



HAL
open science

Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger

Expédit Vissin

► **To cite this version:**

Expédit Vissin. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Hydrologie. Université de Bourgogne, 2007. Français. NNT: . tel-00456097

HAL Id: tel-00456097

<https://theses.hal.science/tel-00456097>

Submitted on 11 Feb 2010

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

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

**Thèse en vue de l'obtention du grade de Docteur
de l'Université de Bourgogne**
(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)



**Impact de la variabilité climatique
et de la dynamique des états de surface
sur les écoulements du bassin béninois
du fleuve Niger**

Spécialité : Hydroclimatologie

Soutenue publiquement par

Expédit Wilfrid VISSIN

Le mercredi 12 décembre 2007

Jury

M. Sylvain BIGOT
M. Michel BOKO
Mme Sylvie GALLE
M. Pierre CAMBERLIN
Mme Jocelyne PERARD

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Co-encadrant
Directeur de thèse

**Université de Bourgogne
Centre de Recherches de Climatologie
CNRS - UMR 5210**

**Thèse en vue de l'obtention du grade de Docteur
de l'Université de Bourgogne
(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)**

**Impact de la variabilité climatique
et de la dynamique des états de surface
sur les écoulements du bassin béninois
du fleuve Niger**

Spécialité : Hydroclimatologie

Soutenue publiquement par

Expédit Wilfrid VISSIN

le mercredi 12 décembre 2007

Jury

M. Sylvain BIGOT
M. Michel BOKO
Mme Sylvie GALLE
M. Pierre CAMBERLIN
Mme Jocelyne PERARD

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Co-encadrant
Directeur de thèse

Sommaire

Avant-propos et remerciement	
Résumé	
Abstract	
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Cadre géographique du domaine d'étude	9
Introduction	10
1.1. Présentation du milieu physique	10
1.2. Description du milieu humain et économique	41
Conclusion	58
Chapitre 2 : Point des connaissances, données et méthodes	59
Introduction	60
2.1. Clarification des concepts	60
2.2. Point des connaissances	67
2.3. Les données : présentation et analyse critique	74
2.4. Méthodes et outils de travail	83
2.5. Les quelques outils informatiques utilisés	111
Conclusion	112
Chapitre 3 : Caractérisation de la variabilité hydro-pluviométrique	113
Introduction	114
3.1. Validation des indices régionaux	114
3.2. Variabilité de la pluviométrie	116
3.3. Bilan climatique ou pluie utile	134
3.4. Caractéristiques des apports pluviométriques dans les sous bassins pour la période 1955-1992	138
3.5. Evolution de l'écoulement dans les sous bassins pour la période 1955-1992	142
3.6. Etude du bilan hydrologique dans les sous bassins pour la période 1955-1992	155
Conclusion	174
Chapitre 4 : Contribution des modèles GR4J et GR2M à l'étude du comportement hydrologique du bassin	175
Introduction	176
4.1. Objectifs de la modélisation par GR4J et GR2M	176
4.2. Problèmes de la modélisation hydrologique dans un contexte non stationnaire	177
4.3. Présentation des modèles GR4J et GR2M	178
4.4. Analyse de l'efficacité des modèles	185
4.5. Evolution comparée débits observés/débits simulés	196
4.6. Identification de tendances du comportement hydrologique des sous bassins	208
Conclusion	217
Chapitre 5 : Impact de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger	219
Introduction	220
5.1. Revue méthodologique	221
5.2. Analyse de la dynamique des états de surface : évolution à long terme de l'occupation du sol	232
5.3. Le NDVI et les termes du bilan hydrologique	242
5.4. Evolution des résidus du NDVI et de quelques termes du bilan hydrologique dans le bassin du Niger au Bénin	251

5.5.	Variabilité du NDVI et des paramètres du bilan hydrologique, pour quelques types d'occupations du sol	255
	Conclusion	260
	Conclusion générale	261
	Bibliographie	267
	Tables des matières	286
	Tables des figures	
	Table des tableaux	
	Annexe	

*A Maria-Clélia Merveille VISSIN, mon adorable petite fille
et
à Laurenda Camen GNELE-VISSIN, ma tendre épouse*

AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS

Cette thèse, intitulée « **Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger** », est réalisée dans le cadre de la convention interuniversitaire de climatologie qui existe entre l'Université d'Abomey-Calavi au Bénin et l'Université de Bourgogne, soutenue par le Ministère des Affaires Etrangères français. Cette étude présente la variabilité hydro-pluviométrique et le fonctionnement différentiel des formations de socle et de grès, la modélisation des écoulements des sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota et l'impact de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger.

Le travail que nous présentons a été mené à son terme grâce à l'appui et aux encouragements de maintes personnes. Qu'il nous soit permis ici de leur exprimer nos remerciements.

Notre profonde gratitude va d'abord à notre directeur de thèse, Madame le Professeur Jocelyne PERARD, qui nous a fait confiance depuis notre DEA et grâce à qui nous avons pu avoir les moyens de notre recherche et qui, en dépit de ses multiples responsabilités, a accepté de diriger ce travail, nous accordant ainsi le privilège de bénéficier de ses conseils, de ses remarques, de son analyse critique et de sa rigueur scientifique. Nous ne saurons trouver les mots justes pour lui exprimer toute notre gratitude, mais qu'elle trouve, dans ces quelques lignes, la marque de notre respect et l'expression de notre admiration.

Notre reconnaissance et notre respect vont à Monsieur Pierre CAMBERLIN, Directeur-Adjoint du Centre de Recherches de Climatologie qui a accepté de co-encadrer cette thèse. Nous nous permettons de saluer chez lui sa modestie et son accessibilité. Il nous a fait bénéficier de son savoir, de ses expériences en matière de recherches et de la clairvoyance de ses opinions scientifiques que nous ne pouvons que saluer. Il a su par ses idées, ses conseils, ses explications, ses critiques et son recul, alimenter l'âme de ce travail de recherche. Qu'il reçoive en retour nos sincères remerciements pour tout ce qu'il a fait pour nous.

Nous tenons également à manifester notre reconnaissance à Monsieur le Professeur Michel BOKO, Directeur du Laboratoire de Climatologie de l'Université d'Abomey-Calavi, qui nous a entouré de sa sollicitude et de son affection, témoignant ainsi son souci constant d'assurer la relève et son goût pour la recherche. Ses observations et ses critiques bienveillantes ne nous ont nullement fait défaut. Nos remerciements ne suffiront jamais à lui exprimer nos sentiments de gratitude. Merci, Professeur BOKO, d'accepter de faire partir du jury de soutenance de cette thèse.

Monsieur Bernard FONTAINE, Directeur du Centre de Recherches de Climatologie et responsable de l'UMR 5210 du CNRS « Climatologie de l'Espace Tropical », nous y a accueilli en manifestant attention et sympathie. Qu'il trouve ici l'expression de nos sincères remerciements.

Monsieur Charles PERRIN, Chercheur au CEMAGREF d'Antony a contribué à l'amélioration de cette thèse. Il n'a pas hésité à nous accueillir au CEMAGREF d'Antony pour nous initier aux modèles GR4J et GR2M, et à nous aider, non seulement par ses idées scientifiques mais aussi par sa compréhension, ses connaissances et ses qualités humaines, sa modestie et son accessibilité permanente et surtout par la qualité de ses travaux qui nous ont épargné énormément de pertes de temps. Charles PERRIN, infiniment merci.

Nous remercions chaleureusement Madame Sylvie GALLE, chargé de recherche de l'IRD au LTHE de Grenoble pour nous avoir fait bénéficier de son expérience et de sa clairvoyance en hydrologie et avoir accepté de faire partir du jury de cette soutenance en qualité d'examinateur.

Nous remercions vivement le professeur Sylvain BIGOT de l'université de Grenoble pour le plaisir qu'il nous a fait en rapportant ce travail. Il analyse cette thèse avec des yeux extérieurs et bienveillants.

Nous accordons une mention particulière à Michèle DALBY, du Centre de Recherches de Climatologie, qui a accepté de relire toute la thèse. Michèle, infiniment merci du fond du coeur.

Nos remerciements les plus chaleureux s'adressent également à Yves RICHARD, Pascal ROUCOU, Thierry CASTEL, Sijikuma SIVARAJAN, Malika MADELIN, Nathalie PHILIPPON, Jean-Pierre CHABIN et Corinne QUINTAR, tous membres du Centre de Recherches de Climatologie, pour leur disponibilité et leur dévouement.

A toute l'équipe de l'Ecole doctorale qui a assuré notre formation, nous disons infiniment merci.

Que Romuald M'BAYI, Karine HERNANDEZ et Sylvain NDJENDOLE trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance pour le précieux concours apporté lors du traitement statistique de nos données.

Nous voudrions remercier aussi très sincèrement nos chefs hiérarchiques au Bénin qui ont bien voulu nous laisser venir en France pour finaliser cette thèse. Ces remerciements s'adressent particulièrement au Professeur Mamoud Akani IGUE, Doyen de la Faculté de Lettres, Arts et Sciences Humaines (FLASH), au professeur Ascension BOGNIAHO, Président du comité sectoriel de la FLASH, à Monsieur Agossou NOUKPO, chef du Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT), à Monsieur Léon OKIOH, Responsable Pédagogique du cycle des maîtrises professionnelles à la FLASH.

Nous tenons à remercier la Mission de l'Ambassade de France au Bénin et, en particulier, Monsieur le Conseiller culturel qui ont soutenu financièrement notre travail et nos séjours à Dijon.

Notre chère épouse Laurenda C. GNELE-VISSIN et notre fille chérie Maria-Clélia Merveille VISSIN ont accepté tous les sacrifices et les désagréments que nous leur avons imposés pendant toute la durée de cette thèse et par nos absences longues et répétées chaque année. Qu'elles reçoivent ici nos très profonds remerciements.

Une reconnaissance particulière à Madame Gisèle DAKPOGAN pour son soutien et la manifestation de son affection envers notre famille et nous-même.

Que Messieurs Fulgence AFOUDA, Christophe S. HOUSSOU, Constant HOUNDENOU, Mohammadou MERAWA, Christian RAUGEL, Félix AZONSI, Abel AFOUDA, Aurelien GOUDJO, Placide CLEDJO, Jean-Bosco VODOUNNOU, Ernest AMOUSSOU, Gervais KISSEZOUNON, Flavien LANHOUSI, Pierre ADISSO, et Mesdames Odile GUEDEGBE, Sylvie ADOTE et Léocadie ODOULAMI reçoivent nos sincères remerciements pour leur soutien moral et leurs nombreux conseils.

Nous sommes, par ailleurs, très sensible au soutien de Marie-Odile BELKAÏD-GALLISSOT, Marie-Paule GUYOT et Seydou IMOROU à qui nous disons, infiniment merci.

Nous ne pouvons oublier nos frères en Christ, Charles BABADJIDE, pères Antoine TIDJANI, Francis SOSSOU, Jean HOUELETE et Marc HOUNNON qui nous ont soutenu dans leurs prières.

A nos amis du Bénin qui nous ont soutenu malgré la distance qui nous sépare, nous tenons à témoigner notre profonde gratitude.

Résumé

Cette thèse a pour objectif principal d'établir un diagnostic du fonctionnement hydrologique du bassin béninois du fleuve Niger dans le contexte de la péjoration pluviométrique qui a sévèrement touché l'Afrique depuis la décennie 1970.

Pour atteindre cet objectif, cette étude s'est appuyée sur trois grands types de données : météorologiques (pluie, température, humidité relative, évapotranspiration potentielle, évapotranspiration réelle), hydrologiques (écoulement, recharge) et des états de surface (superficie des types d'occupation du sol, NDVI). Elle s'est ordonnée autour de trois grands axes

Le premier, consacré à l'étude de la variabilité hydro-climatique sur la période 1955-1992, montre que les déficits pluviométriques des décennies 1970 et 1980 ont été largement amplifiés dans les écoulements de toutes les rivières (Mékrou, Alibori, Sota) du bassin béninois du fleuve Niger. Les déficits d'écoulement représentent cinq ou six fois celui de la pluie (Mékrou, Alibori). Ce même déficit pluviométrique est particulièrement amplifié dans la recharge du sous bassin de la Sota à Coubéri : le déficit de la recharge entre les deux sous périodes 1955-1972 et 1973-1992 représente près de cinq fois celui de la pluie. L'étude a aussi montré le comportement différentiel des grès et du socle : Sur le socle (Mékrou, Alibori), l'écoulement est fortement lié à la pluie, comme le montre la valeur élevée du coefficient de corrélation ; en revanche, sur les grès (sous bassin de la Sota à Coubéri), il est lié à la pluie et à la recharge.

