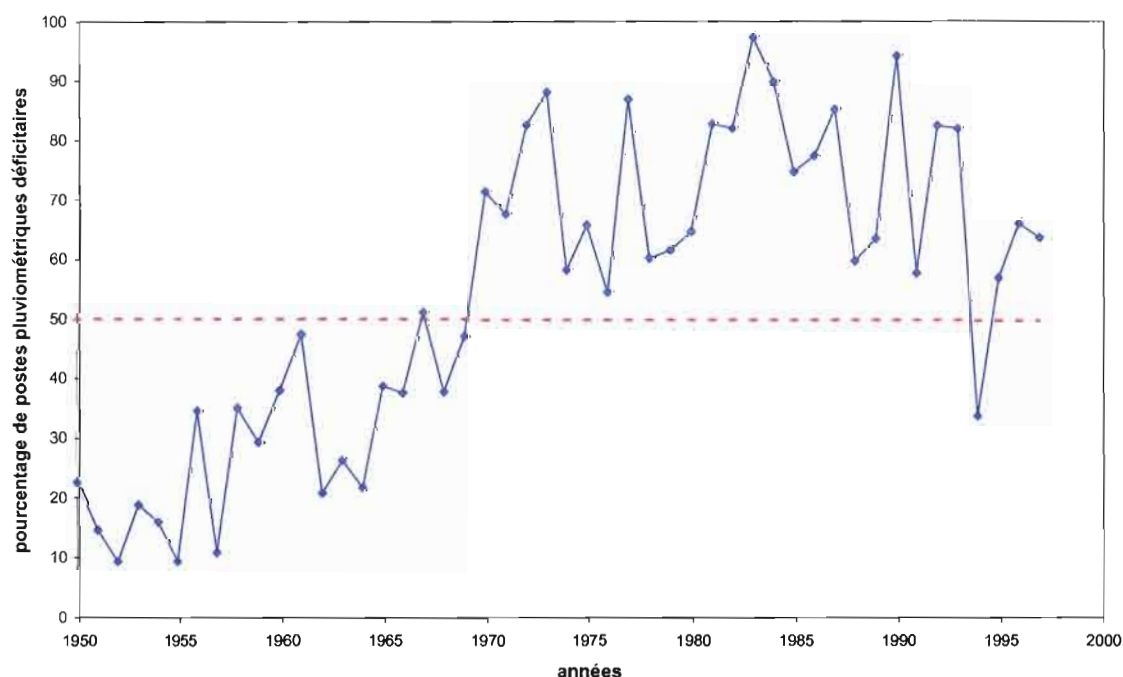


figure 3.7 : Pourcentage de stations déficitaires par rapport à la moyenne interannuelle calculée sur la période 1950-1997

Le calcul des indices pluviométriques moyennés sur les périodes 1950-1959, 1960-1969, 1970-1979, 1980-1989, 1990-1997 confirme les résultats précédents :

- Au cours de la décennie 1950, seulement six stations des 109 stations sont déficitaires.
- Pendant la décennie 1960, on n'observe que 10 stations parmi les 109 présentant des déficits.
- Au cours de la décennie 70, on note une forte augmentation de postes déficitaires (103 sur 109). 6 postes sont légèrement excédentaires, un est situé au Burkina Faso (Nasso) et les 5 autres en Côte d'Ivoire (Adiaké, Boundiali, Oumé, Touleupleu, Odienné). A Oumé, on a calculé un indice supérieur à 0.1 alors que sur les 5 autres, l'indice est inférieur à 0.1.
- Durant la décennie 80, la situation déficitaire généralisée de la précédente décennie se maintient puisque la quasi-totalité des postes sont déficitaires (107 sur 109). Les 2 postes faiblement excédentaires sont situés en Côte d'Ivoire.
- Sur la période 1990-1997, 95 postes sur les 109 présentent un déficit pluviométrique annuel. La sécheresse semble avoir affecté moins de postes durant cette dernière période par rapport aux deux décennies précédentes 80 et 70. Globalement, les conditions de péjoration des pluies annuelles semblent cependant maintenues durant la période 1990-1997.

La cartographie des indices pluviométriques calculés sur la période de référence 1950-1997 (figure 3.8) illustre de manière notable que les décennies 50 et 60 apparaissent comme des périodes humides à l'opposé des décennies 70 et 80 et de la période 1990-1997, qui s'affichent comme des périodes sèches.

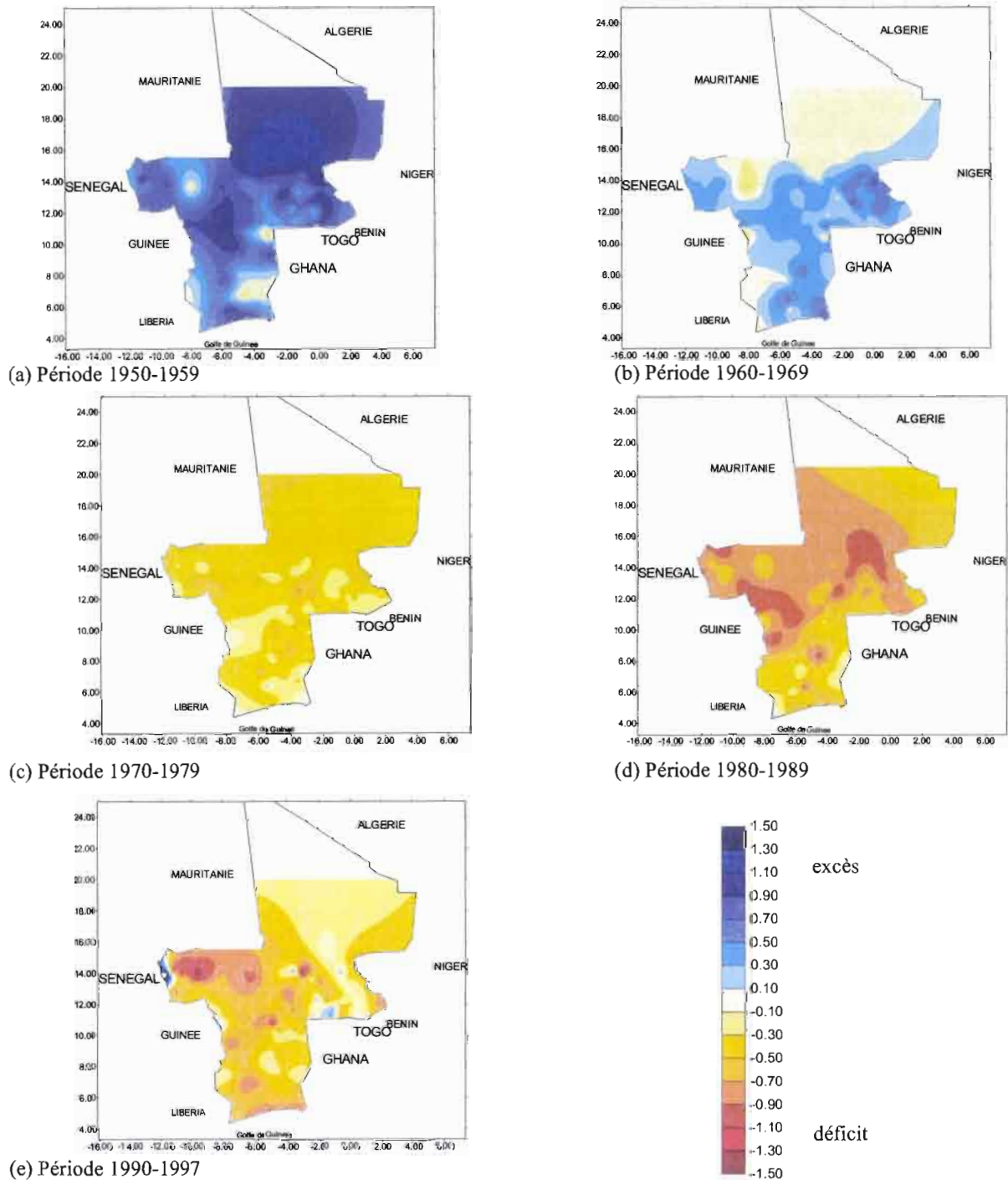


figure 3.8 : Indices pluviométriques interannuels par rapport à la période 1950-1997

3.2.1.5 Calcul des déficits

Nous avons décidé de calculer un déficit de part et d'autre de 1970 pour l'ensemble de nos 140 postes. La cartographie des déficits pluviométriques annuels montre que, globalement sur

toute la zone étudiée, les pluies moyennes annuelles de la période 1970-1997 sont déficitaires par rapport aux pluies moyennes calculées sur l'ensemble de la période 1950-1997 (figure 3.9). Des déficits les plus importants, de l'ordre de 30 à 40%, s'observent au nord du Mali (au-dessus de la latitude 16°N) qui est une zone aride mais nous sommes conscients d'être en limite de notre zone d'étude. En dessous de cette zone, les déficits diminuent mais gardent d'une manière générale des proportions importantes de l'ordre de 20 à 30% pour la bande située entre 12°N et 15-16°N, et 10 à 20% pour la zone située en dessous de 12°N. Quelques poches situées à l'ouest et à l'est en Côte d'Ivoire présentent cependant les plus faibles déficits de l'ordre de 0 à 10%.

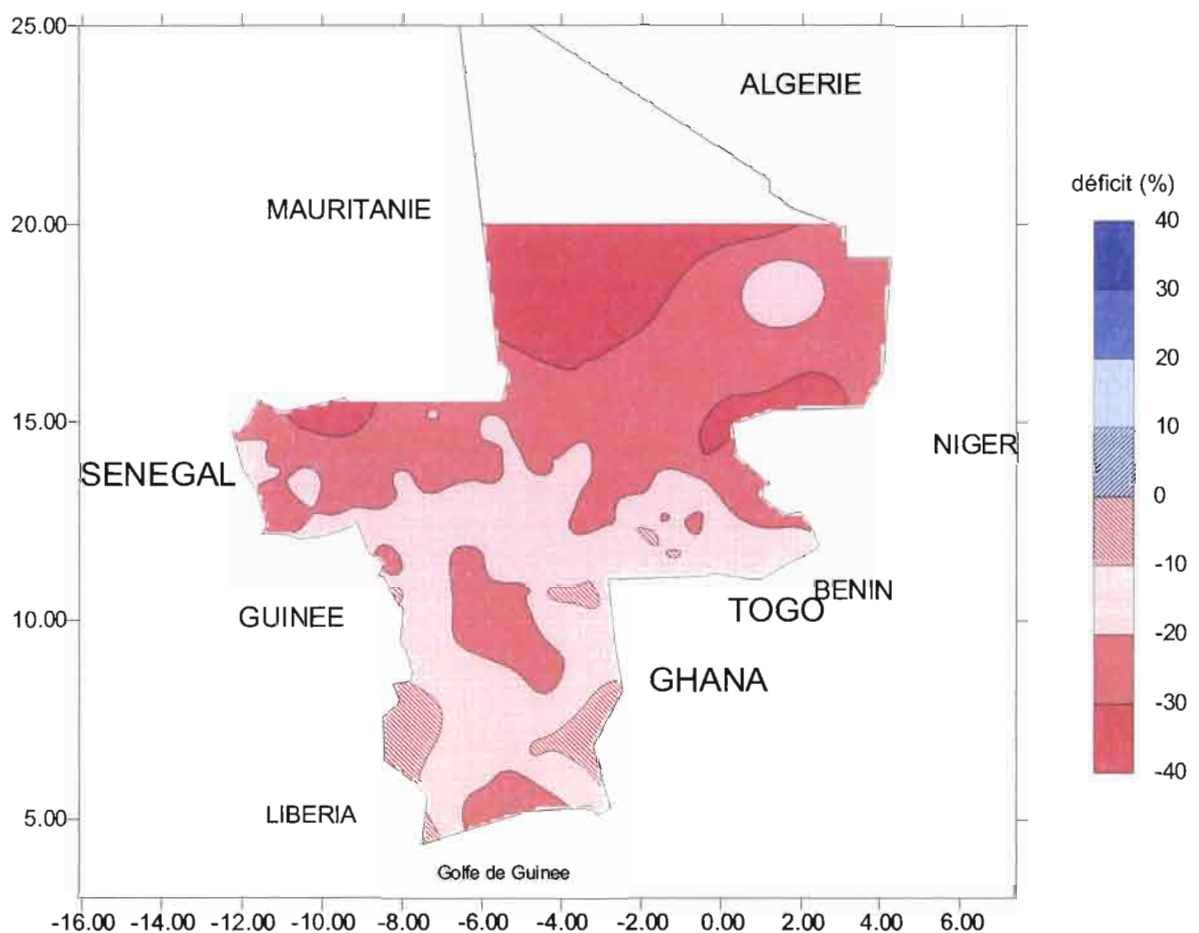


figure 3.9 : Variation relative des pluviométries annuelles de la période 1970-1997 par rapport à la période 1950-1969

En croisant les grilles de déficits pluviométriques annuels et de couverture de végétation (carte du GED), on peut mieux voir quelles sont les zones de végétation particulièrement déficitaires.

La figure 3.10 montre que :

- la classe des déficits les plus importants (40% à 30%) ne concerne que la zone de steppe.
- les déficits compris entre 30% et 20% concernent peu les zones de forêt. Cette classe de déficit concerne plus la zone de végétation désertique que les zones de savane humide et sèche.
- des déficits compris entre 20% et 10% touchent l'ensemble des types de végétation. La zone de savane humide est la plus touchée. Cette classe de déficits est prépondérante en zones de forêt.

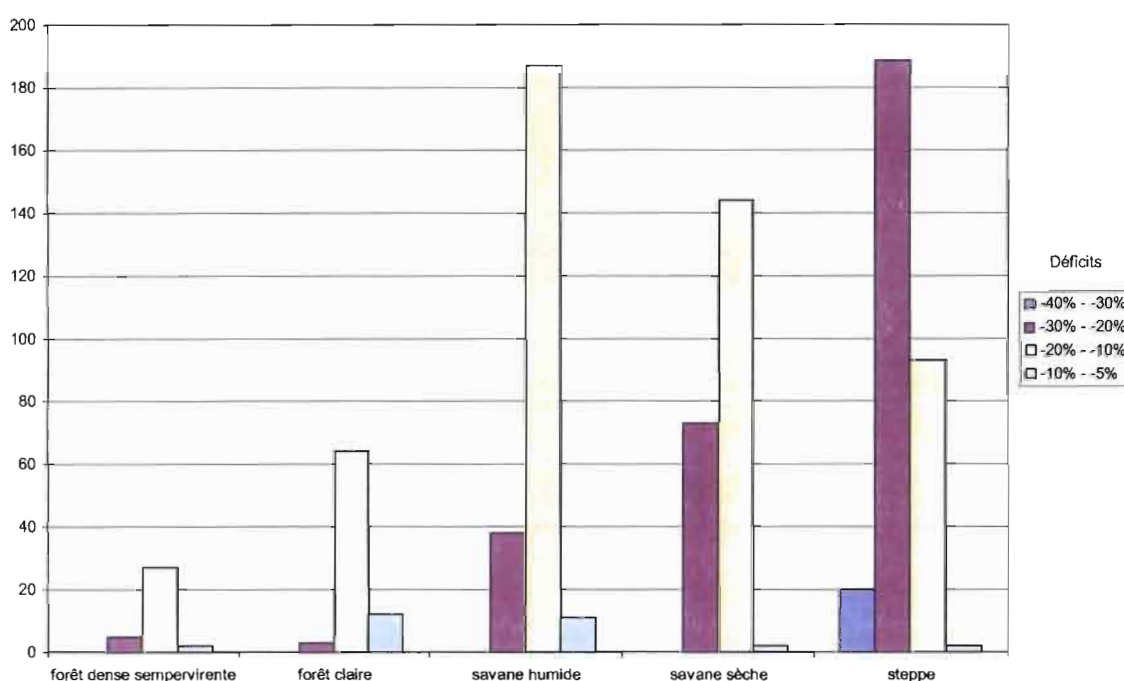


figure 3.10 : Intensité du caractère déficitaire des zones de végétation

3.2.1.6 Conclusion partielle

A partir des données dont nous disposons, nous avons pu mieux quantifier les déficits pluviométriques que l'on peut rencontrer sur notre zone d'étude. A partir des données pluviométriques ponctuelles des 140 stations sélectionnées, nous avons effectué des tests

statistiques et cartographié des indices et des déficits de pluie; à partir de données spatialisées, les grilles de données pluie, nous avons effectué également des tests statistiques. Quels que soient les données utilisées et les traitements réalisés, l'analyse des résultats aboutit au même constat, une baisse du cumul annuel des pluies depuis 1970 plus ou moins prononcée.

Les séries de précipitations annuelles analysées présentent globalement un caractère non aléatoire qui est confirmé par l'application de tests de rupture et par les différentes cartographies réalisées. Par rapport à la période de référence (1950-1997), les décennies 1950-1959 et 1960-1969 sont bien arrosées ; les décennies 1970-1979 et 1980-1989 ainsi que la période 1990-1997 connaissent une pluviométrie bien moindre.

Les résultats de cette analyse basée uniquement sur la période allant de 1950 à 1997 méritent d'être complétés par une analyse similaire sur une période la plus longue possible à partir de quelques séries pluviométriques choisies parmi les 140 postes pluviométriques.

3.2.2 L'évolution pluviométrique au cours du XXème siècle

Sur la figure 3.11 sont localisés les 74 postes pluviométriques retenus. Les données des séries les plus longues remontent aux années 1900-1910.

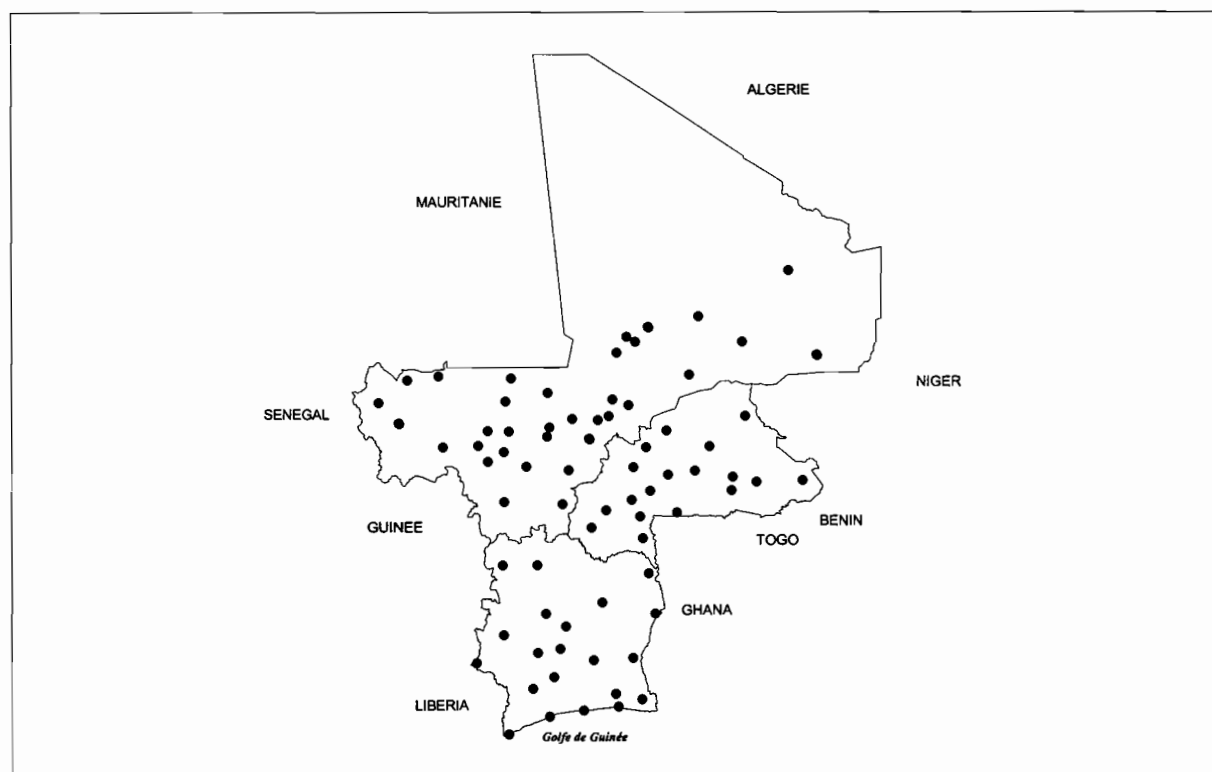


figure 3.11 : Localisation des postes pluviométriques à longue durée d'observation.

3.2.2.1 Analyse du caractère aléatoire des séries

Sur les 74 séries de pluies annuelles analysées, 60 présentent un caractère non aléatoire au seuil de 95% selon le test de corrélation sur le rang et le test de Spearman . Parmi les 14 séries qui sont aléatoires, 10 concernent des postes pluviométriques en Côte d'Ivoire situés pour la plupart à l'est du pays et en bordure du golfe de Guinée.

3.2.2.2 Examen de l'homogénéité des séries

Nous avons appliqué le test de Pettitt et les résultats ont été cartographiés sur la figure 3.12. On note toujours une concentration des dates de rupture entre 1967 et 1972 : 36 séries parmi les 60 séries non aléatoires présentent une rupture située entre 1967 et 1972. Les séries pour lesquelles aucune rupture n'a été détectée se situent pour la plupart en Côte d'Ivoire à l'est du pays et en bordure du golfe de Guinée.

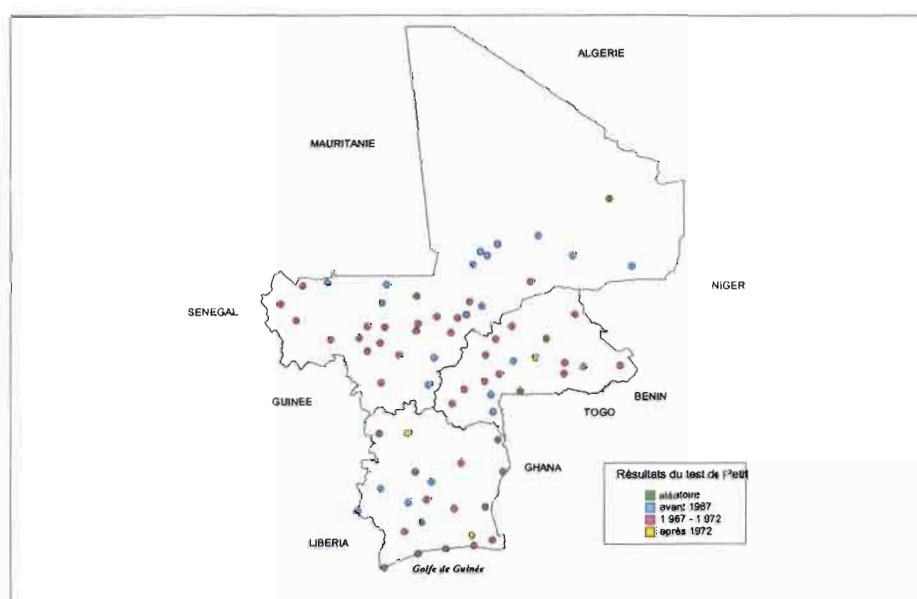


figure 3.12 : Dates de rupture des séries temporelles de précipitations annuelles

3.2.2.3 Calcul des indices

L'évolution des indices pluviométriques calculés par rapport à la moyenne 1920-1997 pour les 26 stations communes à cette période de référence nous permet d'apprécier les variations pluviométriques depuis le début du siècle (Tableau 3.1). On note que les décennies 20 et 30

ainsi que les décennies 50 et 60 sont des périodes globalement humides. La décennie 50 apparaît comme la plus arrosée. Les décennies 40, 70, 80 et 90 (incomplète) sont globalement sèches. Les décennies 70 et 80 ainsi que la période 1990-1997 (à une exception près) se révèlent les plus sèches avec des conditions déficitaires généralisées. Hormis les conditions des années 1910 que nous n'avons pas pu traiter à cause d'un manque d'informations suffisamment denses sur cette période, on retrouve bien à travers cette analyse les grands traits des variations pluviométriques du XX^{ème} siècle déjà présentés par d'autres auteurs (Sircoulon, 1976; Nicholson, 1993; Delattre, 1996; Paturel et al., 1997b).

Tableau 3.1. Évolution des indices pluviométriques calculés par rapport à la période de référence 1920-1997.

Nom station	1920-1929	1930-1939	1940-1949	1950-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1997
Banfora	0.74	0.67	-0.48	0.58	0.43	-0.35	-0.55	-1.28
Bobo-Dioulasso	-0.01	0.45	0.02	0.79	0.31	-0.35	-0.75	-0.41
Boromo	-0.32	0.92	0.19	0.34	0.01	-0.27	-0.60	-0.42
Dédougou	0.55	0.70	0.42	0.41	0.49	-0.79	-1.14	-0.66
Diébougou	0.69	0.67	-0.20	-0.17	0.32	-0.39	-0.59	-0.32
Dori	-0.31	-0.03	-0.02	1.01	0.79	-0.39	-0.75	-0.42
Fada-N'Gourma	-0.38	-0.01	-0.67	1.15	0.71	-0.21	-0.69	0.11
Gaoua	0.79	-0.03	-0.24	-0.20	-0.27	-0.54	-0.57	-0.44
Kaya	0.02	0.07	0.07	0.47	0.40	-0.14	-0.60	-0.59
Koudougou	0.53	0.07	-0.14	0.90	0.24	-0.76	-0.69	-0.32
Koupéla	0.09	0.32	0.10	0.32	0.44	-0.26	-0.94	-0.02
Ouagadougou	0.81	0.32	0.00	0.17	0.19	-0.18	-0.91	-1.26
Ouahigouya	0.12	0.44	0.21	0.65	0.29	-0.64	-1.05	-0.03
Tougan	-0.02	0.94	-0.21	0.48	0.41	-0.52	-0.89	-0.48
Abengourou	0.07	0.49	-0.43	-0.15	0.47	-0.36	-0.01	-0.54
Daloa	0.27	0.08	-0.42	1.06	0.17	-0.47	-0.48	-0.36
Dabakala	0.58	0.33	0.06	0.35	0.57	-0.60	-1.03	-0.49
Daloa	-0.01	0.56	-0.12	0.66	0.22	-0.32	-0.58	-0.92
Dimbokro	0.41	0.67	-0.27	-0.21	0.47	-0.28	-0.42	-0.40
Man	0.14	0.55	0.30	0.26	-0.08	-0.55	-0.36	-0.21
Odienné	0.73	-0.11	0.38	0.53	0.27	0.10	-1.07	-0.85
Bougouni	-0.42	0.81	-0.09	0.48	0.62	-0.39	-0.91	-0.31
Mopti	0.30	0.20	-0.19	1.22	-0.06	-0.44	-0.74	-0.46
Nioro du Sahel	1.26	0.50	-0.27	0.46	-0.05	-0.61	-0.77	-0.71
San	0.25	-0.04	-0.15	0.82	0.19	-0.24	-0.84	-0.44

Il ressort de cette étude sur le XX^{ème} siècle que des périodes de sécheresse et d'abondance pluviométrique alternent depuis le début du siècle. Cependant, la sécheresse actuelle est la plus sévère observée depuis le début du siècle et dure depuis 1970 environ. Ces effets ne se font cependant pas ressentir de la même façon sur notre zone d'étude. Le nord-est et une partie

de la bande littorale de la Côte d'Ivoire sont quelque peu épargnés par ce phénomène de diminution de la pluviométrie annuelle même si ces effets se font quand même ressentir.

3.2.3 Conclusion partielle

Sur la base des informations disponibles, nous nous sommes attachés à faire le point de l'évolution du climat à partir de séries chronologiques de pluies annuelles.

L'étude des séries les plus longues remontant dans le meilleur des cas, au début du siècle montre une succession de périodes sèches et humides sans pour autant qu'une éventuelle évolution cyclique puisse être dégagée.

L'analyse fine du caractère aléatoire des séries de pluies annuelles depuis 1950 montre que dans bon nombre des cas, les séries de pluies annuelles présentent une tendance à la baisse. L'absence de rupture au sein des séries est rejetée par le test de Pettitt qui révèle des dates de rupture se situant principalement sur la période 1967-1972. Le calcul et la cartographie des indices pluviométriques annuels nous confirment que les décennies 1950-1959 et 1960-1969 sont les plus arrosées. Par contre, l'ampleur des déficits pluviométriques depuis la fin des années 60 est remarquable sur l'ensemble de notre zone d'étude, avec des conditions de déficits généralisés sur les décennies 1970-1979 et 1980-1989 et sur la période 1990-1997. L'intensité de la variabilité est mesurée par le calcul des déficits pluviométriques qui varient entre 10% et 40%.

3.3 CARACTERISATION D'UNE VARIABILITE DES PLUIES MENSUELLES

Nous nous proposons d'aborder dans cette section, l'étude de la variabilité pluviométrique au pas de temps mensuel afin de compléter les observations faites précédemment.

Nous avons appliqué les mêmes méthodes que précédemment.

L'analyse des résultats au pas de temps mensuel s'effectuera en considérant un découpage de l'année en quatre grandes périodes respectant les variations saisonnières de la zone d'étude:

- décembre – février : période de la grande saison sèche guinéenne
- mars – juin : période de la première saison des pluies guinéennes
- juillet – septembre : période de la saison des pluies soudanaises et de la "petite saison sèche guinéenne"
- octobre – novembre : période de la seconde saison des pluies guinéennes

3.3.1 Mois de juillet à septembre : saison des pluies en zone de climat soudanien et saison sèche en zone guinéenne

3.3.1.1 *Mois de Juillet*

Les séries chronologiques des pluies du mois de juillet du Burkina Faso et du Mali sont non-aléatoires. Mises à part quelques ruptures précoces qui s'observent à la fin des années 1950 et au début des années 1960, les dates de ruptures identifiées sont situées aux alentours de 1970.

3.3.1.2 *Mois d'Août*

Durant le mois d'août, les tests montrent un accroissement des stations présentant un caractère non aléatoire et/ou une rupture. Le caractère non aléatoire est dû à une diminution des pluies du mois d'août pour les stations de cette région aux alentours de 1970. Les ruptures concernent les stations situées au dessus de la latitude 8°N, c'est à dire principalement les stations de la zone soudanaise.

La cartographie des déficits pluviométriques des années postérieures à 1970 (figure 3.13) confirme les résultats des tests de tendances. D'importants déficits pluviométriques caractérisent les 27 dernières années dans la région soudanaise. Par contre la zone guinéenne connaît un accroissement des précipitations du mois d'août puisque qu'on enregistre des excédents pluviométriques dans le centre et notamment le sud-ouest de la Côte d'Ivoire. Dans le nord-est de la Côte d'Ivoire on observe également des excédents pluviométriques.

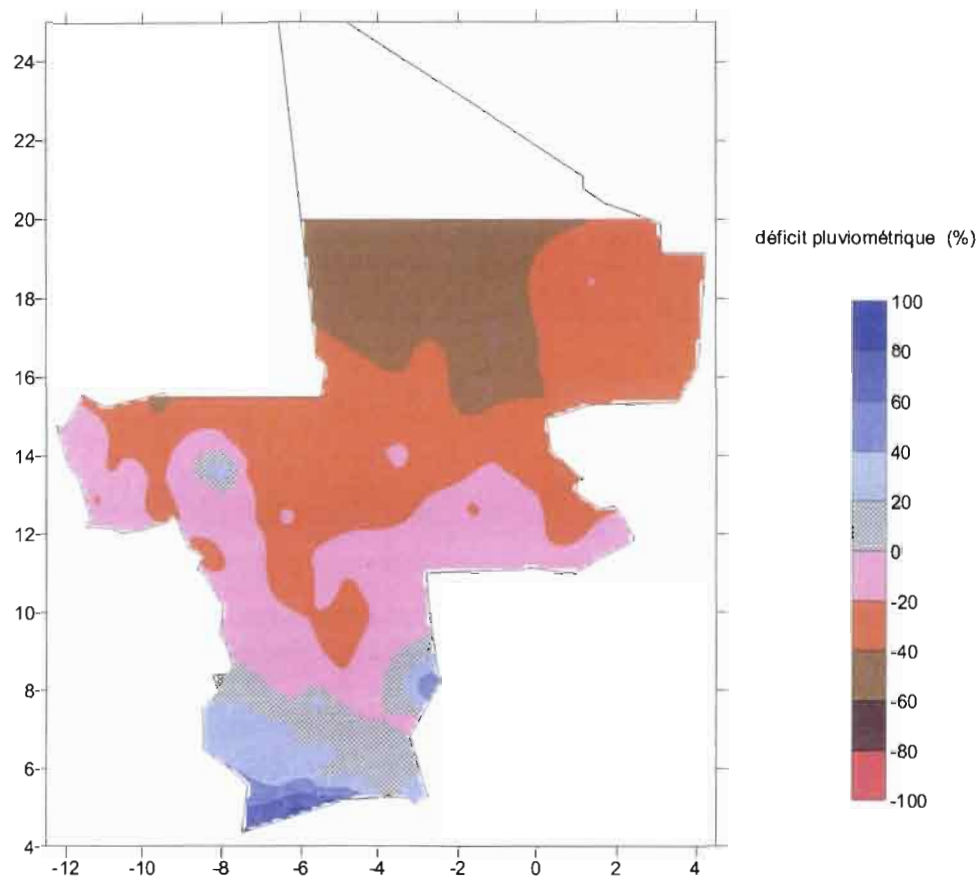


figure 3.13 : Variation relative de la pluviométrie du mois d'août

3.3.1.3 Mois de Septembre

106 stations sur les 140 étudiées présentent un caractère non aléatoire et des ruptures ont été détectées sur 92 d'entre elles. Le caractère non aléatoire des précipitations semble donc se généraliser sur toute la zone d'étude pendant le mois de septembre. Ce qui se confirme avec le calcul et la cartographie (figure 3.14) des déficits pluviométriques qui montrent que globalement, toute la zone d'étude apparaît déficitaire au cours de la période 1970-1997.

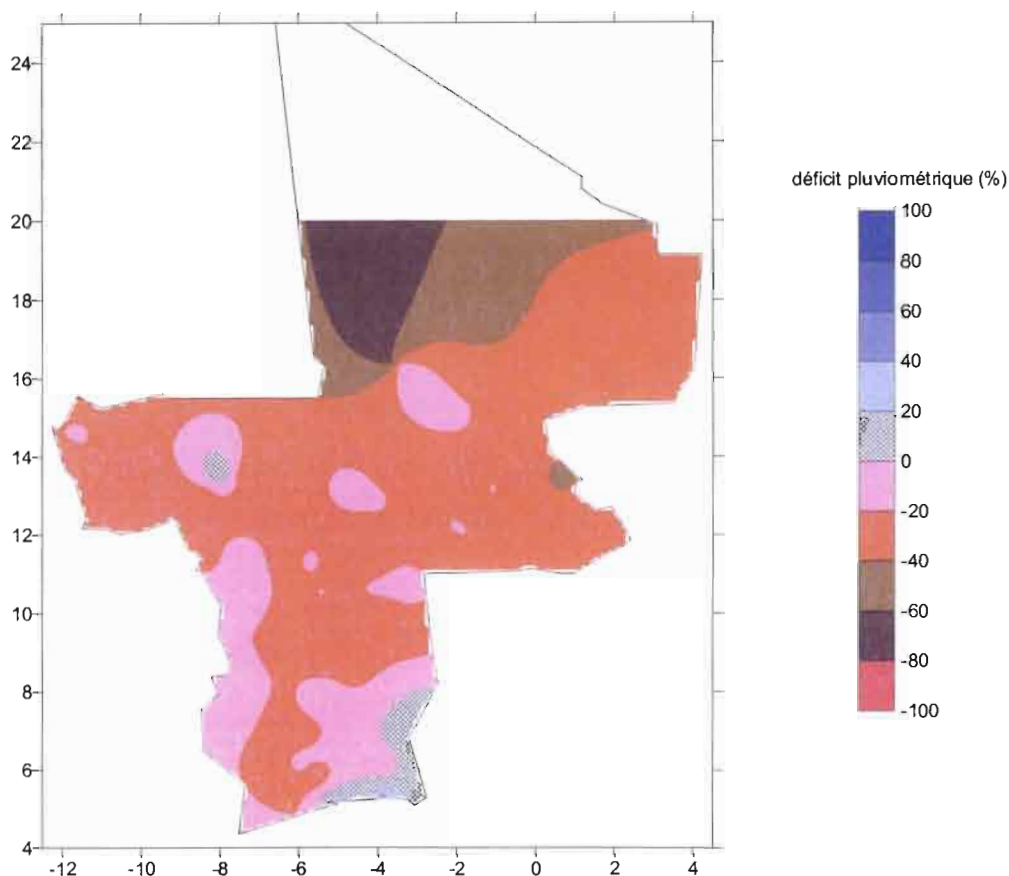


figure 3.14 : Variation relative de la pluviométrie du mois de septembre

3.3.2 Octobre –Novembre : Mois de la petite saison des pluies en zone guinéenne

Les séries des mois d’octobre et de novembre présentent des résultats similaires.

Très peu de postes pluviométriques présentent un caractère non aléatoire. Le test de Pettitt détecte 29 ruptures sur les 140 stations analysées. Ces ruptures se situent pour la plupart d'entre elles entre 1967 et 1969.

3.3.3 Mois de Décembre, Janvier et Février : petite saison sèche en zone guinéenne et saison sèche en zone soudanaise

Durant les mois de décembre, janvier et février, les pluies sont inexistantes en zone soudanaise, faibles dans la zone guinéenne avec des valeurs inférieures à 5 mm en moyenne dans la moitié nord de la Côte d'Ivoire.

Sur la période 1950-1997, la pluviométrie a baissé aux alentours de 1970. Plus de la moitié des stations analysées présentent un caractère non aléatoire et le test de Pettitt révèle des dates de rupture situées entre 1964 et 1972.

3.3.4 Les mois de mars à juin : Mois de la grande saison des pluies en zone guinéenne

Les pluies commencent à être plus fréquentes en commençant par la Côte d'Ivoire. Sur l'ensemble des postes traités, peu de séries présentent un caractère non aléatoire (15% environ) et très peu de ruptures ont été détectées sur les séries chronologiques des pluies du mois de mars.

Des résultats similaires s'observent pendant les mois d'avril et mai.

En juin, le nombre de postes pluviométriques présentant une rupture augmente (environ 40%). Les déficits pluviométriques montrent une baisse généralisée des précipitations du mois de juin sur la zone d'étude durant la période 1970 à nos jours.

3.3.5 Conclusion partielle

L'analyse des résultats de l'étude de la variabilité des pluies mensuelles montre que la pluviométrie mensuelle a notablement changé au cours des dernières décennies sur la zone d'étude. Cependant, le phénomène de sécheresse touche de manières différentes les mois, même si, globalement, à l'exception du mois d'août, sur chacun des mois la pluviométrie a diminué.

Cette baisse de la pluviométrie a, bien entendu, des conséquences importantes sur les ressources en eau de la zone d'étude. L'étude des modifications intervenues au sein des régimes hydrologiques, permettra d'apporter certaines réponses quant à l'incidence de ce déficit pluviométrique sur la disponibilité des ressources en eau.

3.4 CARACTERISATION D'UNE VARIABILITE DES ECOULEMENTS

L'écoulement annuel apparaît dans la littérature comme une variable de choix pour l'étude de la variabilité climatique. Cette considération suppose que les variations des débits des cours d'eau intègrent les variations spatiales des régimes pluviométriques, ce qui mérite d'être vérifié. C'est ainsi que nous nous sommes intéressés dans cette partie à examiner l'évolution des modules de certains cours d'eau de la zone d'étude. Les mêmes méthodes statistiques que précédemment sont employées.

3.4.1 L'évolution des débits moyens annuels

C'est à partir de 1950 que l'on assiste véritablement à l'implantation de nombreuses stations de mesure des débits de cours d'eau dans la zone d'étude. Malheureusement, malgré l'accroissement du nombre de stations hydrométriques, les données comportent d'une manière générale beaucoup de lacunes. Si nous nous intéressons aux stations pour lesquelles nous pouvons recueillir des informations consistantes sur une période assez longue, nous sommes conduits à ne retenir que 40 stations.

L'analyse statistique montre que pour 40 stations étudiées 36 présentent des séries de modules qui sont considérées comme non aléatoires. Ce résultat est confirmé par des tendances (linéaires ou exponentielles) significatives au seuil de confiance de 95%. Les tendances déduites traduisent toutes une baisse des écoulements sur la période de référence.

La quasi-totalité des dates de rupture détectées par le test de Pettitt (Tableau 3.2) se situe entre 1967 et 1972. Seuls les séries des débits moyens annuels de M'Bessé (en Côte d'Ivoire) et de Diarabakoko (au Burkina Faso) se situent plus tard en 1976. On constate donc que les dates de ruptures détectées sur les séries de débits moyens annuels sont moins dispersées que celles obtenues sur les séries de pluies annuelles.

Cela nous a poussé à estimer, pour chacune des stations, le déficit des débits moyens annuels de part et d'autre de la date de rupture détectée ou de part et d'autre de 1970 si aucune rupture n'a été détectée (Tableau 3.2).

L'examen des valeurs prises par le déficit ainsi calculé est instructif. L'écoulement est très déficitaire au cours de la sécheresse actuelle. La moyenne des débits moyens annuels calculée sur la période récente de 1970 à nos jours, présente des déficits de 23% à 69% par rapport à la moyenne calculée sur la période antérieure à 1970. Il faut noter aussi que les stations qui, statistiquement au sens du test de Pettitt, n'ont pas connu de changement brusque de moyenne, connaissent quand même des déficits d'écoulement conséquents.

**Tableau 3.2 Résultats des tests de tendance et calcul des déficits sur les modules annuels
de 40 stations au Burkina Faso, en Côte d'Ivoire et au Mali**

Pays	Nom Poste	Période	Test de tendance	Date de rupture	Deficit (%)
Burkina Faso	Yendere	1956-1993	Non aléatoire	1971	-53
	Dapola	1952-1994	Non aléatoire	1971	-44
	Samandeni	1956-1994	Non aléatoire	1970	-55
Côte d'Ivoire	Bada	1962-1996	Non aléatoire	1971	-53
	Mbrimbo	1953-1996	Non aléatoire	1970	-61
	Tiassale	1954-1996	Non aléatoire	1970	-59
	Rte Beoumi-Seguela	1954-1994	Non aléatoire	1969	-50
	Bouafle	1954-1996	Non aléatoire	1971	-51
	Bocanda	1955-1996	aléatoire	aléatoire	-34
	Dimbokro	1955-1995	Non aléatoire	1968	-49
	Fetekro	1960-1995	aléatoire	aléatoire	-48
	Mbahiakro	1954-1996	Non aléatoire	1971	-47
	Nzianoa	1954-1995	Non aléatoire	1968	-48
	Akakomoekro	1956-1995	Non aléatoire	1971	-47
	Aniassue Pont	1954-1996	Non aléatoire	1971	-51
	Mbasso	1955-1996	Non aléatoire	1971	-45
	Serebou	1954-1996	Non aléatoire	1970	-48
	Iradougou	1962-1996	Non aléatoire	1971	-44
	Semien	1954-1996	Non aléatoire	1969	-34
	Soubre	1954-1996	Non aléatoire	1971	-41
	Bafingdala	1962-1996	aléatoire	aléatoire	-23
	Nibehibe	1962-1996	aléatoire	aléatoire	-44
	Mbesse	1959-1995	Non aléatoire	1976	-60
	Tai	1955-1996	Non aléatoire	1970	-32
Mali	Dire	1950-1996	Non aléatoire	1970	-42
	Koulikoro	1950-1996	Non aléatoire	1969	-40
	Douna	1950-1996	Non aléatoire	1971	-69
	Galougo	1950-1989	Non aléatoire	1969	-59
	Kayes	1950-1989	Non aléatoire	1969	-58
	Daka Saidou	1950-1989	Non aléatoire	1969	-42
	Dibia	1950-1989	Non aléatoire	1969	-48
	Bafing Makana	1950-1989	Non aléatoire	1970	-48
	Soukoutali	1950-1989	Non aléatoire	1969	-41
	Oualia	1950-1989	Non aléatoire	1971	-65
	Toukoto	1950-1989	Non aléatoire	1971	-69
	Fadougou	1950-1989	Non aléatoire	1967	-58
	Gourbassy	1950-1989	Non aléatoire	1967	-62
	Siramakana	1950-1989	Non aléatoire	1971	-68

Nous avons cartographié les résultats du calcul des déficits en adoptant la méthode suivante : les déficits sont calculés pour les différentes stations. Les valeurs ainsi calculées sont affectées, soit à la surface du bassin contrôlé par la station jusqu'à la station immédiatement la plus amont dans le cas de bassins emboîtés, soit à la totalité du bassin dans le cas d'une tête de bassin.

La cartographie des valeurs des déficits sur la figure 3.15, illustre bien l'importante diminution globale des écoulements observée sur la zone d'étude durant ces dernières décennies. Comparés aux déficits pluviométriques de la zone, les déficits des débits moyens annuels sont beaucoup plus importants puisqu'ils sont supérieurs à 40% dans la plupart des cas. Il semble donc, qu'il existe un effet amplificateur au niveau du débit, signal lissé et intégrateur de nombreuses caractéristiques des bassins versants : ruissellement, infiltration, type de végétation, présence et importance de nappes phréatiques, etc.

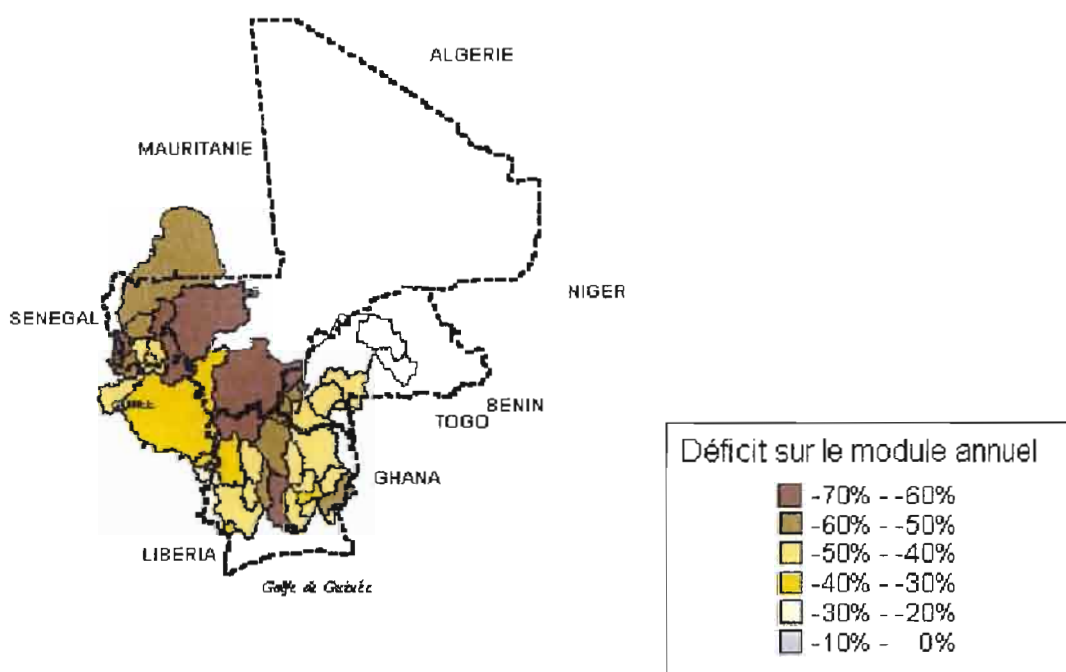


figure 3.15 : Carte des déficits de débits moyens annuels

3.4.2 L'évolution des débits caractéristiques des hautes-eaux

On a procédé dans cette section, à une analyse de la variabilité de quelques variables hydrologiques les plus courantes qui caractérisent les hautes eaux. Ces variables sont calculées à partir des débits journaliers en se référant à l'année civile. Les variables caractéristiques choisies pour cette étude sont les maximums sur chaque année du débit moyen de n jours consécutifs (VCX_n). Pour chaque série étudiée, les valeurs de $n=1, 3, 6, 10$ et 30 jours sont utilisées.

La modification des caractéristiques des hautes-eaux est mise en évidence dans le Tableau 3.3 en appliquant le test de Pettitt pour un seuil de confiance égal à 90%. Les déficits sont évalués pour chacune des stations de part et d'autre de la rupture détectée et de part et d'autre de 1970 si aucune rupture n'a été mise en évidence. Les résultats des tests portant sur l'analyse du caractère aléatoire des variables ne sont pas présentés ici. Il faut noter que ces résultats ne font que confirmer les résultats du test de Pettitt : une rupture est détectée à chaque fois aux séries pour lesquels le caractère aléatoire est rejeté par les tests d'autocorrélation, de corrélation sur le rang et de Spearman.

Les résultats sont très similaires à ceux des modules pour la station hydrométrique considérée. Les années de rupture identifiées sont situées entre 1967 et 1971 pour la plupart.

Tableau 3.3 : Résultats du Test de Pettitt appliqué aux VCXn et calculs des déficits

Pays	Nom station	variable étudiée									
		vcx1		vcx3		vcx6		vcx10		vcx30	
		rupture	déficit	rupture	déficit	rupture	déficit	rupture	déficit	rupture	déficit
Burkina Faso	Yendere	1971	56	1971	56	1971	56	1971	56	1971	57
	Dapola	Aléatoire	6	Aléatoire	7	Aléatoire	9	Aléatoire	9	Aléatoire	14
	Samandeni	1971	72	1971	70	1971	68	1971	66	1971	63
Côte d'Ivoire	Bada	1971	46	1971	47	1971	47	1971	48	1971	51
	Mbrimbo	1971	70	1971	72	1971	73	1971	74	1971	76
	Tiassale	1971	57	1971	59	1971	61	1971	62	1971	64
	Rte Beoumni-Seg	1968	43	1968	45	1968	47	1968	47	1968	45
	Bouaffle	1972	47	1972	47	1972	47	1972	47	1972	43
	Bocanda	1972	43	1972	43	1972	43	1972	40	Aléatoire	29
	Dimbokro	1972	38	1972	39	1972	39	1972	39	1972	38
	Fetekro	1972	49	1972	52	1972	52	1972	52	Aléatoire	37
	Mbahiakro	1972	45	1972	45	1972	45	1972	43	Aléatoire	33
	Nzianoa	1972	33	1974	34	1974	35	1972	36	1974	40
	Akakomoekro	1972	42	1972	43	1972	45	1972	46	1972	43
	Aniassue Pont	1972	45	1972	46	1972	47	1972	48	1972	47
	Mbasso	1972	37	Aléatoire	31	Aléatoire	32	1972	39	1972	40
	Serebou	1971	41	1971	41	1971	41	1971	42	1971	43
	Iradougou	1971	39	1971	38	1971	37	1971	38	1971	40
	Semien	1971	27	1971	26	1971	25	1971	25	1971	22
	Soubre	1971	49	1979	58	1979	59	1971	50	1979	61
	Bafingdala	Aléatoire	24	Aléatoire	24	Aléatoire	25	Aléatoire	26	Aléatoire	26
	Nibehibe	1974	44	1974	44	1974	45	1974	46	1974	47
	Mbesse	1982	56	1976	43	1976	47	1982	58	1976	55
	Tai	Aléatoire	9	Aléatoire	11	Aléatoire	16	Aléatoire	20	Aléatoire	20
Mali	Dire	1970	25	1970	25	1970	26	1970	26	1970	27
	Koulikoro	1970	34	1970	35	1970	35	1970	35	1971	36
	Douna	1971	63	1971	64	1971	64	1971	64	1971	66
	Galougo	1971	51	1971	51	1971	52	1971	52	1967	52
	Kayes	1967	48	1967	48	1967	48	1967	48	1967	52
	Daka Saidou	1970	38	1970	38	1967	39	1970	38	1967	36
	Dibia	1971	42	1971	42	1971	42	1971	41	1971	45
	Bafing Makana	1971	44	1971	45	1971	46	1971	46	1971	48
	Soukoutali	1967	31	1967	32	1967	32	1967	32	1967	34
	Oualia	1971	60	1971	60	1971	60	1971	61	1971	64
	Toukoto	1971	57	1971	57	1971	59	1971	61	1971	69
	Fadougou	1975	59	1967	53	1967	53	1975	59	1967	59
	Gourbassy	1967	52	1967	54	1967	55	1967	56	1967	60
	Siramakana	1971	62	1971	64	1971	65	1971	67	1969	68

3.4.3 L'évolution des débits caractéristiques des basses-eaux

Des problèmes se posent lorsqu'on veut aborder l'analyse des variables caractéristiques de l'étiage pour un bon nombre de bassins versants. L'assèchement de certains cours d'eau est un fait nouveau de la phase de sécheresse. Une difficulté systématique se pose sur le plan de l'analyse statistique des données.

Une des approches possibles consiste à ignorer les valeurs nulles et ne retenir que les étiages non nuls. Cette approche ne présente aucune signification physique. Une autre approche consiste à attribuer une valeur infime mais non nulle aux étiages nuls, ce qui introduit un biais. Pour pallier à ce problème, nous avons retenue d'analyser le seuil minimal en dessous duquel les débits sont restés pendant n jours consécutifs (QCN n).

Les résultats relatifs aux traitements des séries chronologiques de QCN n ($n = 1, 3, 6, 10, 30$) ont été reportés dans le Tableau 3.4 où nous reportons les dates de rupture détectées et les déficits estimés sur la variable de part et d'autre de cette rupture ou de 1970 si aucune rupture n'a été détectée.

Pour une station donnée, on remarque que les résultats du test de Pettitt sont, d'une manière générale, identiques pour les variables QCN n . Pratiquement tous les bassins traités présentent une rupture dans les séries chronologiques de QCN n , traduisant en cela une diminution des basses-eaux. Les exceptions concernent :

- Les stations de Yendéré, Fetekro, Dibia et Toukoto pour lesquelles la plupart des séries chronologiques des variables étudiées sont homogènes au sens du test de Pettitt. Les variations relatives calculées en considérant la période située après 1970 par rapport à l'ensemble de l'échantillon depuis le début des observations montrent cependant une diminution des valeurs des QCN n pour ces stations.
- les stations de Mbrimbo, Tiassalé, Soubré et Koulikoro pour lesquelles les QCN n connaissent une augmentation de leurs valeurs après les dates de ruptures détectées.

Les dates d'occurrence des ruptures identifiées par le test de Pettitt pour un seuil de confiance de 90% surviennent pour un certain nombre de stations (environ 30% des stations) entre 1968 et 1971. Pour d'autres stations, elles se situent plus tardivement entre 1977 et 1982. Cet aspect peut être mis en relation avec les périodes de déficit pluviométrique aiguës des années 1983-1984.

Tableau 3.4 : Résultats du Test de Pettitt appliqué aux QCNn et calcul des déficits

Pays	Nom Station	Variable étudiée									
		QCN1		QCN3		QCN6		QCN10		QCN30	
		rupture	déficit	rupture	déficit	rupture	déficit	rupture	déficit	rupture	déficit
Burkina Faso	Yendere	aléatoire	-47.76	aléatoire	-49.52	aléatoire	-49.68	aléatoire	-50.06	aléatoire	-57.04
	Dapola	1975	-94.64	1975	-94.91	1975	-93.71	1975	-91.77	1975	-84.25
	Samandeni	1980	-87.56	1980	-87.48	1980	-86.83	1980	-86.21	1972	-63.28
		1971	-91.70	1977	-88.69	1972	-92.57	1977	-85.38	1972	-86.30
Côte d'Ivoire	Mbrimbo	aléatoire	58.98	aléatoire	90.36	1979	230.06	1979	249.10	1979	246.94
	Tiassale	1979	226.18	1979	284.51	1979	291.88	1979	287.91	1979	203.45
	Rte Beoumi-Seguela	1977	-97.28	1977	-96.82	1977	-96.16	1977	-94.96	1976	-93.57
	Bouaffle	1978	-96.39	1977	-95.75	1977	-94.67	1977	-94.40	1972	-89.89
	Bocanda	1981	-83.80	1981	-89.50	1978	-80.51	1981	-85.99	1978	-80.37
	Dimbokro	1972	-77.96	1972	-85.56	1972	-82.24	1972	-82.40	1972	-84.13
	Fetekro	aléatoire	-80.49	aléatoire	-78.83	aléatoire	-76.93	aléatoire	-76.40	aléatoire	-80.90
	Mbahiakro	1972	-87.49	1973	-90.51	1973	-90.34	1973	-91.34	1971	-89.19
	Nzianoa	1971	-80.65	1972	-88.41	1972	-88.82	1972	-89.12	1972	-86.12
	Akakomoekro	1977	-95.19	1977	-95.04	1977	-94.71	1977	-93.88	1977	-91.60
	Aniassue Pont	1973	-95.36	1973	-93.23	1973	-93.09	1973	-92.61	1972	-89.06
	Mbasso	1976	-89.50	1977	-93.72	1977	-93.46	1977	-93.52	1972	-88.10
	Serebou	1975	-93.37	1974	-91.73	1974	-91.54	1974	-91.31	1974	-89.86
	Iradougou	1985	-89.02	1985	-93.30	1984	-82.74	1984	-84.29	1984	-80.57
	Semien	aléatoire	-46.74	1972	-64.79	1972	-62.92	1972	-61.78	1981	-64.98
	Soubre	1985	497.44	1981	215.07	1981	263.40	1981	277.06	1981	285.86
	Bafingdala	aléatoire	-54.84	1972	-59.00	1972	-60.92	1981	-62.58	1973	-50.81
	Nibehibe	aléatoire	6.46	1976	-81.77	1976	-80.56	1972	-77.53	1976	-72.61
	Mbesse	1978	-86.11	1978	-88.35	1978	-88.91	1978	-86.97	1978	-83.91
	Tai	aléatoire	-51.32	1972	-66.06	1972	-65.86	1972	-68.46	1972	-57.03
Mali	Dire	1959	-76.95	1959	-76.71	1959	-75.98	1959	-74.73	1959	-74.39
	Koulikoro	1981	39.06	1981	50.77	1981	53.30	1981	50.32	1983	36.49
	Douna	1971	-89.06	1981	-97.51	1972	-91.02	1977	-94.72	1972	-89.54
	Galougo	1971	-97.53	1971	-97.15	1971	-96.77	1971	-96.54	1971	-95.89
	Kayes	1971	-82.38	1971	-81.72	1971	-80.26	1973	-77.52	aléatoire	-74.63
	Daka Saidou	1977	-86.20	1977	-85.44	1977	-84.56	1977	-83.13	1977	-78.16
	Dibia	aléatoire	-97.64	aléatoire	-97.41	aléatoire	-97.45	aléatoire	-97.03	1971	-99.44

3.5 CONCLUSION

Ce chapitre s'est consacré à l'étude de l'évolution climatique récente à travers l'analyse d'un certain nombre de paramètres descriptifs des régimes pluviométriques et hydrométriques. L'analyse s'est appuyée sur des méthodes statistiques et cartographiques variées mais complémentaires, qui permettent d'étudier l'homogénéité des séries chronologiques des variables traitées. Les différentes données de pluie, données ponctuelles ou données spatialisées des grilles, ont été traitées. Les différentes observations faites vont toutes dans le même sens.

L'examen de la variabilité des pluies annuelles a montré que les pluies ont notablement baissé au cours des trois dernières décennies sur la zone d'étude. La cartographie des indices pluviométriques offre une vision de l'extension spatiale de l'évolution des pluies annuelles sur la zone d'étude. De manière qualitative, les conditions de déficits pluviométriques de la période 1990-1997 se rapprochent de celles observées au cours de la décennie 1970 ; la décennie 1980 se distingue par des conditions extrêmes de déficits pluviométriques généralisés.

Les déficits pluviométriques annuels varient, dans la plupart du temps, entre 10 et 40%.

L'analyse des résultats des pluies mensuelles révèle que globalement les pluies de chaque mois diminuent.

Cette variabilité temporelle des précipitations est accompagnée d'une diminution encore plus sensible des écoulements. L'analyse réalisée dans cette étude a porté sur des variables caractéristiques des régimes de ces cours, comme le débit moyen annuel et différentes variables caractéristiques des hautes-eaux (les maximums sur chaque année du débit moyen de n jours consécutifs (VCX_n)) et des basses-eaux (le seuil minimal en dessous duquel les débits sont restés pendant n jours consécutifs pour chaque année (QCN_n)). Pour les 40 stations hydrométriques qui contrôlent divers cours d'eau plus ou moins importants en superficie, au Burkina Faso, en Côte d'Ivoire et au Mali, toutes les variables caractéristiques des régimes d'eau connaissent une baisse depuis les années 70.

Les diminutions enregistrées sur la pluviométrie semble être amplifiée sur les écoulements comme l'atteste le Tableau 3.5 où nous avons illustré pour certains bassins les déficits sur les pluies moyennes annuelles calculées sur le bassin et les débits moyens annuels. Pour le calcul de la pluie moyenne sur le bassin, nous avons utilisé la grille de pluie CRU-IRD.

Tableau 3.5 : Comparaison des déficits entre les pluies annuelles et les débits moyens annuels sur des bassins de la zone d'étude

Pays	Nom poste	Déficit sur les pluies annuelles	Déficit sur les débits moyens annuels
Burkina Faso	Yendere	-17	-53
	Dapola	-14	-44
	Samandeni	-14	-55
Côte d'Ivoire	Bada	-18	-53
	Mbrimbo	-17	-61
	Tiassale	-15	-59
	Rte Beoumi-Seguela	-0.17	-50
	Bouafle	-17	-51
	Bocanda	-13	-34
	Dimbokro	-12	-49
	Fetekro	-19	-48
	Mbahiakro	-17	-47
	Nzianoa	-0.12	-48
	Akakomoekro	-0.16	-47
	Aniassue Pont	-0.14	-51
	Mbasso	-14	-45
	Serebou	-17	-48
	Iradougou	-20	-44
	Semien	-13	-34
	Soubre	-12	-41
	Bafingdala	-9	-23
	Tai	-7	-32
Mali	Dire		-42
	Koulikoro	-14	-40
	Douna	-19	-69
	Galougo	-20	-59
	Kayes	-23	-58
	Daka Saidou	-0.20	-42
	Dibia	-19	-48
	Oualia	-20	-65
	Toukoto	-19	-69
	Fadougou	-22	-58
	Siramakana	-21	-68

Face à cette persistance des conditions de sécheresse depuis plus de 30 ans, certaines certitudes acquises semblent être bouleversées. Ainsi, se pose un problème majeur : quelles normes hydrologiques faut-il choisir pour la réalisation des aménagements de plus en plus

nombreux en vue de satisfaire des besoins de plus en plus accrus en eau? Convient-il ou non d'intégrer purement et simplement les années récentes dans la continuité des séries chronologiques, ou doit on faire l'hypothèse d'une modification plus durable du climat et ne prendre en compte que les dernières années situées après 1970?

CHAPITRE 4 : ÉVOLUTION DES NORMES HYDROLOGIQUES

4 CHAPITRE 4 : ÉVOLUTION DES NORMES HYDROLOGIQUES

Dans ce chapitre, nous abordons le problème des effets de la sécheresse sur les normes pluviométriques et hydrologiques.

Le terme "norme" désigne la moyenne des valeurs observées, parfois remplacée par la médiane ou le mode. Il peut aussi désigner les fréquences d'apparition ou leurs inverses, les durées de retour de tel ou tel phénomène.

Ces notions sont adaptées à des phénomènes purement aléatoires dont elles tentent de déterminer les caractéristiques. L'application de ces notions en hydrologie sur les séries annuelles de pluie ou de débit supposent a priori que celles-ci soient stationnaires. Eu égard aux résultats du chapitre précédent qui remettent en cause le caractère homogène des séries hydrométriques et pluviométriques, l'hypothèse de stationnarité des séries chronologiques de variables hydrométriques et pluviométriques ne semble pas être vérifiée dans notre zone d'étude. Ce constat suscite des interrogations sur les limites des normes hydrologiques : dans les régions touchées ces dernières années par un phénomène de sécheresse, convient-il ou non d'intégrer purement et simplement les années récentes dans la continuité des séries chronologiques, ou doit-on faire l'hypothèse d'une modification plus durable du climat et ne prendre en compte que les 30 dernières années ?

L'expérience montre que la plupart, sinon l'ensemble, des publications en usage dans le domaine de la planification et de la gestion des ressources en eau utilise encore et toujours des informations hydroclimatiques ou des normes basées sur les périodes 1941-1970 ou 1951-1980.

Les données disponibles nous contraignent à limiter notre étude à la période 1951-1997.

Deux options peuvent être considérées :

- (a) Baser les nouvelles normes sur les données les plus récentes, c'est à dire ne considérer que la période « sèche » 1971-1997.
- (b) Intégrer les données les plus récentes aux données plus anciennes, c'est à dire, considérer la période 1951-1997 en son entier.

La période 1951-1980, encore très (trop ?) souvent utilisée pour définir et calculer les normes, nous servira de point de référence et de comparaison.

4.1 METHODOLOGIE

La démarche adoptée consiste en une analyse statistique des observations de différentes variables hydrologiques en vue d'aboutir à une estimation des risques par ajustement de distributions de probabilité. La démarche statistique pour réaliser une analyse statistique des observations s'effectue en plusieurs étapes (Lubès et al., 1995).

Dans un premier temps il faut procéder à une sélection des observations en rapport avec le phénomène étudié. Il s'agit dans le cas de notre étude, de sélectionner des variables hydrologiques couramment utilisées et qui caractérisent au mieux les régimes pluviométriques et hydrologiques.

Ensuite, il faut réaliser un ajustement d'une loi de probabilité théorique à la distribution de fréquence de l'échantillon sélectionné à l'étape précédente.

Enfin, en s'appuyant sur les résultats de l'étape précédente, on effectue une estimation des risques.

Nous nous sommes servis du logiciel Safarhy (Lubes et al., 1995) qui est un logiciel de calculs statistiques et d'analyse fréquentielle adapté à l'évaluation du risque en hydrologie. Les lois de distribution que nous avons ajustées sont la loi normale ou ses dérivées, log-normale, racine carrée-normale pour les moyennes et la loi gamma incomplète pour les valeurs extrêmes.

Par simplification, nous adopterons le vocabulaire suivant :

- le terme "pluie décennale humide" désignera le cumul annuel des pluies correspondant à une année humide de période de retour 10 ans et le terme "pluie décennale sèche" désignera le cumul annuel des pluies correspondant à une année sèche de période de retour 10 ans,
- le terme "module décennal humide" désignera le module annuel correspondant à une année humide de période de retour 10 ans et le terme "module décennal sec" désignera le module annuel correspondant à une année sèche de période de retour 10 ans,

- le terme "VCXn décennal humide" désignera le VCXn correspondant à une année humide de période de retour 10 ans et le terme "VCXn décennal sec" désignera le VCXn correspondant à une année sèche de période de retour 10 ans,
- le terme "QCNn décennale humide" désignera le QCNn correspondant à une année humide de période de retour 10 ans et le terme "QCNn décennale sec" désignera le QCNn correspondant à une année sèche de période de retour 10 ans.

4.2 TRAITEMENT DES PLUIES ANNUELLES

Afin de mieux mettre en évidence les effets de la variabilité du climat sur les normes pluviométriques, la comparaison des cartographies des courbes isohyètes annuelles moyennes calculées sur différentes périodes de référence se révèle intéressante.

4.2.1 Comparaison des cartes de normales pluviométriques 1951-1980, 1961-1990 et 1971-2000

Traditionnellement et par convention, il est d'usage de représenter une cartographie des courbes isohyètes annuelles moyennes calculées sur trente ans. La dernière période de référence sera 1971-1997, ce qui ne devrait pas influencer les résultats présentés.

De toute évidence, les moyennes calculées sur cette dernière période sont influencées par les sécheresses qui jalonnent les 30 dernières années.

Afin de mieux matérialiser les différences qui existent entre les normales établies sur des périodes précédentes, nous avons réalisé une comparaison des normales 1971-1997 et 1961-1990 par rapport aux moyennes annuelles calculées sur la période 1951-1980.

La normale 1951-1980 présente la particularité d'être influencée par deux décennies 50 et 60 reconnues très arrosées en Afrique de l'ouest et par une décennie sèche. La "normale 1961-1990" est non seulement influencée par la période très humide de la décennie 60 mais aussi par les séquences de sécheresse intense de la période 1970-1990.

Sur la figure 4.1, nous avons représenté une cartographie des normales 1951-1980, 1961-1990 et 1971-1997.

Les pluies moyennes annuelles de la normale 1951-1980 varient entre 25 mm, aux confins du Sahara, à plus de 2000 mm dans l'extrême sud-ouest de la Côte d'Ivoire en bordure du Golfe de Guinée.

La carte des normales pluviométriques 1961-1990 ressemble assez bien à la précédente dans la configuration des courbes isohyètes. Cependant, la normale 1961-1990 est marquée par une diminution des précipitations, mise en évidence par un retrait de toutes les isohyètes vers le sud. L'isohyète 400 mm qui coupait la frontière nord du Burkina Faso connaît un recul de l'ordre d'une cinquantaine de kilomètres, l'isohyète 800 mm d'une centaine de kilomètres. L'isohyète 1200 mm disparaît totalement du territoire burkinabè, ne couvre plus qu'une faible portion au sud du Mali et recule considérablement vers le sud du territoire ivoirien. La plage de pluies annuelles supérieures à 1800 mm qui couvrait une bande le long du golfe de Guinée et l'ouest de la Côte d'Ivoire avec la normale 1951-1980, se cantonne désormais dans l'extrême sud-ouest de la Côte d'Ivoire.

Le recul est encore plus marqué, si on compare les normales 1971-1997 et 1951-1980. La période 1971-1997 est bien la période la plus sèche que l'on ait observé, tout au moins sur les 50 dernières années. Mais on ne doit guère se tromper en affirmant que c'est la période la plus sèche du XXème siècle.

La figure 4.2 met en évidence les écarts relatifs que l'on peut observer entre les périodes 1951-1980 et 1971-1997 : la diminution de la normale pluviométrique est comprise entre 10 et 20% mais dépasse parfois 30%, comme dans le nord du Mali entre 16°N et 20°N. L'ouest et l'est de la Côte d'Ivoire connaît des variations relatives faibles comprises entre 0 et -10%.

Si l'on intègre les données de ces 20 dernières années aux données déjà disponibles 1951-1980, on observe également un recul des différentes isohyètes par rapport à la période 1951-1980. Ce recul se traduit par une diminution de la pluviométrie moyenne de la période 1951-1997 par rapport à la période 1951-1980. Cette diminution est matérialisée sur la figure 4.3. Le taux de variation de la normale 1950-1997 par rapport à la normale de référence 1951-1980 est comprise entre 0 et -10% dans la quasi-totalité de la zone d'étude.