Le deuxième axe montre l'efficacité des modèles GR4J et GR2M à simuler les écoulements moyens des sous bassins du Niger au Bénin donnée. Ainsi, par l'analyse du critère de Nash appliqué aux écoulements moyens donne des valeurs satisfaisantes (supérieures à 60 % pour la plupart). On peut donc dire que les modèles GR4J et GR2M présentent une certaine efficacité à simuler les écoulements aux pas de temps journalier et mensuel. Toutefois, les Nash sur les écoulements moyens journaliers avec le modèle GR4J sont largement améliorés au pas de temps mensuel avec le GR2M. Dans les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota à Coubéri, les modèles ont identifié une tendance nette à la baisse du cycle hydrologique. On ne doit toutefois pas négliger les limites des résultats obtenus puisque les tests statistiques utilisés n'ont pas pu identifier une tendance avec les modèles dans le sous bassin de la Sota à Gbassè.

Le troisième axe, consacré à l'étude d'impact de la dynamique des états de surface sur les écoulements, montre que les types d'occupation du sol ont connu de grands changements entre 1979 et 1992, avec une régression sensible des formations végétales naturelles (forêts et savanes arborées) et une progression marquée des formations anthropiques (mosaïques de cultures et de jachères) pour la même période. Il montre aussi que la recherche de corrélations NDVI/écoulement et résidus NDVI/résidus écoulement indépendamment de la pluie, souligne une relation significative dans les sous bassins de la Mékrou et de la Sota à Gbassè. Les résultats établissent ainsi une relation entre l'activité photosynthétique et l'écoulement, indépendamment de la pluie dans ces sous bassins. Cependant, dans les sous bassins de l'Alibori et de la Sota à Coubéri, on a pas pu mettre en évidence de lien significatif entre l'activité photosynthétique des types d'occupation du sol et l'écoulement. Toutefois, nos résultats sont limités par les données de NDVI qui ne reflètent que l'activité photosynthétique du couvert végétal. Par ailleurs, la longueur de la série des ces données est insuffisante pour tester efficacement l'influence de la dynamique des états de surface sur l'écoulement

Mots clés : Variabilité climatique, écoulement, recharge, NDVI, états de surface, bassin béninois du fleuve Niger

Abstract

This thesis has for principal objective to establish a diagnosis of the hydrological system of the beninese basin of the Niger River, in the context of the rainfall decrease which has severely affected Africa since the 1970s.

To achieve this goal, this study was based on three main types of data :weather (rainfall, temperature, relative humidity, potential evapotranspiration, real evapotranspiration), hydrological (stream flow, recharge) and of land surface conditions (land cover types, NDVI).It considers three key aspects.

The first one, devoted to the study of hydro-climatic variability over the period 1955-1992, shows that the rainfall deficits of the 1970s and 1980s were largely amplified in the stream flows of all the rivers (Mekrou, Alibori, Sota) in the beninese basin of the Niger river.The stream flow deficit amount to five to six times that of the rain (Mekrou, Alibori).The rainfall deficit is particularly amplified in the recharge of Sota in the Couberi sub basin : the recharge deficit between the two sub periods 1955-1972 and 1973-1992 represents nearly five times that of the rain.The study also showed the differential behaviour of the sandstones and the basement complex.Over the latter (Mekrou, Alibori), the stream flow is strongly related to the rain, as demonstrated by the high value of the correlation coefficient ;on the other hand, on the sandstones (Sota at Couberi sub basin), it is related to both the rain and the recharge.

The second part of the study shows the effectiveness of the GR4J and GR2M models to simulate the average stream flows according to the Nash the criterion applied to the stream flows, which gives satisfactory values (higher than 60 % in general).One can thus say that the GR4J and GR2M models provide reasonable simulations of the stream flow at daily and monthly time scales.However, the Nash criterion on the daily average stream flows using the GR4J model are largely improved at a monthly time scale using the GR2M model. In the Mekrou, Alibori and Sota at Couberi sub basins, the models identified a clear downward trend for many components of the hydrological cycle.There is no such trend in the Sota basin at Gbasse though it may partly be related to inadequate statistical tests.

The third part is devoted to the impact study of land surface dynamics on the stream flows. It shows that the land cover types underwent great changes between 1979 and 1992, with a significant regression of the natural vegetation formations (forests and woodlands) and a marked increase of anthropised land cover types (mosaic of crops and fallow) for the same period.he search for NDVI/stream flow correlation, and NDVI residuals/stream flow residuals independently of the rain, also underlines a significant relationship in the Mekrou and Sota at Gbasse sub basins.The results demonstrate a covariation between the photosynthetic activity and the stream flow, independently of the rain in these sub basins. However, in the Alibori and Sota at Couberi sub basins, no significant relationship between the photosynthetic activity for different land cover conditions and the stream flow. Nevertheless, our results are restricted by the NDVI data which reflect only the photosynthetic activity of the vegetation cover. Moreover, the corresponding time-series are too short to test efficiently the influence of land surface conditions dynamics on stream flow.

Key words : *Climatic variability, stream flow, recharge, NDVI, land surface conditions, Niger River basin, Benin*

Introduction générale

La Terre est la seule planète du système solaire à disposer, grâce à sa position privilégiée, d'eau liquide à sa surface. Indispensable pour le développement de la vie, habitat d'une partie de la faune et de la flore, vecteur de matières érodant et modifiant les paysages, élément vital d'alimentation, l'eau devient, avec l'accroissement de la population, une denrée de plus en plus convoitée. L'eau douce, principal objet d'enjeux, ne constitue que 3 % de la ressource mondiale (le reste étant formé par les mers et les océans), dont les trois quarts sont stockés sous forme de glace (PERRIN, 2000). Dans son ouvrage *La Bataille de l'Eau*, Roger CANS (1994) dresse un tableau alarmant de l'avenir de cette ressource. Sa répartition quantitative à l'échelle du globe est très hétérogène et souvent très différente de la répartition des populations. Enjeu de vie, l'eau devient de plus en plus une question politique, source de tensions croissantes entre Etats, notamment au Proche-Orient et en Afrique. La variabilité temporelle de sa disponibilité est également source de problèmes : trop rare, elle entraîne des situations de pénurie, de désertification, d'exode de populations ; trop abondante, elle est la cause d'inondations catastrophiques et rappelle à l'homme l'impossibilité d'en maîtriser totalement les forces. Sa qualité est également très variable, soumise de plus en plus aux déséquilibres des écosystèmes aquatiques liés aux pollutions d'origine humaine. Quant à la qualité de l'eau de distribution, elle est l'enjeu d'une compétition, cette fois économique, que se livrent de grands groupes industriels, pour ce que certains nomment « l'or bleu » (MOUELHI, 2003).

Devant l'accroissement de la demande en eau lié à la croissance démographique et à la multiplication des usages (consommation domestique, industrie, agriculture, loisirs, etc.), les gestionnaires des ressources en eau doivent faire face aux problèmes de pollution, de mauvaise gestion et de pénurie. Dans ce contexte, on comprend alors aisément la nécessité de mettre au point des outils d'aide à la gestion et à la décision qui permettent de mieux cerner le fonctionnement des hydrosystèmes naturels et le devenir de l'eau dans l'environnement. L'utilisateur de ces instruments peut bénéficier d'une meilleure connaissance de la répartition spatio-temporelle des flux d'eau, des matières et composés qu'elle véhicule, par exemple à l'échelle d'un bassin versant. Le cours d'eau constitue, dans cette démarche d'appréhension des hydrosystèmes, un objet d'intérêt privilégié en raison de l'accès aisé qu'il offre à la ressource. La connaissance de son débit est un instrument indispensable à la gestion des systèmes aquatiques (prévision de débits, gestion d'ouvrages de retenue, dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, etc.). De nombreuses recherches se sont donc attachées, depuis plus d'un siècle, à essayer de comprendre les processus de génération des débits et le

fonctionnement du bassin versant (PERRAULT, 1674 ; HALLEY, 1691), entité hydrologique de production et de concentration des écoulements.

Cause première de la variabilité des écoulements, les précipitations représentent aux basses latitudes l'élément du climat qui conditionne le plus les différents systèmes socio-écologiques.

L'absence, la rareté, l'excès ou la mauvaise répartition spatio-temporelle des pluies peuvent être générateurs de crises climatiques et économiques et très souvent aussi, d'instabilité sociale et politique (BOKO, 1988 ; TAPSOBAT, 1997). Sur ce plan, l'Afrique de l'Ouest, où la plupart des pays ont une économie fondée sur le secteur primaire, en particulier sur l'agriculture pluviale, apparaît comme une région particulièrement sensible (IPCC, 2007). La baisse très marquée de la pluviométrie observée dans cette région au cours des décennies 1970 et 1980 a eu des répercussions importantes, aux plans hydrologique et agronomique, mais aussi économique, social, voire politique. Ainsi, la baisse des rendements des cultures vivrières a entraîné, certaines années, des pénuries alimentaires. Dans plusieurs pays d'Afrique, les cultures d'exportation qui étaient rentables avant 1970, ne l'ont bien souvent plus été après. Les cas de l'arachide au Niger et du palmier à huile au Bénin sont exemplaires, même si, là aussi, d'autres éléments de la conjoncture ont joué (IRD, 1999).

L'étude d'éventuels « changements climatiques » avec les manifestations extrêmes que cela pourrait entraîner et de leurs impacts sur le cycle hydrologique constitue un enjeu important pour la communauté scientifique.

Dans le bassin du Niger, au nord du Bénin, comme sur l'ensemble des pays de l'Afrique de l'Ouest, on a constaté une baisse relativement brutale de la pluviométrie qui a entraîné une diminution sensible des productions hydrologiques qui en dépendent.

La définition des moyens à mettre en œuvre pour l'exploitation optimale des ressources en eau suppose de pouvoir en dresser un inventaire. Pendant longtemps, cet inventaire a reposé sur une hypothèse très forte, celle de la stationnarité du climat. Il est maintenant évident que cette hypothèse n'est pas réaliste pour l'Afrique de l'Ouest. L'analyse des chroniques montre des ruptures de stationnarité sur une bonne partie de l'Afrique tropicale au nord de l'équateur en général (NICHOLSON, 1979 et 1986 ; FONTAINE, 1985, 1986 et 1990 ; LEROUX, 1970 et 1988 ; JANICOT, 1989, 1990 ; JANICOT et FONTAINE, 1993 ; MORON, 1994) et au Bénin en particulier (BOKO, 1988 ; PERARD et BOKONONGANTA, 1993 ; BOKO et ADJOVI, 1994 ; HOUNDENOU et HERNANDEZ, 1998 ;

HOUNDENOU, 1999). La rupture la plus récente se situe vers 1970 et marque le début d'une période déficitaire (DESSOUASSI, 1997 ; VISSIN, 1998 ; VISSIN, 2001 ; VISSIN *et al.*, 2003). Après 1970, sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, la pluviométrie a, en moyenne, baissé de 180 mm par rapport à la période antérieure (TAPSOBAT, 1997). L'impact de cette modification sur le régime hydrologique et sur la production agricole a été très important : les écoulements ont connu une baisse de 50 % en moyenne au Sahel (MAHE et OLIVRY, 1995) et près de 40 % dans la zone soudanienne (AFOUDA et ADISSO, 1997 ; PATUREL *et al.*, 1997a et b ; PATUREL *et al.*, 1995), comme en témoignent les niveaux les plus bas des barrages d'Akossombo au Ghana et de Kossou en Côte d'Ivoire dans les années 1980 (COUREL, 1988).