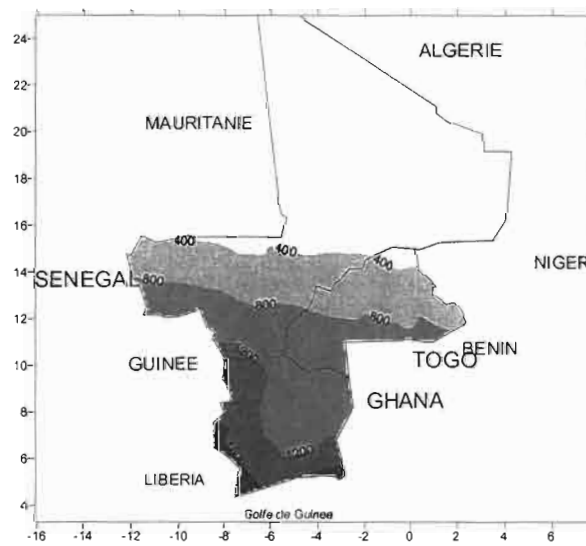
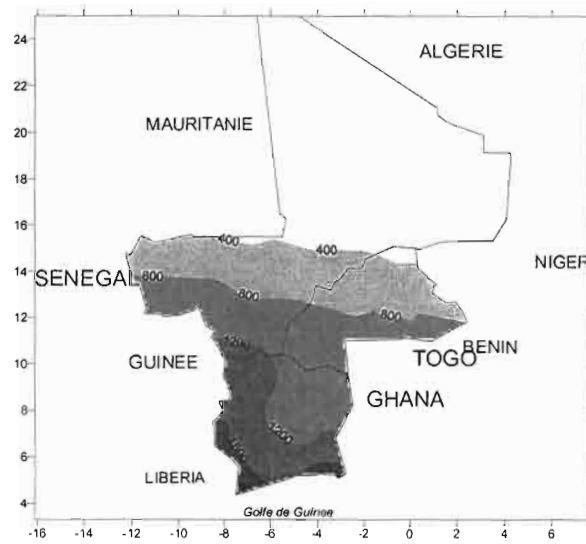
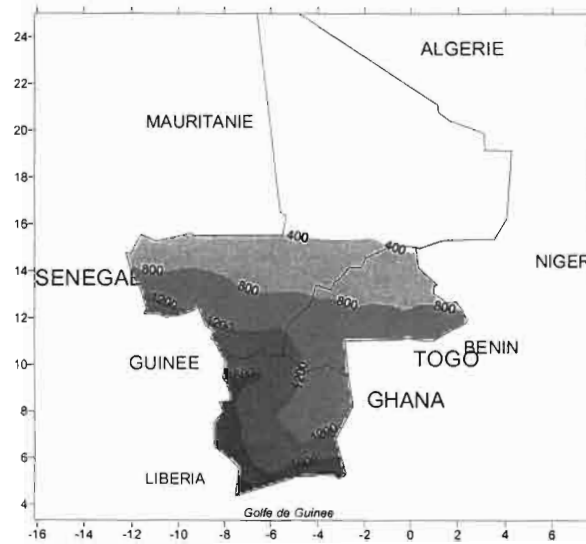


figure 4.1 : Normales pluviométriques 1951-1980, 1961-1990 et 1971-1997

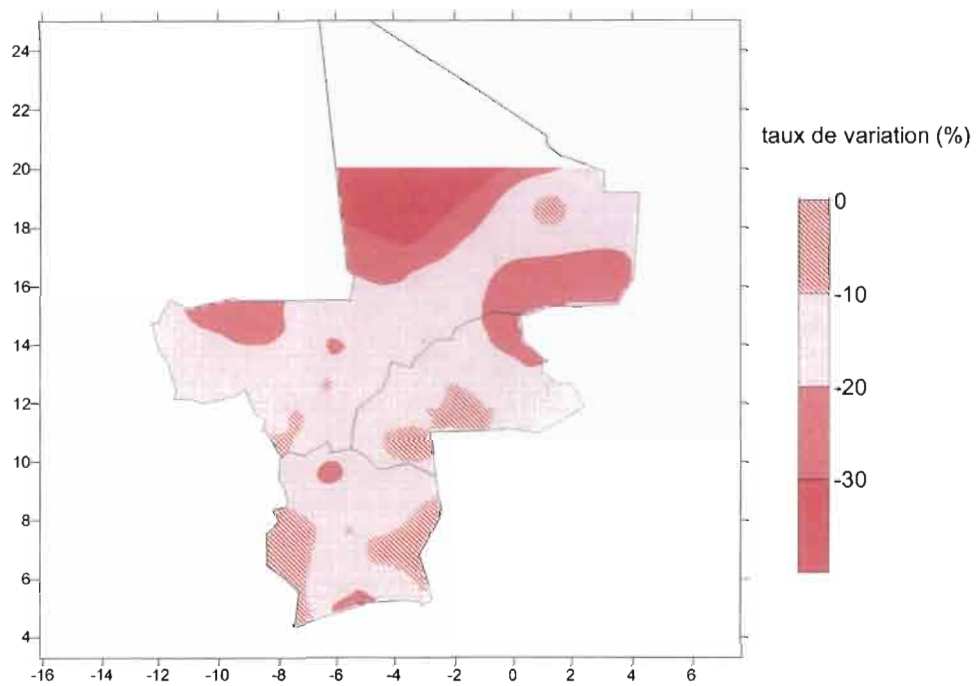


figure 4.2 : Variation relative entre la normale "1971-1997" et la normale "1951-1980"

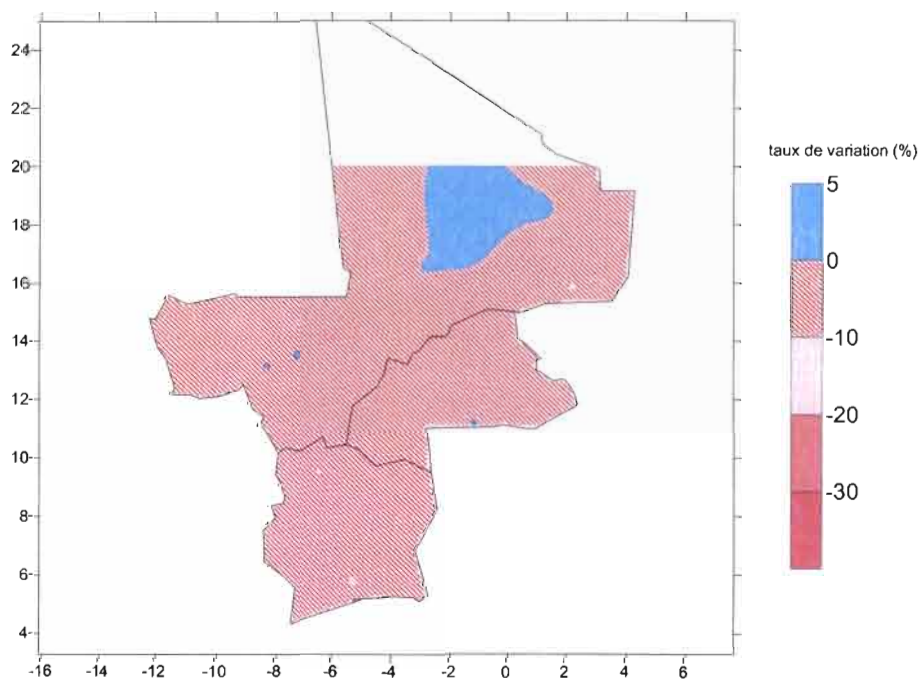


figure 4.3 : Variation relative entre la normale "1950-1997" et la normale "1951-1980"

4.2.2 Comparaison des cartes pluviométriques réalisées sur les périodes 1950-1997 et 1971-1997

A l'examen des résultats de l'étude de l'évolution des pluies annuelles depuis 1950, qui ont montré que les décennies 1950 et 1960 sont humides à l'inverse des décennies suivantes qui sont déficitaires, on est tenté de proposer l'établissement d'une carte des pluies moyennes annuelles depuis 1950. L'élaboration de normales sur une période plus longue semble souhaitable. La période 1950-1997 présente l'avantage statistique de comporter des périodes « anormalement » arrosées (1950-1969) et des périodes « anormales » sèches (1970-1997).

Cependant, si on fait l'hypothèse d'une modification plus durable des conditions de sécheresse observées depuis 1970 environ, il semble intéressant d'étudier les différences occasionnées par la prise en compte des données d'observation uniquement sur les 30 dernières années.

Pour illustrer notre propos, nous avons choisi de représenter sur la figure 4.4 la carte du taux de variation entre les pluies moyennes annuelles calculées sur la période 1971-1997, par rapport aux pluies moyennes annuelles calculées sur la période 1950-1997. L'examen de la carte montre que sur l'ensemble de la zone d'étude, les pluies moyennes annuelles de la période 1971-1997 sont inférieures aux pluies moyennes de la période 1950-1997. Les plus forts déficits compris entre -20 et -30% s'observent au nord du Mali au dessus de la latitude 16°N. Les déficits compris entre 10 et 20% se rencontrent sur la majeure partie de la zone d'étude.

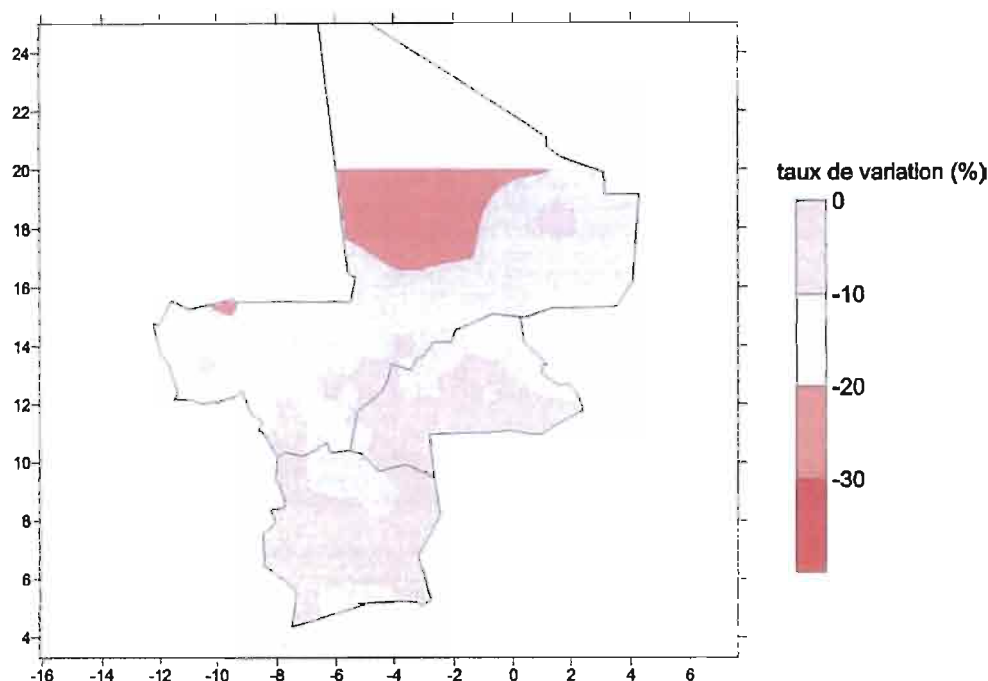


figure 4.4 : Variation relative (%) des pluies moyennes annuelles calculées sur les périodes 1950-1997 et 1970-1997

4.2.3 Analyse de la récurrence des pluies annuelles

Pour chaque poste pluviométrique sélectionné, nous avons considéré trois échantillons constitués par les données des périodes 1951-1980, 1950-1997 et 1971-1997.

Sur chacun d'eux, nous avons procédé à un ajustement d'une loi statistique sur les séries de données de pluies annuelles. Les tests d'adéquation du Khi^2 avec un risque de 1^{ère} espèce de 5% et du A^2 d'Anderson-Darling nous ont conduit à choisir la loi normale pour nos ajustements.

Nous avons alors déduit les déficits des valeurs fréquentielles calculées sur les périodes 1950-1997 et 1971-1997 par rapport à celles calculées sur la période 1951-1980.

La plupart du temps, les petits projets de construction d'infrastructures dans les pays de la zone d'étude considèrent une période de retour de 10 ans pour l'évaluation des variables hydrologiques de leurs critères de dimensionnement. Nous choisissons donc de représenter beaucoup plus en détails les résultats de notre étude pour la fréquence décennale.

4.2.3.1 Comparaison des données des périodes 1951-1980 et 1950-1997

Les pluies décennales humides calculées sur les périodes 1950-1997 par rapport à celles de 1951-1980, présentent des variations relatives comprises entre 0 et -10% (figure 4.5). Par endroits (Mali), des écarts sont positifs, mais excèdent rarement 5%.

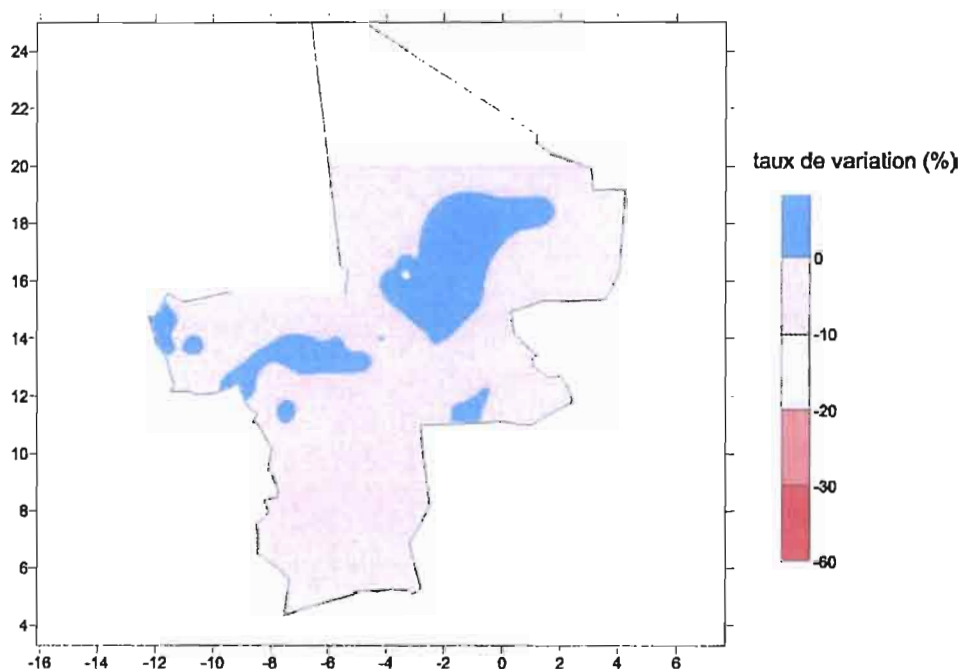


figure 4.5 : Variation relative (%) des pluies moyennes annuelles décennales humides calculées sur les périodes 1950-1997 et 1951-1980

4.2.3.2 Comparaison des données des périodes 1951-1980 à 1971-1997

La figure 4.6 illustre une cartographie des déficits pluviométriques des pluies annuelles en année décennale humide. Il apparaît que les pluies décennales humides calculées sur la récente période 1971-1997, sont déficitaires par rapport à celles calculées sur la période 1951-1980. Les plus faibles déficits sont de l'ordre de 10% et semblent localisés par endroits sur les trois pays de la zone d'étude. La plupart du temps, les taux de variation sont compris entre -10 et -20%, mais dépassent quelquefois -30%.

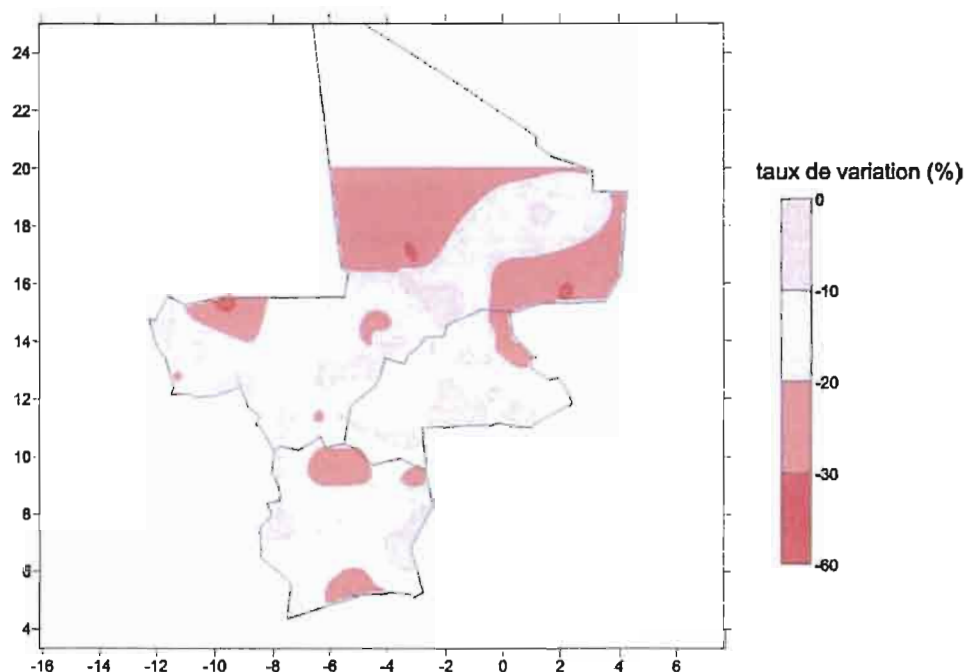


figure 4.6 : Variation relative (%) des pluies moyennes annuelles décennales humides calculées sur les périodes 1971-1997 et 1951-1980

D'une manière générale, les valeurs des pluies annuelles associées aux récurrences humides sur les périodes 1950-1997 et 1951-1980 sont proches (figure 4.7). Par contre, un écart considérable s'observe entre les valeurs associées aux pluies annuelles calculées sur la période 1971-1997 par rapport à celles calculées sur la période 1951-1980 (figure 4.7). La décennale calculée sur la période 1951-1980 a une récurrence de presque 100 ans lorsque l'on ne considère que la série de 1971 à 1997 à Aribinda. A Abidjan, la pluie décennale calculée sur la période 1951-1980 est presque cinquantennale pour les données de l'échantillon de 1971 à 1997. A Bamako, la situation est très étonnante puisque la pluie décennale calculée sur la période 1951-1980 a une récurrence de plus de 200 ans avec les données de la période 1971-1997.

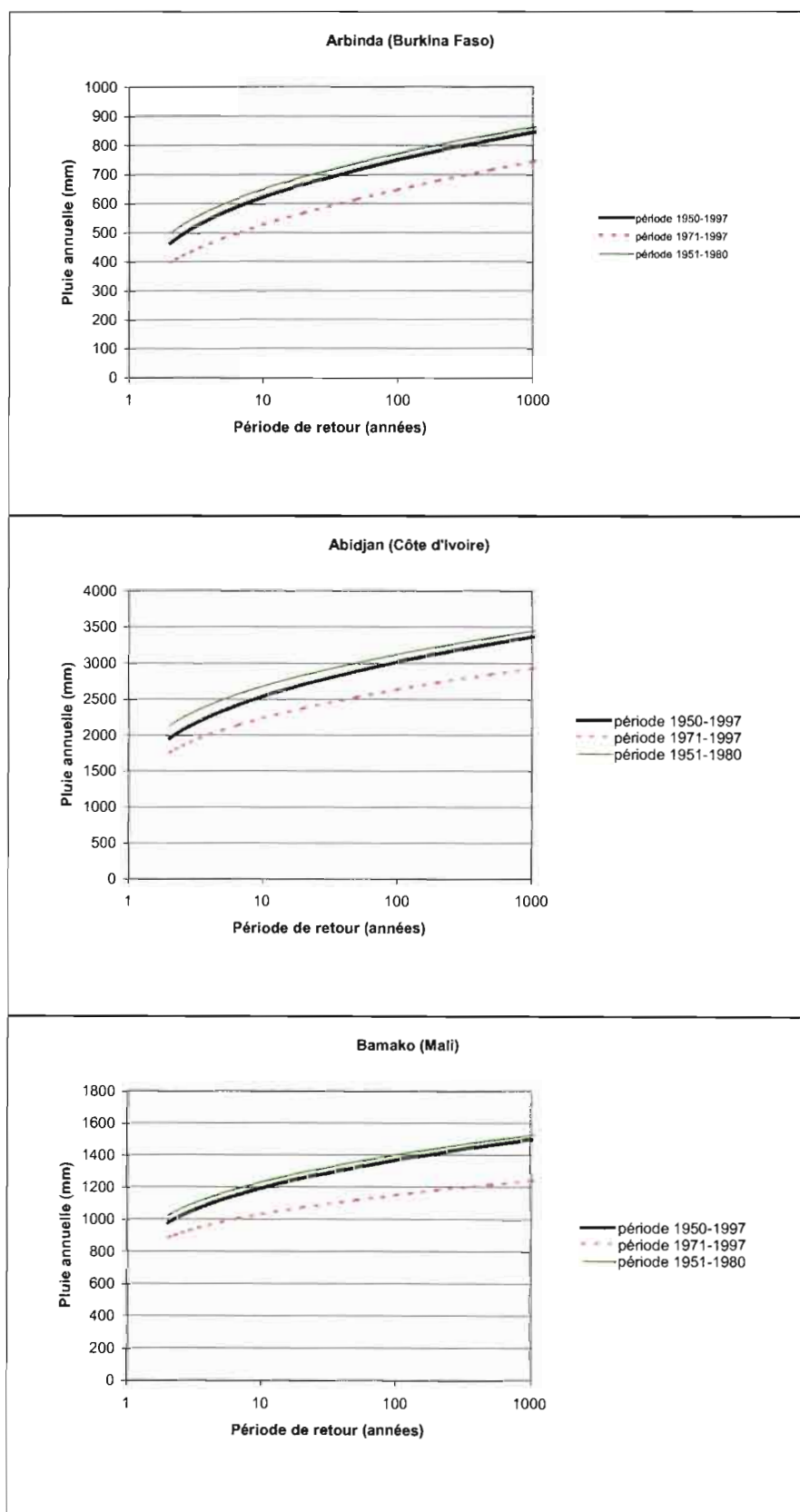


figure 4.7 : Pluies annuelles en fonction des périodes de retour pour des récurrences humides à Aribinda (Burkina Faso), Abidjan (Côte d'Ivoire) et Bamako (Mali)

Lorsqu'on considère les récurrences sèches, des déficits moins importants que ceux observés pour les récurrences humides apparaissent.

Les taux de variation entre les pluies annuelles calculées sur la période 1950-1997, par rapport aux pluies décennales calculées sur la période 1951-1980 sont compris la plupart du temps entre 0 et 10% (figure 4.8).

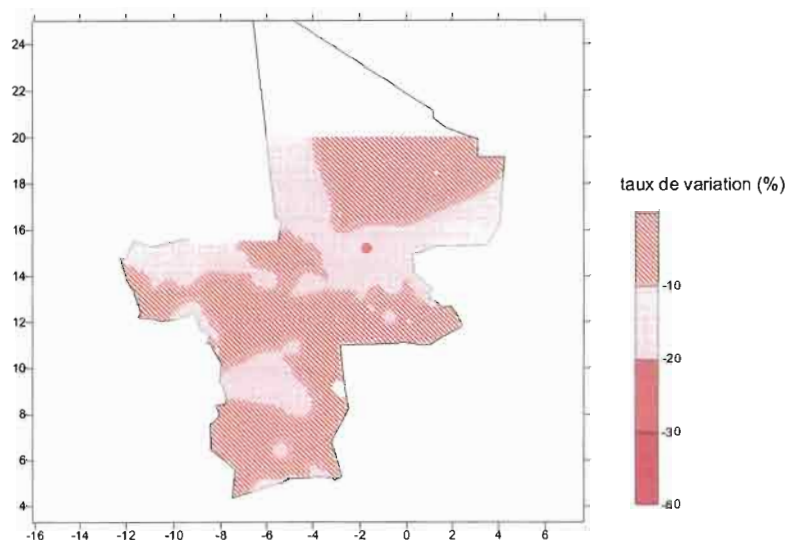


figure 4.8 : Variation relative entre les pluies décennales sèches calculées sur la période 1950-1997, par rapport à celles calculées sur la période 1951-1980.

Les écarts deviennent plus importants lorsqu'on compare les pluies décennales sèches calculées sur les périodes 1971-1997 et 1951-1980 (figure 4.9). Pour la zone située en dessous de la latitude 14°N, les taux de variations entre les pluies décennales calculées sur ces deux périodes sont compris la plupart du temps entre 0 et -20%. Au dessus de cette zone, c'est à dire principalement dans la zone sahélienne, les écarts augment et atteignent souvent -30%.

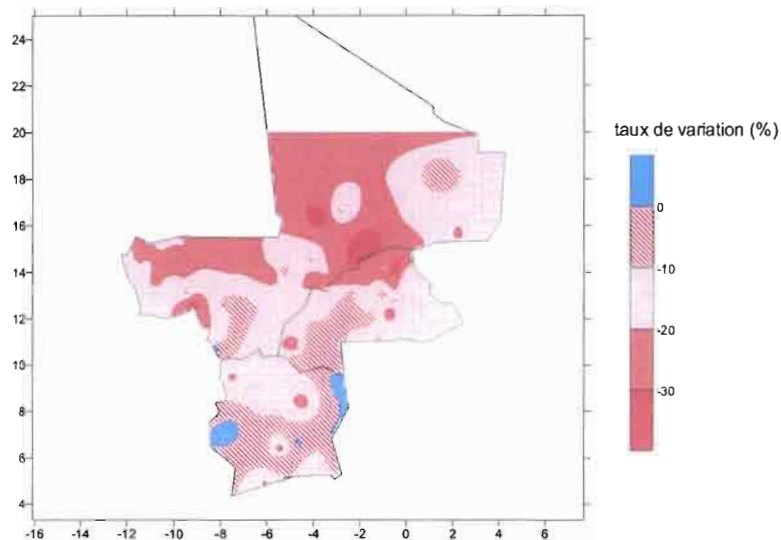


figure 4.9 : Variation relative entre les pluies décennales sèches calculées sur la période 1971-1997, par rapport à celles calculées sur la période 1951-1980.

Pour des récurrences sèches supérieures à 10 ans les écarts entre les valeurs associées à ces récurrences sur les périodes 1951-1980 et 1950-1997 d'une et 1971-1997 d'autre part, tendent à diminuer (figure 4.10). Pour les stations d'Aribinda et Bamako, en considérant les périodes de retour supérieures à 30 ans, les pluies annuelles associés calculées sur la récente période 1971-1997 sont supérieures à celles calculées sur la période 1950-1997. Les valeurs des pluies annuelles correspondant aux fréquences rares (supérieures à 100 ans) calculées sur la période 1971-1997 tendent à être proches de celles calculées sur la période 1951-1980.

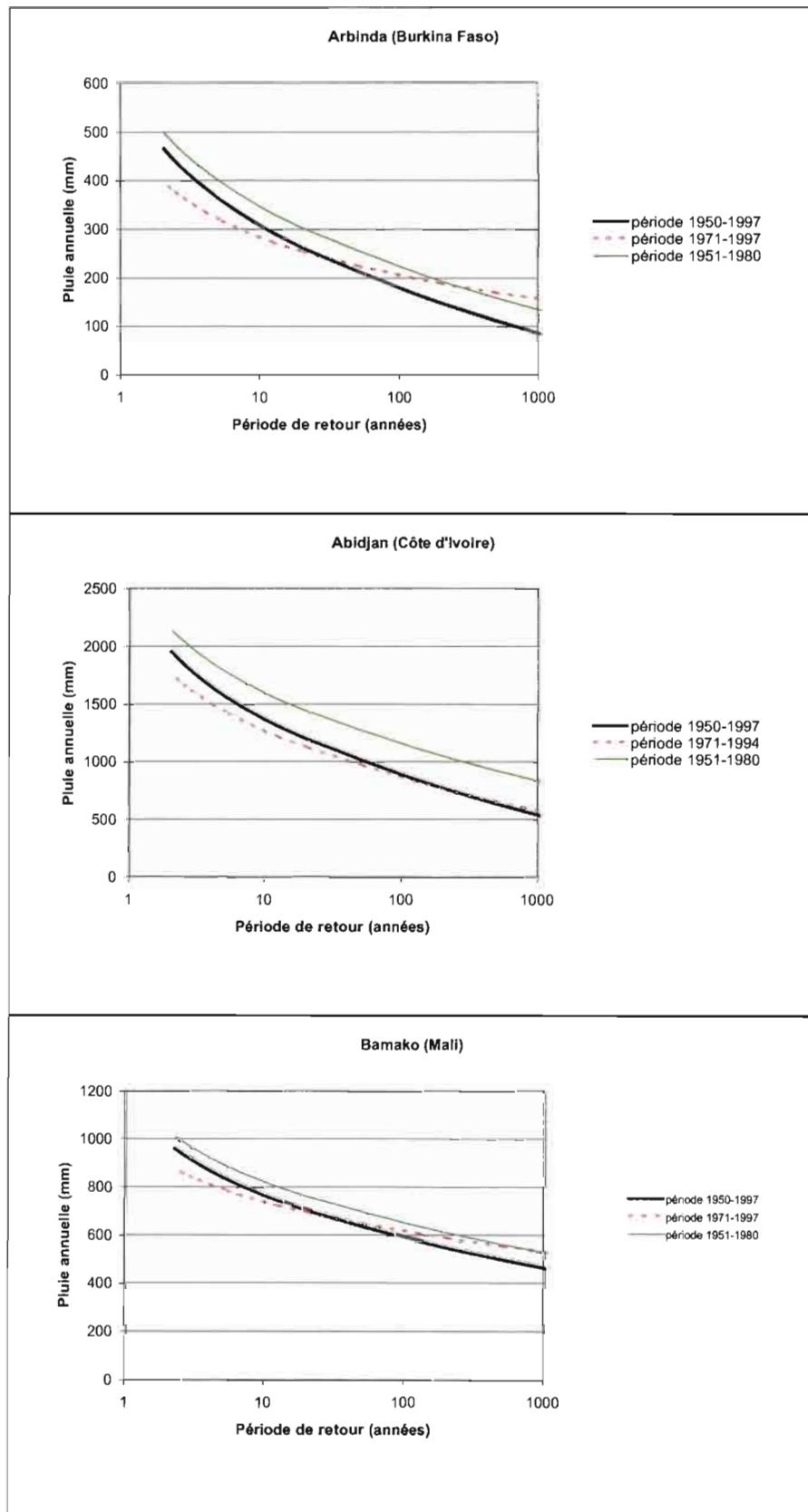


figure 4.10 : Pluies annuelles en fonction des périodes de retour pour des récurrences sèches à Arbinda (Burkina Faso), Abidjan (Côte d'Ivoire) et Bamako (Mali)

4.3 TRAITEMENT DES DEBITS MOYENS ANNUELS

Le débit moyen annuel est une variable qui est représentative du volume qui transite annuellement à l'exutoire d'un cours d'eau. Il est beaucoup utilisé pour caractériser l'abondance des ressources en eau.

Les séries chronologiques de débits moyens annuels constituées pour les 40 stations hydrométriques sélectionnées ont été soumises à différentes lois d'ajustement. Pour cette variable, ce sont la loi normale ou ses dérivés qui ont été ajustées (test du Khi² avec un risque de 1^{ère} espèce de 5% et test A² de Anderson-Darling)

Nous avons calculé les valeurs des débits moyens annuels sur les périodes 1951-1980, 1950-1997 et 1971-1997 pour les récurrences humides décennales, vicennales, cinquantennales centennales (Tableau 4.1) et millenales (figure 4.11).

Les valeurs des débits moyens annuels révèlent des différences notoires selon que l'on considère les séries d'une période ou d'une autre (Tableau 4.1 et figure 4.11). Les valeurs des modules calculés sur les périodes 1950-1997 et 1971-1997 sont systématiquement inférieures à ceux de la période 1951-1980. Il ressort que plus la période de retour est élevée, plus l'écart entre les modules calculés sur les périodes 1950-1997 d'une part et 1971-1997 d'autre part, est grand. Pour un cours d'eau donné, les taux de variations entre les modules calculés sur les périodes 1971-1997 et 1951-1980 sont sensiblement les mêmes quelle que soit la durée de retour considérée.

Mis à part le cas du bassin du Bafingdala en Côte d'Ivoire pour lequel le taux de variation entre les modules calculés sur les deux périodes est de -5%, les taux de variation sont compris entre -18% et -60% pour une année humide de période de retour 10 ans. Sur les 40 bassins traités, 27 bassins présentent des taux de variation compris entre -30% et -60%.

Les écarts sont tels qu'ils peuvent avoir des conséquences que l'on n'ose pas imaginer :

- sur le Bandama à Bada, le débit décennal calculé sur la période 1951-1980 a une période de retour de 35 ans environ sur la période 1950-1997 et millennale sur la période 1971-1997,
- sur le Mouhoun à Dapola, il faut considérer une période de retour de plus de 400 ans sur la période 1971-1997 pour obtenir le débit décennal sur la période 1951-1980,
- sur le Niger à Douna, le débit millennal calculé sur la période 1971-1997 n'est même pas décennal sur la période 1951-1980.

Ces quelques valeurs doivent (en tout cas, le devraient !) faire réfléchir les concepteurs d'ouvrages hydrauliques qui se retrouvent face à un problème que leur raison techniciste n'avait pas imaginé.

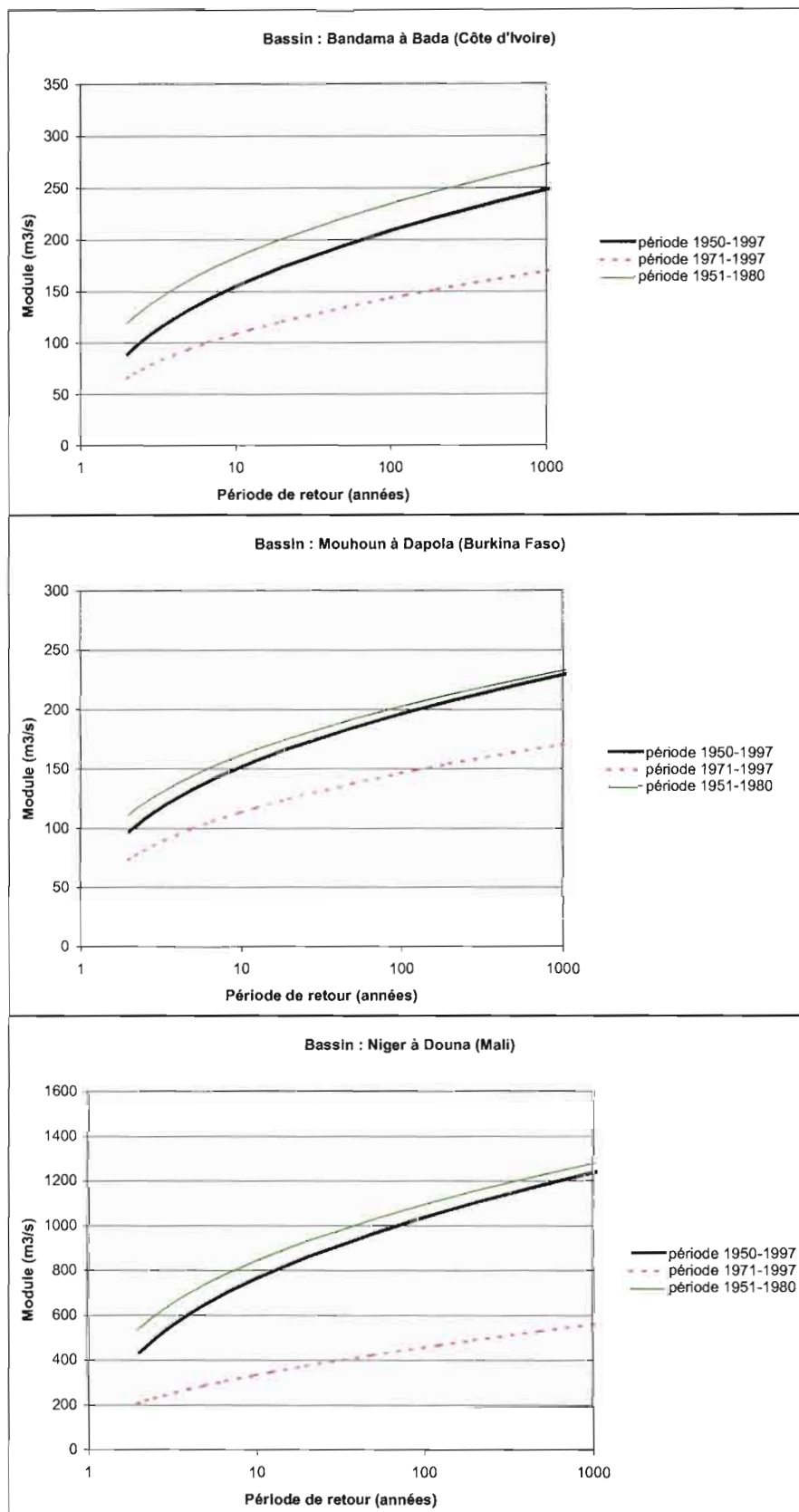


figure 4.11 : Courbes d'ajustement du module en fonction des périodes de retour (réurrences humides)

Tableau 4.1 : Valeurs des modules en m³/s associés aux récurrences humides

Pays	Nom station	fréquence									
		décennale			vingtennale			cinquantennale			centennale
		1951-1980	1950-1997	1971-1997	1951-1980	1950-1997	1971-1997	1951-1980	1950-1997	1971-1997	1951-1980 1950-1997
Burkina Faso	Diarabakoko	20	17	9	22	20	10	25	23	11	27 26
	Yendere	59	0	33	65	72	37	72	93	41	77 110
	Boromo	52	51	38	56	56	41	60	61	45	63 65
	Dapola	161	152	113	176	167	125	192	185	138	202 196
	Samandeni	24	22	16	27	25	18	29	27	20	31 29
Côte d'Ivoire	Bada	183	155	108	201	173	121	221	194	134	235 208
	Mbrimbo	405	357	165	450	446	180	501	572	196	535 675
	Tiassale	580	459	243	726	568	266	934	723	291	1105 848
	Rte Beoummi-Seguela	105	94	64	116	106	72	129	120	80	138 129
	Bouafle	136	121	82	151	136	91	168	153	101	179 164
	Bocanda	87	75	61	110	85	69	143	96	78	170 104
	Dimbokro	111	104	63	146	142	71	197	202	80	242 255
	Fetekro	60	53	39	68	60	44	77	68	49	83 73
	Mbahikro	93	82	58	107	95	65	123	109	74	134 119
	Nzianoa	152	141	88	194	188	99	256	259	111	308 321
	Akakomoekro	338	339	204	385	447	228	440	610	255	477 751
	Aniassue Pont	381	377	211	425	492	235	474	665	262	507 812
	Mbasso	356	346	217	398	444	242	445	586	269	476 706
	Serebou	317	300	172	355	387	191	398	517	212	426 627
	Iradougou	27	25	20	29	28	22	32	32	23	34 34
	Semien	328	301	234	358	331	249	394	366	267	419 390
	Soubre	713	668	444	797	782	479	896	933	518	966 1050
	Bafingdala	80	79	74	85	84	80	91	91	86	96 95
	Nibehibe	25	24	18	32	32	20	42	44	23	50 55
	Mbesse	10	10	8	11	13	11	13	19	16	14 24
	Tai	284	255	205	310	283	221	339	317	239	358 340
Mali	Dire	1413	1363	965	1489	1462	1033	1575	1571	1111	1632 1643
	Koulikoro	1996	1899	1417	2121	2062	1543	2263	2245	1683	2357 2367
	Douna	842	765	333	929	859	374	1027	966	422	1092 1036
	Galougo	837	795	417	912	880	462	996	976	515	1052 1040
	Kayes	832	791	421	905	874	458	987	968	498	1042 1030
	Daka Saidou	363	357	222	389	402	235	419	461	249	438 504
	Dibia	530	511	324	570	559	351	616	613	381	646 649
	Bafing Makana	428	408	248	463	446	266	501	488	285	527 517
	Soukoutali	443	424	280	474	458	296	509	497	314	532 522
	Oualia	255	241	130	281	270	162	309	303	207	328 324
	Toukoto	117	110	53	130	124	65	144	139	82	154 150
	Fadougou	157	148	77	172	164	84	188	183	92	200 195
	Gourbassy	215	208	107	231	233	118	248	260	131	260 278
	Siramakana	88	83	45	97	93	58	107	105	79	114 113

Pour des récurrences sèches (figure 4.12), les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus en considérant des récurrences humides :

- Sur le bassin du Bandama à Bada, le module décennal sec calculé sur les périodes 1950-1997 et 1971-1997 a une période de retour de 40 ans sur la période 1951-1980.
- Sur le bassin du Mouhoun à Dapola, le module décennal sec calculé sur la période 1950-1997 est de fréquence trentennale sur la période 1951-1980. Par contre sur la période 1971-1997, ce même module a une période de retour de 6 ans.
- Les valeurs des modules décennaux sec calculées sur les périodes 1950-1997 et 1971-1997 sur le bassin du Niger à Douna sont très proches. Par contre en considérant la période 1951-1980, ces mêmes modules ont une fréquence de retour de 30 ans.

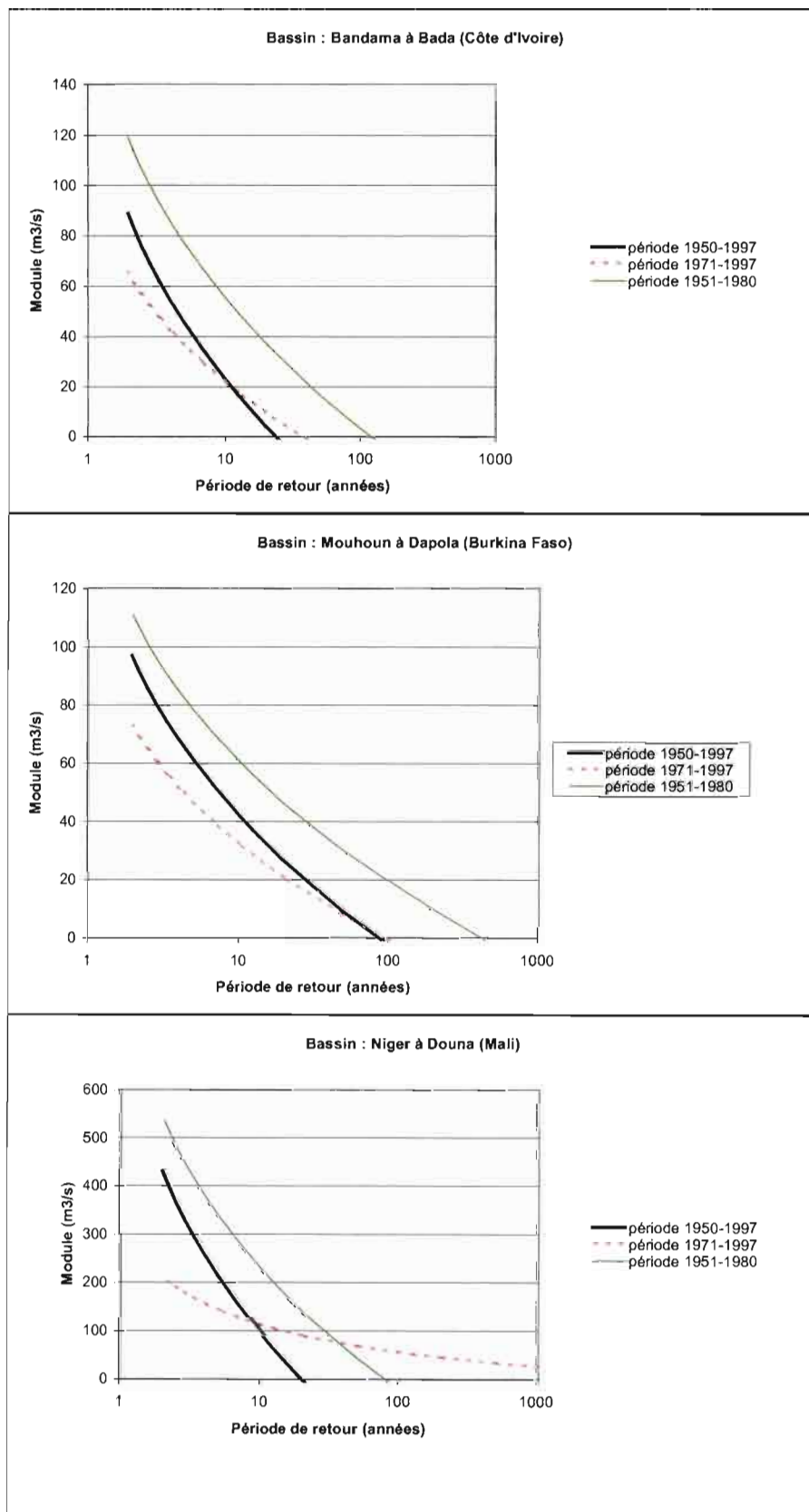


figure 4.12 : Courbes d'ajustement du module en fonction des périodes de retour (récurrences sèches)

4.4 TRAITEMENT DES CARACTERISTIQUES DES HAUTES-EAUX

L'étude des débits extrêmes ne peut être abordé sans qu'on ait recours à des chroniques de débits instantanés ou journaliers. Sur les 40 stations hydrométriques sélectionnées, on a pu établir des séries de maximum annuel du débit moyen de n jours consécutifs (VCX n) pour 38 stations.

L'ajustement des lois statistiques nous a conduit à retenir la loi normale ou ses dérivées (loi Log-Normale retenue la plupart du temps) pour les séries de VCX n calculés (test du Khi² avec un risque de 1^{ère} espèce de 5% et test A² de Anderson-Darling).

La distribution des fréquences de VCX n diffère suivant la période choisie. Les résultats sont à peu près semblables pour les différents VCX. Nous avons choisi de présenter les résultats concernant le VCX1 sur les périodes 1951-1980, 1950-1997 et 1971-1997 pour les récurrences humides décennales, vicennales, cinquantennales, centennales (Tableau 4.2) et millenales (figure 4.13).

La figure 4.13 illustre la distribution des fréquences du VCX1 pour 3 cours d'eau. D'une manière générale, les valeurs fréquentielles des VCX1 calculées sur la période 1951-1980 sont supérieures à celles calculées sur les périodes 1950-1997 et 1971-1997 :

- Sur le bassin du Bandama à Bada, le VCX1 décennal humide calculé sur la période 1951-1980 a une période de retour de 25 ans sur la période 1950-1997, et une période de retour de 40 ans sur la période 1971-1997.
- Sur le bassin du Mouhoun à Dapola, les différences sont moins importantes que celles observées sur le Bandama à Bada. Le VCX1 décennal humide calculé sur la période 1950-1997 a une période de retour de 15 ans sur la période 1950-1997 et une période de retour de 20 ans sur la période 1971-1997.
- Sur le bassin du Niger à Douna les VCX1 sur les périodes 1951-1980 et 1950-1997 sont assez proches. Le VCX1 décennal humide calculé sur la période 1951-1980 à une période de retour de 17 ans environ sur la période 1950-1997. Par contre sur la période 1971-1997, le VCX1 décennal humide calculé sur la période 1951-1980 n'est même pas millennal sur la période 1971-1997. Cela caractérise la diminution très nette des puissances de crue sur la période 1971-1997 sur le bassin du Niger, ce qui corrobore les résultats obtenus par Olivry et al. (1998).

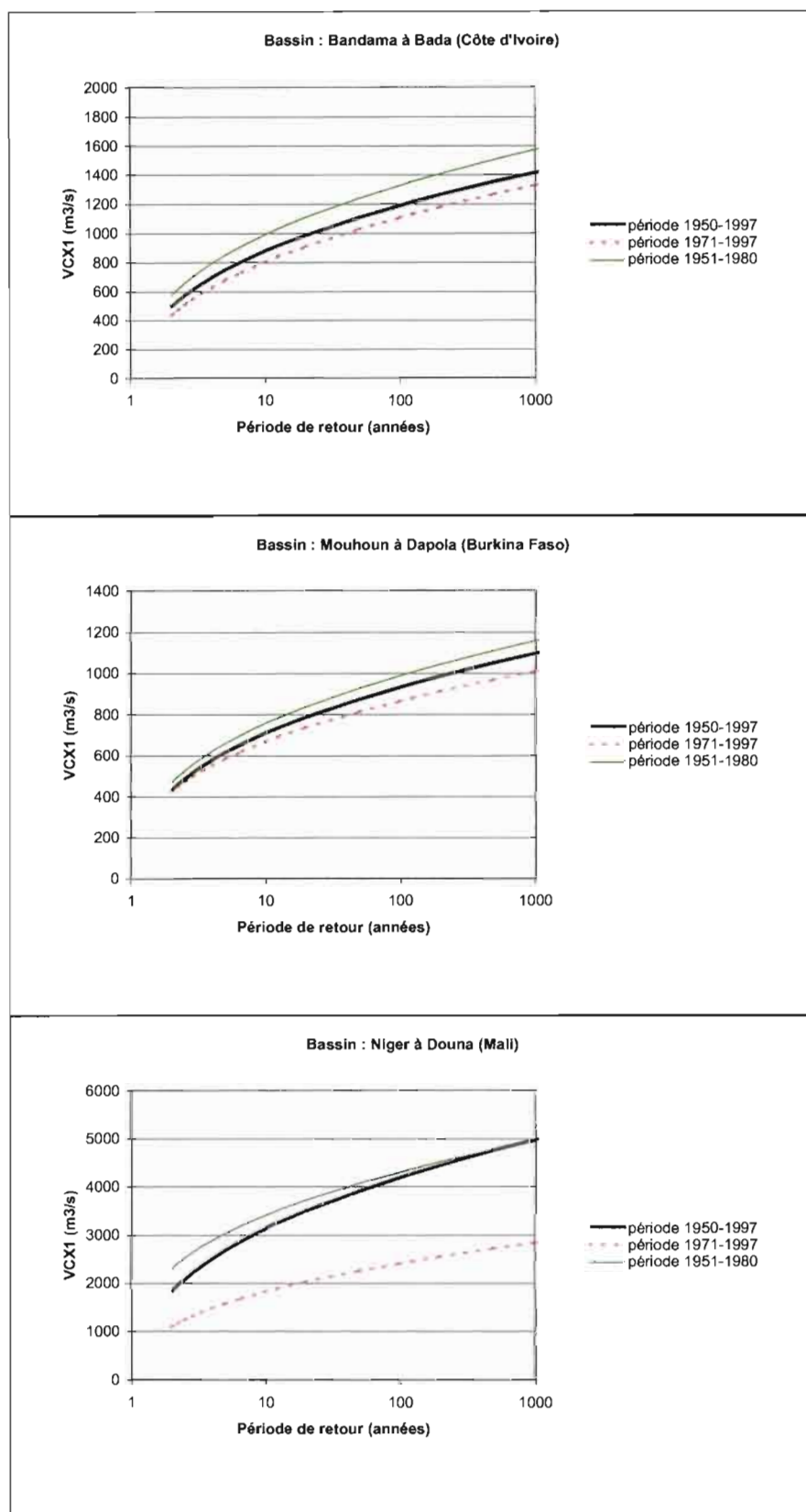


figure 4.13 : Courbes d'ajustement du VCX1 (débit maximum journalier) en fonction des périodes de retour (réurrences humides)

Dans le Tableau 4.2, nous avons regroupé les valeurs des VCX1 pour les périodes 1951 - 1980, 1950 - 1997 et 1971 - 1997.

L'examen du tableau montre :

- les valeurs des VCX1 sur la période 1971-1997 toujours inférieures aux autres,
- pour un bassin donné, les variations calculés sur les VCX1, sont inférieures à celles calculées sur les modules,
- les taux de variation des VCX1 entre les périodes 1971-1997 et 1950-1997 varient entre – 6% et –50%.

Tableau 4.2 : Valeurs de VCX1 (en m³/s) associées aux récurrences humides

Pays	Nom station	fréquence										
		décennale			vingtennale			cinquantennale			centennale	
		1951-1980	1950-1997	1971-1997	1951-1980	1950-1997	1971-1997	1951-1980	1950-1997	1971-1997	1951-1980	1950-1997
Burkina Faso	Yendere	449	395	308	498	443	347	553	496	392	590	532
	Dapola	756	710	667	837	787	736	927	875	813	988	933
	Samandeni	293	265	206	345	326	262	406	402	335	448	456
Côte d'Ivoire	Bada	991	878	804	1108	986	909	1239	1107	1028	1327	1188
	Mbrimbo	1944	1846	920	2168	2459	1149	2419	3394	1476	2587	4207
	Tiassale	2318	2226	1332	2565	2844	1489	2844	3749	1665	3029	4506
	Rte Beoummi-Seguela	648	598	476	714	666	533	788	743	598	838	793
	Bouafle	871	797	666	959	887	747	1058	989	839	1124	1057
	Bocanda	492	449	353	550	505	396	616	568	444	659	610
	Dimbokro	466	438	363	519	492	407	580	551	456	620	591
	Fetekro	428	396	331	476	444	372	530	497	418	566	533
	Mbahiakro	496	455	370	554	511	415	619	573	466	662	615
	Nzianoa	616	609	529	684	674	589	766	748	655	822	797
	Akakomoekro	2060	1874	1540	2288	2098	1719	2544	2350	1920	2715	2519
	Aniassue Pont	2026	1850	1467	2235	2063	1636	2469	2303	1827	2625	2463
	Mbasso	1862	1704	1431	2076	1907	1594	2317	2135	1777	2477	2287
	Serebou	1733	1550	1192	1921	1732	1322	2132	1936	1470	2273	2072
	Iradowgou	135	122	104	145	132	111	157	143	120	164	150
	Semien	1639	1536	1328	1763	1688	1431	1902	1866	1546	1994	1990
	Soubre	3102	2908	2185	3356	3240	2445	3643	3615	2738	3833	3864
Bafingdala	383	381	358	412	412	387	445	447	421	467	470	
Nibehibe	140	126	110	156	142	125	174	160	142	187	172	
Mbesse	87	83	73	94	92	82	102	101	91	107	108	
Tai	1114	1084	1008	1202	1187	1084	1301	1308	1169	1367	1393	
Mali	Dire	2638	2646	2336	2722	2798	2472	2817	2968	2626	2880	3082
	Koulikoro	7793	7514	5912	8233	8116	6362	8728	8793	6869	9058	9245
	Douna	3405	3139	1821	3716	3507	2026	4066	3920	2256	4299	4196
	Galougo	5342	5177	3697	5802	5733	4134	6319	6358	4625	6665	6775
	Kayes	4976	4841	3389	5396	5352	3777	5869	5928	4213	6185	6312
	Daka Saidou	2034	1972	1427	2195	2153	1547	2377	2358	1682	2498	2494
	Dibia	3152	3071	2372	3412	3377	2622	3704	3722	2902	3899	3952
	Bafing Makana	2558	2532	1865	2768	2784	2055	3003	3067	2270	3160	3255
	Soukoutali	2302	2261	1857	2466	2455	2027	2651	2675	2220	2774	2821
	Oualia	1974	1883	1217	2162	2105	1379	2374	2354	1561	2515	2521
	Toukoto	928	891	638	1029	1003	732	1142	1129	838	1218	1213
	Fadougou	1375	1275	891	1519	1427	1004	1681	1598	1132	1789	1713
	Gourbassy	1766	1677	1193	1935	1866	1344	2126	2080	1514	2253	2222
	Siramakana	789	752	469	866	844	533	952	947	605	1010	1016

Afin d'avoir une idée de la répartition spatiale des baisses des VCX1, nous avons représenté sur la figure 4.14, une carte des variations relatives entre les VCX1 calculés sur la période 1971-1997, par rapport aux VCX1 calculés sur l'ensemble de la période 1950-1997.

Les bassins couvrant les zones de régime subdésertique et désertique, de régime sahélien et de régime tropical pur sont affectés d'importants déficits supérieurs à 30%.

La quasi-totalité des bassins situés en zone de régime tropical de transition, présentent des déficits inférieurs à 30%. Plus au nord, les bassins de la zone de régime tropical pur et de régime sahélien, les sous-bassins du Bandama subissent des déficits plus faibles de l'ordre de 20 à 30% ou moins. Le bassin de la Comoé situé à l'est de la Côte d'Ivoire se distingue avec de faibles déficits de l'ordre de 10% sur la quasi-totalité des sous-bassins.

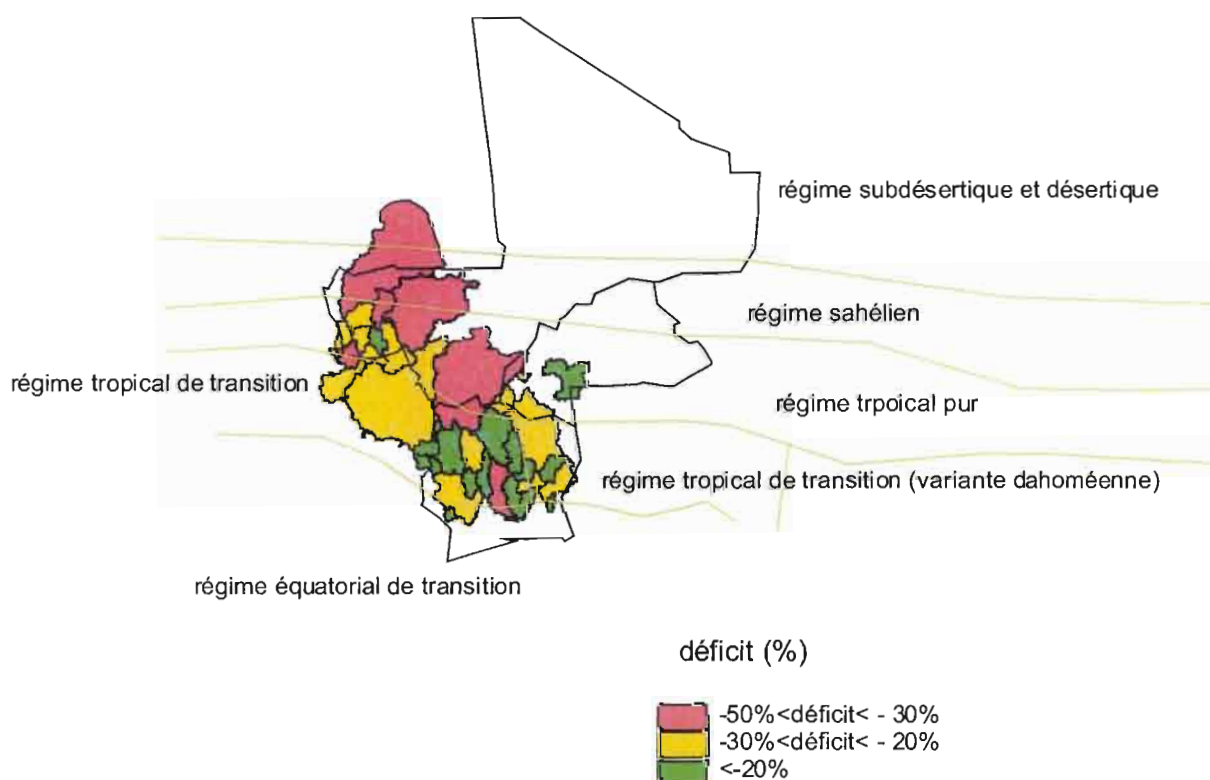


figure 4.14 : Variation relative entre les VCX1 calculés sur la période 1971-1997 par rapport aux VCX1 calculés sur la période 1950-1997 pour une récurrence décennale humide

4.5 TRAITEMENT DES CARACTERISTIQUES DES BASSES-EAUX

La variable relative aux faibles débits retenue pour cette analyse est le seuil minimal en dessous duquel les débits sont restés pendant n jours consécutifs (QCN n).

L'ajustement des lois statistiques nous a conduit à retenir la loi normale ou ses dérivées (loi Log-Normale retenue la plupart du temps) et, exceptionnellement, la loi Gamma incomplète pour les séries de QCN n calculés (test du χ^2 avec un risque de 1^{ère} espèce de 5% et test A^2 de Anderson-Darling).

La distribution des fréquences de QCN n diffère suivant la période choisie. Les résultats sont à peu près semblables pour les différents QCN. Nous avons choisi de présenter les résultats concernant le QCN1 sur les périodes 1951-1980, 1950-1997 et 1971-1997 pour les récurrences humides décennales, vicennales, cinquantennales, centennales (Tableau 4.3) et millenales (figure 4.15).

On observe une modification de la distribution de fréquence des QCN n selon les périodes 1951-1980, 1950-1997 et 1971-1997 considérées.

La figure 4.15 illustre les courbes d'ajustement des QCN1 sur ces trois périodes pour trois cours d'eau pérennes pour des récurrences humides.

Dans le Tableau 4.3, nous avons regroupé les valeurs de QCN1 associées à différentes récurrences humides.

L'examen des valeurs fréquentielles du tableau permettent de se rendre compte de la plus faible modification de ces valeurs selon la période considérée par rapport aux modifications observées sur les autres variables de l'écoulement traitées précédemment.

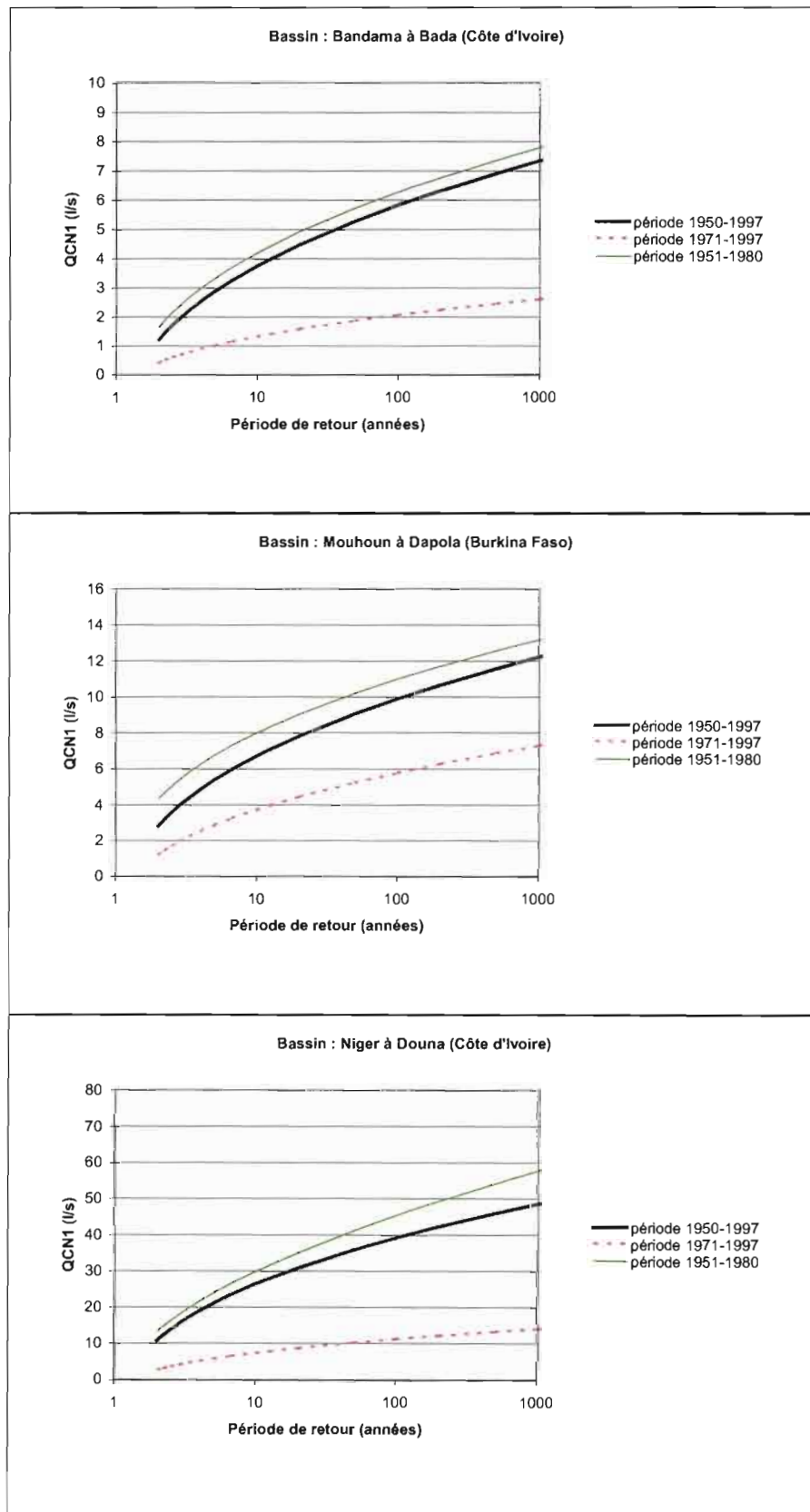


figure 4.15 : Courbes d'ajustement du QCN1 en fonction des périodes de retour (réurrences humides)

Tableau 4.3 : Valeurs de QCN1 (m3/s) associées aux récurrences humides

Pays	Nom station	fréquence											
		décennale			vicennale			cinquantennale			centennale		
		1951-1980	1950-1997	1971-1997	1951-1980	1950-1997	1971-1997	1951-1980	1950-1997	1971-1997	1951-1980	1950-1997	1971-1997
Burkina Faso	Yendere	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Dapola	8	7	4	9	8	4	10	9	5	11	10	6
	Samandeni	3	2	2	3	3	2	3	3	3	4	4	3
Côte d'Ivoire	Bada	5	4	1	7	4	2	9	5	2	10	6	2
	Mbrimbo	25	29	38	37	42	62	57	62	107	76	81	154
	Tiassale	29	44	51	42	55	58	62	69	67	80	80	72
	Rte Beoumni-Segou	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
	Bouaflé	1	1	0	2	1	0	2	2	1	3	2	1
	Bocanda	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Dimbokro	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
	Fetekro	3	2	0	4	3	0	5	4	0	6	4	0
	Mbahikro	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
	Nzianoa	1	1	0	2	1	0	4	1	0	5	1	0
	Akakomoekro	6	5	3	7	6	4	8	7	5	8	8	5
	Aniassue Pont	12	12	2	16	26	2	19	61	3	22	107	3
	Mbasso	3	3	1	4	3	2	4	4	2	5	4	2
	Serebougou	3	2	2	3	2	2	4	3	2	4	3	3
	Iradougou	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Semien	6	5	5	7	6	8	8	8	13	9	8	17
	Soubre	12	36	49	19	63	90	33	120	178	48	184	279
	Bafingdala	82	59	3	102	74	3	124	90	4	138	101	4
	Nibehibe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Mbesse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tai	18	15	9	21	18	13	25	21	18	27	23	23
Mali	Dire	77	70	45	106	97	59	152	140	79	194	179	96
	Koulikoro	98	103	101	123	115	114	160	129	128	190	138	138
	Douna	30	26	7	35	31	9	41	36	10	45	39	11
	Galougo	9	7	1	13	12	1	20	21	1	26	31	1
	Kayes	7	6	2	9	8	3	11	10	3	13	12	4
	Daka Saidou	15	13	7	18	16	8	21	20	10	23	22	12
	Dibia	14	11	1	17	14	1	20	17	1	22	19	1
	Bafing Makana	19	16	2	23	20	3	27	23	3	30	26	4
	Soukoutali	9	10	1	14	12	2	23	15	2	31	16	2
	Oualia	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
	Toukoto	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
	Fadougou	2	2	0	3	2	0	3	3	0	3	3	0
	Gourbassy	1	1	0	1	1	0	1	1	0	2	1	0
	Siramakana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Le Tableau 4.4 illustre les valeurs des QCN1 pour des récurrences décennales et vicennales sèches.

Tableau 4.4 : Valeurs décennales et vicennales du QCN1 (l/s) associées aux récurrences sèches

Pays	Nom station	fréquence					
		décennale			vicennale		
		1951-1980	1950-1997	1971-1997	1951-1980	1950-1997	1971-1997
Burkina Faso	Yendere	0	0	0	0	0	0
	Dapola	1	0	0	0	0	0
	Samandeni	1	0	0	1	0	0
Côte d'Ivoire	Bada	1	0	0	1	0	0
	Mbrimbo	2	2	1	1	1	1
	Tiassale	2	2	0	2	1	0
	Rte Beoumni-Segou	0	0	0	0	0	0
	Bouafle	0	0	0	0	0	0
	Bocanda	0	0	0	1	0	0
	Dimbokro	1	0	0	1	0	0
	Fetekro	0	0	0	0	0	0
	Mbahiakro	0	0	0	0	0	0
	Nzianoa	0	0	0	0	0	0
	Akakomoekro	1	0	0	1	0	0
	Aniassue Pont	0	0	0	1	0	0
	Mbasso	0	0	0	0	0	0
	Serebou	0	0	0	0	0	0
	Iradougou	0	0	0	1	0	0
	Semien	0	0	0	0	0	0
	Soubre	0	1	1	0	0	0
	Bafingdala	0	0	0	0	0	0
	Nibehibe	0	0	0	0	0	0
	Mbesse	0	0	0	0	0	0
	Tai	0	0	1	0	0	1
Mali	Dire	8	7	7	6	5	5
	Koulikoro	19	19	12	15	7	0
	Douna	1	0	0	1	0	0
	Galougo	0	0	0	0	0	0
	Kayes	0	0	0	0	0	0
	Daka Saidou	0	0	0	1	0	0
	Dibia	0	0	0	0	0	0
	Bafing Makana	0	0	0	0	0	0
	Soukoutali	0	0	0	1	0	0
	Oualia	0	0	0	0	0	0
	Toukoto	0	0	0	0	0	0
	Fadougou	0	0	0	0	0	0
	Gourbassy	0	0	0	0	0	0
	Siramakana	0	0	0	0	0	0

4.6 CONCLUSION

Ce chapitre soulève le problème de la limite relative des termes comme "normes hydrologiques" et "durée de retour" dans une région qui connaît actuellement une période de sécheresse. On a longtemps cru cette sécheresse passagère mais force est de constater que ce « passager » dure depuis maintenant 30 ans. Même si cette sécheresse s'inscrivait dans les oscillations aléatoires séculaires (millénaires ou autres ...) du climat, elle prend de telles allures de persistance que les échantillons de certaines variables climatiques et hydrologiques ne sont plus comparables sur l'ensemble de la période d'observation et la période après 1970.

Les normales pluviométriques calculées sur les période 1950-1979, 1960-1989 et 1970-1997 varient de manière très sensible d'une période à une autre. La normale 1950-1979 qui intègre deux décennies (1950 et 1960) qualifiées comme très arrosées à l'échelle séculaire, est supérieure à la normale sur la période 1960-1989. La normale 1950-1979 est évidemment encore plus importante que la normale établie sur la période 1970-1997.

L'intégration des données pluviométriques après 1970 à la série des observations depuis 1950 fournit un échantillon de données qui prend en compte des années fortement humides (1950-1969) et des années fortement sèches (depuis 1970). La comparaison des moyennes établies entre les échantillons constitués sur l'ensemble de la période d'observation depuis 1950 et les moyennes établies depuis 1970 montre des différences significatives. Les taux de variation entre les moyennes établies sur ces deux périodes varient la plupart du temps entre -10% et -20%. Dans certaines zones ils atteignent -40% et dépassent quelquefois -60%.

Les modifications observées au niveau des pluies se retrouvent également au niveau des écoulements.

L'étude statistique menée sur l'étude des valeurs de certaines variables hydrologiques les plus courantes pour caractériser le régime hydrologique d'un bassin a montré que selon que l'on intègre ou pas ces données récentes dans les séries chronologiques, les diminutions des "normes hydrologiques" (au sens de valeurs associées à des périodes de retour données) sont plus ou moins importantes.

L'étude des récurrence des modules sur les périodes 1950-1997 et 1970-1997 montre des taux de variation importants très souvent supérieurs à -30% pour une récurrence décennale humide. Ces taux de variation sont à peu près identiques quelle que soit la période de retour considérée. Les plus forts taux de variation affectent les bassins versants des zones de régime sahélien et tropical pur. Le bassin de la Comoé qui a une forme allongée et qui prend sa

source en zone de régime tropical pur connaît également des déficits importants compris entre -20% et -30% .

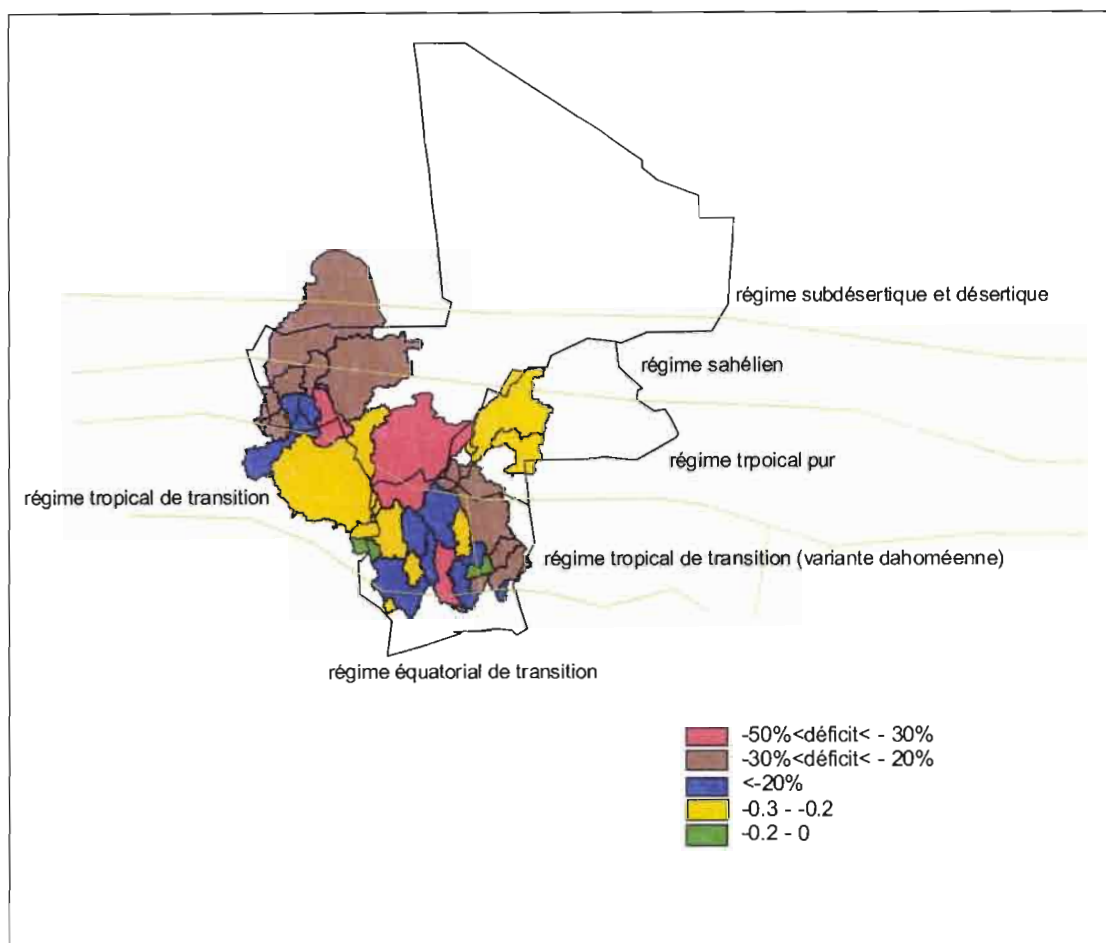


figure 4.16 : Variation relative entre les modules calculés sur la période 1971-1997 par rapport aux modules calculés sur la période 1950-1997 pour une récurrence décennale humide

L'examen de la distribution des fréquences des variables caractéristiques de hautes eaux montre des résultats similaires à ceux obtenus sur les débits moyens annuels. Les taux de variations entre les VCX1 (débits moyens journaliers maximums annuels) calculés sur les périodes 1950-1997 et 1971-1997 varient la plupart du temps entre -20 et -50% .

De même, les variables caractérisant les basses-eaux présentent des différences de leur distribution de fréquence d'apparition suivant la période considérée.

Au regard de l'ensemble des résultats obtenus dans ce chapitre, il s'avère que les études de prédétermination des variables hydrologiques et la non-stationnarité des séries mise en évidence dans les chapitres précédents, posent un réel problème dans l'évaluation des risques. Suivant que l'on intègre ou pas les données des 30 dernières années dans la série des échantillons, la prédétermination des variables de fréquence donnée est plus ou moins importante.

Ce résultat implique des enjeux sur les méthodes statistiques de prédétermination des variables hydrologiques. L'objectif de la statistique c'est d'inférer sur l'avenir en supposant que l'avenir est une reproduction du passé, d'où l'importance de la notion de stationnarité.

La notion de norme hydrologique fait référence à la prévision du futur par extrapolation du passé. Dans une optique de dimensionnement ou de gestion des ouvrages, on s'intéresse à une valeur remarquable, la norme hydrologique. Cependant, dans la situation où la stationnarité n'est pas vérifiée, quelle attitude faut-il adopter? Nous sommes en face d'un problème de gestion, de prévision. Avoir calculé les conséquences d'une telle situation, c'est avoir en main un élément décisionnel qui permette d'agir en connaissance de cause. Comment peut-on évaluer le risque associé à cette gestion? Peut-être faut-il s'orienter vers des techniques de simulation face à des situations connues?

L'attitude à adopter face à ce problème est très délicate. Elle dépend du risque final envisagé par le projeteur. Ce risque dépend autant de facteurs aggravants comme la topographie, l'anthropisation, que du seul risque météorologique ou hydrologique.

L'exemple du barrage de Bagré au Burkina Faso qui a été mis en eau en 1992 illustre parfaitement notre propos. Cet ouvrage a été conçu en se basant sur des données antérieures aux années 1980 donc sur une période globalement plus humide. Son évacuateur de crue a été dimensionné pour une crue de projet dont le débit de pointe a alors été estimé à 1520 m³/s. En 1994, une crue a été observée qui aurait atteint un débit de pointe estimé à 2050 m³/s. Que s'est il passé ? Des travaux menés par Mahé et al. (2001) sur une partie du bassin amont ont montré que depuis 1970, les coefficients de ruissellement avaient considérablement augmentés : alors qu'il pleuvait moins, les écoulements étaient dorénavant même plus importants (ce résultat ne concerne que le bassin du Nakambé et ne doit pas être généralisé comme l'a montré les valeurs obtenues sur d'autres bassins). Dans ce cas là, si on avait pris

en compte les données les plus récentes, on aurait abouti à des valeurs de débit de pointe bien supérieures à celles estimées alors.