De façon générale, la variabilité des écoulements est amplifiée par rapport à celle des pluies (VISSIN *et al.*, 2003 ; VISSIN *et al.*, 2006). Sur le Bani (affluent du Niger) par exemple, le débit moyen annuel a baissé de 66 % entre 1924 et 1988, pour une diminution du volume pluviométrique annuel de seulement 18 % sur la même période (OLIVRY, 1993). La superficie en eau libre du lac Tchad était d'environ 6 000 km² avant 1972 ; elle n'est plus actuellement que de 1 700 km² (IRD, 1999 et 2001).

Ces exemples illustrent la forte sensibilité des systèmes hydrologiques au forçage pluviométrique, mais laisse aussi supposer que d'autres facteurs des états de surface (couverture végétale, formation géologique, nature des sols, pratiques culturelles, aménagements fluviaux, diverses utilisations humaines) ont pu accentuer le déficit d'écoulement.

A partir de ces constats, il paraît donc nécessaire de pouvoir analyser les fluctuations des précipitations à moyen terme et de les traduire en termes de ressources hydriques disponibles dans le bassin béninois du fleuve Niger. L'un des problèmes posés est de savoir si, à partir des paramètres caractérisant un contexte climatique (pluviométrie, température, humidité, ensoleillement...), on peut évaluer les ressources en eau des premiers horizons du sol, estimer les écoulements et la recharge des aquifères. La redistribution des eaux de pluie étant conditionnée par plusieurs facteurs environnementaux, dont le relief, la végétation et la nature du sol, l'évaluation de l'impact des fluctuations climatiques sur le bilan hydrologique suppose de pouvoir quantifier l'influence de ces différents éléments dans le bassin béninois du fleuve Niger.

Pour mener des recherches approfondies sur les modèles prenant en compte ces différents paramètres du milieu, il est nécessaire de réaliser des analyses régionales pour un diagnostic

précis des différents régimes hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger en Afrique de l'Ouest. C'est l'un des objectifs de cette thèse intitulée : « **Impacts de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger** ».

Par le biais de cette recherche, nous allons tenter d'établir les relations qui existent entre la variabilité climatique, les états de surface et les écoulements (figure 1).

La figure 1 montre que les précipitations et l'évaporation, deux paramètres du climat dans leur variation temporelle, influent sur les états de surface et sur l'écoulement. La pluie conditionne le développement de la végétation, contribue au remaniement des sols et génère des écoulements superficiels et des écoulements souterrains par infiltration. En revanche, l'évaporation se manifeste sur la végétation par pertes via la transpiration (phénomène biologique) et réduit les ressources en eau par des pertes par évaporation de la surface libre des sols et des eaux (phénomène physique).

Avec la croissance démographique, nous assistons à une forte pression anthropique sur les milieux naturels contribuant ainsi à la dégradation des formations végétales naturelles au profit des cultures. Cette modification de la structure du couvert végétal est susceptible d'avoir un impact sur les écoulements de surface.

Enfin, les formations géologiques conditionnent différents types de fonctionnement hydrologique, compte tenu de leur nature.

De toutes ces relations sort un écoulement à l'exutoire qui est enregistré à la station.

Cette étude qui va tenter d'aborder toutes ces préoccupations se fonde sur les hypothèses suivantes :

- les conditions pluvio-évaporales déterminent la variation de l'écoulement ;
- la structure géologique et pédologique du bassin versant atténue ou accentue l'impact des variations pluviométriques sur les variations hydrologiques ;
- la structure spatiale et temporelle de la végétation a un effet sur la variabilité pluvio-hydrologique.

Le principal objectif de cette thèse est de faire une étude diagnostique du fonctionnement des bassins hydrologiques dans le contexte de la péjoration pluviométrique.

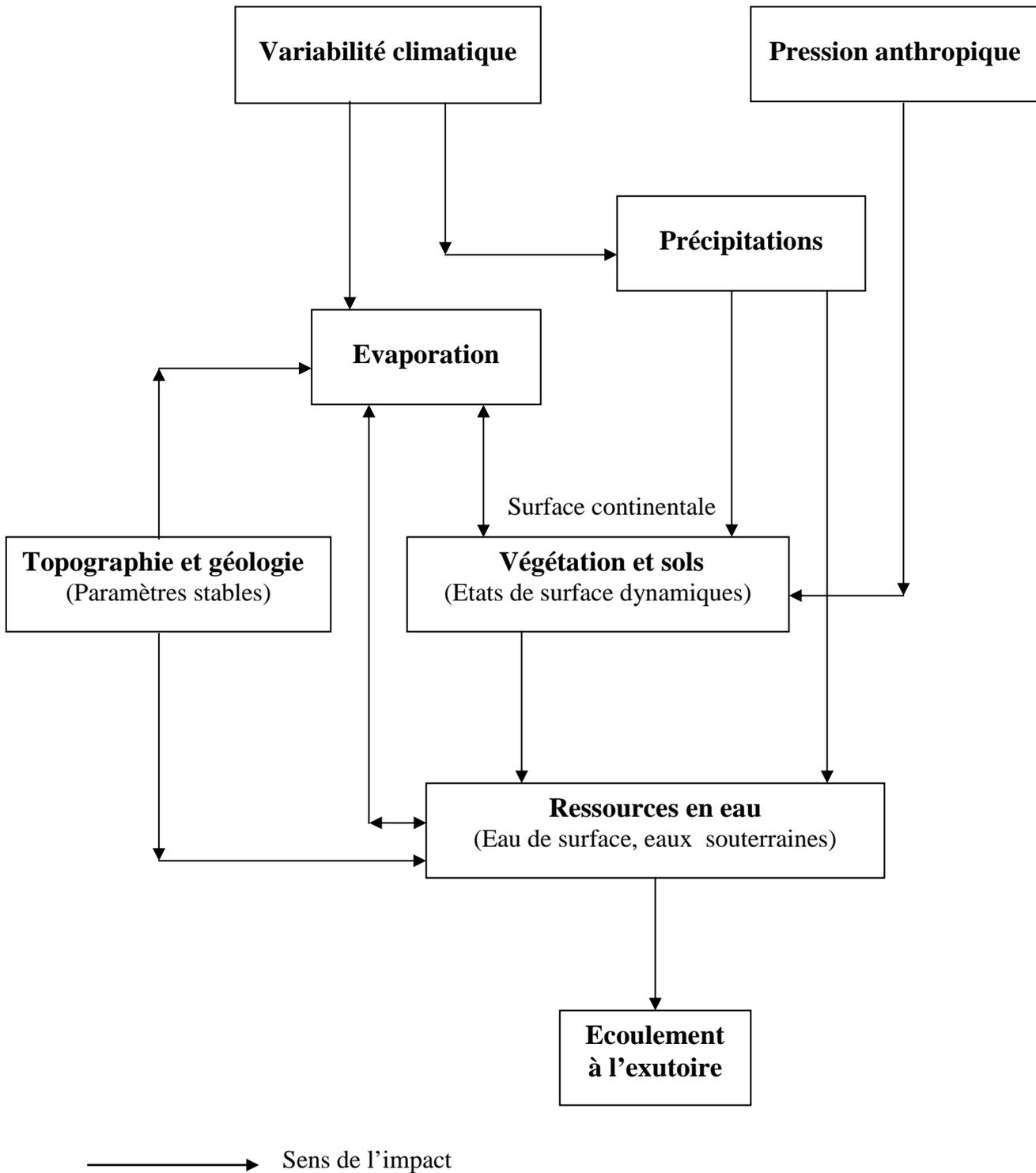


Figure 1 : Cadre conceptuel de l'impact de la variation climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger

Elle vise à :

- Evaluer les termes du bilan hydrologique aux différents pas de temps annuel, mensuel et journalier ;
- Caractériser la variabilité pluviométrique du bassin du Niger au Bénin et analyser l'impact de celle-ci sur les autres termes du bilan hydrologique ;
- Etudier l'impact des formations géologiques sur l'écoulement et la recharge ;
- Evaluer l'efficacité de deux modèles conceptuels et empiriques (GR4J et GR2M) à simuler les écoulements des sous bassins ;
- Rechercher les tendances dans le comportement hydrologique de chaque sous bassin avec les modèles GR4J et GR2M ;
- Etudier l'impact de la dynamique de l'état et de la structure de la couverture végétale sur les écoulements du bassin.

Cette recherche est articulée en cinq chapitres.

Le premier chapitre présente le contexte géographique et hydro-climatologique du bassin béninois du fleuve Niger, domaine d'étude de cette thèse. Il expose également la perception qu'ont les populations des phénomènes hydro-climatiques.

Le deuxième chapitre fait le point des connaissances actuelles sur le sujet et introduit les données climatologiques, hydrologiques, de l'état et de la structure de la couverture végétale utilisées dans la constitution d'une base spatialisée pour cette étude. Il met aussi en évidence les méthodes et les modèles hydro-climatiques choisis pour cette recherche.

Le troisième chapitre est dévolu à la caractérisation de la variabilité hydro-climatique dans le bassin hydrologique du Niger au Bénin sur la période 1955-1992. Cette caractérisation s'appuie sur les connaissances de la variabilité spatiale et temporelle des régimes pluviométriques et hydrologiques, et donc des ressources en eau. Nous analyserons dans ce chapitre les relations entre les signatures caractéristiques des phénomènes climatiques et la variabilité spatio-temporelle des ressources en eau à travers l'étude du bilan hydrologique à différents pas de temps. A cette fin, l'analyse des séries concomitantes, variables hydrologiques d'une part et variables climatologiques de l'autre, permettra de replacer cette variabilité hydrologique dans un contexte général de sécheresse hydrologique. Il s'agit également d'exploiter les séries hydro-climatiques à l'aide de méthodes d'analyses

statistiques robustes, et notamment d'identifier d'éventuelles discontinuités (ruptures de stationnarité). Il sera mis en évidence le fonctionnement différent des formations du socle et des grès.

Le quatrième chapitre a pour objectifs essentiels de mettre en évidence l'aptitude des modèles GR4J et GR2M à simuler les écoulements dans les sous bassins et de rechercher les tendances dans les comportements hydrologiques des bassins versants à partir des mêmes modèles.

Le cinquième chapitre analyse d'abord l'évolution des types d'occupation du sol. Il examine ensuite l'influence des fluctuations pluviométriques sur les états et la structure de la couverture végétale (les états de surface). Il étudie également la tendance des différents termes du bilan hydrologique et du NDVI (indice de végétation). Enfin, à partir de la corrélation partielle, il examine les liens entre écoulement et état de la végétation dans le but de contribuer à évaluer l'impact de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger.

Les résultats de cette recherche devront faciliter la constitution d'outils d'aide à la décision pour une meilleure gestion des ressources en eaux dans le contexte de la mise en œuvre de la GIRE (Gestion Intégrée des Ressources en Eau) au Bénin. Dans ce cadre, le Bénin s'est doté d'un document de politique de l'eau intitulé « la gouvernance de l'eau au service du développement du Bénin » qui préconise la gestion de la ressource en eau dans le souci d'équité, d'efficacité et de transparence, à la fois pour le bien-être de l'humanité et de la régulation des tensions sociales qu'engendre son exploitation (TOMETRY, 2006). Ils permettront également, à l'aide des résultats des modèles, la reconstitution des données hydrométriques récentes très lacunaires.

Chapitre 1 : Cadre géographique du domaine d'étude

Introduction

Ce chapitre présente les différents paramètres du milieu physique et les caractères de l'environnement humain à travers les activités économiques et la place de l'eau dans la vie des populations du bassin béninois du fleuve Niger.

L'espace physique constitue l'élément déterminant sans lequel aucune étude hydrologique n'est véritablement possible. C'est pour cette raison essentielle qu'est abordée la présentation des aspects physiques et de l'environnement climatique et hydrologique.

L'étude du paysage humain met en évidence les pratiques qui ont une influence sur le milieu physique, et plus particulièrement, sur les ressources en eau et sur la perception de l'eau par les populations du bassin béninois du fleuve Niger.