L'étude menée a ainsi mis en évidence les différences qui existent sur les variables pluviométriques et hydrologiques à l'échelle ponctuelle. Pour compléter cette analyse, il semble intéressant d'étudier les différences occasionnées en terme de capacité de production, à une échelle régionale sur des caractéristiques de lames d'eau. Pour ce faire, la modélisation de la relation pluie-débit à grande échelle d'espace et de temps est une voie intéressante à explorer.

**CHAPITRE 5 : VARIABILITE DES
RESSOURCES EN EAU, APPORT DE LA
MODELISATION**

5 CHAPITRE 5 : VARIABILITE DES RESSOURCES EN EAU, APPORT DE LA MODELISATION

Le premier chapitre de cette étude a présenté une analyse bibliographique sur le thème de la variabilité climatique en Afrique, en mettant l'accent sur l'Afrique de l'Ouest. Il apparaît que des déficits pluviométrique et hydrométrique continus affectent de manière considérable l'Afrique de l'ouest depuis plus de 30 ans. Cette sécheresse qui se distingue des autres sécheresses persistantes qui se sont déjà produites depuis le début du siècle par son intensité, sa durée et son extension géographique, apparaît comme un phénomène sensible en raison des effets restrictifs qu'elle impose sur le plan économique et social.

Dans le troisième chapitre, nous avons cherché à vérifier la variabilité du climat dans notre zone d'étude à travers des analyses de quelques variables caractéristiques du climat. Nous avons constaté et quantifié une diminution des pluies annuelles et des pluies mensuelles pour la plupart des postes pluviométriques sélectionnés pour cette étude. Cette diminution des pluies s'est répercutée sur les débits, souvent avec une ampleur plus forte.

A partir de ces éléments, nous nous sommes intéressés dans ce chapitre aux éventuelles conséquences de cette variabilité du climat sur les ressources en eau à travers une approche de régionalisation hydrologique. Les résultats qui sont présentés concernent :

- une analyse bibliographique du concept de régionalisation
- une régionalisation des lames d'eau écoulées annuelles en s'appuyant sur une modélisation hydrologique spatialisée sur les périodes 1950-1995 et 1971-1995.

5.1 DE L'HYDROLOGIE REGIONALE ET DE LA REGIONALISATION

L'hydrologie régionale a connu un essor important au plan international durant les dernières années. Par le canal de réseaux fédérateurs tels que les projets FRIEND de l'UNESCO, des chercheurs mettent en commun des données et des méthodologies d'études. De la sorte, l'hydrologie régionale, tout en mettant l'accent sur les particularités des méthodes, opère une synthèse d'informations.

L'engouement des chercheurs vers ces projets fédérateurs va de pair avec le développement d'études de régionalisation en hydrologie. Ce qui fait de la régionalisation un domaine privilégié des grandes études de synthèse sur des problèmes et des approches diversifiées.

Malgré l'abondance des études ces dernières années sur le thème de régionalisation il n'est pas aisé de trouver une définition précise de ce qu'est la régionalisation.

Pour notre part, nous retiendrons la définition suivante : la régionalisation des variables hydrologiques est un ensemble de procédures visant à exploiter au maximum les informations existantes dans une région donnée pour estimer ou améliorer l'information en un site particulier.

La régionalisation s'inscrit donc dans une démarche de prédétermination. Elle nécessite des outils spécifiques d'étude et de traitement des aspects spatiaux des phénomènes et fait recours à de nouvelles technologies comme les systèmes d'information géographiques (SIG), les modèles numériques de terrain (MNT), la télédétection, etc., pour tenter de cerner la dimension régionale en hydrologie.

Parmi les techniques de base de la régionalisation on peut citer :

- l'interpolation : elle consiste à obtenir une estimation d'une variable en tout point, dans le but d'obtenir une image d'ensemble du phénomène tel qu'il se déploie dans l'espace,
- la simulation conditionnelle : elle consiste en l'élaboration d'une fonction représentative de la variable étudiée en tout point, respectant les valeurs observées, et représentative d'une réalité possible,
- la mise en loi : elle consiste à réduire les observations de la variable étudiée à une loi générale ne dépendant plus des considérations locales,
- la caractérisation d'effets liés à l'échelle : on s'intéresse à étudier la dépendance entre le phénomène étudié et la surface concernée,
- la segmentation : on s'intéresse à segmenter l'espace en domaines dits homogènes.

Ces différentes procédures ne sont pas toujours distinctes, les unes étant complémentaires des autres.

Dans ce qui suit, nous confondrons les termes de régionalisation et de modélisation spatialisée puisque notre prédétermination se basera sur une modélisation hydrologique.

5.2 MODELISATION SPATIALISEE DES LAMES D'EAU ECOULEES

Le problème de la spatialisation des variables hydrologiques au sein des systèmes d'eau constitue un enjeu majeur dans la compréhension et l'interprétation des phénomènes.

En s'appuyant sur les données de base, le but poursuivi dans cette partie est de trouver une méthodologie, utilisant un SIG, pour approcher les variables d'écoulement sur un bassin versant.

Afin d'être utile dans le cadre de la gestion et de la planification des ressources en eau, cette méthodologie se doit d'être simple, facilement exportable d'un bassin versant à un autre et basée sur des données existantes ou facilement collectables.

En se basant sur une recherche bibliographique, une série de modèles de bilan d'eau ont été retenus, puis appliqués à des bassins versants de différentes tailles et appartenant à différentes zones climatiques; la finalité étant d'aboutir à une cartographie de lames d'eau écoulées mensuelles et annuelles.

5.2.1 Généralités sur la modélisation spatialisée

Avec l'essor des outils de traitement et d'analyse des informations géographiques et géostatistiques, les modèles hydrologiques font de plus en plus appel à la structure spatialisée. L'utilisation des outils comme les SIG permet une approche plus aisée de régionalisation dans le cadre d'une modélisation hydrologique spatialisée. La spatialisation peut prendre diverses formes : mailles carrées ou triangulaires, régulières ou irrégulières, éléments en grappes, etc. (Girard et al., 1981; Bouvier et al., 1994; Le Barbé et Servat, 1992).

Théoriquement, cette structure devrait permettre une amélioration des performances des modèles puisqu'elle prend en compte l'organisation spatiale des différents facteurs intervenant dans la genèse de l'écoulement. Cependant, malgré les potentialités qu'offre la modélisation spatialisée, beaucoup d'auteurs s'accordent sur des difficultés d'application et d'interprétation des modèles spatialisés (Beven, 1989; Grayson et al., 1992).

Cette inadéquation semble être liée à la transposition des mécanismes observés à une échelle locale dans des conditions bien connues à des échelles beaucoup plus importantes et dans des conditions hétérogènes.

A ces difficultés d'ordre général, s'ajoute dans le cas de notre zone d'étude, le déficit ou le manque d'informations. Ce qui limite l'utilisation des modèles sophistiqués (physiques, distribués) à une échelle régionale.

Il semble donc avantageux de s'orienter vers d'autres approches de type analyse des systèmes, pour appréhender les fonctionnements à l'échelle du bassin.

C'est ainsi que la méthode que nous présentons dans ce chapitre fait appel à des modèles conceptuels de bilan hydrologique.

5.2.2 Justification du choix de la taille des mailles

La dimension de chaque grille utilisée pour l'étude est de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

Ce choix d'une structure simple et régulière est un compromis entre la taille qui est exigée pour représenter la variabilité spatiale (Arnell et al., 1996, Yates, 1997) et celle pour laquelle on dispose de données convenables.

Yates (1997) pense qu'une résolution inférieure ou égale à $1^\circ \times 1^\circ$ permet de représenter la variabilité spatiale à un niveau acceptable.

Arnell et Reynards (1996) pensent qu'une grille de dimension supérieure à $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ conduirait à perdre la bonne qualité de représentation de la variabilité, et une résolution plus fine nécessiterait une quantité énorme de données et des efforts considérables pour les calculs. Une autre raison de notre choix est que plusieurs types de données globales sont actuellement déjà disponibles à cette résolution, simplifiant l'application de la méthodologie à une échelle régionale.

5.2.3 Justification de la modélisation proposée

Les modèles pluie-débit fonctionnant à des pas de temps faibles (horaire, journalier) peuvent être employés pour les mêmes fins que les modèles mensuels. Mais ces modèles requièrent des données d'entrée qui ne sont malheureusement pas toujours disponibles. En plus, ces modèles sont d'une utilisation beaucoup plus complexe que les modèles mensuels et sont généralement assez lourds à manipuler.

Gleick (1986) montre que pour une étude à l'échelle régionale, un modèle fonctionnant au pas de temps mensuel est suffisant. C'est aussi l'échelle de temps des gestionnaires de projet, d'aménagement et autres.

5.2.4 Les principes de l'évaluation de l'écoulement

La méthode consiste à estimer les lames d'eau mensuelles et annuelles sur chaque maille en fonction de la pluie, de l'évapotranspiration potentielle en utilisant un modèle de bilan hydrologique couplé à un SIG. Il existe un certain nombre de tentatives récentes consistant à intégrer des modèles hydrologiques dans les SIG. Il est effectivement intéressant d'utiliser les fonctionnalités qu'offrent les SIG même s'il est vrai que certaines techniques liées à la modélisation (optimisation, analyse de sensibilité, etc.) ne figurent pas dans les SIG. Le SIG ARCVIEW que nous avons retenu permet grâce à son module de programmation AVENUE de pallier cette lacune.

A l'aide des grilles de précipitation, d'évapotranspiration potentielle et de caractéristiques physiographiques disponibles, on simule à l'aide d'un modèle de bilan, les variations de l'humidité du sol, de l'évapotranspiration réelle et de l'écoulement. Celles-ci sont calculées pour chaque maille, indépendamment les unes des autres, et ce pour chaque pas de temps. On superpose à cette grille les contours des bassins versants. L'écoulement total à l'exutoire de chacun des bassins est obtenu par sommation des contributions élémentaires des différentes mailles qui les constituent. Lorsqu'une maille intersecte une limite de bassin versant, ce calcul sera pondéré par la superficie du bassin versant au sein de cette maille.

Une simplification est ainsi faite en n'intégrant aucune procédure de transfert dans le schéma de fonctionnement des modèles. Comme le pas de temps choisi est mensuel, cette procédure nous a semblé superflue.

Trois modèles de bilan d'eau ont été retenus. Il s'agit :

- d'une version modifiée (Conway et Jones, 1999) d'un modèle de bilan initialement proposé et défini par Thornthwaite et Mather (1955),
- du modèle GR2M du CEMAGREF (Makhlouf, 1994),
- du modèle de Yates (Yates, 1997).

5.2.5 Processus de fonctionnement général des modèles choisis

Les modèles utilisés dans notre étude sont des modèles au pas de temps mensuel qui utilisent les mêmes données à savoir, la pluie, l'évapotranspiration potentielle, le débit et des données liées au stockage de l'eau dans le sol (capacité de rétention en eau du sol pour les modèles GR2M et Conway ; capacité maximale de stockage d'eau dans le sol pour le modèle de Yates).

Les modèles GR2M et Conway comportent des paramètres dont les valeurs numériques sont obtenues après optimisation d'un critère de qualité des débits générés par ces modèles.

Les paramètres du modèle de Yates, quant à lui, sont reliés à des caractéristiques physiques du bassin et ne nécessitent aucune procédure d'optimisation (Yates, 1997).

Ces modèles présentent un mode de fonctionnement comparable, même si les équations qui les décrivent sont différentes. Nous résumons comme suit le mode de fonctionnement général commun à ces modèles :

- une fraction de la pluie mensuelle participe à l'écoulement direct,
- le niveau d'un réservoir qui représente le stock d'eau évolue en fonction de la pluie et de l'évapotranspiration potentielle par l'intermédiaire d'une évapotranspiration réelle,
- une vidange progressive de ce stock d'eau produit l'écoulement lent.

5.2.6 Présentation des modèles

5.2.6.1 Le modèle GR2M

Le modèle GR2M a été élaboré au CEMAGREF sur un ensemble de bassins français (Makhlouf, 1994).

La particularité de ce modèle réside dans sa simplicité ainsi que dans le nombre relativement faible de ses paramètres. Ce modèle conceptuel global de simulation des débits fonctionne au pas de temps mensuel et comporte deux paramètres. En outre il a connu de nombreuses applications sur des bassins de notre zone d'étude (Paturel et al., 1995b; Ouedraogo, 1996; Ouedraogo et al., 1998; Aka, 1999).

Le modèle GR2M est constitué :

- d'un réservoir sol qui régit la fonction de production et qui est caractérisé par sa capacité maximale A. La capacité A représente la capacité de rétention en eau du sol,
- d'un réservoir eau gravitaire qui régit la fonction de transfert.

Les deux entrées pluie (P) et évapotranspiration (ETP) sont modulées dans la même proportion et concomitamment en multipliant les valeurs de ces entrées par un coefficient $X1$ ($0 < X1 < 1$) qui est un paramètre du modèle à estimer.

Ensuite, on soustrait une même quantité U à la pluie modulée ($P'=X_1.P$) et à l'évapotranspiration potentielle modulée ($ETP'=X_1.E$) du mois considéré. La quantité U est de la forme :

$$U = \frac{P' \cdot ETP'}{\left(\sqrt{P'} + \sqrt{ETP'}\right)^2} \quad \text{éq. 5.1}$$

Ces opérations sur la pluie et l'évaporation donnent respectivement :

$$P_n = X_1 P - U \quad \text{éq. 5.2}$$

$$E_n = X_1 ETP - U \quad \text{éq. 5.3}$$

Soit H le niveau du réservoir sol en début du pas de temps.

Une partie de P_n augmente le niveau H du réservoir qui devient $H1$:

$$H1 = \frac{H + AV}{1 + \frac{AV}{A}} \quad \text{éq. 5.4}$$

avec $A = 200 \text{ mm}$ et $V = \tanh \frac{P_n}{A}$

Le complément de P_n est donc :

$$P_e = P_n - (H1 - H) \quad \text{éq. 5.5}$$

Sous l'effet de E_n , le niveau $H1$ du réservoir devient $H2$:

$$H2 = \frac{H1(1 - W)}{1 + W(1 - \frac{H1}{A})} \quad \text{éq. 5.6}$$

où

$$W = \tanh \frac{En}{A}$$

H2 correspond au niveau du réservoir sol au début du pas de temps suivant.

L'évapotranspiration réelle peut être déduite par différence des niveaux du réservoir sol au début et à la fin du mois.

Le réservoir eau gravitaire reçoit $\frac{4}{5}Pe$ tandis que $\frac{1}{5}Pe$ s'écoule directement.

Le niveau S du réservoir au début du mois considéré augmente et devient S1 :

$$S1 = S + \frac{4}{5}Pe \quad \text{éq. 5.7}$$

Le débit délivré par ce réservoir linéaire est

$$Qg = X_2 S1 \quad \text{éq. 5.8}$$

avec $0 < X_2 < 1$, X_2 étant le second paramètre du modèle.

Le niveau S2 du réservoir à la fin du pas de temps de calcul est alors :

$$S2 = S1 - Qg \quad \text{éq. 5.9}$$

L'écoulement total Q s'écrit alors

$$Q = Qg + \frac{Pe}{5} \quad \text{éq. 5.10}$$

L'architecture du modèle GR2M est présentée en figure 5.1

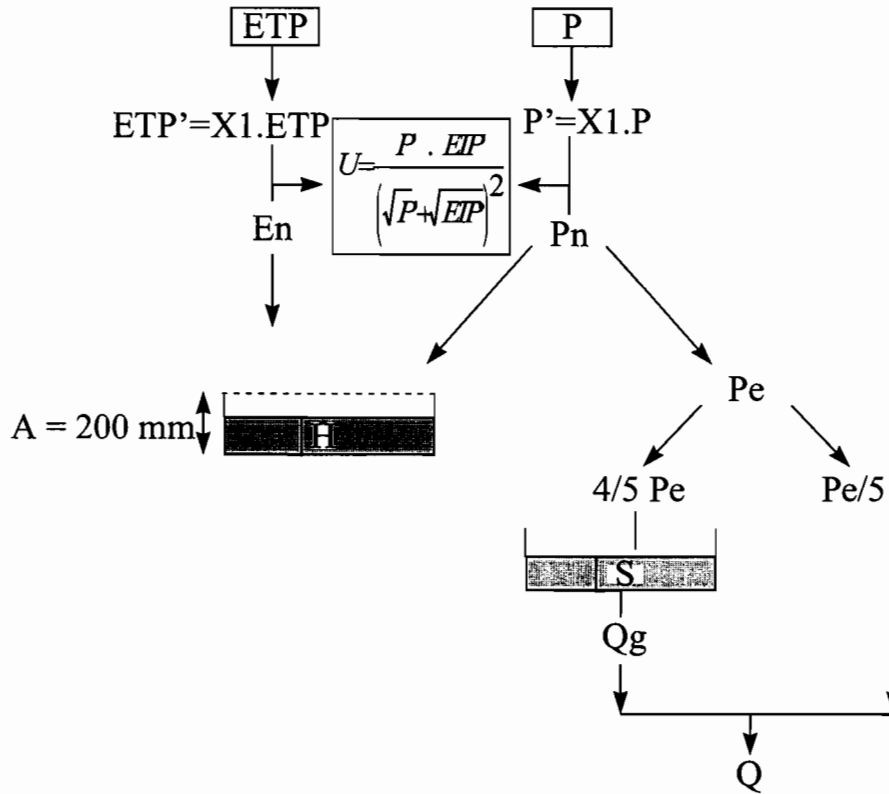


figure 5.1 : Schéma de fonctionnement du modèle GR2M

5.2.6.2 Le modèle de Conway

Le modèle de bilan d'eau simule les variations de l'humidité du sol, de l'évapotranspiration réelle et de l'écoulement en fonction des précipitations (P), de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et des caractéristiques du sol. Les variables d'état sont définies par les interactions entre les précipitations, l' ETP et le stock d'humidité du sol.

Pour que l'écoulement (R) se produise, il faut que la pluie excède l' ETP et satisfasse le déficit d'humidité du sol (SMD). Une proportion α de la pluie se transforme en écoulement direct avant qu'on n'établisse le bilan d'eau.

Pendant les mois où la pluie excède l' ETP et SMD est satisfaite, le surplus s'ajoute au stock d'eau du mois précédent (SR_{i-1}) pour constituer l'eau potentiellement disponible du mois considéré (AR_i) :

$$AR_i = (P_i - \alpha P_i) + SR_{i-1} - ETP_i + SMD_{i-1} \quad \text{éq. 5.11}$$

$$R_i = \alpha.P_i + \beta.AR_i \quad \text{éq. 5.12}$$

Une fraction β de AR_i s'ajoute à l'écoulement direct pour donner l'écoulement total :

Le complément de l'eau potentiellement disponible forme l'eau disponible pour le prochain mois et SMD est remis à zéro.

$$SR_i = (1 - \beta)AR_i \quad \text{éq. 5.13}$$

Lorsque la pluie est insuffisante pour satisfaire l'ETP et combler le déficit d'humidité, l'humidité contribue à satisfaire en partie la demande évaporatoire et SMD s'accroît.

$$SMD_i = SMD_{i-1} + (P_i - \alpha.P_i) - ETR_i \quad \text{éq. 5.14}$$

Plus le sol s'assèche, plus il est difficile de satisfaire la demande évaporatoire. C'est ainsi que l'ETR est exprimé comme suit :

où $ETR_i = K.ETP_i$, K dépend de l'état d'humidité du sol.

Dans le cas où $SMD_{i-1} > -25$ mm, $K = 1$

Dans le cas où $-0.5WHC < SMD_{i-1} < -25$, K est défini par la relation suivante :

$$K = 0.5 + 0.5 \frac{0.5.WHC + SMD_{i-1}}{0.5.WHC - 25}$$

Lorsque $SMD_{i-1} < -0.5.WHC$, $K = 0.1$

Le débit total est donné par :

$$R_i = \alpha.P_i + \beta.SR_{i-1} \quad \text{éq. 5.15}$$

Le schéma de fonctionnement du modèle est proposé sur la figure 5.2 ci-après.

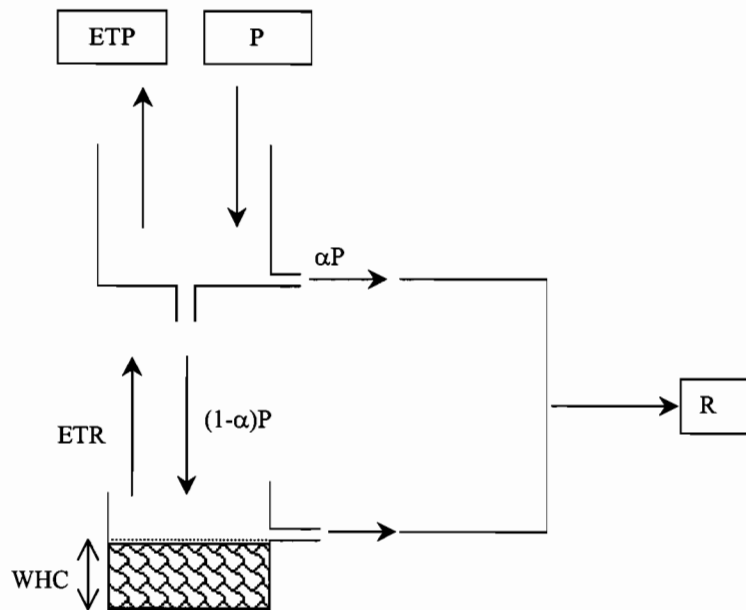


figure 5.2 : Schéma de fonctionnement du modèle de Conway

5.2.6.3 Le modèle de Yates

Le modèle décrit par Yates (1997) est un modèle de bilan d'eau dont la particularité réside dans le fait que les écoulements de surface et de sub-surface et l'évapotranspiration potentielle sont représentés par une fonction continue de l'humidité du sol.

L'équation du bilan avec ce modèle est de la forme suivante :

$$S_{\max} \frac{dz}{dt} = R_s(P, z, t) - R_{ss}(z, t) - E_r(Pet, z, t) \quad \text{éq. 5.16}$$

où

RS : désigne l'écoulement de surface

RSS : l'écoulement de sub-surface

Er : l'évapotranspiration réelle

Smax : Capacité maximale de stockage du sol (intègre le sol de la zone racinaire et les couches de sol plus profondes). Smax est un paramètre du modèle.

z : le niveau relatif du stock d'eau (rapport entre le stock d'eau et Smax)

Une relation non linéaire est utilisée pour décrire l'évapotranspiration réelle :

$$E_r(Pet, z, t) = Pet \left(\frac{5z - 2z^2}{3} \right) \quad \text{éq. 5.17}$$

L'écoulement de surface est fonction du niveau relatif du stock d'eau z :

$$R_s(P, z, t) = z^\epsilon P \quad \text{éq. 5.18}$$

L'écoulement de sub-surface s'écrit :

$$R_{ss}(z, t) = \alpha z^2 \quad \text{éq. 5.19}$$

L'écoulement total est obtenu en faisant la sommation de l'écoulement de surface et de l'écoulement de sub-surface :

$$R = R_s + R_{ss} \quad \text{éq. 5.20}$$

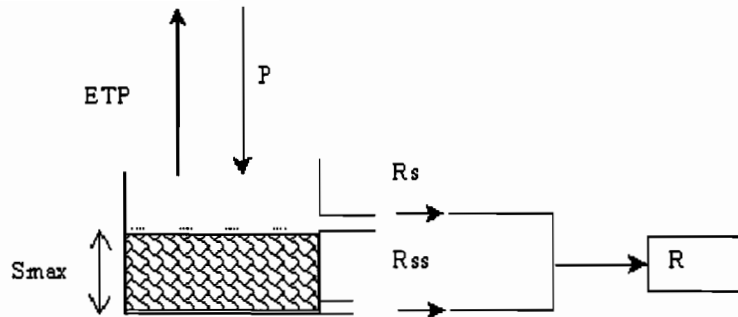


figure 5.3 : Schéma de fonctionnement du modèle de Yates

5.2.7 Protocole d'identification et d'analyse des paramètres

5.2.7.1 Identification des paramètres des modèles GR2M et Conway

Les modèles GR2M et Conway comportent des paramètres dont les valeurs numériques sont obtenues après optimisation d'un critère de qualité des débits générés par ces modèles.

La démarche employée pour le calage des paramètres des modèles, est une succession d'opérations pour déterminer les valeurs numériques des paramètres qui conviennent le mieux à l'utilisation du modèle. Pour chaque bassin, cette démarche est constituée de deux étapes :

- une étape de calibration,
- une étape de validation.

Une analyse des résultats obtenus nous conduira à retenir sur chaque bassin les modèles qui présentent les meilleures performances pour la suite de notre étude.

5.2.7.1.1 Échantillons de calage et de validation

On a procédé au calage des paramètres du modèle en se référant à des valeurs observées à l'exutoire du cours d'eau considéré.

Pour chaque bassin, les séries de données ont été divisées en deux sous-séries plus ou moins égales sur l'ensemble de la période d'observation. Les valeurs numériques des paramètres ont été calées sur la première sous-série puis validées sur la seconde.

5.2.7.1.2 Critère d'optimisation et critère de qualité de l'ajustement des modèles

La fonction critère que nous avons retenue pour l'optimisation des paramètres des modèles est la somme du carré des écarts entre les valeurs observées et calculées (SCE).

Pour mesurer la qualité de l'ajustement et faciliter la comparaison des ajustements sur différents bassins dont les écoulements correspondent à des ordres de grandeur différents, il est indiqué d'utiliser un critère adimensionnel. Nous avons donc choisi d'utiliser le critère proposé par Nash et Sutcliffe (1970) que nous désignerons par l'appellation NASH et qui s'écrit comme suit :

$$NASH = 100 \left[1 - \frac{\sum_i (Q_o^i - Q_c^i)^2}{\sum_i (Q_o^i - Q_m)^2} \right] \text{ en \%}$$

avec Q_o^i et Q_c^i désignant les débits respectivement observés et calculés ; Q_m le débit moyen observé sur l'ensemble de la période d'observation sans lacune.

Le modèle ajusté est d'autant meilleur que le critère de NASH est proche de 100.

On peut déduire une relation entre le critère de Nash et SCE qui s'écrit :

$$NASH = 100 \left[1 - \frac{SCE}{\sum_i (Q_o^i - Q_m)^2} \right]$$

5.2.7.1.3 Méthode numérique d'optimisation

Les paramètres des modèles GR2M et Conway sont calibrés en utilisant une méthode numérique d'optimisation non linéaire qui s'appuie sur un cheminement dans l'espace vers la valeur minimale d'un critère d'écart entre les réponses observées et calculées par le modèle.

Deux processus d'optimisation bien connus en hydrologie ont été choisis. Il s'agit de la méthode d'optimisation de Rosenbrock et celle de Nelder et Mead.

Ces méthodes, dites méthodes locales (Perrin, 2000), adoptent une stratégie itérative dans laquelle, partant d'un point de l'espace des paramètres, on se déplace dans une direction qui

améliore continûment la valeur de la fonction critère, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'amélioration.

La méthode d'optimisation de Rosenbrock a la particularité de permettre le calcul de l'optimum d'une fonction qui n'est ni dérivable, ni continue (Guilbot, 1971 Servat, 1986).

C'est une méthode de recherche séquentielle qui permet à la fois :

- de déterminer la longueur du pas de recherche,
- de déterminer la direction de ce pas,
- de tenir compte des contraintes possibles imposées aux paramètres.

La méthode numérique utilisée a connu quelques modifications pour mieux l'adapter à la modélisation pluie-débit (Servat et Dezetter, 1988).

La méthode d'optimisation de Nelder et Mead est basée sur un algorithme antérieur, la méthode du simplex de Spendley.

Un simplex est un polyèdre régulier dans l'espace à n dimensions E^n . Dans le cas de la recherche du minimum d'une fonction critère $f(x)$, on peut sélectionner des jeux de valeurs de x en des points de E^n situés aux sommets du simplex. En géométrie analytique, on peut montrer que les coordonnées des sommets d'un simplex régulier composent une matrice D , dans laquelle les colonnes représentent les composantes des sommets (numérotés de 1 à $n+1$), et les lignes les coordonnées (de $i=1$ à n).

Soit i étant le nombre de paramètres d'ajustement du modèle, à partir de $(i+1)$ points fixés arbitrairement, la méthode consiste à déterminer, par des transformations géométriques combinant homothéties et symétries, un point dont le critère est inférieur à ceux associés aux points de départ. L'opération est ainsi répétée de manière itérative jusqu'à ce qu'il n'y ait pas d'amélioration du critère et le processus s'arrête.

Une des limites des méthodes numériques d'optimisation est l'identification de solutions qui peuvent correspondre à des minima relatifs. Dans l'application pratique, pour pallier à ce problème, nous avons adopté la méthodologie suivante inspirée des travaux de Servat (1993) :

- grâce à une procédure d'itérations, nous balayons le domaine des paramètres du modèle suivant un pas de temps fixe,

- le jeu de paramètres qui donne le meilleur critère de qualité est retenu comme paramètres initiaux pour une procédure d'optimisation automatique par la méthode de Rosenbrock, réputée pour son efficacité au début de la recherche de la solution optimum,
- le résultat de la recherche est enfin affinée par l'utilisation de la méthode de Nelder et Mead.

Le processus d'optimisation est limité à un nombre d'itérations égal à 50 fois le nombre de paramètres à optimiser. Cependant, avec la méthode de Nelder et Mead, la procédure d'optimisation peut s'arrêter avant, lorsque la fonction critère ne varie pratiquement plus.

5.2.7.2 Identification des paramètres du modèle de Yates

Le modèle comporte 3 paramètres : ε , α , et $S_{\max}$.

L'avantage de ce modèle est que ces trois paramètres peuvent être déterminés sans aucune procédure de calage et validation.

Yates (1997) en s'appuyant sur le schéma de classification climat-végétation de Holdridge, propose une prédétermination des paramètres (Tableau 5.1) basée sur une méthode purement empirique déjà appliquée à notre zone d'étude. Le coefficient d'écoulement de sub-surface α dépend du stock d'eau dans le sol. Les régions à forte valeur de coefficient d'écoulement (débit/pluie) correspondent en général à des zones à forte valeur de coefficient d'écoulement de sub-surface α , et inversement.

Le paramètre ε détermine la part de l'écoulement de surface (ou écoulement direct). L'écoulement direct dépend de la pluie et du niveau relatif de stock d'eau dans le sol. De faibles valeurs de ε participent à un accroissement de la contribution de l'écoulement de surface dans l'écoulement total.

Tableau 5.1 : Paramètres α , ε et Smax en fonction du Schéma de classification de Holdridge (d'après Yates, 1997)

	Classification	α	ε	Smax (mm)
1	Tundra/polar	8.0	1.0	500
2	Foret tundra/ alpine	7.0	1.5	600
3	Boreal Forest	6.0	2.0	800
4	Cool desert	2.5	1.5	1000
5	Steppe	2.5	1.0	1000
6	Temperate forest	5.0	2.5	1000
7	Hot desert	0.2	4.0	1500
8	Chapparral	0.8	2.5	1500
9	Warm temperate forest	0.3	4.0	1500
10	Tropical/Sub-tropical semi- arid	0.2	3.5	1600
11	Tropical/Sub-tropical dry forest and savannah	0.4	3.5	1600
12	Tropical/Sub-tropical saisonnal forest	3.0	5.0	2000
13	Tropical/Sub-tropical rain and wet forest	4.5	4.0	2400

5.2.8 Analyse des résultats des modèles sur des bassins tests

Nous avons sélectionné 7 sous-bassins du Bandama , du Niger et du Mouhoun (ex Volta Noire), représentatifs de la zone d'étude et de superficie variant de 1000 km² à 120 000 km².

Le Tableau 5.2 donne quelques caractéristiques de ces 7 bassins tests.

Tableau 5.2 : Détails sur les bassins tests

Pays	Cours d'eau principal	Nom Station	Superficie (Km2)	Période d'observation	Période de calage	Période de validation
Burkina Faso	Mouhoun	Boromo	58 000	1956-1993	1956-1975	1976-1993
	Mouhoun	Samandeni	4 575	1956-1994	1956-1976	1977-1994
Côte d'Ivoire	Bandama	Bada	24 050	1962-1996	1962-1978	1979-1995
	Niger	Iradowgou	1 990	1962-1996	1962-1978	1979-1995
	Sassandra	Semien	29 300	1954-1996	1954-1976	1977-1996
Mali	Niger	Koulikoro	120 000	1950-1996	1950-1974	1975-1996
	Niger	Douna	101 600	1950-1996	1950-1974	1975-1996

Nous avons utilisé l'ensemble des données qui étaient disponibles, à savoir les 3 grilles de pluie (TRAVAIL, CRU, CRU-IRD), les 3 grilles d'ETP (ETP RC, ETP TO, ETP PM) et les 2 grilles de sol (CRU, FAO) définies au chapitre 2.

Toutes ces grilles ont été combinées les unes aux autres, permettant ainsi 18 jeux possibles de grilles de données d'entrée pour chacun des modèles et bassins versants utilisés. 126 opérations de calage et validation ont donc été effectuées pour chacun des modèles GR2M et Conway.

5.2.8.1 Calage-validation du modèle GR2M

Nous avons procédé au calage automatique des paramètres du modèle GR2M sur l'ensemble des 7 bassins tests. Le Tableau 5.3 regroupe les valeurs moyennes, l'écart type, le minimum et le maximum des principales caractéristiques des procédures de calage et validation.

Tableau 5.3 : Caractéristiques des calages-validations du modèle GR2M

	Paramètre 1	Paramètre 2	Critère de Nash	
			Calage	Validation
Moyenne	0.47	0.36	76	41
Écart-type	0.13	0.17	7	44
Minimum	0.16	0.00	56	-108
maximum	0.79	0.55	90	90

L'observation des valeurs du tableau permet de se rendre compte que d'une manière générale, les calages du modèle GR2M sont de bonne qualité. La moyenne du critère de Nash est égale à 76 avec la plupart des valeurs supérieures à 60. Le modèle GR2M semble donc s'adapter à toutes les circonstances (différents jeux de données d'entrée) en phase de calage.

En phase de validation, on observe que le critère de Nash se dégrade. La moyenne du critère de Nash n'est plus que de 48. On note l'apparition de valeurs négatives du critère de Nash en phase de validation, ce qui témoigne de la mauvaise reconstitution des hydrogrammes observés, quand on sait que le critère de Nash doit tendre idéalement vers 100.

5.2.8.2 Calage-validation du modèle Conway

Le calage-validation systématique du modèle Conway sur les 7 bassins tests a fourni les résultats dont les valeurs moyennes, l'écart type, le minimum et le maximum des principales caractéristiques sont regroupées dans le Tableau 5.4.

Tableau 5.4 : Caractéristiques des calage-validations du modèle Conway

	Paramètre 1	Paramètre 2	Critère de Nash	
			Calage	Validation
Moyenne	0.04	0.20	40	21
Écart-type	0.06	0.16	30	44
Minimum	0.00	0.00	-6	-154
maximum	0.16	0.56	90	87

L'examen des valeurs caractéristiques montre une qualité relativement faible des calages et validations effectués à l'aide du modèle Conway.

5.2.8.3 Application du modèle de Yates

Rappelons que le modèle de Yates ne nécessite aucune procédure d'ajustement de ses paramètres. Il a donc été appliqué sur l'ensemble de la période de données d'entrée (pluie et ETP) disponibles.

Sur 5 bassins-tests, on a pu obtenir, au moins, une combinaison de grille de données d'entrée pour laquelle le coefficient de Nash dépassait le seuil de 70 (Tableau 5.5). Cela n'a pas pu être possible pour les bassins de Boromo et Samandeni :

- sur le bassin de Samandeni, la meilleure valeur du critère de Nash est égale à 67 avec comme fichiers d'entrée, la grille de pluie TRAVAIL et la grille d'ETP PM
- sur le bassin de Boromo, la meilleure valeur du critère de Nash étant égale à 15 avec comme fichiers d'entrée, la grille de pluie TRAVAIL et la grille d'ETP RC.

**Tableau 5.5 : Sélection des meilleures valeurs du critère de Nash obtenues
avec le modèle de Yates**

Bassin	période	pluie	ETP	NASH
Bada	1962-1995	TRAVAIL	TO	77
Douna	1950-1995	CRU-IRD	TO	71
Iradougou	1962-1995	CRU	PM	72
Iradougou	1962-1995	CRU	TO	78
Iradougou	1962-1995	CRU-IRD	TO	70
Iradougou	1962-1995	TRAVAIL	TO	79
Koulikoro	1950-1995	CRU	PM	78
Koulikoro	1950-1995	CRU	TO	85
Koulikoro	1950-1995	CRU-IRD	PM	77
Koulikoro	1950-1995	CRU-IRD	TO	85
Semien	1954-1995	CRU	RC	80
Semien	1954-1995	TRAVAIL	RC	82

5.2.8.4 Comparaison de la performance des modèles

D'une manière générale, les 3 modèles associés aux combinaisons des grilles de données d'entrée conduisent à une bonne reproduction de la forme des hydrogrammes observés tant en période de calage qu'en période de validation.. Sur la figure 5.4 nous avons représenté les hydrogrammes observés et calculés sur la période de validation pour le bassin du Bandama à Bada (grille TRAVAIL pour la pluie, grille TO pour l'ETP et grille FAO pour le sol). On note une bonne reconstitution des faibles écoulements. Les débits de pointe calculés sont bien situés dans le temps mais sont surestimés.

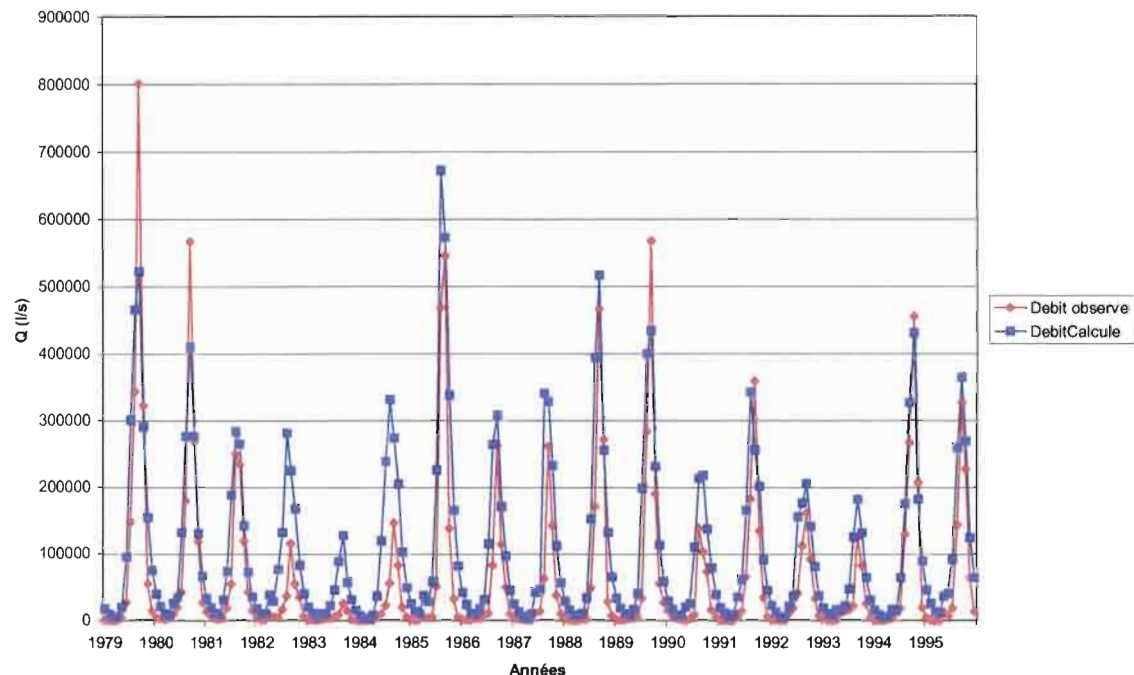


figure 5.4 : Hydrographes observés et calculés sur la période de validation (modèle GR2M) sur le bassin du Bandama à Bada

Afin d'établir une autre comparaison de la performance des trois modèles, nous avons simulé sur l'ensemble de la période d'observation des débits les écoulements à l'exutoire des bassins tests à l'aide des jeux respectifs de paramètres optimisés pour les modèles GR2M et Conway et des paramètres régionalisés du modèle de Yates. Nous avons retenu, pour chaque bassin, les meilleures combinaisons de grilles de données qui donnent les valeurs les plus élevées du critère de Nash (Tableau 5.6).

Il ressort de l'analyse du Tableau 5.6 que le modèle GR2M donne les meilleures valeurs du critère de Nash pour 4 bassins sur les 7 bassins tests. Le modèle de Yates fournit des valeurs du critère de Nash assez homogènes sauf sur le bassin de Boromo où la valeur du critère de Nash est égale à 15. Par contre, le modèle Conway présente des performances plus disparates que les deux autres modèles, même si il fournit les meilleurs résultats pour les bassins de Koulikoro et Douna.

Tableau 5.6 : Meilleures grilles de données d'entrée pour les bassins-tests et valeurs du critère de Nash sur l'ensemble de la période d'observation

Bassin	modèle GR2M				modèle Conway				modèle Yates		
	pluie	ETP	sol	NASH	pluie	ETP	sol	NASH	pluie	ETP	NASH
Bada	TRAVAIL	TO	FAO	75	TRAVAIL	RC	FAO	71	TRAVAIL	TO	77
Boromo	TRAVAIL	TO	FAO	77	CRU	RC	FAO	46	TRAVAIL	RC	15
Douna	CRU-IRD	TO	FAO	65	CRU	RC	FAO	76	CRU-IRD	TO	71
Iradougou	TRAVAIL	TO	FAO	81	CRU	RC	FAO	80	TRAVAIL	TO	79
Koulikoro	CRU-IRD	TO	FAO	81	CRU-IRD	RC	FAO	90	CRU-IRD	TO	85
Samandeni	TRAVAIL	RC	FAO	73	TRAVAIL	RC	FAO	61	TRAVAIL	PM	67
Semien	CRU	RC	FAO	89	CRU	PM	CRU	46	TRAVAIL	RC	82

5.2.8.5 Analyse de la pertinence des jeux de données.

Nous avons souhaité procéder ensuite à une comparaison de la performance des modèles en fonction de chaque grille de données pluie (TRAVAIL, CRU-IRD et CRU), ETP (PM, TO et RC) et sol (FAO et CRU). Cette comparaison sera basée sur les valeurs du critère de Nash.

Le Tableau 5.7 regroupe les résultats des processus de calage et de validation des modèles GR2M et Conway sur le bassin du Bandama à Bada. Les autres résultats obtenus sur les autres bassins sélectionnés sont présentés en annexe.

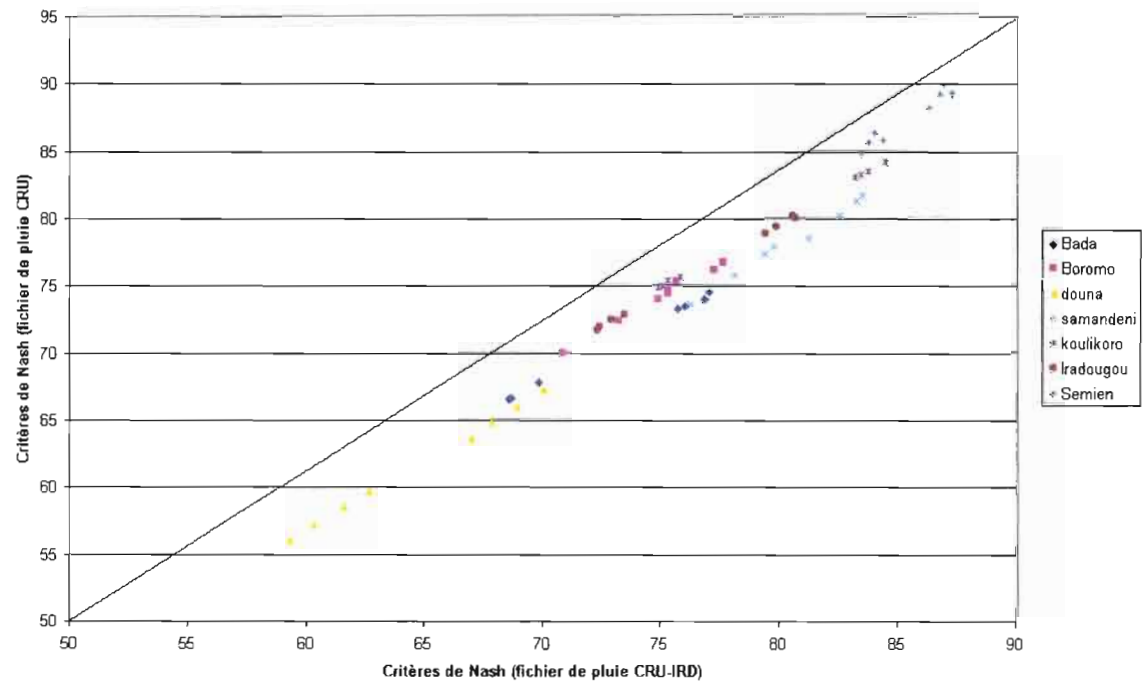
Tableau 5.7 : Résultats des tests de calage-validation sur le bassin de Bada

Combinaison des données			Modèle GR2M		Modèle CONWAY	
PLUIE	ETP	SOL	Nash Calage	Nash validation	Nash Calage	Nash validation
CRU	RC	FAO	74	46	80	48
CRU	PM	FAO	73	42	27	-116
CRU	TO	FAO	75	44	22	-127
CRU-IRD	RC	FAO	77	42	81	7
CRU-IRD	PM	FAO	76	41	17	-145
CRU-IRD	TO	FAO	77	42	13	-154
TRAVAIL	RC	FAO	80	61	83	46
TRAVAIL	PM	FAO	80	61	34	-46
TRAVAIL	TO	FAO	81	62	29	-54
CRU	RC	CRU	67	39	60	-22
CRU	PM	CRU	67	36	22	14
CRU	TO	CRU	68	38	22	14
CRU-IRD	RC	CRU	69	37	55	-66
CRU-IRD	PM	CRU	69	36	23	15
CRU-IRD	TO	CRU	70	37	23	15
TRAVAIL	RC	CRU	73	55	64	1
TRAVAIL	PM	CRU	73	54	29	14
TRAVAIL	TO	CRU	74	56	29	14

5.2.8.6 Influence du type de pluie

L'examen des résultats obtenus montre que, avec le modèle GR2M, la grille de pluie CRU-IRD et celle que nous avons bâtie (TRAVAIL) fournissent les meilleurs résultats au regard du critère de Nash.

En comparant des résultats obtenus avec les fichiers CRU-IRD et CRU et en utilisant le modèle GR2M (figure 5.5), on montre une amélioration nette des critères de Nash avec le fichier de pluie CRU-IRD. A priori, ce résultat ne nous surprend pas. L'amélioration de la spatialisation des pluies en intégrant des postes supplémentaires aboutit à une meilleure reconstitution des écoulements générés.



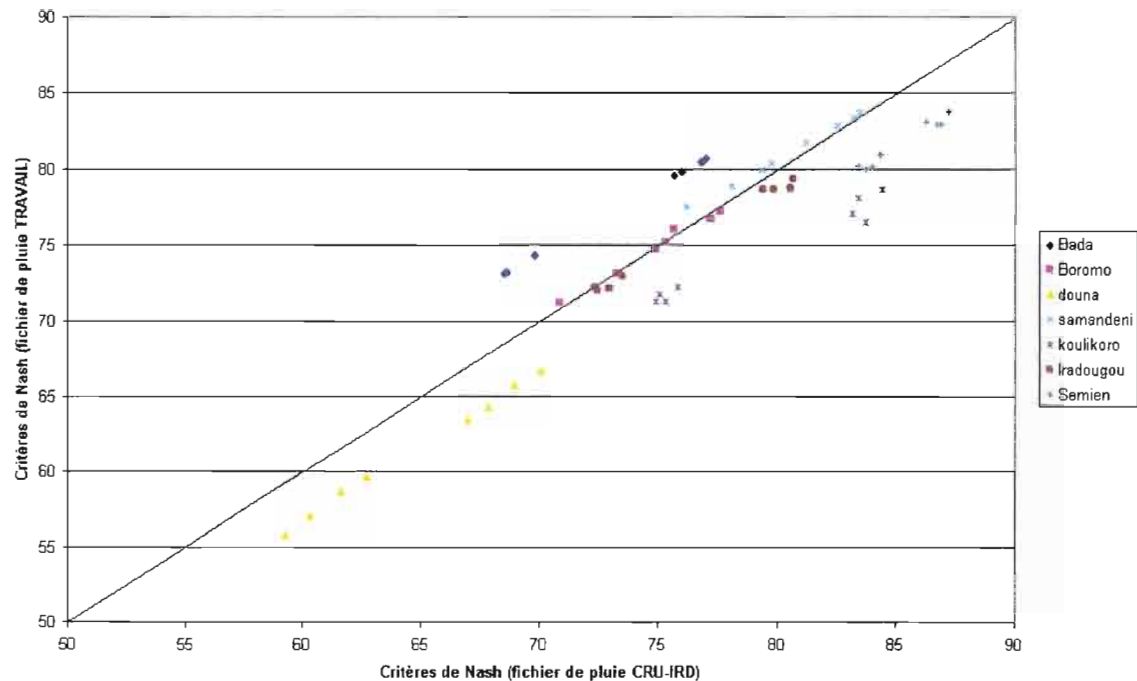


figure 5.6 : Comparaison des critères de Nash (calage) des fichiers de pluies CRU-IRD et TRAVAIL obtenus avec le modèle GR2M

Lorsqu'on utilise le fichier de pluie CRU-IRD avec le modèle Conway, l'amélioration attendue du critère de NASH en phase de calage n'est pas très nette. Il peut apparaître surprenant que l'on obtienne la plupart des meilleures valeurs du critère de Nash avec le fichier de pluie CRU. En phase de validation, les valeurs du critère de NASH obtenues avec le fichier de pluie CRU sont meilleures comparées à celles obtenues avec le fichier de pluie CRU-IRD. De même, en comparant les résultats obtenus avec le fichier de pluie CRU à ceux obtenus avec le fichier de pluie TRAVAIL, il apparaît que les meilleures valeurs du critère de NASH sont obtenues avec le fichier de pluie CRU.

En appliquant le modèle de Yates, la comparaison des critères de Nash obtenus avec les 3 grilles de pluie (TRAVAIL, CRU, CRU-IRD), ne montre pas de différence significative. Sur la figure 5.7 où nous avons représenté les critères de Nash obtenus avec les deux grilles de pluie TRAVAIL et CRU-IRD, on observe une dispersion des points autour de la première bissectrice. Aucune tendance nette ne se dégage.

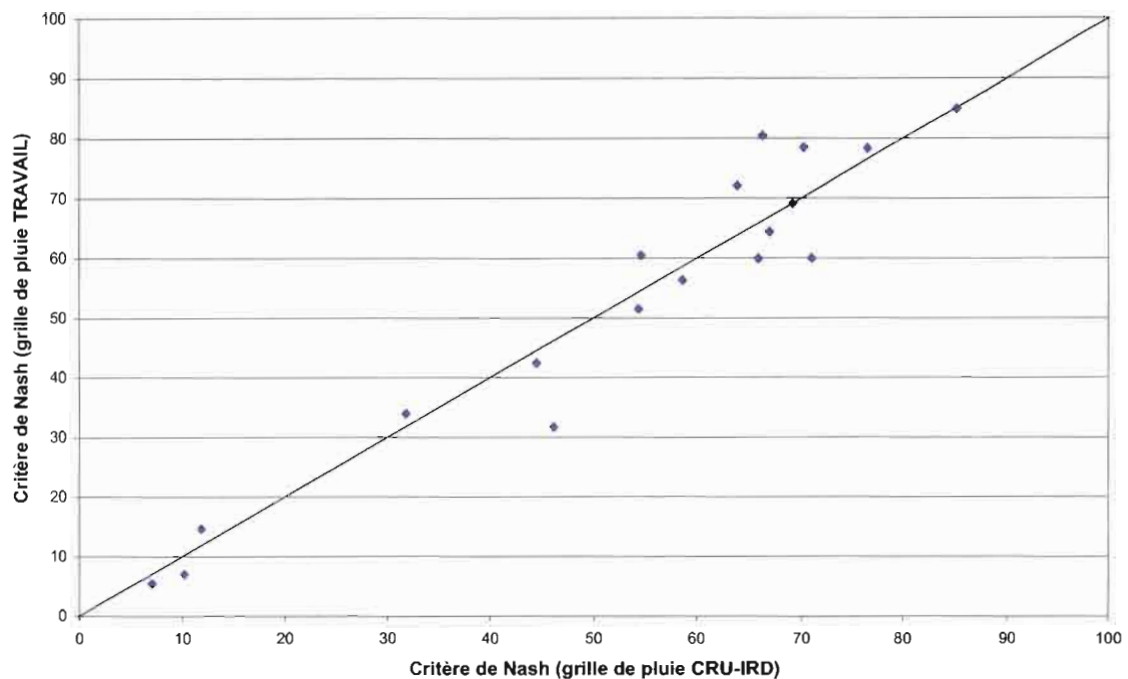


figure 5.7 : Comparaison des critères de Nash obtenus avec le modèle de Yates pour les grilles de pluie CRU-IRD et TRAVAIL

5.2.8.7 Influence du type d'ETP

La comparaison des valeurs du critère de NASH obtenues en utilisant les différents jeux de données de grilles d'ETP montrent que :

- le modèle GR2M semble insensible aux valeurs de données d'ETP. Sur les figure 5.8 et figure 5.9, on observe une faible dispersion des points autour de la première bissectrice, malgré les différences importantes entre les valeurs d'ETP RC et les deux autres données d'ETP TO et PM.

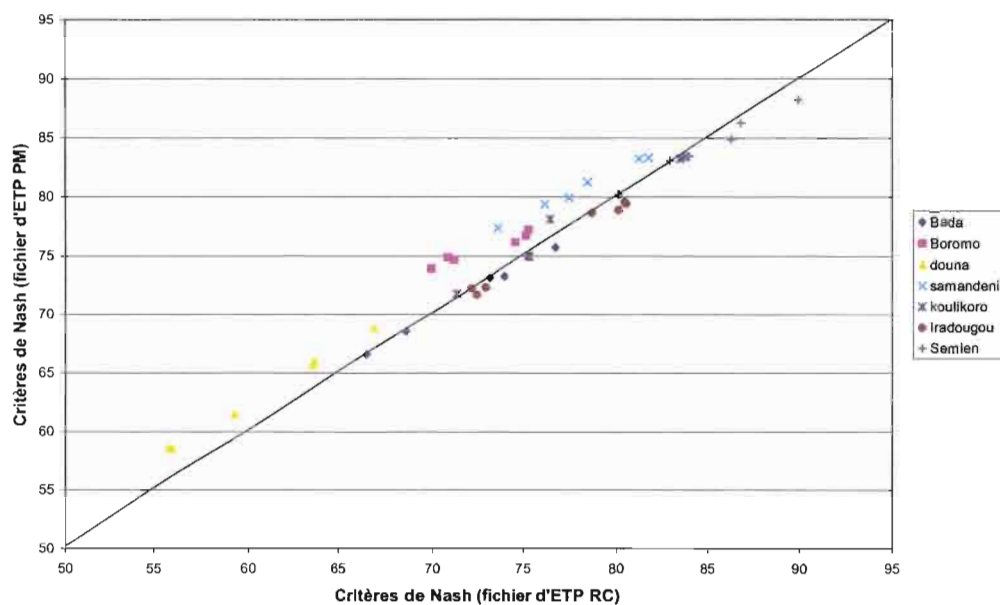


figure 5.8 : Comparaison des critères de Nash obtenus avec les grilles d'ETP RC et PM avec le modèle GR2M

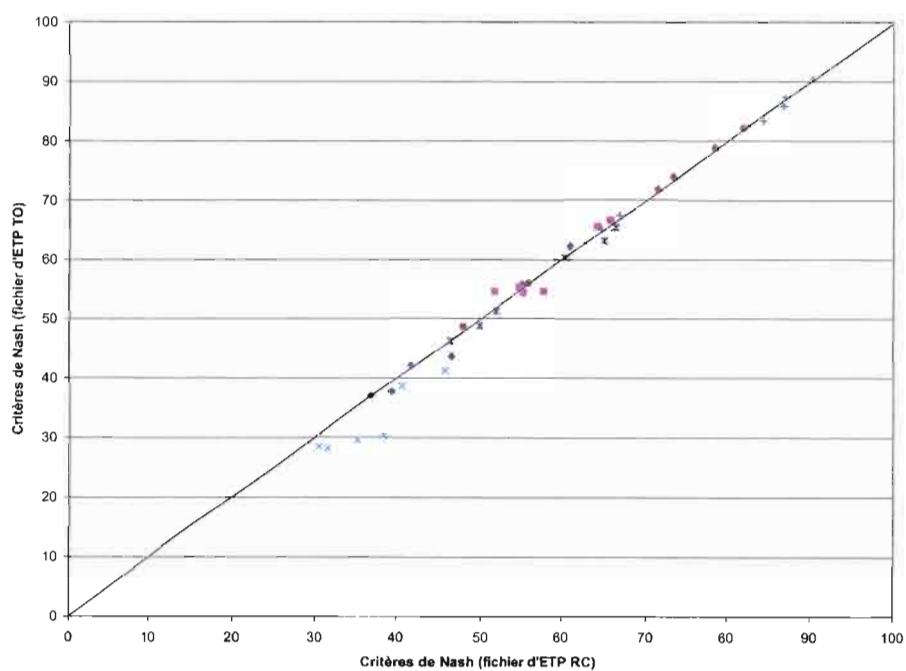


figure 5.9 : Comparaison des critères de Nash obtenus avec les grilles d'ETP RC et TO avec le modèle GR2M

- avec le modèle Conway, il y a une nette différence des résultats en fonction de la grille d'ETP utilisée. Les meilleurs valeurs du critère de NASH sont obtenues avec le fichier d'ETP RC.
- avec le modèle de Yates, l'ETP semble avoir une influence sur les résultats obtenus : la comparaison des critères de Nash obtenus avec les 3 grilles d'ETP (figure 5.10) montre que la grille d'ETP TO donne les meilleurs résultats dans la plupart des cas.

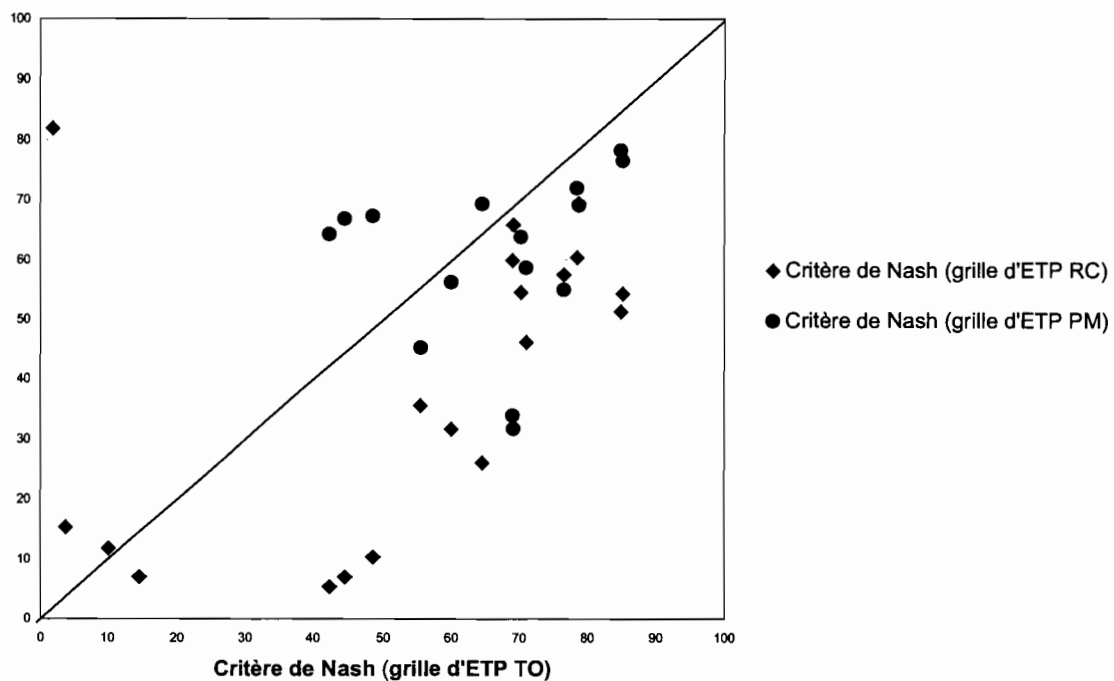


figure 5.10 : Comparaison des critères de Nash obtenus avec les grilles d'ETP TO et RC et PM avec le modèle de Yates

5.2.8.8 Influence de la capacité de rétention en eau du sol

Le modèle de Yates ne nécessite pas de données de capacité de rétention en eau du sol, les résultats présentés concernent les modèles GR2M et Conway.

L'analyse des résultats montre que dans la majorité des cas, le fichier sol de la FAO donne de meilleurs résultats par rapport à ceux du fichier sol du CRU.

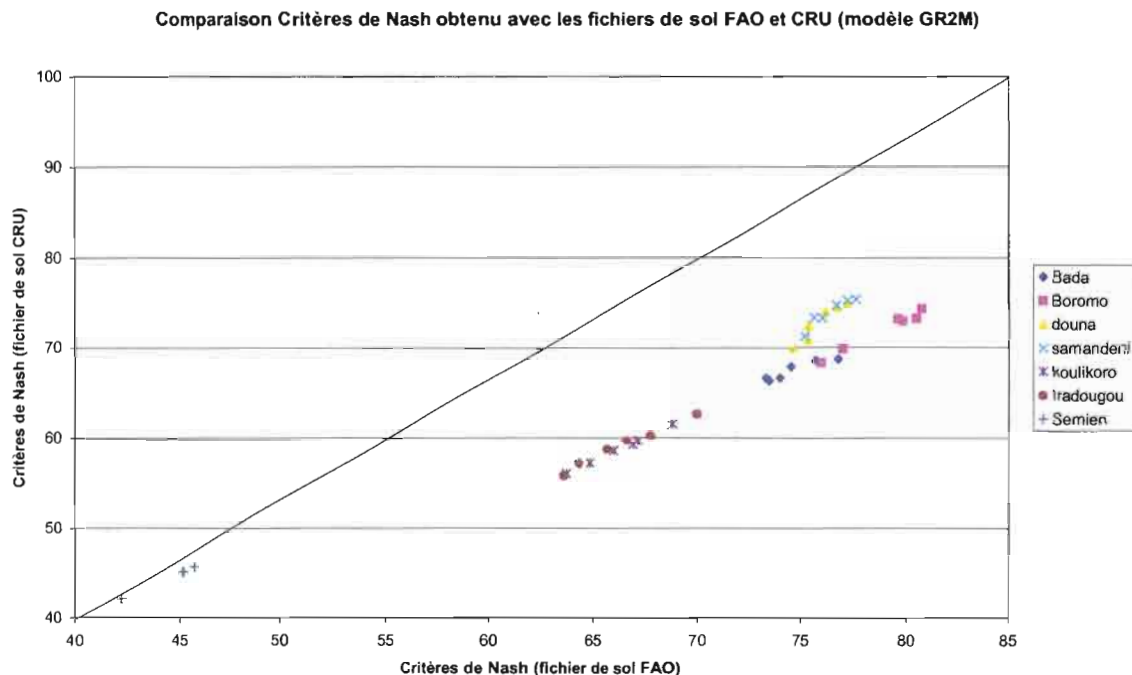


figure 5.11 : Comparaison des critères de Nash obtenus avec les grilles de sol FAO et CRU (modèle GR2M)

Avec le modèle Conway, on observe des résultats allant dans le même sens que précédemment, les meilleurs valeurs du critère de NASH correspondant au fichier de sol FAO.

5.2.9 Cartographie des lames d'eau écoulées

5.2.9.1 Choix du modèle et des grilles de données pour la cartographie de lames d'eau

Les modèles GR2M et Conway permettent d'établir une cartographie des lames d'eau pour les bassins sur lesquels ils ont été calés et validés.

Le modèle de Yates permet d'aboutir à une carte des lames d'eau écoulées sur l'ensemble de la zone d'étude étant donné que les paramètres de ce modèles peuvent être prédéterminés.

La comparaison des meilleures reconstitutions des hydrogrammes observés obtenues avec les modèles GR2M et Yates sur les bassins tests montrent une bonne concordance entre les deux modèles. La figure 5.12 illustre les hydrogrammes simulés par les modèles GR2M et Yates sur le bassin du Bandama à Bada en phase de validation pour le modèle GR2M. La forme des hydrogrammes simulés par les deux modèles concordent bien : les débits de basses eaux

correspondent assez bien, les débits de pointe se situent au même moment mais les débits de pointe diffèrent, le modèle de Yates donnant la plupart du temps les plus fortes valeurs de débits de pointe.

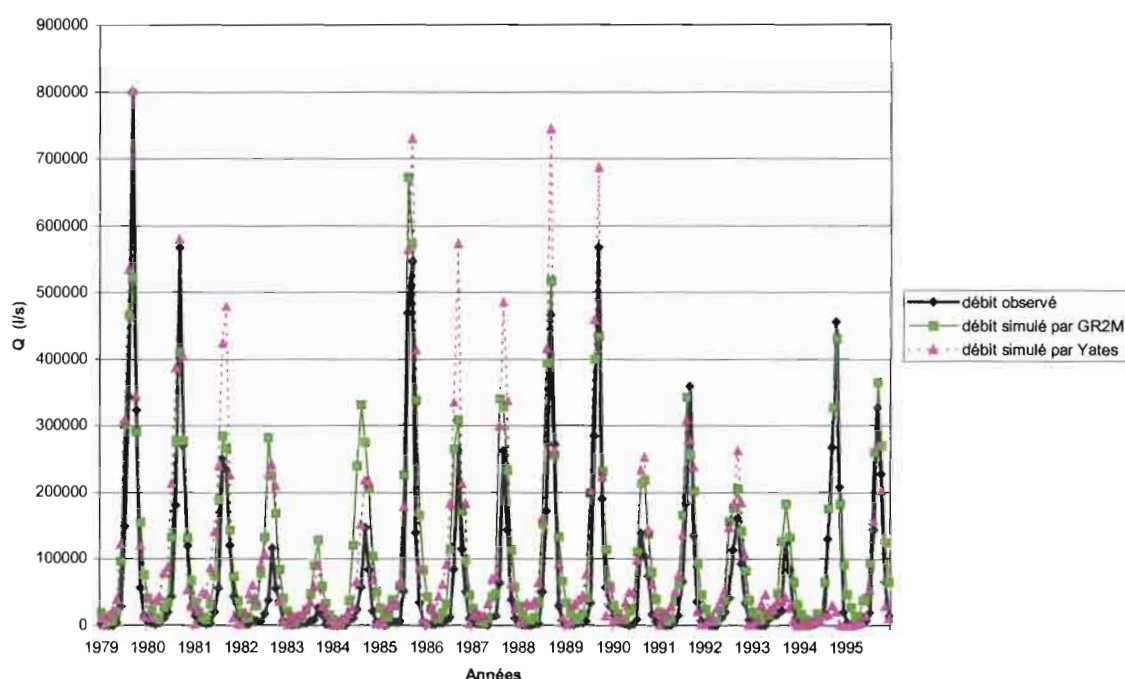


figure 5.12 : Hydrogrammes calculés par les modèles GR2M et Yates

Si nous souhaitons cartographier les lames d'eau écoulées en utilisant les modèles GR2M ou Conway, il nous faut régionaliser les paramètres obtenus. Le report sur une carte des valeurs des paramètres calés pour chacun de ces modèles ne semble pas répondre à une organisation spatiale structurée comme le montre l'exemple de la figure 5.13. Aussi, nous avons décidé de retenir le modèle de Yates qui, de toutes façons, semble donner des résultats très probants pour la cartographie des lames d'eau écoulées.

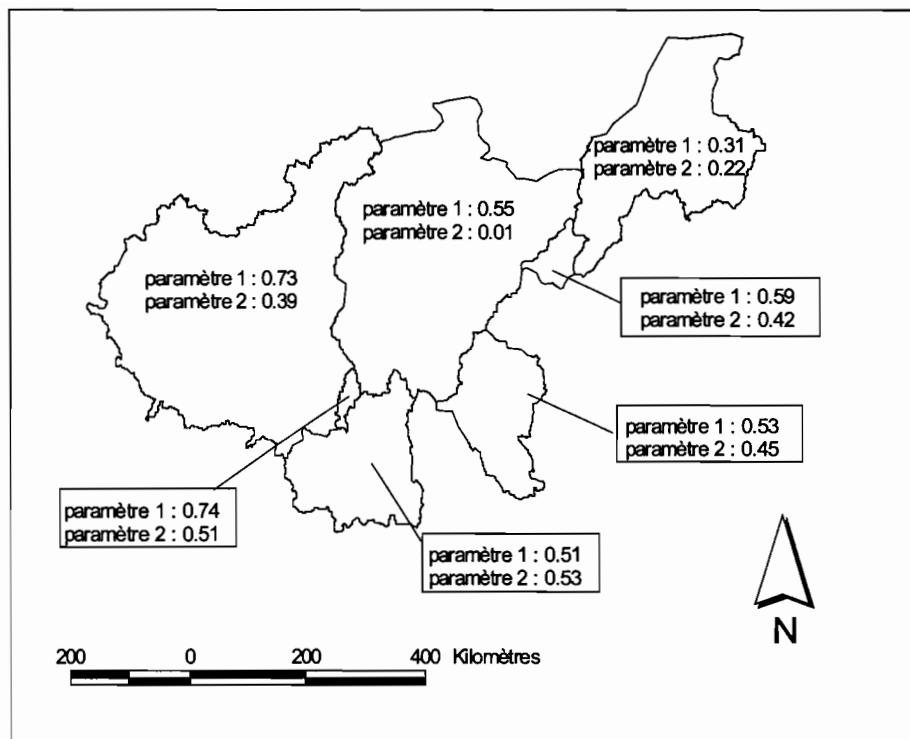


figure 5.13 : Carte des paramètres optimisés du modèle GR2M sur les bassins-tests (grille de pluie CRU-IRD, grille d'ETP RC, grille de sol FAO)

L'analyse de la sensibilité des données d'entrée a été refaite en appliquant le modèle de Yates au 27 bassins dont nous disposons.

- il semble que les grilles de pluie TRAVAIL et CRU-IRD conduisent aux meilleurs résultats,
- la grille d'ETP PM donne de mauvais résultats : le critère de Nash est supérieur à 70 sur seulement 5 bassins parmi les 27 bassins traités,
- avec la grille d'ETP RC, c'est sur 10 bassins qu'on obtient des critères de Nash supérieurs à 70. Il est remarquable de constater que ces 10 bassins sont tous situés en Côte d'Ivoire. Selon la classification de Holdridge qui a servi de base à une régionalisation des paramètres du modèle, les 10 bassins appartiennent aux zones 11 (Tropical/Sub-tropical dry forest and savannah) 12 (Tropical/Sub-tropical seasonal forest) et 13 (Tropical/Sub-tropical rain and wet forest),
- Sur ces bassins particuliers, les autres grilles d'ETP donnent des valeurs de critères de NASH généralement plus faibles. Les écoulements tant en période de basses eaux qu'en période de hautes-eaux sont surestimés. Cela peut s'expliquer par le fait que les valeurs de

la grille d'ETP RC étant particulièrement élevées (elles peuvent atteindre 3 fois les autres valeurs d'ETP par endroits), elles contribuent à réduire la part d'eau écoulée,

- avec la grille d'ETP TO, ce sont également 10 bassins qui répondent à ce même critère. Les résultats sont acceptables sur les zones arides et semi-arides mais faibles sur des zones plus humides. Une majoration de 30% des valeurs d'ETP TO pour les mailles situées en zone de savane humide et en zone de forêt conduit à de meilleurs résultats.

Nous retiendrons donc les grilles de pluie CRU-IRD et TRAVAIL associées à la grille d'ETP TO modifiée pour la cartographie des écoulements de la zone d'étude.

5.2.9.2 Cartographie des moyennes mensuelles et annuelles de lames d'eau écoulée sur la période 1950-1995

Les cartes des lames d'eau annuelles sont obtenues par simple sommation des lames d'eau mensuelles.

5.2.9.2.1 Lames d'eau mensuelles

L'élaboration des moyennes mensuelles de lame d'eau écoulée permet de mieux cerner la réalité des phases significatives du cycle annuel (figure 5.14).

- Les cartes de janvier à février et mars (non représentées) révèlent de faibles valeurs de lames d'eau écoulées sur l'ensemble de la zone d'étude. Dans la partie septentrionale, située au-dessus de la latitude 14°, une absence totale d'écoulement s'observe. Ailleurs, les lames d'eau sont inférieures à 1 mm excepté le sud-ouest de la Côte d'Ivoire où on observe des valeurs comprises entre 1 et 5 mm.
- D'avril à juin, les lames d'eau écoulées augmentent nettement au sud de la latitude 10°N. Les plus fortes valeurs de lames d'eau écoulées sont circonscrites dans le sud et le sud-ouest de la Côte d'Ivoire. Les écoulements sont toujours inexistant au nord de la latitude 14°N.
- D'août à octobre, les lames d'eau écoulées augmentent sur l'ensemble de la zone d'étude. De faibles valeurs d'écoulement (inférieures à 1 mm) s'observe là où l'écoulement était inexistant durant les autres mois. On note une migration de fortes valeurs de lames d'eau écoulée du sud vers le nord d'août à septembre.
- De novembre à décembre, les zones à faibles valeurs de lame d'eau écoulée prennent de l'ampleur. progressivement les zones de lame d'eau écoulée migrent du nord vers le sud,

pour se confiner en décembre en bordure du golfe de Guinée et dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire.

- L'évolution mensuelle de la répartition spatiale des lames d'eau écoulée semble donc associée à la migration de la zone de convergence intertropicale. Cette évolution correspond assez bien aux régimes hydrologiques décrits dans la zone d'étude.