1.1. Présentation du milieu physique

1.1.1. Situation et justification du choix de la zone d'étude

Le bassin béninois du fleuve Niger se situe à l'extrême nord du Bénin (figure 1.1). Il couvre une superficie d'environ 48 000 km², soit 42 % de la superficie totale du Bénin (114 763 km²). Situé entre les latitudes 10° et 12°30' nord et les longitudes 1°32' et 3°50' est, il regroupe les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota, et est orienté en général SSW-NNE.

Le choix de ce domaine d'étude se justifie par le fait qu'aucun des sous bassins n'a, jusque là, bénéficié d'une recherche approfondie sur la dynamique hydro-pluviométrique utilisant des modèles performants.

Un autre critère de choix est que ce bassin à la particularité de drainer deux formations géologiques de natures différentes : le socle imperméable et les grès perméables. Ceci offre la possibilité de comparer les modalités de fonctionnement sur deux types très contrastés de formation, mais tous les deux soumis à une forte dégradation de la pluviométrie depuis les années 1970 et une forte pression anthropique, susceptible de se traduire par des modifications des états de surface.

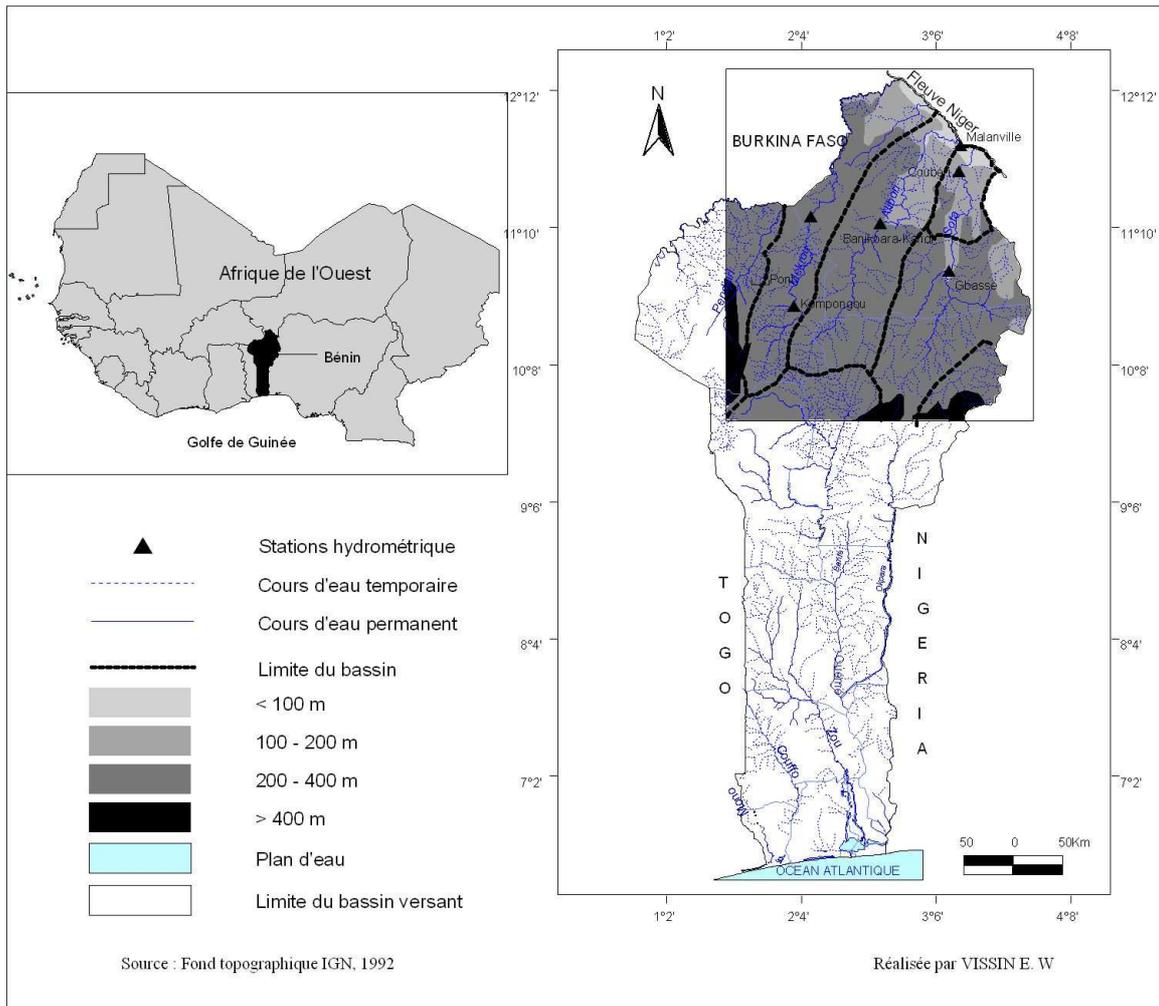


Figure1 : Localisation du bassin béninois du fleuve Niger

1.1.2. Traits topographiques majeurs

Le bassin béninois du fleuve Niger est séparé des bassins de l’Ouémé et du Mono (situés plus au Sud) par une ligne de crête, ou ligne de partage des eaux, d’axe est-ouest au niveau de la latitude 10° nord, due à l’érosion différentielle (ADAM et BOKO, 1993 ; LE BARBE, 1993) (figure 1.2). Il est constitué de deux unités topographiques : la pénéplaine cristalline et le plateau de grès de Kandi.

- *La pénéplaine granito-gneissique*

Située dans la partie sud du bassin et constituée de roches cristallines, elle est caractérisée par un modelé en croupes, modestes. Sa topographie vallonnée et monotone s’incline progressivement du sud vers le nord depuis la ligne de crête où son altitude moyenne atteint 400 m jusqu’au contact du plateau de Kandi. Elle est parsemée au sud d’une multitude de

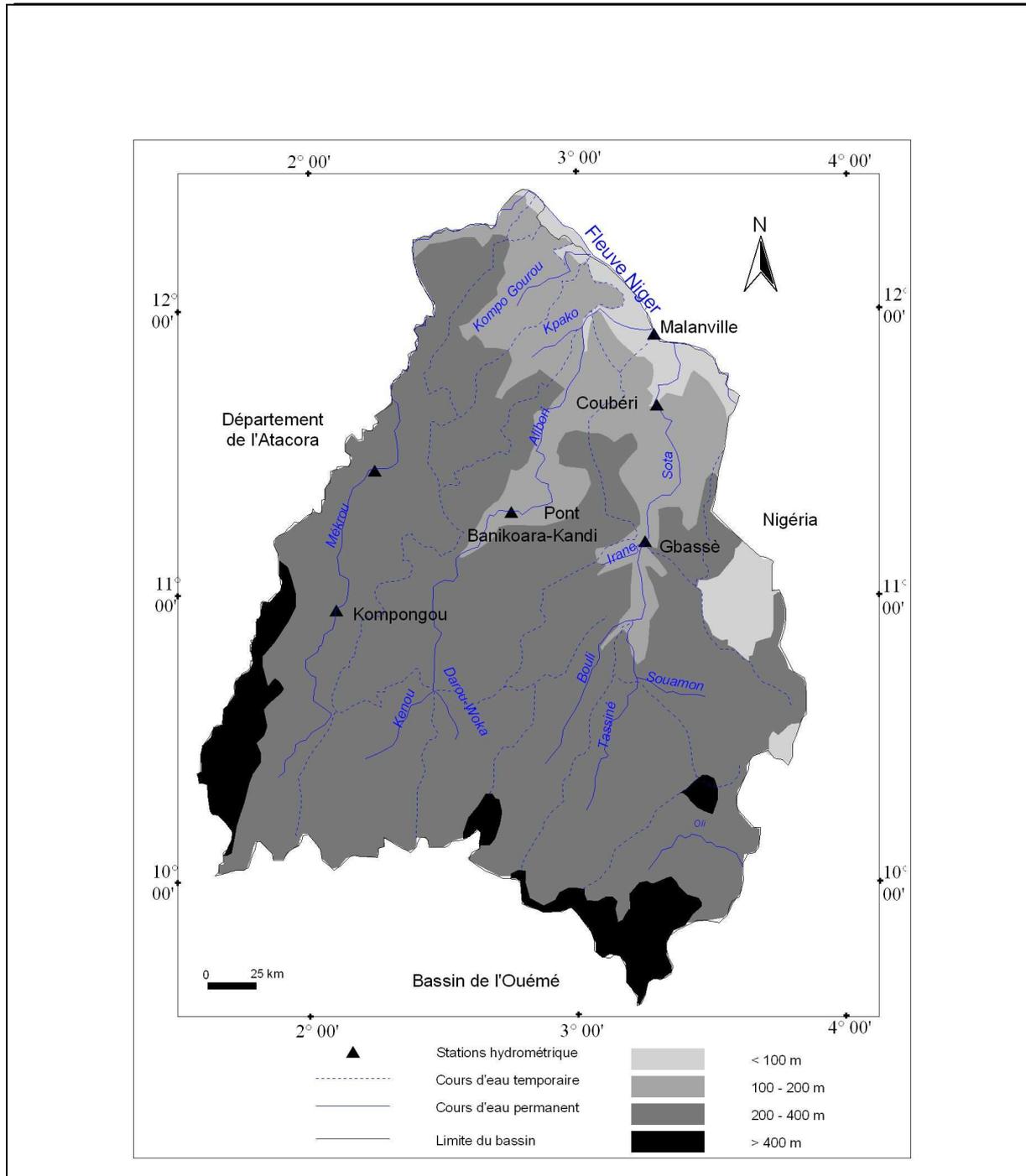


Figure 1.2 : Relief du bassin béninois du fleuve Niger
(Réalisée par VISSIN E. W.)

collines isolées (collines de Bembéréké, de Sinendé, de Nikki et Kalalé). La pénélaine est raccordée à l'ouest au massif de l'Atacora dont les sommets dépassent 600 m et au plateau de Kandi au nord et au nord-est. Ces collines, quoique peu élevées, constituent le trait majeur de la topographie des sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota à Gbassè (LE BARBE *et al.*, 1993).

Malgré leur altitude modeste, elles influencent les flux atmosphériques et elles constituent aussi les lignes de crête où naissent la plupart des rivières (Mékrou, Alibori et Sota) qui drainent la région. Ces reliefs accroissent, en effet, l'échauffement diurne, perturbent les courants, aggravent la turbulence et favorisent l'ascendance des masses d'air. Leur présence explique l'importance accrue des manifestations orageuses dans cette région (AGLI, 1995).

- le plateau de Kandi

Il constitue la partie septentrionale du bassin béninois du fleuve Niger (sous bassin de la Sota à Coubéri). D'une grande platitude, son altitude moyenne est de 250 mètres. Légèrement incliné vers la plaine alluviale du bassin du Niger à laquelle il se raccorde dans l'extrême nord, il est parsemé d'une multitude de petites buttes de cuirasses ferrugineuses à très faible dénivellation (ADAM et BOKO, 1993 ; LE BARBE *et al.*, 1993).

Le plateau de Kandi et la pénéplaine sont parcourus par des vallées plus ou moins encaissées dans lesquelles coulent des rivières (Mékrou, Alibori et Sota) au réseau d'affluents relativement dense. L'écoulement de toutes ces rivières se fait dans le sens sud-nord conforme à l'orientation NNE-SSW des formations géologiques.

1.1.3. Contexte hydrogéologique

Le bassin s'étend sur deux formations géologiques : les formations du socle à l'ouest et au sud et les grès de Kandi au nord-est (LE BARBE *et al.*, 1993 ; ADAM et BOKO, 1993 ; LESSARD, 1964) (figure 1.3).

La majeure partie du bassin de la Mékrou s'étend sur des terrains primaires (gneiss et orthogneiss), ainsi que des formations de micaschistes et de quartzites de l'Atacora. Dans le bassin inférieur de la Mékrou apparaissent des schistes primaires.

Le sous bassin de l'Alibori est essentiellement constitué de terrains primaires gneissiques avec des granites qui affleurent dans le haut bassin. Entre les séries de fractures orientées nord-sud apparaissent aussi des migmatites.