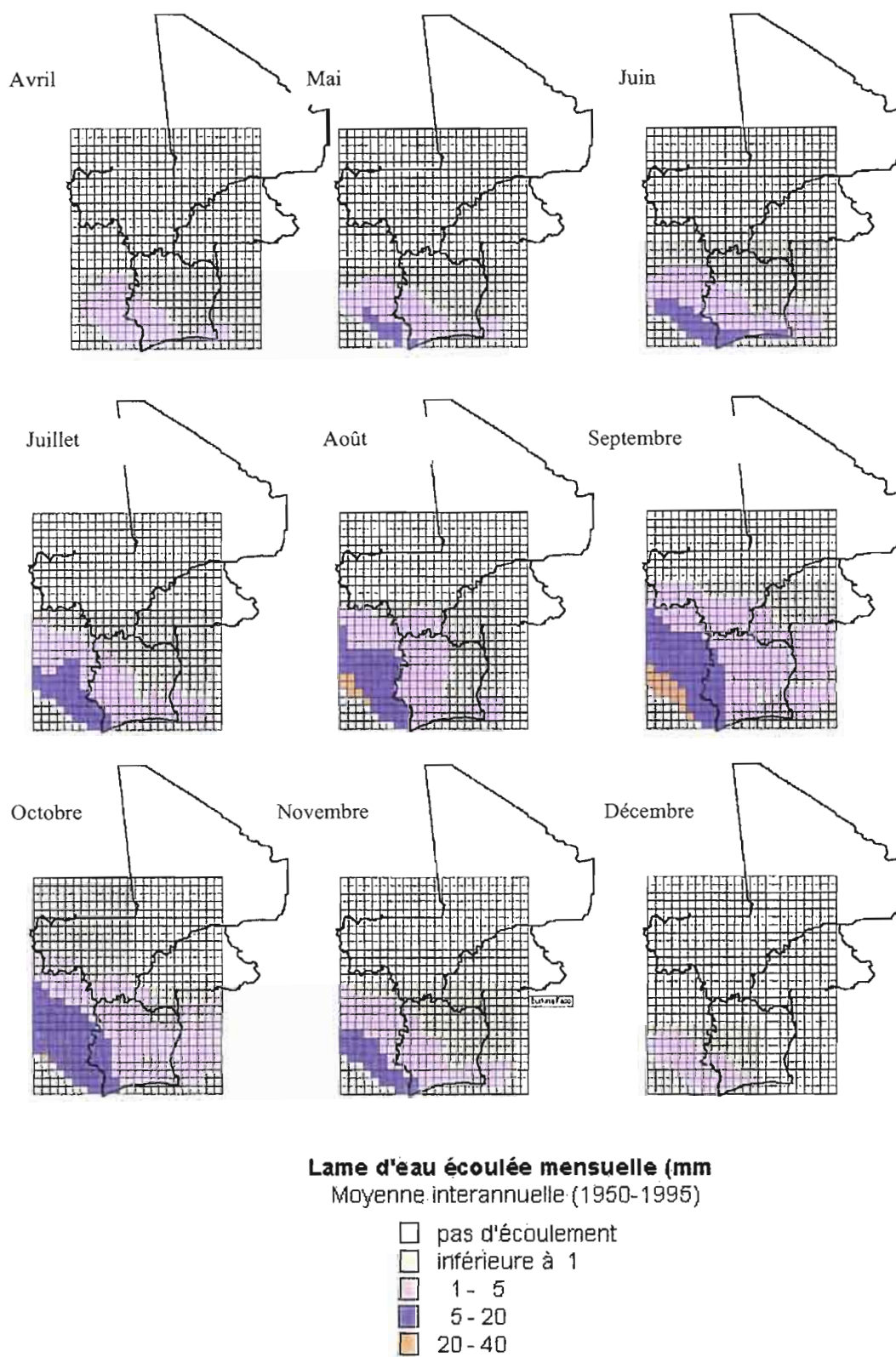


figure 5.14 : Hauteurs moyennes (1950-1995) de la lame d'eau écoulee mensuelle

5.2.9.2.2 *Lame d'eau annuelle*

La représentation cartographique des lames d'eau moyennes annuelles est illustrée sur la figure 5.15 à partir d'un découpage en mailles régulières de 0.5°x0.5°.

Les zones les plus septentrionales situées aux confins du désert et la zone sahélienne se distinguent par de faibles valeurs de lame d'eau écoulée annuellement. La carte indique des lames d'eau annuelles inférieures à 1 mm sur toute la bande comprise entre les latitudes 14°N et 18°N.

Progressivement la lame d'eau écoulée annuelle augmente vers le sud en prenant des valeurs comprises entre 5 et 80 mm. Quelques distorsions s'observent par endroits, et semblent être dues aux effets du relief. La dorsale guinéenne s'individualise avec les plus fortes valeurs de lame d'eau écoulées.

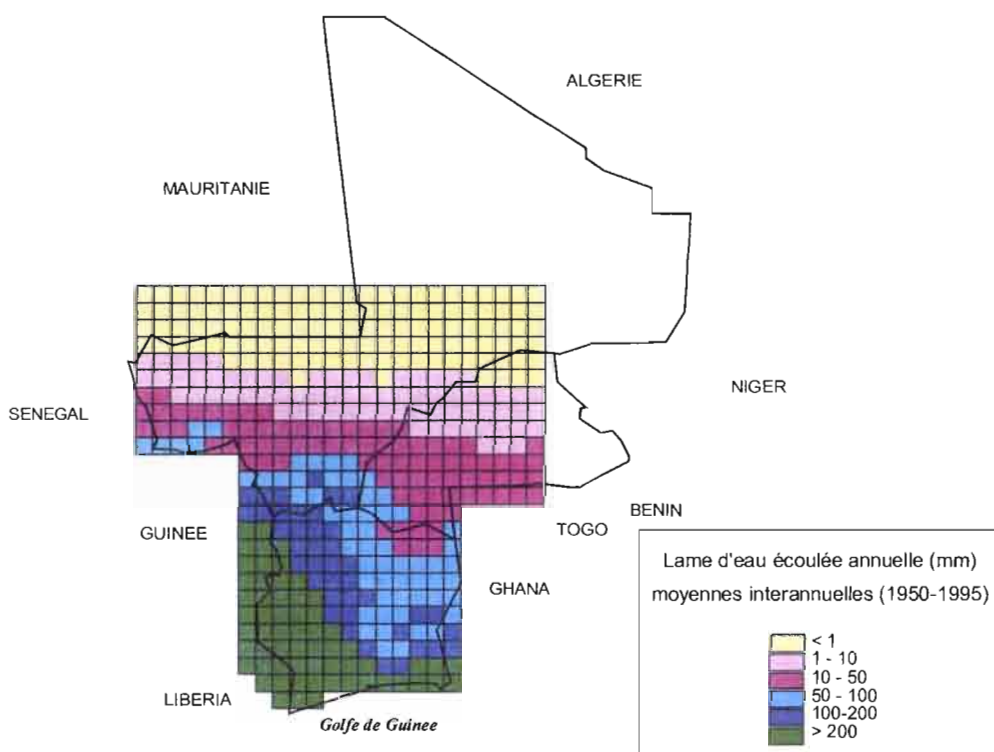


figure 5.15 : Moyenne annuelle des lames d'eau écoulée sur la période 1950-1995

5.2.9.3 *Cartographie des moyennes annuelles de lames d'eau écoulée sur la période 1971-1995*

La moyenne annuelle des lames d'eau écoulée sur la période 1971-1995 est représentée sur la

figure 5.16.

De très faibles valeurs de lame d'eau écoulée annuelle s'observent dans les régions situées au nord de la parallèle 14°N. On note des écoulements inférieurs à 1 mm/an.

Au fur et à mesure qu'on se déplace vers le sud, on observe une augmentation de la lame d'eau écoulée qui passe d'environ 1 à 10 mm/an autour de la parallèle 14°N jusqu'à des valeurs supérieures à 200 mm/an dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire.

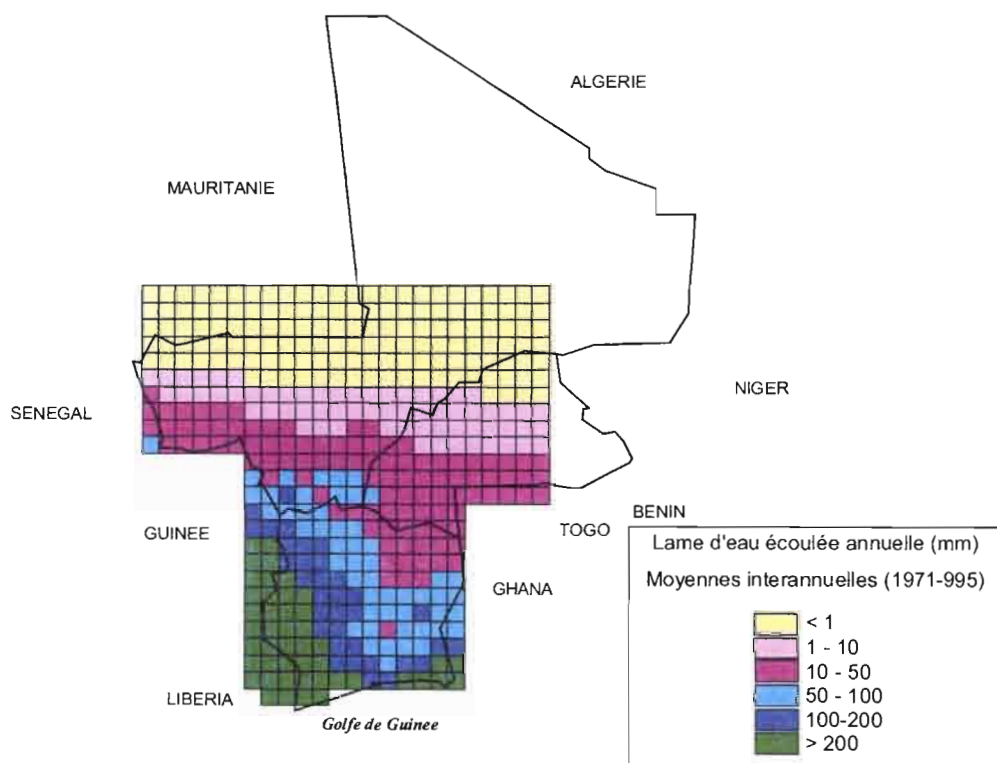


figure 5.16 : moyenne annuelle des lames d'eau écoulée sur la période 1971-1995

5.2.9.4 Comparaison entre les cartographies de lame d'eau annuelle sur les périodes 1950-1995 et 1971-1995

La lame d'eau écoulée est une variable au contenu synthétique puisqu'elle intègre, selon le bilan hydrologique qui permet son évaluation, plusieurs paramètres climatiques. Il ne semble donc pas surprenant que les cartes obtenues fassent ressortir une décroissance générale de la lame d'eau écoulée annuelle du nord au sud.

D'une manière générale, la répartition spatiale des lames d'eau écoulée sur la période 1971-1995 est similaire à celle sur la période 1950-1995. Cependant, les valeurs de lames d'eau écoulée sont plus faibles que celles calculées sur l'ensemble de la période 1950-1995.

Un léger glissement des classes de lame d'eau écoulée s'opère vers le sud traduisant ainsi une diminution des écoulements sur la période 1971-1995.

On note une augmentation des zones à très faible écoulement (inférieur à 1 mm/an). Le nombre de mailles appartenant à cette classe passe de 121 sur la période 1950-1995 à 142 sur la période 1971-1995 soit une extension de cette classe d'environ 50 000 Km².

La diminution des zones à très fortes valeurs d'écoulement (> 200 mm/an) est également remarquable pour les moyennes calculées sur la période 1971-1995. On observe une diminution du nombre de mailles appartenant à cette classe sur la période 1971-1995. On passe de 65 mailles appartenant à cette classe pour les lames d'eau calculées sur la période 1950-1995 à 48 pour les lames d'eau calculées sur la période 1971-1995, ce qui traduit une diminution d'environ 40 000 Km² des zones à écoulement supérieur à 200/an.

La diminution des moyennes annuelles de la lame d'eau écoulée annuelle sur la période 1971-1995 est beaucoup plus perceptible sur la carte des différences entre les deux cartes établies sur les deux périodes 1950-1995 et 1971-1995 (figure 5.17).

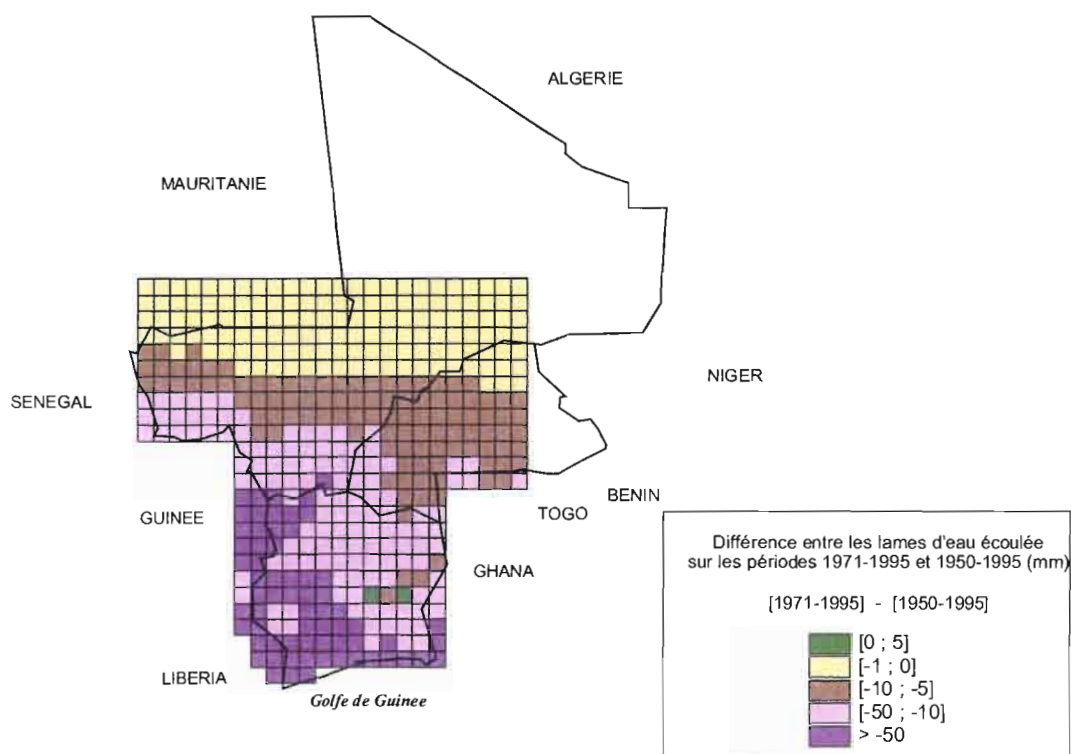


figure 5.17 : Différence entre les moyennes annuelles des lames d'eau écoulée sur les périodes 1971-1995 et 1950-1995

5.3 CONCLUSION

Nous avons recherché à coupler des modèles hydrologiques à un système d'information géographique, afin de spatialiser les lames d'eau écoulées à une échelle annuelle dans le but d'analyser l'impact de la péjoration climatique observée depuis plus de 30 ans sur les lames d'eau écoulées. L'utilisation des Systèmes d'Information Géographique se justifie d'autant plus que ce sont des outils qui sont particulièrement destinés à tous les domaines devant travailler avec la composante spatiale.

Pour y parvenir, nous avons utilisé des modèles pluie-débit. Une recherche bibliographique a abouti à la sélection de modèles simples nécessitant comme données d'entrée les données dont nous disposons. Nous nous sommes basés sur une discrétisation de l'espace en mailles régulières de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

Nous avons développé des programmes avec le langage de programmation Avenue du SIG ArcView. Ces programmes ont permis la mise en place d'une interface conviviale pour, d'une part, gérer l'ensemble des données spatio-temporelles collectées et mises en place dans le cadre de cette étude, et d'autre part prendre en compte un ensemble de procédures propres à la modélisation hydrologique.

Les modèles retenus pour simuler les écoulements sur la zone d'étude s'appuient sur différentes formulations :

- les modèles GR2M et CONWAY nécessitent la mise en œuvre d'une procédure de calage et validation pour la détermination des paramètres,
- les paramètres du modèle de Yates sont prédéterminés en utilisant la classification de Holdridge.

Suivant le mode opératoire précédemment défini pour aboutir à une bonne identification des paramètres optimums des modèles, nous avons testé la capacité de ces modèles à simuler les débits observés sur des bassins versants aux caractéristiques variées et appartenant à différentes zones climatiques :

- L'étude de sensibilité des modèles aux 3 grilles de données de pluie, statistiquement différentes les unes des autres, montre que le critère « quantité d'information » ne semble pas suffisant pour faire un choix de grille : les grilles obtenues à partir de la plus grande quantité d'information, donc « a priori » plus justes, ne donnent pas nécessairement les meilleurs résultats avec les modèles utilisés.
- L'étude de sensibilité des modèles aux 3 grilles de données d'ETP, sensiblement différentes les unes des autres, montre que deux d'entre elles semblent le mieux convenir aux modèles et aux bassins versants tests : ETP Thom et Oliver et ETP Reference Crop. L'ETP Thom et Oliver est une modification de la formulation de Penman, largement décrite dans la bibliographie comme la formulation qui prend mieux en compte les processus physiques mis en place dans l'évaporation. Par contre l'ETP Reference Crop qui suppose des conditions particulières de couvert végétal et d'humidité, conduit à des valeurs jugées trop élevées, voire irréalistes dans certains cas. On peut donc être surpris que ces valeurs d'ETP RC conduisent à des résultats jugés satisfaisants. De tels résultats ont été également observés par Conway et al. (1999).

Il ressort de tous ces essais que les modèles simples de bilan hydrologique permettent d'atteindre des niveaux de performance satisfaisants. Dans les tests réalisés, aucun des modèles ne présente une supériorité nette par rapport aux autres. Cependant, le modèle GR2M a prouvé de bonnes qualités de performance et de robustesse sur la plupart des bassins tests. La limite que présente ce modèle est que les résultats obtenus sur des bassins versants ne peuvent pas être transférés à d'autres bassins où on ne dispose aucune information. Le petit nombre de bassins tests ne nous permet pas de déduire une organisation spatiale simple des paramètres de ce modèle. Toutefois, il semble intéressant par la suite de prolonger notre travail en essayant de « régionaliser » les paramètres calés en appliquant les différentes techniques présentées dans ce chapitre.

Le modèle de Yates malgré son côté empirique permet de pallier ce problème de régionalisation. La cartographie des lames d'eau écoulées annuelles à l'aide du modèle de Yates sur les périodes 1950-1995 et 1971-1995 nous a permis d'une part de dresser une répartition spatiale des écoulements à l'échelle régionale, et d'autre part, d'apprécier les manifestations de la variabilité du climat sur les ressources en eau. La répartition spatiale des classes de lames d'eau annuelle écoulée est la même quelle que soit les deux périodes considérées, 1950-1995 et 1971-1995. Les valeurs de lames d'eau écoulées décroissent du sud vers le nord. Cependant, on observe un glissement des classes de hauteurs de lames d'eau écoulées sur la période 1971-1995 par rapport à celles établies sur la période 1950-1995. Ce qui traduit une baisse des écoulements sur la période 1971-1995 par rapport aux écoulements de la période 1950-1995.

L'approche utilisée dans cette étude présente donc plusieurs avantages liés à la simplicité et à la souplesse qu'offre le couplage des modèles hydrologiques aux SIG. Certes, nous sommes encore au début du développement de cette approche. Les résultats sont prometteurs, il reste cependant encore de nombreux axes à explorer pour renforcer les acquis.

CONCLUSION

CONCLUSION

La variabilité climatique en Afrique de l'ouest

L'Afrique, terre de contraste en matière de climat, qui plus est, fragilisée du point de vue environnemental (pression anthropique, déforestation, surpâturage, désertification, etc.), subit de très fortes variations de son climat et de ses ressources en eau.

Une recherche bibliographique a permis d'apprécier l'état des connaissances dans le domaine de la variabilité climatique et de ses implications sur les ressources en eau en Afrique d'une manière générale et en Afrique de l'Ouest en particulier.

L'analyse de la documentation historique, des témoignages et des récits rapportés, qui concernent l'Afrique de l'ouest et centrale, montre qu'une grande sécheresse a été ressentie au début du XX^{ème} siècle, entre 1913 et 1916. Elle a engendré une grave famine.

Plus tard dans le siècle, il est également fait état d'une sécheresse qui a eu également des conséquences dramatiques au milieu du siècle (1940-1944) même si elle fut moins intense que la précédente et probablement plus localisée.

Depuis le début de la décennie 1970, les médias ne cessent de se faire l'écho des grandes sécheresses successives qui ont sévi en Afrique de l'Ouest et, à un degré moindre, en Afrique centrale.

Il apparaît que la sécheresse n'est révélée que par son caractère exceptionnel dans le temps et ses conséquences, néfastes à l'homme et à l'économie de ces pays. Pourtant, la sécheresse correspond à une situation déficitaire des ressources en eau superficielles et souterraines qui se met en place progressivement dans le temps et dans l'espace.

Seule, l'étude statistique de très longues séries d'observations peut permettre de suivre l'évolution des conditions hydroclimatiques.

Au cours du XX^{ème} siècle, la principale conclusion d'une telle étude est la mise en évidence de plusieurs phases climatiques contrastées. Les principales périodes humides qui séparent les périodes sèches se situent entre 1925 et 1935 et 1951 et 1968 (Servat et al., 1998). L'inconsistance des informations pluviométriques au début du siècle ne permet pas d'établir une comparaison réellement objective de ces différents « incidents » climatiques. Nous nous sommes donc focalisés plus sur la seconde moitié du XX^{ème} siècle qui a connu un développement important des réseaux de mesures, en particulier, du réseau hydrométrique qui

n'existait auparavant qu'à un état embryonnaire : seuls quelques grands cours d'eau étaient régulièrement mesurés.

Au cours des trois dernières décennies, les pluies ont beaucoup baissé sur la zone d'étude. Les conditions de déficits pluviométriques généralisées sont perçues sur les cartes des indices pluviométriques. Les déficits pluviométriques annuels calculés sur la période 1971-1997 par rapport à la période 1950-1997 avoisinent 20%.

L'étude des pluies mensuelles révèle que la diminution des pluies annuelles est associée à une diminution des pluies mensuelles qui touche tous les mois à l'exception peut-être du mois d'août dans les régions plus humides.

Cette variabilité des précipitations se répercute sur les écoulements. Les écoulements diminuent pour la plupart des stations étudiées. L'analyse réalisée dans cette étude a porté sur des variables caractéristiques des régimes des cours d'eau. Il s'agit du débit moyen annuel, des VCXn (caractéristiques des hautes-eaux - maximums sur chaque année du débit moyen de n jours consécutifs) et des QCNn (caractéristiques des basses-eaux seuil minimal en dessous duquel les débits sont restés pendant n jours consécutifs). Les déficits entre les variables calculées sur la période 1971-1997 par rapport à celles calculées sur la période 1950-1997 sont souvent bien supérieurs à 30%.

Les conséquences sur les normes hydrologiques

Le traitement statistique des séries hydropluviométriques nous oblige à considérer 2 sous-séries bien distinctes, avant et après 1970. Les normales pluviométriques (qui supposent une stabilité du climat) calculées sur des périodes de 30 ans, présentent pourtant des variations sensibles sur les périodes 1951-1980, 1961-1990 et 1971-1997. La cartographie de ces normales trentenaires de pluie annuelle montre une conservation de la configuration des isohyètes. Cependant, on observe un glissement des isohyètes vers le sud-sud-ouest pour les cartes établies sur les deux dernières périodes, traduisant ainsi un déficit pluviométrique pour les périodes 1961-1990 et 1971-1997 par rapport à la période 1951-1980. Le recul est encore plus prononcé sur la période 1971-1997. Ce qui confirme bien que la décennie 1990 est également déficitaire sur notre zone d'étude. Globalement, les déficits entre la normale 1971-1997 et 1951-1980 varient entre 10 et 20% mais peuvent être supérieurs.

On retrouve cette variabilité sur les caractéristiques des régimes des cours d'eau.

Les estimations de modules de la période 1971-1997 sont systématiquement inférieures à celles de la période 1951-1980. Les résultats sont quelquefois éloquentes puisque pour certains cours d'eau l'écart relatif d'estimation est supérieur à 55% pour toutes les récurrences.

Les estimations de modules sur l'ensemble de la période 1951-1997 sont également systématiquement inférieures à celles de la période 1951-1980 mais supérieures à celles établies sur la période 1971-1997. Les écarts entre les périodes de retour estimées des modules dans chacun des cas (1951-1980 et 1951-1997) sont donc bien moins importants.

Les estimations des VCXn sur la période 1971-1997 sont toujours inférieures à celles des autres périodes. Les variations d'estimation des VCXn d'une période à l'autre sont moindres que celles calculées sur les modules.

L'analyse de la récurrence des modules, des VCXn et QCNn sur les périodes 1950-1997 et 1970-1997 montrent des taux de variation dépassant parfois 30% en valeur absolue, pour des périodes de retour allant de 10 à 100 ans. Les bassins versants des zones à régime sahélien et tropical pur semblent être les plus affectés par la diminution des variables hydrologiques au cours des 30 dernières années.

Pour un autre comportement vis-à-vis des normes hydropluviométriques

Le problème est de savoir quelle norme il faut retenir dans les régions touchées ces dernières années par le phénomène de sécheresse. Convient-il d'intégrer purement et simplement les années récentes dans la continuité des séries hydropluviométriques ou doit-on faire l'hypothèse d'une modification plus durable et ne prendre en compte que les données des années postérieures à la date de début de la sécheresse?

Suivant l'attitude adoptée, un aménageur-projeteur pourra aboutir à des projets très dissemblables d'un point de vue technique et probablement encore plus dissemblables d'un point de vue économique.

Pour toute conception d'ouvrage, il paraît tentant et sensé de se placer dans les conditions les plus risquées, les plus défavorables pour son fonctionnement : pour la conception d'un barrage, considérer la période la plus humide ; pour une prise d'eau au fil de l'eau, considérer la période la plus sèche ...

Cependant...

La longue période de sécheresse a eu des effets durables sur les systèmes hydrologiques qui sont bien plus complexes qu'on ne le croit : au Niger l'augmentation du coefficient de ruissellement près des mares, suite à l'augmentation de la pression anthropique sur le paysage, a abouti à un rehaussement du toit de la nappe phréatique localement dans des dépressions endoréïques depuis 1970.

Dans le contexte africain, la conception de barrages (ou de tout autre ouvrage hydraulique) devrait tenir compte du fait que, leur durée de vie étant largement supérieure à 30 ans, leur alimentation connaîtra des fluctuations très importantes qui pourront même s'accompagner d'un changement de leur régime. La stratégie de conception devra se baser sur des principes de systèmes d'eau capables de pouvoir résister aux effets de plusieurs années de sécheresse ou, au contraire, à plusieurs années d'abondance (Hubert et al., 1989).

Le problème de la révision des normes hydropluviométriques est très délicat et il est difficile de proposer une solution définitive. Si les limites de ces normes, suite à des changements climatiques, sont bien connues et sont largement commentées dans cette étude, nous ne pouvons que recommander que soient clairement définis les aspects méthodologiques d'utilisation opérationnelle de séries chronologiques de référence.

La régionalisation des lames d'eau écoulées

Pour avoir une vision régionale de l'incidence de la péjoration climatique sur les ressources en eau, nous avons exploré des voies de recherche sur la régionalisation des lames d'eau écoulées.

L'approche a consisté à recourir à la modélisation semi-spatialisée de la relation pluie-débit au pas de temps mensuel en se basant sur une forme de maille régulière et de dimension $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Ces choix se justifient par l'information disponible et notre objet principal qui est de trouver quelle modélisation hydrologique mettre en œuvre pour appréhender et évaluer les éventuelles modifications intervenues principalement au niveau des ressources en eau à une échelle régionale.

Les voies de recherche explorées ont permis d'aboutir à des résultats intéressants :

- A partir des données pluies disponibles sur près de 300 postes qui couvrent la zone de notre étude, il a été possible de construire 3 grilles spatialisées de pluie. Les modes de sélection des postes pluviométriques et les méthodes de spatialisation de cette information n'ont pas été les mêmes et ont abouti à des grilles, parfois statistiquement différentes les

unes des autres. L'étude de sensibilité des modèles à ces différentes grilles de données de pluie montre que le critère « quantité d'information » ne semble pas suffisant pour faire un choix de grille : les grilles obtenues à partir de la plus grande quantité d'information, donc « a priori » plus justes, ne donnent pas nécessairement les meilleurs résultats avec les modèles utilisés.

- Les grilles d'ETP ont été calculées en utilisant des mêmes variables climatiques et la même méthode d'interpolation mais en appliquant quatre formulations distinctes d'estimation empirique de l'ETP. Les grilles d'ETP sont sensiblement différentes les unes des autres. Deux formulations semblent le mieux convenir aux modèles et aux bassins versants choisis : ETP Thom et Oliver et ETP Reference Crop, cette dernière donnant pourtant des valeurs jugées trop élevées.
- La grille sol FAO qui se base sur des concepts et des hypothèses simples donne très nettement les meilleurs résultats pour les modèles et les bassins versants choisis.
- A partir des essais effectués, il apparaît que les performances des modèles diffèrent d'un bassin à l'autre. Le modèle GR2M présente de manière générale une bonne robustesse par rapport aux deux autres modèles utilisés, Conway et Yates.
- Le modèle de Yates, malgré son aspect empirique, nous donne la possibilité d'obtenir des cartes de lames d'eau écoulée sur l'ensemble de la zone d'étude car il ne nécessite aucune procédure de calage-validation, à l'inverse des 2 autres modèles.
- L'incidence de la variabilité pluviométrique sur les lames d'eau est remarquable sur la carte des lames d'eau dressée sur la période récente (1971-1995) comparée à la carte établie sur la période 1950-1995. On observe un glissement des classes de lame d'eau écoulée annuelle vers le sud.

Perspectives

Nous sommes encore au début du développement de l'approche proposée pour caractériser la sécheresse ainsi que ses effets sur les ressources en eau dans cette étude en Afrique. Les résultats sont prometteurs, il reste cependant plusieurs points à travailler :

- définir de manière précise la notion de sécheresse : contrairement à une idée répandue, la sécheresse n'est pas simplement synonyme de faibles précipitations. La pluie n'est pas équitablement répartie sur la planète, et certaines régions seront toujours moins arrosées

- que d'autres. Les zones désertiques, par exemple, connaissent une faible pluviométrie. Certaines régions de la zone tropicale connaissent une saison sèche et une saison des pluies bien distinctes car elles ne reçoivent presque pas de pluie pendant la saison sèche. La sécheresse est donc un terme relatif, et comme nous l'avons souligné, la notion de sécheresse dépend des usages de l'eau et mérite d'ailleurs d'être définie de manière précise,
- extension de la zone d'étude : les travaux menés dans cette étude n'ont concerné qu'une zone pilote couvrant 3 pays d'Afrique de l'ouest. Il importe d'étendre ce travail à d'autres régions d'Afrique voire du monde pour pouvoir tirer des conclusions générales. La contrainte qui se pose tout de suite est la disponibilité des données,
 - mieux caractériser la sécheresse : la caractérisation de la sécheresse mérite d'être affinée et mise à jour. Peut-être faut-il s'intéresser à une analyse régionale de la sécheresse à travers des analyses de type courbes surface – durée – période de retour?. Pour assurer une mise à jour de la caractérisation de la sécheresse, on pourrait penser à la mise en place d'un observatoire de la sécheresse. Encore une fois, il se posera un problème de disponibilité des données pour les besoins de l'étude,
 - vulgariser les résultats sur les normes hydrologiques : l'incidence de la sécheresse sur les normes hydrologiques suscitent un grand intérêt et les réflexions doivent être poursuivies. Les quelques résultats acquis dans cette étude méritent déjà d'être valorisées afin d'informer les décideurs. Peut-être faut-il renouveler des rencontres du genre le colloque qui s'est tenue à Ouagadougou en 1986 sur "la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse"?,
 - s'orienter vers la modélisation à faible pas de temps : dans notre démarche de modélisation, nous avons cherché à prédéterminer les écoulements dans une optique de gestion des ressources en eau. Pour être utile dans le domaine de la planification (agronomie par exemple), il serait intéressant d'étudier d'autres types de modèles fonctionnant à des pas de temps plus courts (décadaires).

Les différentes perspectives de recherche ébauchées ci-dessus nécessitent probablement la disponibilité d'une importante quantité de données. Il faut donc encourager les collaborations inter-régionales (FRIEND AOC , HYCOS AOC) qui sont de nature à faciliter les échanges des données entre les chercheurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A.F.P., 1996. Extension de la borreliose au sud du Sénégal en raison de la sécheresse. Paris.
- Adefolalu D.O., 1986. Further aspects of sahelian drought as evident from rainfall regime of Nigeria. Arch. Meteorol. Gophys. Bioclimatol., Ser. B, 36, 277-295.
- Adejuwon, J.O., Balogun, E.E., Adejuwon, S.A., 1990. On the annual and seasonal patterns of rainfall fluctuations in sub-saharian West-Africa, Journal of Climatology, 10, pp. 839-848.
- Aka, A.O., 1999. Variabilité des écoulements et activité anthropiques. Cas du bassin du Bandama en Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 243 P.
- Albergel, J., 1987. Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface. Application aux petits bassins du Burkina Faso. In : The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources (Proc Vancouver Symposium August 1987). IAHS Publ n°168, 355-365.
- Arnell, N.W., Reynards, N.S., 1996. The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. Journal of hydrology, 183 : 397-424.
- Askew A.J., Rodda J.C., 1995. Addressing arid zone problems. In : L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement. Mélanges à la mémoire de Jean Rodier (Actes de la conférence de Paris, 2-4 Mai 1995) (édité par P. Chevallier & B. Pouyaud), 113-124. IAHS Publ. n° 238.
- Bamba, F., Mahé, G., Bricquet, J.P., Olivry, J.C., 1996. Changements climatiques et variabilité des ressources en eau des bassins du Haut Niger et de la Cuvette Lacustre. In : Fritsch J.M., Paturel J.E. & Servat E. (Eds) : Réseaux hydrométriques, réseaux télématiques, réseaux scientifiques : nouveaux visages de l'Hydrologie Régionale en Afrique, XIIèmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, CD-Rom ORSTOM, 26 p.
- Bechler, N., Lamotte, M., Motcho, H.K., Mietton, M., 1997. Les étiages du Fleuve Niger : risque de pénurie en eau pour l'agglomération de Niamey. In : Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty (Proc. Rabat symp., April 1997) (ed. By D. Rosbjerg, N. Boutayeb, A. Gustard, Z. W. Kundzewicz & P. F. Rasmussen), 67-74. IAHS Publ. n°240.
- Beltrando, G., 1990. Variations spatio-temporelles des précipitations sahéliennes de l'Atlantique à l'ouest du Massif Ethiopien (1936-1976), MET, VII° série, 1-8.

- Bernier, J., 1965. Sur les probabilités d'occurrence des sécheresses et des étiages. Bulletin du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou, n° 11, 3-12.
- Beven, K., 1989. Changing ideas in hydrology. The case of physically based models. Journal of hydrology, 105 : 157-172.
- Bouvier C., Fuentes Mariles G., Dominguez Mora R., 1994. "MERCEDES, un modèle hydrologique d'analyse et de prévision de crues en milieu hétérogène". 4p., 23^e Journées de l'Hydraulique - Congrès de la SHF, Nîmes (France), Septembre 1994, pp.257-260
- Bricquet, J.P., Bamba, F., Mahé, G., Touré, M., Olivry, J.C., 1997. Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique Atlantique. Revue des sciences de l'eau; vol n°3, 321-337.
- Bricquet, J.P., Mahé, G., Bamba, F., 1995. Changements climatiques et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). In : L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement. Mélanges à la mémoire de Jean Rodier (Actes de la conférence de Paris, 2-4 Mai 1995) (édité par P. Chevallier & B. Pouyaud), 113-124. IAHS Publ. n° 238.
- Carbonnel, J.P. et HUBERT P.; 1992. Pluviométrie en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. Remise en cause de la stationnarité des séries. In L'aridité, une contrainte au développement, Ed. ORSTOM, 37-51.
- Casenave, A., Valentin, C., 1988. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. CEE/ORSTOM, Paris, multigr. 202 p.
- Cissé, Sawadogo, 1986. La sécheresse et ses effets sur les normes hydrologiques. In. Colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse, Ouagadougou 20-24 mai 1986. Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), Série Hydrologie, 30 pp.
- Conway, D., Jones, P., D., 1999. Assessing the impact of future climatic change on the water resources and the hydrology of the Rio de la Plata basin, Argentina. Final Report – August 1999. Climatic Research Unit. University of East Anglia.
- Delattre, M.O., 1996. Évolution climatique en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. Rapport de Stage de fin d'Études. ISIM, Montpellier.
- Delhomme, J.P., 1976. Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Docteur Ingénieur, Paris 6, Ecole des Mines de Paris, 130p.
- Demarée G.R., Nicolis C., 1990. Onset of the sahelian drought viewed as a climatic fluctuation induced transition. Quart. Jour. Roy. Met. Soc., 116, 221-238.