Ces deux sous bassins sur socle cristallin constitué de roches magmatiques et métamorphiques sont imperméables. Dans ces roches, on trouve deux types de nappes. Les premières se situent dans la couche d'altération argilo-sableuse dont l'épaisseur est généralement de l'ordre de 10 à 30 m et qui sont exploitées par des puits à grands diamètres. La perméabilité (k) est très faible, de l'ordre de $k = 8 \cdot 10^{-6}$ m/s. Les secondes nappes sont

localisées au niveau du socle sous-jacent à la couverture d'altération dans les fissures qui constituent un aquifère discontinu, ne contribuant que très faiblement à alimenter les débits d'étiage (LESSARD, 1964).

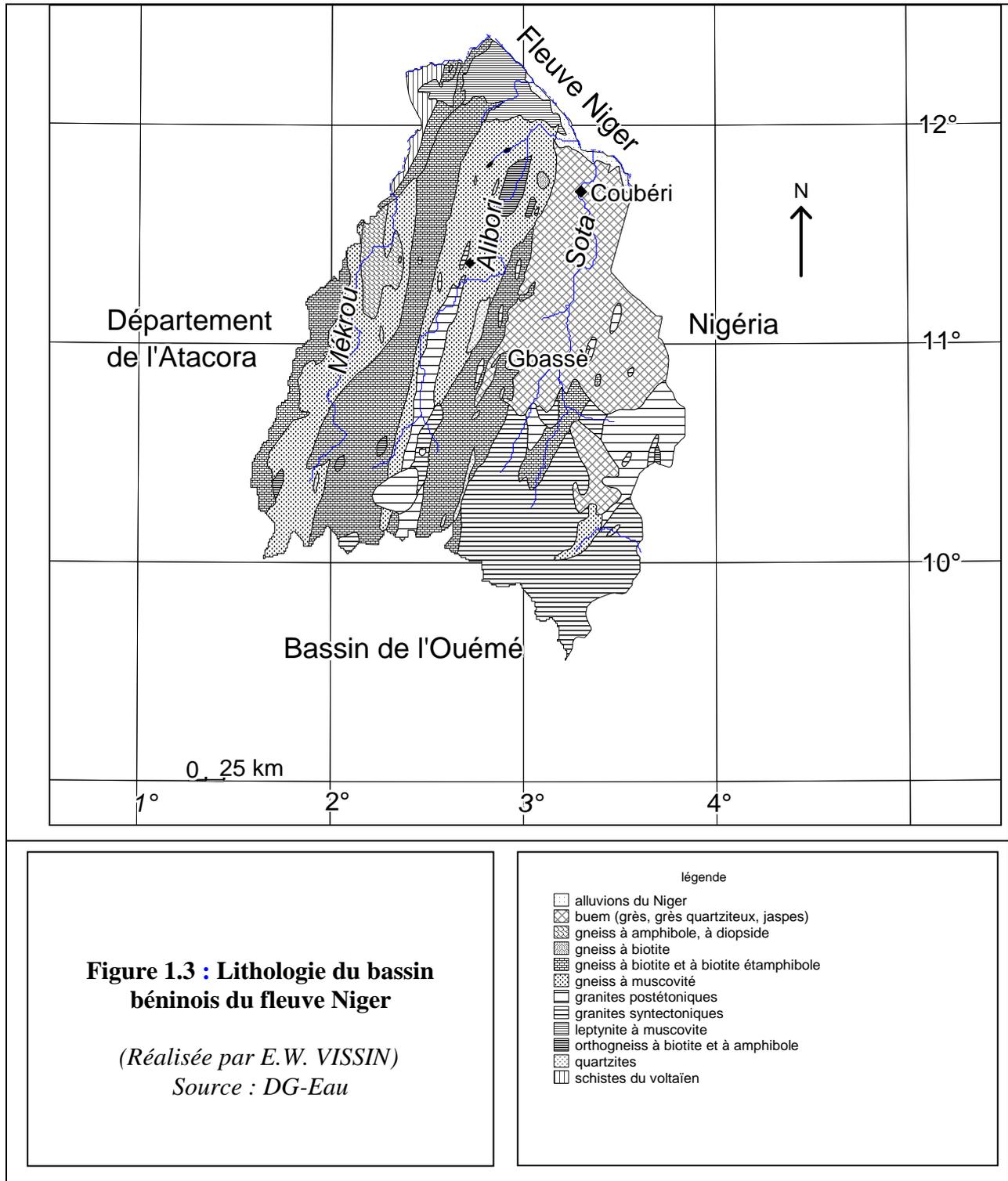
Le bassin supérieur de la Sota, au sud de Gbassè, s'étend sur des formations du socle granito-gneissique précambrien comprenant essentiellement : gneiss, migmatites, micaschistes, diorites et quelques quartzites accompagnés localement de granites. Ce socle s'abaisse graduellement vers le nord-est et est surmonté en discordance par 20 % d'un ensemble gréseux appelé grès de Kandi (LE BARBE *et al.*, 1993 ; VISSIN, 2001).

Les bassins inférieur et moyen de la Sota, au nord de Gbassè sont constitués d'un mélange de conglomérats de diorite, de gneiss et de migmatite (LESSARD, 1964), surmonté d'une variété de grès qui couvre plus de 93 % de la superficie du sous bassin de la Sota à Coubéri. Une coupe géologique sud-nord dans le sous bassin de la Sota (VISSIN, 1998) (figure 1.4), permet de distinguer de bas en haut :

- des grès sableux, fins à moyens, très tendres, légèrement arkosiques (grès feldspathiques résultant de la cimentation d'une roche granitique ou gneissique) vers la base, d'une épaisseur de 40 m environ, visibles à partir du talweg ;

- des grès grossiers et des silts (sédiments meubles très fins, plus ou moins consolidés), blancs ou violacés, comportant à leur base des grès argileux en plaquettes, de 10 m d'épaisseur environ ;

- le continental terminal (conglomérats et brèches, grès, silts).



Ces différents faciès gréseux ont (à cause de la porosité) un degré de perméabilité assez notable et ils possèdent des réservoirs importants. Leur potentiel aquifère est ainsi appréciable.

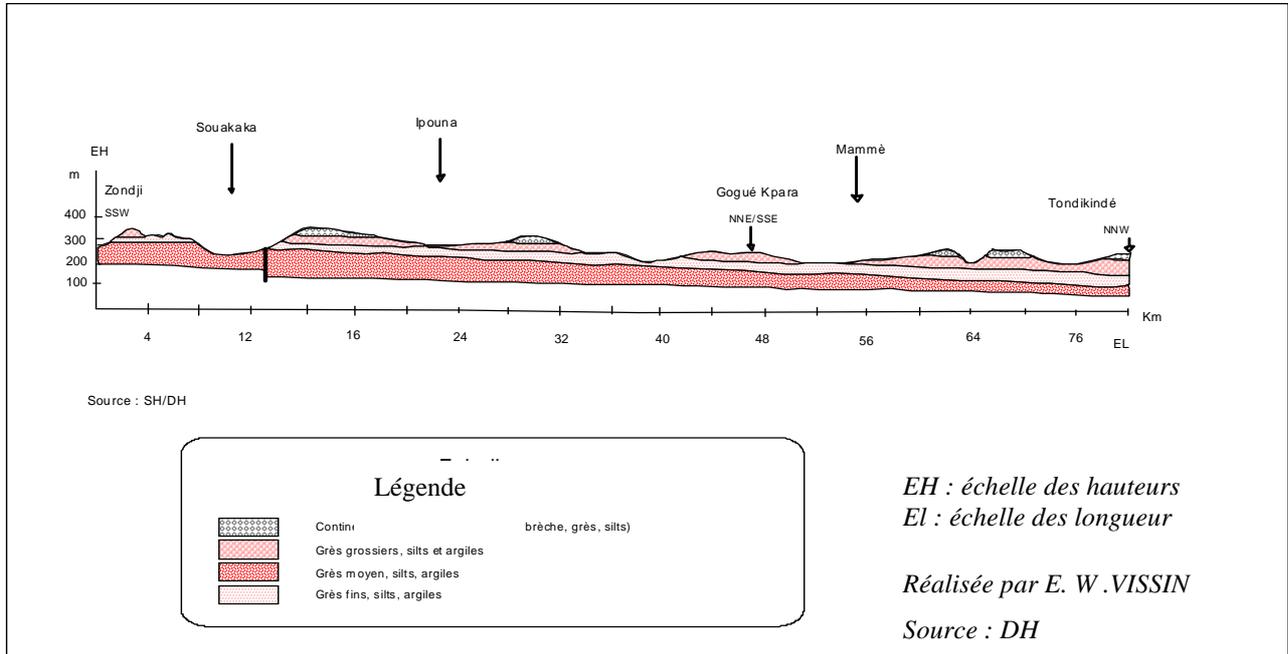


Figure 1.4 : Coupe géologique dans le bassin de la Sota

C'est d'ailleurs dans les bassins gréseux que les étiages sont les plus soutenus : ils sont supérieurs à $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$ à Coubéri, contre $0,63 \text{ m}^3/\text{s}$ à Gbassè (LE BARBE *et al.*, 1993 ; LESSARD, 1964).

Ces formations géologiques expliquent la nature et les propriétés des sols du bassin qui sont d'une extrême fragilité.

1.1.4. Principaux types de sol

D'après LE BARBE *et al.*, 1993, D. DUBROEUCQ (1978), P. FAURE (1977a et b) et M. VIENNOT (1978a et b), les sols des bassins du Nord-Bénin résultent essentiellement de processus de ferrallitisation et de ferruginisation. S'ajoutent trois types de remaniement : le lessivage, l'érosion et l'induration. Trois formations pédologiques importantes se partagent notre espace d'étude (HOUNDENOU, 1999) : les sols faiblement ferrallitiques, les sols hydromorphes (le plus souvent sols à pseudogley) et les sols ferrugineux tropicaux.

- Les sols faiblement ferrallitiques se développent sur les formations gréseuses plus ou moins ferruginisées dans la région de Kandi. Ils ont une teneur en argile de 10 à 40 % et

un bon indice d'érodibilité, de 0.07 en surface, mais qui s'accroît en profondeur (0.1 à 0.2). Avec une perméabilité moins bonne par rapport à celle du Continental terminal, ils ont une réserve hydrique de l'ordre de 60 mm par mètre de profondeur. Ces sols sont peu profonds et cuirassés (sols formés par le processus d'induration des horizons d'accumulation suite à l'alternance de détrempe et de dessiccation). En dépit de leurs conditions physiques médiocres, la plupart de ces sols offrent d'assez bonnes propriétés chimiques, d'où leur intense exploitation pour les cultures (AGLI, 1995).

- Les sols hydromorphes, sols à pseudogley (rencontrés dans les vallées et les bas-fonds), le plus souvent de texture sableuse à sable grossier, sont des sols grumeleux ou grumelo-polyédriques en surface, avec un indice d'instabilité structurale <1 . Cependant, au-delà de 20 cm de profondeur, cet indice est supérieur à 1,5. Ce sont en général des sols profonds (> 1 m) avec une perméabilité moyenne en surface de l'ordre de $13-4 \cdot 10^{-6}$ m/s. En profondeur, cette perméabilité est comprise entre 3 et $6 \cdot 10^{-6}$ m/s. Leur érodibilité est moyenne, avec une valeur comprise entre 0.1 et 0.2. Les sols hydromorphes sont alluviaux et riches, favorables à la culture du riz. Leur évolution dépend de l'eau pluviale et de la remontée de la nappe phréatique (LE BARBE *et al.*, 1993). Selon les sites, la réserve hydrique est de l'ordre de 75 ou 100 mm à un mètre de profondeur.

- Les sols ferrugineux tropicaux, localisés sur le socle, sont caractéristiques d'un régime pluviométrique unimodal. Ils sont marqués par un lessivage intense et une forte altération. Leurs propriétés hydrodynamiques sont moins bonnes que celles des sols ferrallitiques. Ce sont des sols peu profonds, souvent concrétionnés, avec des horizons bien différenciés et une couche humifère peu épaisse. Leur faible épaisseur, sur un substratum magmatique et cristallophyllien, induit l'absence de nappe phréatique. Toutefois, des poches d'eau exploitables se situent sur les zones de broyage le long des fissures et des fractures de la roche-mère (BOKO, 1992). Suivant leur capacité de drainage, on peut les classer en trois catégories :

les sols ferrugineux tropicaux lessivés, biens drainés sur granites leucocrates,

les sols ferrugineux tropicaux lessivés, à engorgement de profondeur,

les sols ferrugineux tropicaux non lessivés.

Ces différents types de sols portent des formations végétales variées.

1.1.5. Types de végétation

Dans l'ensemble du bassin, en relation avec la diminution des précipitations vers le nord, la végétation devient progressivement plus clairsemée du sud vers le nord. Ainsi, dans le sud, la savane arborée comprend, en général, un ensemble assez dense d'arbres pouvant atteindre 10 m, avec une importante strate d'arbustes et un tapis de graminées (de SOUZA, 1988 ; BIO BIGOU, 1989, LE BARBE et al., 1993) qui freinent le ruissellement. La taille et la densité des arbres décroissent en direction du nord. Sur le plateau couvert de cuirasses latéritiques poussent de petites forêts sèches à *Isobertilinia doka* (Kpakpa loko en fon). Les pentes sont dissimulées par une végétation de savanes boisées à *Hymenocardia acida* (Atinvè en fon), *Entata abyssinia* (Wuandonu en fon), *Cochlospermum trinctorium* (*Cochlospermum* à teinture : Atiyi vokanfun en fon) et *Cochlospermum planchani* (Ajinaku vokanfu en fon) (BIO BIGOU, 1989 ; Le BARBE et al., 1993).

Dans la partie nord, on rencontre des forêts à *Diospiros mespiliformis* (Goyavier de singe), *Ficus spp* (Figuiers : Vun Vuitin en fon), *Khaya senegalensis* (Caïlcédrat : Zunzatin en fon) et des formations saxicoles : *Butyrospermum paradoxum* (Karité : Limoutin en fon), *Combretum spp* (Houlin kokwé en fon). Sur les lithosols des quartzites de Badagba ou sur les grès de Kandi se développent des savanes arborées et des savanes arbustives à *Adansonia digitata* (Baobab : Kpasa en fon) et à *Combretum spp* (de SOUZA, 1988 ; Centre National de la Recherche Scientifique du Sénégal, 1973).

Enfin, le long des cours principaux des vallées se trouve une galerie forestière à *Anogeisus léiocarpus* (Bouleau d'Afrique : Hlihon en fon), *Khaya senegalensis* et *Ficus spp*. (LE BARBE et al., 1993 ; GBATCHO, 1992 ; BRUNET-MORET et al., 1986).

La forêt classée de l'Alibori supérieur couvre près de la moitié du bassin supérieur de l'Alibori, tandis que le parc "W" occupe les bassins inférieurs de la Mékrou et de l'Alibori. D'autres forêts classées (de Goungoun, de la Sota, des Trois Rivières) s'étendent sur 30 % de la surface totale du sous bassin de la Sota. Celle dite « des Trois Rivières », dans le bassin supérieur, est la plus dense et la plus grande, avec 2 400 km².

Les forêts subissent la pression humaine et sont particulièrement vulnérables du fait des conditions climatiques.

1.1.6. Caractéristiques climatiques du bassin béninois du fleuve Niger

Le bassin béninois du fleuve Niger au Bénin s'intègre, du point de vue de la dynamique atmosphérique, dans l'ensemble climatique ouest-africain.

La circulation atmosphérique au-dessus de l'Afrique de l'Ouest a déjà été étudiée par plusieurs chercheurs, dont LEROUX (1970, 1983, 1988), JANICOT (1985, 1988, 1990a et b), FONTAINE (1985, 1985, 1990a et b), MORON (1991, 1992, 1993), SULTAN (2002), SULTAN et JANICOT (2004).

Les résultats majeurs de ces travaux montrent, pour cette région, une circulation atmosphérique à grande échelle dominée par les circulations cellulaires de types Hadley et Walker. Celles-ci se manifestent par l'alternance saisonnière sur la région de vents de deux directions opposées : les alizés de secteur NE et la mousson de SW qui confluent le long de l'Equateur Météorologique (EM) formant la Zone de Convergence Inter-tropicale (ZCIT).

La circulation dans les basses couches et dans les couches moyennes et supérieures constitue le trait majeur de cette dynamique atmosphérique. Quels en sont les fondements ?

1.1.6.1. Fondements de la dynamique atmosphérique

Trois principaux centres d'action modulent la circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest et sur notre domaine d'étude : l'anticyclone des Açores, celui de Sainte-Hélène et l'anticyclone égypto-libyen (BOKO, 1988 ; AGLI, 1995 ; HOUNDENOU, 1995 et 1999).

L'anticyclone des Açores : il a une position moyenne voisine au sol de 30°W et de 50°W en altitude (AGLI, 1995). En latitude, il occupe, en surface, une position moyenne de 35°N en janvier et de 40°N en juillet, tandis qu'en altitude (700 hPa) il se situe par 15°N en janvier et 27°N en juillet (DHONNEUR, 1978). Il dirige vers l'ouest de l'Afrique l'alizé maritime (figure 1.5).

L'anticyclone de Sainte-Hélène : plus stable que le précédent, sa position longitudinale moyenne au sol est proche de 10°W et de 25°W en altitude. En latitude, sa position en surface se situe sur 30°S en janvier et sur 28°S en juillet, tandis qu'en altitude (700 hPa), elle se situe par 17°S en janvier et 12°S en juillet. Il commande sur l'Afrique de l'Ouest le flux de mousson.

L'anticyclone égypto-libyen est un centre d'action continental et thermodynamique. Généralement centré sur 15°E, ses variations méridiennes sont limitées aux latitudes 20° et

25°N. En hiver, il est responsable de l'alizé continental sec, l'harmattan dont l'influence se fait sentir au-delà de notre domaine d'étude. En été boréal, l'anticyclone égypto-libyen n'existe qu'en altitude et se trouve remplacé en surface par la dépression saharienne vers laquelle confluent les flux en provenance de l'hémisphère sud.

Ce sont ces centres d'action qui déterminent la configuration isobarique en Afrique de l'Ouest. C'est de leur activité et de leur vigueur que dépendent les fluctuations de la Zone de Convergence Intertropicale (BOKO, 1988 ; AFOUDA, 1990) et des systèmes de circulation.

1.1.6.2. La Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) ou Equateur Météorologique (EM) et ses migrations saisonnières

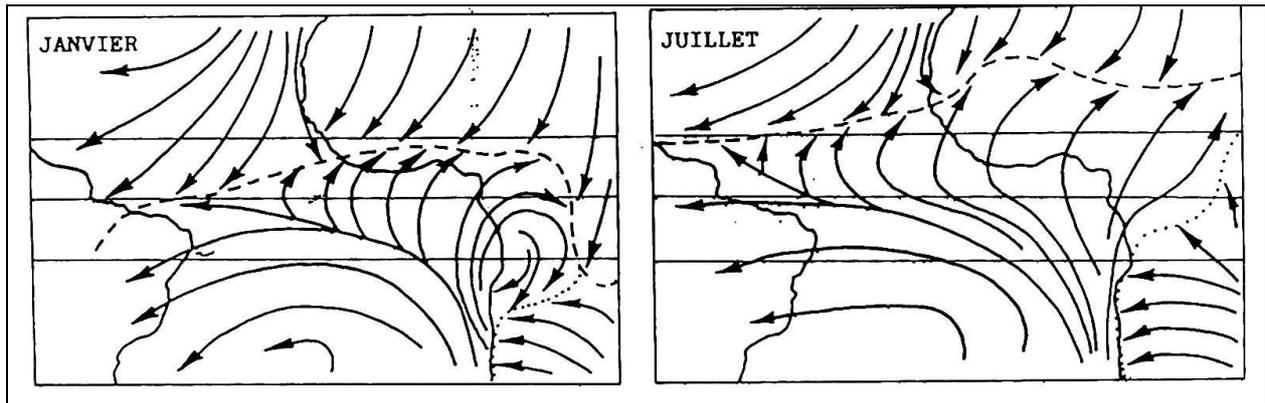
En hiver de l'hémisphère nord, la ZCIT associée à de basses pressions occupe, en surface, une position relativement méridionale sur le Bénin. Toutefois, elle est toujours située dans l'hémisphère nord entre 5° et 7° N. Hormis les régions côtières du Golfe de Guinée, l'ouest africain est alors balayé par l'alizé du nord-est ou harmattan (figure 1.5).

De février à avril, la ZCIT migre lentement et irrégulièrement vers le nord. Cette remontée s'accélère à la fin avril et le flux de mousson du sud-ouest pénètre largement sur le continent.

De mai à juillet, la ZCIT migre vers le Sahel, atteignant les 17 et 18°N ou même parvient au-delà du 20° parallèle certaines années. La circulation de mousson s'affirme, alors que la dépression d'origine thermique se creuse sur le Sahara. La trace au sol de la ZCIT vient s'établir sur ces basses pressions, alors que l'anticyclone de Sainte-Hélène se renforce immédiatement au sud de l'équateur et que celui des Açores migre vers le nord-ouest.

En août, la ZCIT atteint sa position la plus septentrionale vers 19°N en moyenne sur le continent. L'anticyclone des Açores est décalé vers le nord-ouest, tandis que la pression de l'anticyclone de Sainte-Hélène s'accroît. Les basses pressions couvrent le Sahara.

En septembre, la ZCIT amorce son retrait vers le sud, qui est plus rapide que sa migration vers le nord, à cause de la différence thermique entre les masses océaniques et continentales.



Source : M. BOKO (1988) tiré de G. DHONNEUR, 1974).

Trace au sol des discontinuités

-----Equateur Météorologique (EM)

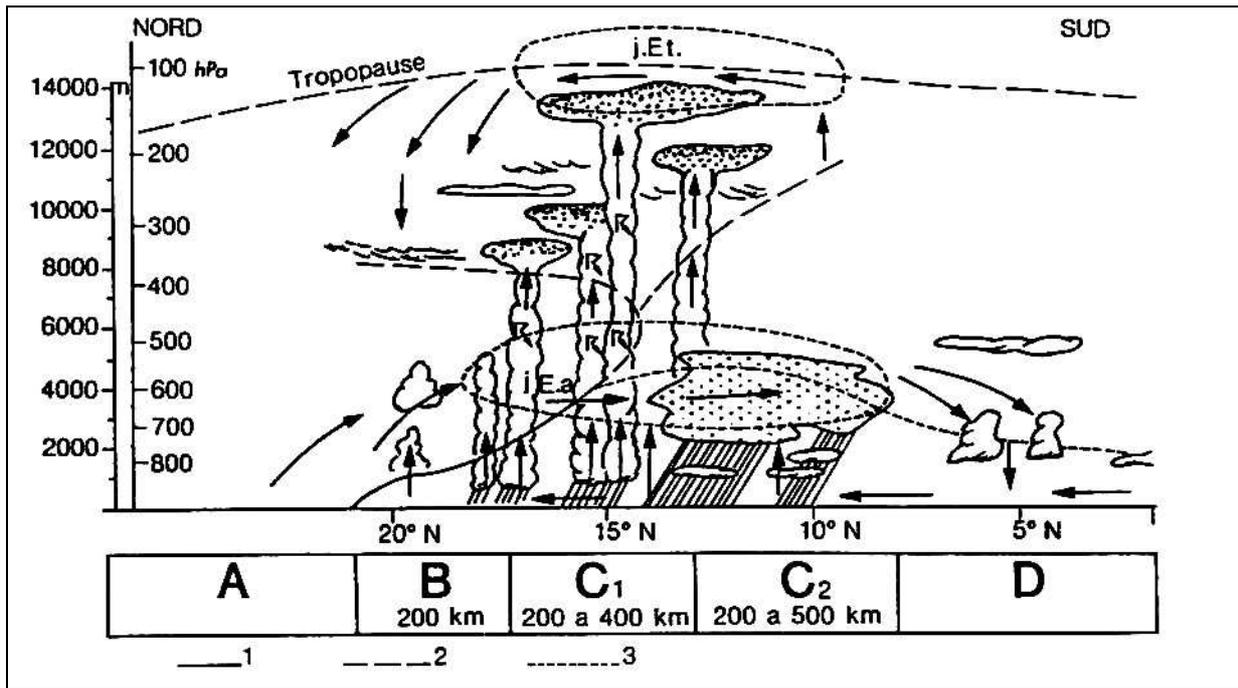
.....Confluence Interocéanique

Figure 1. 5 : Circulation en surface en janvier et juillet

1.1.6.3. Les mécanismes de la pluviogenèse et les perturbations atmosphériques dans le bassin du Niger au Bénin

Dans le bassin béninois du fleuve Niger, le potentiel précipitable disponible dépend en grande partie de l'apport hydrique de la mousson atlantique. La contribution du potentiel de l'océan Indien dans les couches moyennes en mai-juin et octobre est moins importante que celle de l'océan Atlantique en raison de l'appauvrissement du flux en vapeur d'eau lors de la traversée de l'Afrique de l'Est (CADET *et al.*, 1987). Le déplacement de la ZCIT conditionne l'occurrence des précipitations dans le bassin, comme en Afrique de l'Ouest. En effet, la saison des pluies dans notre domaine est liée au passage de la ZCIT (AGLI, 1995 ; HOUNDENOU, 1999). Les précipitations se déversent avec plus ou moins d'importance au sud de la trace au sol de l'Equateur Météorologique (BOKONON-GANTA, 1987). Ainsi, au sud de la trace au sol de la ZCIT, l'ascendance de l'air chaud et humide venu du sud-ouest est le facteur essentiel de la convection. Les processus convectifs majeurs se produisent dans des secteurs privilégiés de la ZCIT. La figure 1.6 présente une coupe méridienne de cette dernière et les quatre zones qui lui correspondent (FONTAINE, 1990). Les précipitations majeures interviennent dans la zone C où la convection génère des nuages à fort développement vertical (cumulonimbus).