- Denett M.D., Rodgers J. A., Stern R. D., 1985. A reappraisal of rainfall trends in the sahel. *Journal of Climatology*, n°5, 353-362.
- Depraetere, C., 1996. *Novas Totius Terrarum (NTT)*. Base de données mondiale du relief. ORSTOM, Antenne Hydrologique du Bénin.
- Dhonneur, G., 1985. *Traité de météorologie tropicale. Application au cas particulier de l'Afrique occidentale et centrale*. Direction de la météorologie. 151 p.
- Dunne, K.A. and Willmott, C.J., 1996. Global distribution of plant-extractable water capacity of soil. *Int. J. Climatology* 16, 841-859.
- ESRI, 1996. *Avenue. Customization and application development for ArcView*. Environmental Systems Research Institute, Inc. 260p.
- Farmer, G., 1986. Rainfall variability in tropical Africa. Some implications for policy. *Land Use Policy*, October 1986.
- Fontaine, B. et Bigo, S., 1991. Modes de sécheresse ouest-africains et température de surface océanique. *Veille Climatique Satellitaire*, 38, 37-49.
- Girard, G., Ledoux, E., Villeneuve, J.P., 1981. Le modèle couplé. Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains dans un système hydrologique. *Cah. ORSTOM, sér. Hydro.*, n°4-1981, pp : 151-278.
- Gleick, P.H., 1986. Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. *Journal of hydrology*, 88 (1986) 97-116.
- Gonni, C., 1986a. Quelques données sur la sécheresse de ces dernières années. In. *Colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse*, Ouagadougou 20-24 mai 1986. Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), Série Hydrologie, 14 pp.
- Gonni, C., 1986b. Limites d'utilisation des normes hydrologiques et pluviométriques. In. *Colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse*, Ouagadougou 20-24 mai 1986. Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), Série Hydrologie, 10 pp.
- Grayson, R.B., Moore, I.A., McMahon, T.A., 1992. physically based hydrologic modelling. 2. Is the concept realistic? *Water Res. Res.*, vol 128, n° 10, pp. 2659-2666.
- Guilbot, A., 1971. Processus d'optimisation en quatre étapes appliqué à la recherche des paramètres des modèles déterministes. *Laboratoire d'Hydrologie et de Modélisation*. Université Montpellier II, note LHM 16/71.

- Houndenou, C., Hernandez, K., 1998. Modification de la saison pluvieuse dans l'Atakora (1961-1990). Un exemple de sécheresse au nord-ouest du Bénin (Afrique occidentale). Cahiers Sécheresse, Volume 9, Numéro 1, pp. 23 – 34.
- Hubert P., Carbonnel J.P., 1987. Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. Journal of Hydrology, 95 : 165-183.
- Hubert, P., Carbonnel, J.P., Chaouche, A., 1989. Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. Journal of hydrology, 110: 349-367.
- Hubert P., servat E. , Paturel J.E., Kouamé B., Bendjoudi H., Carbonnel J.P., Lubes-Niel H., 1998. La procédure de segmentation, dix ans après. In : Servat E., Hugues D., Fritsch J.M. & Hulme M. (Eds) : Water Ressources Variability in Africa during the XXth Century. Proceedings de la conférence ABIDJAN'98, ORSTOM/AISH/UNESCO, Pub. AISH no 252, 189-197.
- Hulme, M., 1996a. Recent climatic change in the world's drylands. Geophysical research Letters, vol. 23, n° 1, 61-64.
- Hulme, M., 1996b. Climate change and southern Africa : an exploration of some potential implications in the SADC region. CRU/WWF.
- Kendall S. M. et Stuart A., 1943. The advanced theory of statistics. Charles Griffin, Londres.
- Kottegoda, N.T., 1980. Stochastic water resources technology. McMillan Press, Hong Kong, 384 p.
- Lamb H.H., 1966. Climate in the 1960's. Geogr. Journ., 132, 183-212
- Lamb P., 1983. Subsaharan rainfall update for 1982 : continued drought. Journal of Climatology, n°3, 419-422.
- Laraque, A., Mahé, G., Orange, D., Marieu, B., 2001. Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the twentieth century. Journal of Hydrology, 245, 1-4, 104-117.
- Le Barbé, L., Servat, E. 1992. Régionalisation en hydrologie. Application au développement. Actes des VIIIes journées hydrologiques, Montpellier, les 22 et 23 septembre 1992. ORSTOM
- Le Borgne, J., 1990. La dégradation actuelle du climat en Afrique, entre Sahara et Équateur. In La dégradation des paysages en Afrique de l'ouest. Points de vue et perspectives de recherches. Université Cheick Anta Diop, Dakar 1990, 17-36.

- Leprun, J.C., Molinier M., Cadier, E., Fotius, G., Galindo, O., De Souza Ramos, F., De Souza, H., 1995. Les sécheresses de la région nordeste du Brésil et leurs conséquences. *Sécheresse*, vol. 6, n°1, Mars 1995, 23-33.
- Leroux, M., 1980. Le climat de l'Afrique tropicale. Dakare. Thèse d'Etat. Université de Dijon. 3 tomes. 1427 p.
- L'Hôte, Y., Mahé, G., 1996. Afrique de l'Ouest et Centrale. Carte des précipitations moyennes annuelles (Période 1951-1989). ORSTOM.
- Lubès H., Masson J.M., Servat E., Paturel J.E., Kouamé B., Boyer J.F., 1994. Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques. Etudes bibliographiques. UR2-DEC, ORSTOM, Montpellier
- Lubès H., Masson J.M., Raous P., Tapiou M., 1995. Safarhy. Logiciel de calculs et d'analyse fréquentielle adapté à l'évaluation du risque en hydrologie. ORSTOM – Université Montpellier II.
- Mahé, G., 1993. Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Thèse, Université Paris XI-Orsay, ORSTOM Editions, Coll. Etudes et Thèse, Paris, 438 p.
- Mahé, G., Olivry, J.C., 1991. Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale du mensuel à l'interannuel. In: *Hydrology for the Water Management of Large River Basins (Proc Vienne Symposium August 1991)*. IAHS Publ n°201, 163-172.
- Mahé, G. et Citeau, J., 1993. Relation océan-atmosphère-continent dans l'espace africain de la mousson atlantique. Schéma général et cas particulier de 1984. *Veille Climatique Satellitaire.*, n°44, 34-54.
- Mahé, G. et Olivry J.C., 1995. Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, vol. 6, n°1, Mars 1995, 109-117.
- Mahé, G. et Olivry, J.C., 1999. Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Series IIa*, vol. 328, 621-626.
- Mahé, G., Bamba, F., Soumaguel, A., Orange, D., Olivry, J.C. (sous presse). Water losses in the Niger River inner delta : water balance and flooded surfaces. *Hydrological Processes Journal*.

- Mahé G., Dray A., Paturel J.E., Crès A., Koné F., Manga M., Crès F.N., Djoukam J., Maïga A.H., Ouédraogo M., Conway D., Servat E., 2001. Climatic and anthropogenic impacts on the hydrological regime of the Nakambe river, Burkina-Faso. FRIEND quadriennial meeting, Cape Town, South Africa, March 2002.
- Makhlouf, Z., 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat, Université Paris - Sud, 413 p.
- Milly, P.C.D, Dunne, K.A., 1994. Sensitivity of the global water cycle to the water-holding capacity of land. *J. Climate*, 7, 506-526.
- Morel, M., 1986. Les problèmes posés par les normes pluviométriques dans la région sahélienne. In. Colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse, Ouagadougou 20-24 mai 1986. Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), Série Hydrologie, 15 pp.
- Moron, V., 1994. Variabilité des précipitations en Afrique tropicale au nord de l'équateur (1933-1990) et relations avec les températures de surface océanique et la dynamique de l'atmosphère. Centre de recherches de Climatologie. Université de Bourgogne. 219 p.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principle, *Journal of hydrology*, 10 : 282-290.
- New, M., Hulme, M., Jones, P., 1997. A 1961-1990 mean monthly climatology of global land areas. Climatic Research Unit. School of Environmental Sciences. University of East Anglia.
- Nicholson, S.E., 1979. Revised rainfall series for the west african subtropics. *Monthly Weather Review*, n°107, 620-623.
- Nicholson, S.E., 1980. The nature of rainfall fluctuations in subtropical West Africa. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 473-487.
- Nicholson, S.E., 1981. Rainfall and atmospheric circulation during drought periods and wetter years in West Africa. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 2191-2208.
- Nicholson, S.E., 1985. Sub-Saharan Rainfall 1981-1984. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 24, n°12.
- Nicholson, S.E., 1993. An overview of African rainfall fluctuations of the last decade. *Journal of Climate*, vol. 6, n°6.
- Nicholson, S.E., 1994. Recent rainfall fluctuations in Africa and their relationship to past conditions over the continent. *The Holocene* 4, 2, 121-131.

- Nicholson, S.E., 1998. Interannual and interdecadal climate variability of rainfall over African continent during the last two centuries. In : Water Resources Variability in Africa during the Xxth century (ed. by E. Servat, D. Hughes, J.M. Fritsch & M. Hulme) (Proc. Abidjan'98 Conf., Abidjan, Côte d'Ivoire, November 1998), 107-116. IAHS Publ. no. 252, 1998
- Nicholson, S.E., Palao, I.M., 1993. A re-evaluation of rainfall variability in the sahel. Part I. Characteristics of rainfall fluctuations. *International Journal of Climatology*, vol. 13, 371-389.
- Olivry, J.C., 1983. Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégal et aux îles du Cap-Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XX, n° 1, pp : 47-69.
- Olivry, J.C., Bricquet, J.P., Mahé, G., 1993. Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide. In : *Hydrology of Warm Humid Regions* (Proc Yokohama Symposium July 1993). IAHS Publ. n°216, 67-78.
- Olivry, J.C., Bricquet, J.P., Bamba, F., DIARRA, M., 1994. Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit des deux dernières décennies. In: *Quelques données préliminaires sur l'environnement et la qualité des apports du Niger au Sénégal*. (éd. par Olivry J. C., DIALLO IAM, M., BRICQUET, J. P.) ORSTOM - CNRST Novembre 1994.
- Olivry, J.C., Bricquet, J.P., Mahé, G., 1998. Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies. In : Servat E., Hughes D., Fritsch J.M. & Hulme M. (Eds) : *Water Ressources Variability in Africa during the XXth Century*. Proceedings de la conférence ABIDJAN'98, ORSTOM/AISH/UNESCO, Pub. AISH no 252, 189-197.
- Orange, D., Wesselink, A., Mahé, G., Feiroure, C., 1997. The effects of climate changes on river baseflow and aquifer storage in Central Africa. *Proceedings of Rabat Symposium, 5th IAHS Assembly*, Publ. 240, Sustainability of water ressources under increasing uncertainty, 113-123.
- Ouedraogo, M., 1996. Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit autour des années 1970 en Côte d'Ivoire. Mémoire de DEA Sciences de l'eau dans l'environnement continental, Université Montpellier II, 80 p.
- Ouedraogo, M., Lubes-Niel, H., Masson, J.M., Servat, E., Paturel J.E., 1998. Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit aux alentours de 1970 en Côte d'Ivoire. In : *Water Resources Variability in Africa during the Xxth century* (ed. by E. Servat, D. Hughes, J.M. Fritsch & M. Hulme) (Proc. Abidjan'98 Conf., Abidjan, Côte d'Ivoire, November 1998), 315-321. IAHS Publ. no. 252, 1998

- Ozer, P. et Erpicum, M., 1995. Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905. *Sécheresse*, vol. 6, n°1, Mars 1995, 103-108.
- Paturel, J.E., Servat, E., Kouamé, B., Boyer, J.F, Lubès, H., Masson, J.M., 1995a. Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. *Sécheresse*, vol. 6, n°1, Mars 1995, 95-102.
- Paturel, J.E., Servat, E., Vassiliadias, A 1995b. Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data, case of the GR2M model. *Journal of hydrology*, 168 : 111-125.
- Paturel, J.E., Servat, E., Kouamé, B., Lubès, H., Ouedraogo, M., Masson, J.M., 1997a. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part two : An integrated regional approach. *Journal of Hydrology*, 191 : 16-36.
- Paturel, J.E., Servat, E., Lubès, H., Delattre M.O., 1997b. Variabilité climatique et analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. Soumis pour publication à *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Institut de France.
- Paturel, J.E., Servat, E., Kouamé, B., Lubès, H., Fritsch, J. M., Masson, J.M., 1997c. Manifestations d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In. *Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty (Proc. Rabat symp., April 1997)* (ed. By D. Rosbjerg, N. Boutayeb, A. Gustard, Z. W. Kundzewicz & P. F. Rasmussen), 21-30. IAHS Publ. N°240
- Paturel, J.E., Ouattara, F., Mahé, G., Lubès-Niel, H., Servat, E., L'Aour, A., 2001. Evolution du climat au Burkina-Faso au cours de la seconde moitié du XXième siècle. FRIEND quadriennial meeting, Cape Town, South Africa, March 2002.
- Penman, H.L., 1956. Evaporation : An Introduction survey. *Netherlands J. Agric. Sci.*, vol. 1, pp. 9-29.
- Perrin, C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 276 p.
- Pettitt, A.N., 1979. A non-parametric approach to the change point problem. *Applied statistics*, vol. 28 (2), pp. 16-36.

- Pouyaud, B., 1986a. Estimation des apports annuels et des étiages, avant et après la récente période de sécheresse, de la Volta Noire à Nounbiel et de la Volta Blanche à Bagré. In. Colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse, Ouagadougou 20-24 mai 1986. Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), Série Hydrologie, 16 pp.
- Pouyaud, B., 1986b. Normes hydrologiques des réseaux de mesures hydrométriques et sécheresse. In. Colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse, Ouagadougou 20-24 mai 1986. Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), Série Hydrologie, 5 pp.
- Rodier, 1964. Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'ouest du Congo. Mém. ORSTOM, n°6, Paris, 137 p.
- Servat, E., 1986. Présentation de trois modèles globaux conceptuels et déterministes : CREC 5, MODGLO et MODIBI. Centre ORSTOM de Montpellier, Novembre 1986
- Servat, E., 1993. Evaluation régionale des ressources en eau : application à la Côte d'Ivoire. Rapport de synthèse du programme ERREAU. Antenne hydrologique ORSTOM d'Abidjan, 154 p.
- Servat, E., 1994. ICCARE. Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en Afrique de l'ouest non sahélienne. Présentation du programme. Antenne Hydrologique ORSTOM, Abidjan, Côte d'Ivoire. 25 pp.
- Servat, E., Dezetter, A., 1988. SIMPLE et ROSEN : deux méthodes d'optimisation non linéaire. Théorie et pratique. Notice OVNIh1. ORSTOM Montpellier.
- Servat, E., Sakho, M., 1995. Instability of water resources and management of a planned water system in non-sahelian West Africa. Hydrological Sciences Journal, 40, 2, 217-230.
- Servat E., Paturel J.E., Lubès H., Kouamé B., Ouedraogo M., Masson J.M., 1997a. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part one: Detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. Journal of Hydrology, 191: 1-15.
- Servat, E., Paturel J.E., Kouamé B., Travaglio, M., Lubès, H., Marieu B., Fritsch, J.M., Masson, J.M., 1997b. Modification des régimes d'écoulement en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne et conséquences sur les ressources en eau. FRIEND'97 - 3rd International Conference on FRIEND - Regional Hydrology : Concepts and models for sustainable water resource management. 1 - 4 Octobre 1997, Postojna, Slovénie.

- Servat E, Paturel JE, Kouamé B, Travaglio M, Ouedraogo M, Boyer JF, Lubès-Niel H, Fritsch JM, Masson JM, Marieu B., 1998. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In: Water Resources Variability in Africa during the Xxth century (ed. by E. Servat, D. Hughes, J.M. Fritsch & M. Hulme) (Proc. Abidjan'98 Conf., Abidjan, Côte d'Ivoire, November 1998), 323-337. IAHS Publ. no. 252, 1998
- Shuttleworth, W.J., 1994. Evaporation. In Handbook of Hydrology (ed. by R. D. Maidment), Chapter 4, McGraw-Hill.
- Sircoulon, 1974. Les données climatiques et hydrologiques de la sécheresse en Afrique de l'ouest sahélienne. SIES rapport n°2. 44 p.
- Sircoulon, J., 1976. Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaisons avec les sécheresses "1913" et "1940". Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrol., vol. XIII, n°2, 1976, 75-174.
- Sircoulon, J., 1987. Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'Ouest depuis le début du 20ème siècle. In : The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources (Proc Vancouver Symposium August 1987). IAHS Publ n°168, 13-25.
- Sircoulon, J., 1990. Impact possible des changements climatiques à venir sur les ressources en eau des régions arides et semi-arides. WMO/TD-n°380, 87 p.
- Sircoulon, J., 1992. Caractéristiques des ressources en eau de surface zones arides de l'Afrique de l'Ouest. Variabilité et évolution actuelle. In l'Aridité une contrainte au développement. Didactiques/ORSTOM Éditions, 1992
- Sircoulon, J., Olivry, J.C., 1986. Caractéristiques d la sécheresse actuelle en Afrique de l'Ouest et Centrale (considération sur les stations pluviométriques de longue durée et les débits des rivières. In : Colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse, Ouagadougou 20-24 mai 1986. Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), Série Hydrologie, 20 pp.
- Smith, M., 1992. Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Report, Land and Water Development Division, UN Food And Agriculture Organization, Rome, Italy.
- Sutcliffe, J.V. et Knott, D.G., 1987. Historical variations in African water resources. In : The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources (Proc Vancouver Symposium August 1987). IAHS Publ n°168, 463-475.

- Tanaka, M., Weare, B.C., Navato, A.R., Newell, R.E., 1975. Recent African rainfall patterns. *Nature*, 255, 201-203.
- Thom, A.S., and Oliver, H.R., 1977. On Penman's equation for estimating regional evapotranspiration. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 193, 345-357.
- Thornthwaite, C.W., and Mather, J.R., 1955. The water balance. *Publ. Climatol. Lab. Climatol. Drexel Inst. Technol.* 8 (1), 1-104.
- Todorov, A.V., 1985. Sahel, the changing rainfall and the 'normals' used for its assesment, *Journal of Climate and Apllied Meteorology*, 24, pp. 97-107.
- UNESCO / OMM, 1987. Aspects hydrologiques des sécheresses. Publié par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, Paris, France.
- Wattier, P., 1986a. L'eau, le bien le plus convoité au Sahel. *Dépêche A.F.P.*, 8 Mai 1986.
- Wattier, P., 1986b. Afrique sécheresse. Au Mali, la sécheresse est une caractéristique permanente. *Dépêche A.F.P.*, 6 Mai 1986.
- Wesselink, A.J., Orange, D., Feizouré C.T., Randriamiarisoa, 1995. Les régimes hydroclimatiques et hydrologiques d'un bassin versant de type tropical humide : l'Oubangui (République Centrafricaine). In : *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement. Mélanges à la mémoire de Jean Rodier (Actes de la conférence de Paris, 2-4 Mai 1995) (édité par P. Chevallier & B. Pouyaud)*, 179-194. *IAHS Publ.* n° 238.
- WMO, 1966. Climatic change by a working group of the commission for climatology. *World meteorological organization (WMO) 195, TP 100, Tech note n°79*, 78p.
- Yates, D., N., 1997. Approaches to continental scale runoff for integrated assessment models. *Journal of Hydrology*, 201 : 289-310.

ABREVIATIONS ET SIGLES

ABRÉVIATIONS ET SIGLES

ASECNA : Agence pour sécurité et la navigation aérienne

CEMAGREF : Centre du Machinisme du Génie Rural et des Eaux et Forêts

CRU : Climatic Research Unit

FAO : Food and Agriculture Organization

FRIEND : Flow Regimes from International Experimental and Network Data

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

GED : Global Ecosystem Database

GRID : Global Resource Information Database

HYCOS : HYdrological Cycle Observing System

ICCARE : Identification et Conséquences d'une variabilité climatique en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne

IRD : Institut de recherche pour le développement (ex ORSTOM)

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NOAA-EPA : National Oceanic and Atmospheric Administration – Environment Protection Agency

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

OSS : Observatoire du Sahara et du Sahel

PHI : Programme Hydrologique International

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

SIEREM : Système d'Information Environnemental sur les Ressources en Eau et leur Modélisation

SIG : Système d'Information Géographique

UEA : University of East Anglia

UNESCO :United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization

USGS : United States Geographical Survey

VAHYNE : analyse de la VARIabilité HYdrologique et impacts sur les ressources eN Eau

ZCIT : Zonce de conergence Inter-Tropicale

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1.1 : Déficits d'écoulement moyen de certains cours d'eau d'Afrique de l'ouest pendant la période 1972-1974 (d'après Sircoulon, 1976)</i>	28
<i>Tableau 1.2 : déficits pluviométriques moyens observés par rapport à la date de rupture pour des pays d'Afrique de l'Ouest et Centrale (in Servat et al., 1998)</i>	46
<i>Tableau 1.4 : Ordres de grandeur (en %) de certains déficits d'écoulement annuel calculés depuis la date de rupture observée dans les séries chronologiques par rapport à la période de référence 1950-1989 (d'après Paturel et al., 1997c)</i>	51
<i>Tableau 1.5 : Comparaison des déficits annuels de la pluviométrie et des écoulements sur quelques pays de l'Afrique de l'ouest et centrale</i>	61
<i>Tableau 2.1 : Classification des sols selon la capacité de rétention en eau (source FAO)</i>	99
<i>Tableau 2.2 : Données climatiques gérées par la base de données SIEREM</i>	105
<i>Tableau 3.1. Évolution des indices pluviométriques calculés par rapport à la période de référence 1920-1997.</i>	131
<i>Tableau 3.2 Résultats des tests de tendance et calcul des déficits sur les modules annuels de 40 stations au Burkina Faso, en Côte d'Ivoire et au Mali</i>	138
<i>Tableau 3.3 : Résultats du Test de Pettitt appliqué aux VCXn et calculs des déficits</i>	141
<i>Tableau 3.4 : Résultats du Test de Pettitt appliqué aux QCNn et calcul des déficits</i>	143
<i>Tableau 3.5 : Comparaison des déficits entre les pluies annuelles et les débits moyens annuels sur des bassins de la zone d'étude</i>	145
<i>Tableau 4.1 : Valeurs des modules en m³/s associés aux récurrences humides</i>	166
<i>Tableau 4.2 : Valeurs de VCX1 (en m³/s) associées aux récurrences humides</i>	172
<i>Tableau 4.3 : Valeurs de QCN1 (m³/s) associées aux récurrences humides</i>	176
<i>Tableau 4.4 : Valeurs décennales et vicennales du QCN1 (l/s) associées aux récurrences sèches</i>	177
<i>Tableau 5.1 : Paramètres α, ε et Smax en fonction du Schéma de classification de Holdridge (d'après Yates, 1997)</i>	200
<i>Tableau 5.3 : Détails sur les bassins tests</i>	200
<i>Tableau 5.4 : Caractéristiques des calages-validations du modèle GR2M</i>	201
<i>Tableau 5.5 : Caractéristiques des calage-validations du modèle Conway</i>	202
<i>Tableau 5.6 : Sélection des meilleures valeurs du critère de Nash obtenues avec le modèle de Yates</i>	203
<i>Tableau 5.7 : Meilleures grilles de données d'entrée pour les bassins-tests et valeurs du critère de Nash sur l'ensemble de la période d'observation</i>	205
<i>Tableau 5.9 : Résultats des tests de calage-validation sur le bassin de Bada</i>	206

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLE DES ILLUSTRATIONS

figure 1.1 : Indices pluviométriques interannuels des hauteurs de pluies annuelles par rapport à la période 1901-1990 (in Nicholson, 1998).	25
figure 1.2 : Variations de l'hydraulicité (variable centrée réduite) depuis 1950 pour l'Afrique sèche (Chari, Niger, et Sénégal) et l'Afrique humide (Oubangui et Sangha) (in Bricquet et al., 1997)	26
figure 1.3 : Évolution des coefficients de tarissement sur le Niger et le Bani (in Olivry et al., 1994)	33
figure 1.4 : Afrique de l'Ouest et Centrale : Isohyètes interannuelles sur les décennies 1950 à 1980 (in Servat et al., 1998)	38
figure 1.5 : Tracé des indices pluviométriques pour les décennies 1950, 1960, 1970 et 1980 (in Servat et al., 1998)	39
figure 1.6 : Afrique de l'Ouest et Centrale – Pluviométrie des mois de Février sur les décennies 1950 à 1980 (in Servat et al., 1998)	42
figure 1.7 : Afrique de l'Ouest et Centrale – Pluviométrie des mois de Juillet sur les décennies 1950 à 1980 (in Servat et al., 1998)	42
figure 1.8 : Afrique de l'Ouest et Centrale : Nombre de jours de pluie interannuel sur les décennies 1950 à 1980 (in Servat et al., 1998)	44
figure 1.9 : Pluies moyennes interannuelles au cours des décennies 1950 à 1990 au Burkina Faso (in Paturel et al., 2001)	48
figure 1.10 : Variation des apports annuels de grands fleuves (in Sircoulon, 1987)	50
Figure 1.11 : Hydrogrammes annuels du Bani à Douna en année proche de la médiane 1970-1971 et en année minimum 1984-1985 (in Sircoulon, 1990)	52
Figure 1.12 : Hydrogrammes annuels du Niger à Koulikoro en années maximum 1925-1926, médiane 1965-1966 et minimum 1984-1985 (in Sircoulon, 1990)	53
Figure 1.13 : Hydrogrammes annuels du Sénégal à Bakel en année proche de la médiane 1962-1963 et en année minimum 1984-1985 (in Sircoulon, 1990)	53
Figure 1.14 : Hydrogrammes annuels du Chari à N'Djamena en année proche de la médiane 1970-1971, en année sèche 1972-1973 et en année minimum 1984-1985 (in Sircoulon, 1990)	54
figure 1.15 : Déficit hydrométrique de cours d'eau en Afrique de l'Ouest et centrale (in Servat et al., 1998)	56
figure 2.1 : Zone d'étude	67
figure 2.2 : Esquisse des sols de l'Afrique de l'ouest (in Casenave et Valentin, 1988)	71
figure 2.3 : Les grandes zones de végétation	72
figure 2.4 : Isohyètes interannuelles calculées sur la période 1950-1997	75
figure 2.5 : Carte des principaux bassins de la zone d'étude	78
figure 2.6 : Carte des différents régimes hydrologiques et de leurs variantes	80
figure 2.7 : Réseau pluviométrique de l'étude	82
figure 2.8 : Nombre cumulé de stations pluviométriques retenus en fonction de l'année d'implantation	83
figure 2.9 : Réseau hydrométrique de l'étude	84
figure 2.10 : Contours de principaux bassins en Afrique de l'Ouest	87
figure 2.11 : Principaux types de végétation en Afrique de l'ouest.	88
figure 2.12 : Postes pluviométriques utilisés pour la constitution des grilles de pluie CRU et CRU-IRD	90
figure 2.13 : Moyennes mensuelles des hauteurs de pluies des grilles de pluie	91
figure 2.14 : Résultats du test de Student de la comparaison des moyennes des pluies annuelles des fichiers CRU-IRD et TRAVAIL pour un seuil de confiance de 95%	93
figure 2.15 : Moyennes mensuelles d'ETP	95
figure 2.16 : ETP moyennes interannuelles calculées sur la période 1950-1995	97
figure 2.17 : Température moyenne annuelle calculée sur la période 1950-1995	98
figure 2.18 Distribution des sols en fonction de leur capacité de rétention d'eau	100
figure 2.19 : Différence des capacités de rétention d'eau du sol de la FAO et du CRU	102
figure 2.20 : Pays pris en compte dans le projet SIEREM	103
figure 3.1 : Précipitations annuelles à Aribinda, Abidjan et Bamako.	117
figure 3.2 : Pentés des droites de régression rapportées à l'écart type	118
figure 3.3 : Cartographie des dates de rupture des séries temporelles de précipitations annuelles (période de référence: 1950 à 1997) (fichier de pluie TRAVAIL)	120
figure 3.4 : Cartographie des dates de rupture des séries temporelles de précipitations annuelles (période de référence: 1950 à 1995) (fichier de pluie CRU-IRD)	121
figure 3.5 : Dynamique spatiale (zone délimitée par les isohyètes) et temporelle du phénomène de diminution de la pluviométrie annuelle (fichier CRU-IRD)	122

figure 3.6 : Dynamique spatiale (zone de végétation) et temporelle du phénomène de diminution de la pluviométrie annuelle (fichier CRU-IRD)	123
figure 3.7 : Pourcentage de stations déficitaires par rapport à la moyenne interannuelle calculée sur la période 1950-1997	125
figure 3.8 : Indices pluviométriques interannuels par rapport à la période 1950-1997	126
figure 3.9 : Variation relative des pluviométries annuelles de la période 1970-1997 par rapport à la période 1950-1969	127
figure 3.10 : Intensité du caractère déficitaire des zones de végétation	128
figure 3.11 : Localisation des postes pluviométriques à longue durée d'observation.	129
figure 3.12 : Dates de rupture des séries temporelles de précipitations annuelles	130
figure 3.13 : Variation relative de la pluviométrie du mois d'août	134
figure 3.14 : Variation relative de la pluviométrie du mois de septembre	135
figure 3.15 : Carte des déficits de débits moyens annuels	139
figure 4.1 : Normales pluviométriques 1951-1980, 1961-1990 et 1971-1997	153
figure 4.2 : Variation relative entre la normale "1971-1997" et la normale "1951-1980"	154
figure 4.3 : Variation relative entre la normale "1950-1997" et la normale "1951-1980"	154
figure 4.4 : Variation relative (%) des pluies moyennes annuelles calculées sur les périodes 1950-1997 et 1970-1997	156
figure 4.5 : Variation relative (%) des pluies moyennes annuelles décennales humides calculées sur les périodes 1950-1997 et 1951-1980	157
figure 4.6 : Variation relative (%) des pluies moyennes annuelles décennales humides calculées sur les périodes 1971-1997 et 1951-1980	158
figure 4.7 : Pluies annuelles en fonction des périodes de retour pour des récurrences humides à Aribinda (Burkina Faso), Abidjan (Côte d'Ivoire) et Bamako (Mali)	159
figure 4.8 : Variation relative entre les pluies décennales sèches calculées sur la période 1950-1997, par rapport à celles calculées sur la période 1951-1980.	160
figure 4.9 : Variation relative entre les pluies décennales sèches calculées sur la période 1971-1997, par rapport à celles calculées sur la période 1951-1980.	161
figure 4.10 : Pluies annuelles en fonction des périodes de retour pour des récurrences sèches à Aribinda (Burkina Faso), Abidjan (Côte d'Ivoire) et Bamako (Mali)	162
figure 4.11 : Courbes d'ajustement du module en fonction des périodes de retour (récurrences humides)	165
figure 4.12 : Courbes d'ajustement du module en fonction des périodes de retour (récurrences sèches)	168
figure 4.13 : Courbes d'ajustement du VCX1 (débit maximum journalier) en fonction des périodes de retour (récurrences humides)	170
figure 4.14 : Variation relative entre les VCX1 calculés sur la période 1971-1997 par rapport aux VCX1 calculés sur la période 1950-1997 pour une récurrence décennale humide	173
figure 4.15 : Courbes d'ajustement du QCN1 en fonction des périodes de retour (récurrences humides)	175
figure 4.16 : Variation relative entre les modules calculés sur la période 1971-1997 par rapport aux modules calculés sur la période 1950-1997 pour une récurrence décennale humide	179
figure 5.1 : Schéma de fonctionnement du modèle GR2M	192
figure 5.2 : Schéma de fonctionnement du modèle de Conway	194
figure 5.3 : Schéma de fonctionnement du modèle de Yates	196
figure 5.4 : Hydrogrammes observés et calculés sur la période de validation (modèle GR2M) sur le bassin du Bandama à Bada	204
figure 5.5 : Comparaison des critères de Nash des fichiers de pluies CRU-IRD et CRU obtenus avec le modèle GR2M	207
figure 5.6 : Comparaison des critères de Nash (calage) des fichiers de pluies CRU-IRD et TRAVAIL obtenus avec le modèle GR2M	208
figure 5.7 : Comparaison des critères de Nash obtenus avec le modèle de Yates pour les grilles de pluie CRU-IRD et TRAVAIL	209
figure 5.8 : Comparaison des critères de Nash obtenus avec les grilles d'ETP RC et PM avec le modèle GR2M	210
figure 5.9 : Comparaison des critères de Nash obtenus avec les grilles d'ETP RC et TO avec le modèle GR2M	210
figure 5.10 : Comparaison des critères de Nash obtenus avec les grilles d'ETP TO et RC et PM avec le modèle de Yates	211
figure 5.11 : Comparaison des critères de Nash obtenus avec les grilles de sol FAO et CRU (modèle GR2M)	212
figure 5.12 : Hydrogrammes calculés par les modèles GR2M et Yates	213

<i>figure 5.13 : Carte des paramètres optimisés du modèle GR2M sur les bassins-tests (grille de pluie CRU-IRD, grille d'ETP RC, grille de sol FAO)</i>	214
<i>figure 5.14 : Hauteurs moyennes (1950-1995) de la lame d'eau écoulée mensuelle</i>	217
<i>figure 5.15 : Moyenne annuelle des lames d'eau écoulée sur la période 1950-1995</i>	219
<i>figure 5.16 : moyenne annuelle des lames d'eau écoulée sur la période 1971-1995</i>	219
<i>figure 5.17 : Différence entre les moyennes annuelles des lames d'eau écoulée sur les périodes 1971-1995 et 1950-1995</i>	221

RESUME

Ce travail s'inscrit dans la problématique de la révision des normes hydrologiques dans un contexte de déficits pluviométrique et hydrométrique prolongé.

L'analyse bibliographique sur la variabilité climatique et des ressources en eau menée dans cette étude révèle de fortes préoccupations de l'opinion publique et un intérêt convergent de spécialistes pour la problématique de la variabilité du climat et leur lien avec les ressources en eau en Afrique. La sécheresse actuelle qui est intervenue à la fin des années 60 apparaît comme un phénomène anormal qui se distingue des autres sécheresses persistantes qui se sont déjà produites depuis le début du siècle. Trois caractéristiques de la récente sécheresse font qu'elle semble être sans équivalent depuis le début du siècle: sa durée, son intensité et son extension.

L'application de différentes méthodes statistiques aux séries chronologiques de variables caractéristiques du régime pluviométrique et hydrométrique montre que globalement sur la zone d'étude (Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Mali), ces variables sont en baisse depuis les alentours de 1970. Le déficit pluviométrique annuel varie entre 10 et 40 %, alors que les débits moyens annuels présentent un déficit supérieur à 20% et dépassant quelques fois 60% ; cela révèle l'ampleur plus importante de la variabilité climatique sur les ressources en eau superficielles.

Cette étude s'est intéressée aux limites de notions comme "normes hydrologiques" et "durée de retour" dans une région qui connaît un contexte déficitaire depuis plus de 30 ans.

L'étude de la récurrence des pluies annuelles montre des différences importantes des valeurs fréquentielles calculées selon les échantillons constitués (observations sur la période 1950-1997 et observations sur la période 1971-1997). En année décennale humide, par exemple, les pluies annuelles calculées sur la période 1971-1997, sont moins importantes que celles calculées sur l'ensemble de l'échantillon des observations ; les variations dépassent la plupart du temps 10%.

Les valeurs fréquentielles des séries de débits moyens annuels, de même que les variables caractéristiques des hautes-eaux présentent des résultats similaires à ceux observés sur les pluies annuelles. Les variables caractéristiques des basses-eaux sont également touchées avec l'apparition de valeurs nulles pour des fréquences rares lorsqu'on ne considère que les données de la période située après 1970.

Le recours à la modélisation de la relation pluie-débit, basée sur les équations de bilan hydrique nous a permis de procéder à une régionalisation des lames d'eau écoulées mensuelles et annuelles et de mener l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau. Nous avons pu aboutir à une cartographie des lames d'eau écoulées mensuelles et annuelles sur des mailles de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Les effets de la dégradation du climat se manifestent par une réduction des lames d'eau écoulées sur la période 1971-1997.

TITLE

Contribution to the study of the impact of climate variability on water resources in West AFRICA. Consequences Analysis of a persevering drought : hydrological normals and regional modelisation

ABSTRACT

This work deals with the problem of hydrological standards revision in a context of rainfall and hydrometric decrease on a long period.

The bibliographical analysis on the climatic variability and water resources carried out in this study reveals that the current drought which intervened in the end of the 60s appears as an abnormal phenomenon which distinguishes it from the other persevering droughts which occurred since the beginning of century. Three characteristics of the recent drought make that it seems to be without equivalent since the beginning of century: its duration, its intensity and its extension.

The application of various statistical methods in the chronological series of variable, describing the rainfall and hydrometric patterns shows that globally, on the zone of study (Burkina Faso, Côte d'Ivoire and Mali), these variables are in decline since the beginning of 1970. Annual rainfall departures varies between 10 and 40 %, while the mean annual runoff present a deficit superior to 20 % and exceeding several times 60 %.

This study was interested in the limits of notions such as "the hydrological standards" and "duration of return" in a region which knows a context of deficit during more than 30 years.

The study of the recurrence of annual rainfall shows important differences of frequencies values calculated according to established samples (observations over the period 1950-1997 and observations over the period 1971-1997).

Frequencies values of mean annual average of runoff, as well as variable of low and high runoff present similar results to those observed on annual rainfall.

The use of water balance models allowed us to proceed to a regionalization of the monthly and annual runoff and to lead the study of the impact of the climatic variability on water resources. Maps of the monthly and annual runoff based on grid of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ has been established and show a decrease of the rate of discharge on the period 1971-1997.

DISCIPLINE : Mécanique, génie mécanique, génie-civil

MOTS-CLES

Variabilité climatique, variabilité des ressources en eau, sécheresse, normes hydrologiques, modélisation spatialisée.

INTITULE ET ADRESSE DE L'UFR OU DU LABORATOIRE

Laboratoire HydroSciences Montpellier (UMR 5569) – Case MSE – Place Eugène Bataillon – 34095 Montpellier cedex 5