Au Sahel, les perturbations prennent la forme le plus souvent de ligne de grains qui sont à l'origine de pluies intenses. Elles naissent en été à la faveur d'ondes d'est (FONTAINE, 1990) et se déplacent comme ces dernières, d'est en ouest.



Source : B. Fontaine (1990)

Figure 1.6 : Coupe schématique nord-sud en août de la troposphère au-dessus de l'Atlantique vers le méridien origine

1. Front intertropical (FIT). 2. Limite inférieure de l'air équatorial d'altitude. 3. Limite supérieure de la mousson, J.E.a., Jet d'Est africain (AEJ). J.E.t., Jet d'Est tropical (TEJ). Les principales zones de temps : A, zone sans pluie ; B, zone avec des orages isolés ; C1, zone où dominent les lignes de grains ; C2, zone où dominent les « pluies de mousson » ; D, zone avec des pluies réduites. Les flèches schématisent les flux et en particulier les mouvements de convection ou de subsidences des masses d'air (d'après Detwiler, 1965 ; Flohn, 1965 ; Leroux, 1970 ; Burpee, 1972 ; Dhonneur, 1974 ; cités par Maley, 1981 et Olivry, 1986).

Les précipitations observées sur notre domaine durant la saison pluvieuse sont de types variés. Étroitement liées à la migration saisonnière de la ZCIT, elles résultent de perturbations atmosphériques d'échelles différentes : pluies de mousson, lignes de grains ou orages isolés.

➤ Les pluies de mousson

Elles surviennent avec la montée de la ZCIT sur la région. Pour avoir séjourné longtemps sur l'océan et en raison des nuages à grand développement vertical qui la composent, la ZCIT donne des pluies abondantes et continues qui sont le fait de nuages cumuliformes fortement convectifs (zone C2 de la mousson, figure 1.6). Ce sont les averses des mois de juin, juillet, août, mois au cours desquels le corps de la ZCIT, dans les couches moyennes, est légèrement plus au nord de la région d'étude (AFOUDA, 1990). Ces pluies de mousson s'individualisent par leur occurrence plus élevée la nuit et le matin, lorsque le fléchissement thermique entraîne une augmentation de la condensation (MORON, 1993).

➤ ***Les lignes de grains***

Elles se présentent comme des alignements nord-sud de cumulonimbus, associés aux ondes d'est tropicales, ondulations affectant le champ de masse et de mouvement d'altitude que Pierre PAGNEY (1994) appelle perturbations de première grandeur. Ces lignes de grains sont à l'origine des averses orageuses qui surviennent surtout en mai-juin, mais aussi en août et septembre dans notre domaine. Elles constituent l'apport le plus important de pluies au nord de 10°30' N où elles représentent au moins 60 % des totaux pluviométriques (OMOTOSHO, 1984). Elles se situent dans la zone C1 de la mousson et sont accompagnées de vents violents avec des rafales de plus de 20 nœuds (AGLI, 1995) (Figure 1.6)

➤ ***Les orages isolés***

Dus à des nuages cumuliformes, ils sont typiques de la zone B de la mousson, là où la faible épaisseur de la couche humide et la subsidence supérieure interdisent des formes plus évoluées (MORON, 1993). Ils sont associés à des vents de moins de 20 nœuds (OMOTOSHO, 1984). Ces orages constituent la particularité de notre domaine : ils y sont l'expression de la convection locale favorisée par le relief, les buttes ou les crêtes interfluves (AGLI, 1995).

Le champ moyen des précipitations est en accord avec la dynamique spatio-temporelle des phénomènes convectifs.

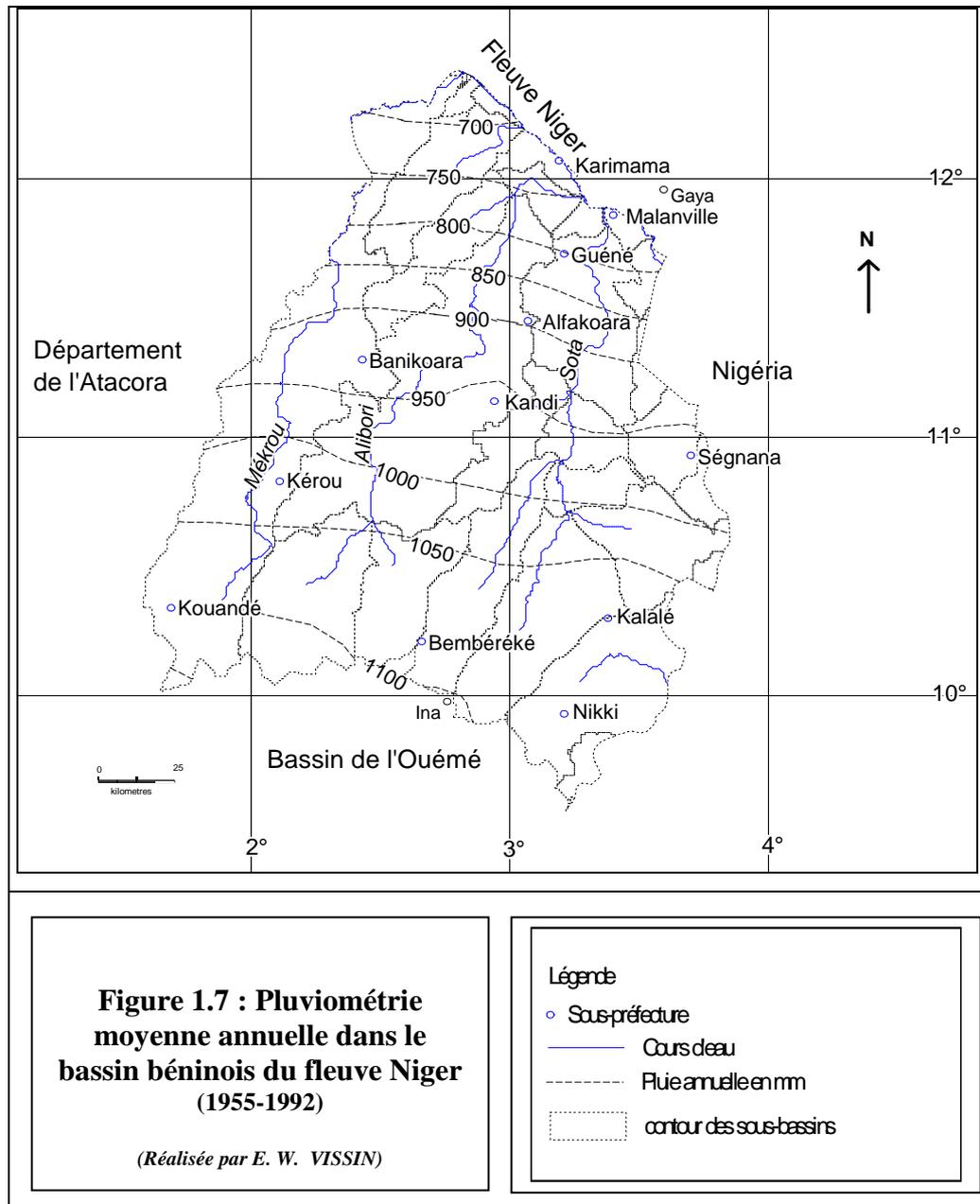
1.1.6.4. Champs pluviométriques moyens annuels

Les champs pluviométriques moyens du Bénin ont déjà été étudiés par plusieurs chercheurs (BOKONON-GANTA, 1987 ; BOKO, 1988 ; AFOUDA, 1990 ; ADAM et BOKO, 1993 ; HOUNDENOU, 1998), sur des séries différentes. Tous ces travaux ont montré que la pluviométrie a connu une baisse sensible au cours des récentes décennies. Dans le bassin béninois du fleuve Niger, les totaux moyens annuels calculés sur la période 1955-1992 sont modestes : ils varient entre 805 et 1 190 mm. Les facteurs déterminants de la variation spatiale de la pluviométrie sont la latitude et l'altitude (orographie) (HOUNDENOU, 1999).

- Champs pluviométriques moyens annuels et latitude

Dans le bassin, AGLI (1995) et VISSIN (2001) ont montré une diminution progressive des hauteurs annuelles de pluies du sud vers le nord du bassin, ce qui est en accord avec les

valeurs moyennes de la pluviométrie annuelle (1955-1992) que nous avons obtenues pour les isohyètes (Figure 1.7).



L'ensemble du bassin enregistre 650 à 1 200 mm de pluie par an en moyenne (VISSIN, 2001) et les apports saisonniers sont caractérisés par un net gradient latitudinal. Ainsi, on enregistre au sud du bassin 1 133 mm, 1 180 mm, 1 143 mm, 1 153 mm et 1 190 mm respectivement à Nikki, Ina, Bembéréké, Kalalé et Kouandé (tableau 1.1). Dans la partie centrale, on obtient 1050 mm à Ségbana, 1 090 mm à Kandi et 978 mm à Banikoara et dans la région septentrionale, les précipitations baissent largement puisqu'on enregistre 907 mm à Alfakoara et 805 mm à Malanville (tableau 1.1). Les plus fortes moyennes pluviométriques du

bassin s'observent dans la région de Kouandé, d'Ina et Bembéréké (dans le sud aux basses latitudes du bassin), tandis que les plus faibles hauteurs de pluie sont relevées à Malanville (dans le Nord au hautes latitudes) (Figure 1.7).

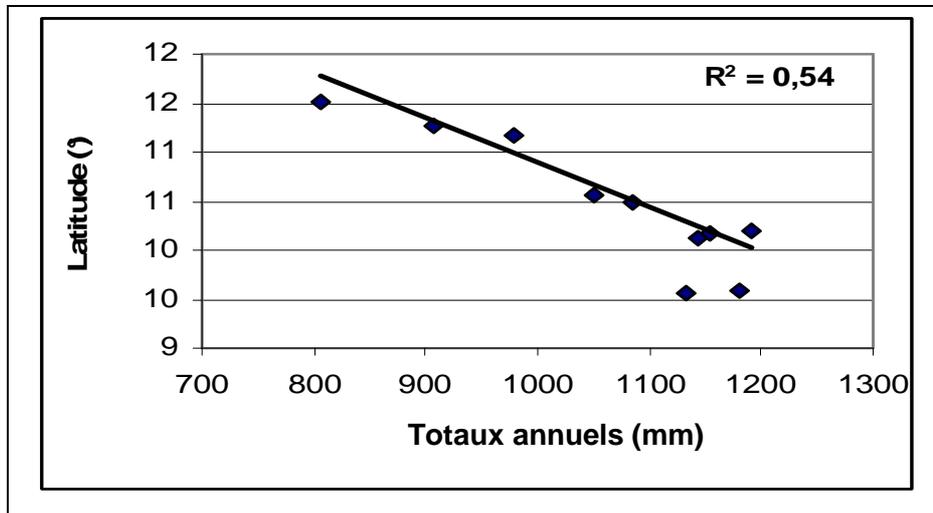


Figure 1.8 : Relation pluie latitude dans le bassin du Niger au Bénin (1955-1992)

Ainsi, la latitude intervient pour 54 % dans la distribution des pluies du bassin (Figure 1.8).

La relation entre la position géographique (pluie/latitude) et la distribution de la pluviométrie montre que le champ pluviométrique est caractérisé par un gradient méridien.

Toutefois, les écarts entre les hauteurs de pluie relevées à Ina (1 180 mm) au Sud et Malanville (805 mm) au Nord ne peuvent être exclusivement justifiés par la latitude ; joue également l'influence de l'orographie.

- Champs pluviométriques moyens annuels et altitude

Dans le bassin du Niger au Bénin, les précipitations sont aussi caractérisées par un gradient vertical. Le tableau 1.1 montre que, de façon générale, les stations situées sur un relief élevé ont les hauteurs de pluie les plus marquées. En effet, le sud du bassin est parsemé de collines et de crêtes interfluves atteignant au maximum 491 m d'altitude alors que le centre n'est qu'un plateau de 250 à 290 m en moyenne d'altitude et l'extrême nord est une plaine alluviale de 160 m d'altitude. Ces crêtes, quoique modestes, exercent une influence certaine sur les totaux pluviométriques et en particulier sur les phénomènes orageux (AGLI, 1995). Ainsi, l'altitude explique 53 % de la variance des totaux pluviométriques annuels (figure 1.9).

Tableau 1.1 : Pluies moyennes annuelles (1955-1992), latitude et altitude des stations

Stations	latitude (°)	altitude (m)	Pluie moyenne 1955-1992
<i>Banikoara</i>	11°18 N	310	978
<i>Bembèrèkè</i>	10°12 N	491	1143
<i>INA</i>	9° 58 N	358	1180
<i>Kalalé</i>	10°18 N	410	1153
<i>Kandi</i>	11°80 N	290	1049
<i>Kouandé</i>	10°20 N	442	1190
<i>Malanville</i>	11°52 N	160	805
<i>Nikki</i>	9°56 N	402	1133
<i>Ségbana</i>	10°56 N	277	1050
<i>Alfakoara</i>	11°27N	342	907
<i>Kérou</i>	10°50N	256	1086

Source s: ASECNA et BODOPLU (IRD)

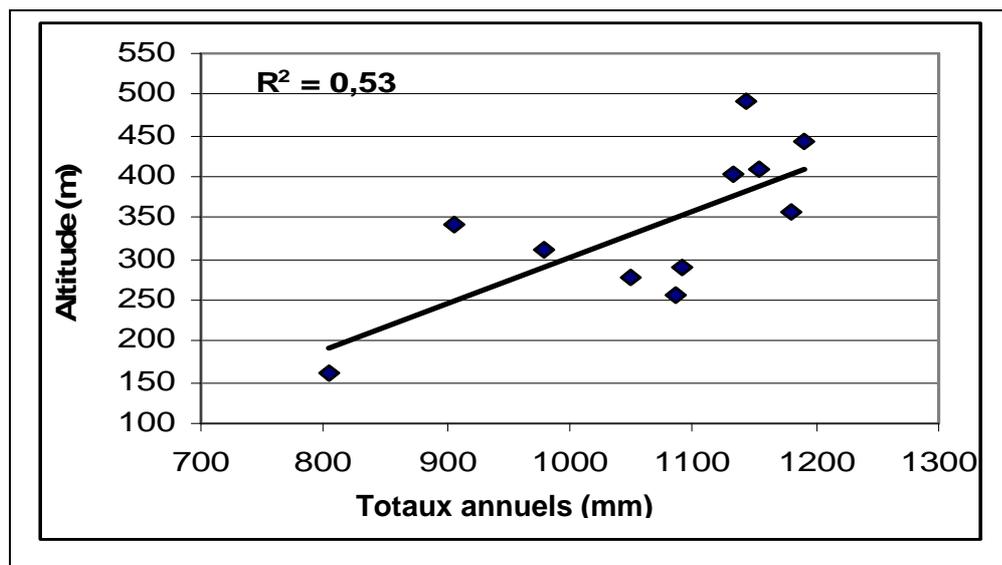


Figure 1.9 : Relation pluie altitude dans la bassin du Niger au Bénin (1955-1992)

Le champ moyen saisonnier des précipitations permettra de mettre en évidence les différentes saisons du bassin.

1.1.6.5. Champs pluviométriques moyens saisonniers

L'Afrique de l'Ouest en général et le bassin béninois du fleuve Niger en particulier enregistrent deux saisons contrastées : une saison sèche et une saison pluvieuse

L'espace géographique du bassin est caractérisé par une concentration des pluies (96 % annuels moyens) sur six mois (mai-octobre) (AFOUDA, 1990 ; HOUNDENOU, 1999), à l'image de la disposition saisonnière des pluies en pays soudano-sahéliens.

- Une unique saison des pluies

La saison des pluies s'étend d'avril-mai à septembre-octobre. Pendant cette période, la lame d'eau recueillie est partout supérieure à 90 % du total annuel : 90 % à Ina, 91 % à Nikki et Kalalé, 92 % à Bembéréké, 95 % à Kandi et Banikoara et 97 % à Malanville et Gaya (VISSIN, 2001). L'application de la classification hiérarchique ascendante sur les données pluviométriques de neuf stations du bassin identifie trois classes correspondant aux différentes zones climatiques du bassin : la première, située au sud entre les isohyètes 1 200 et 1 050mm, correspondant au climat de type soudanien humide, regroupe les stations de Kouandé, Ina, Bembéréké, Nikki et Kalalé ; la deuxième classe, localisée au nord du bassin, s'étend entre les isohyètes 1 050 et 850 mm. Elle identifie le climat de type soudanien sec et est constituée des stations de Kandi et de Banikoara ; enfin, la troisième classe est située à l'extrême nord, entre les isohyètes 850 et 650 mm, et correspond au climat de type soudano-sahélien regroupant les stations de Malanville et de Gaya.

La saison des pluies commence par des bourrasques et des orages dus à la convection locale (BOKO, 1992). Cette période voit en effet alterner l'alizé continental sec et la mousson, et apparaître des vents d'est supérieurs humides (AFOUDA, 1990). En début de saison, la mousson est encore peu épaisse, mais son caractère instable est propice aux orages qui éclatent un peu partout (BOKO, 1992).

Dans notre aire d'étude, ces orages se produisent essentiellement de la fin du printemps à la fin de l'été, mais ils sont particulièrement nombreux et violents près des reliefs, même modestes (PERARD, 1992).

Le mois de mai marque souvent un début aléatoire de l'installation de la saison pluvieuse. Il est cependant capital sur le plan agricole, avec une concentration pluviométrique saisonnière égale à 10 % du total annuel. Les valeurs modales varient entre 200 et 300 mm à Kandi, Bembéréké, Malanville, Nikki (Figure 1.10) et dans les différents sous bassins (Figure 1.11). Nos enquêtes de terrain montrent que les populations estiment qu'à ce moment précis la pluviométrie est généralement suffisante pour démarrer les semis. C'est aussi la période qui marque le début de la saturation des sols pour l'amorce de l'écoulement.

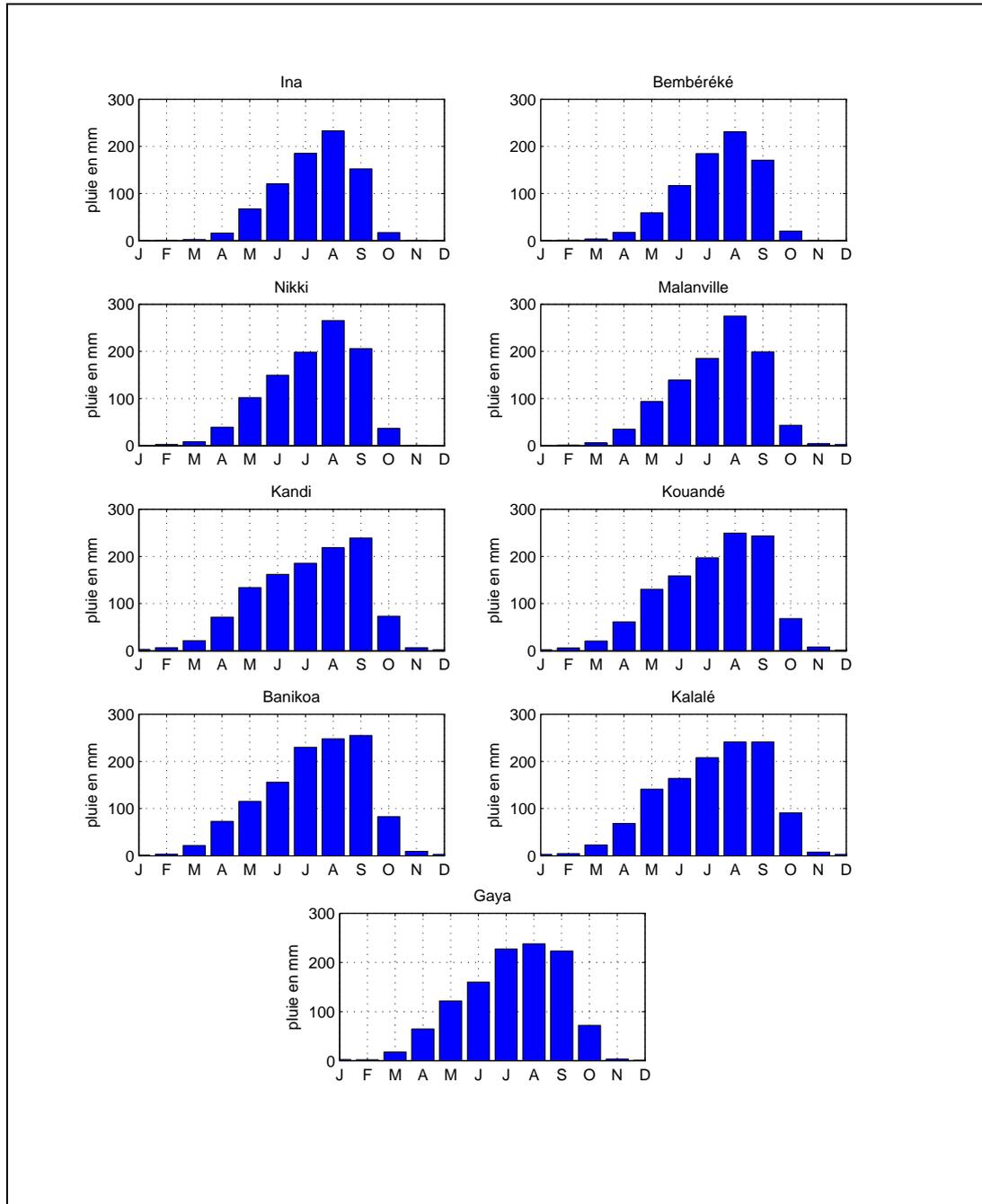


Figure 1.10: Régime pluviométrique des stations du bassin béninois du fleuve Niger (1955-1992)

Cette période de l'année est marquée par un ciel souvent peu nuageux, mais avec des pluies orageuses de courte durée liées à la structure inclinée de la Convergence Inter-Tropicale (CIT) et à la faible épaisseur de la mousson..

En juin, tous les sous bassins enregistrent plus de 12 % de leurs totaux pluviométriques annuels (Mékrou : 13% ; Alibori : 14 % ;Sota à Gbassè : 14 % ; Sota à Coubéri : 15%) et les pluies deviennent continues.

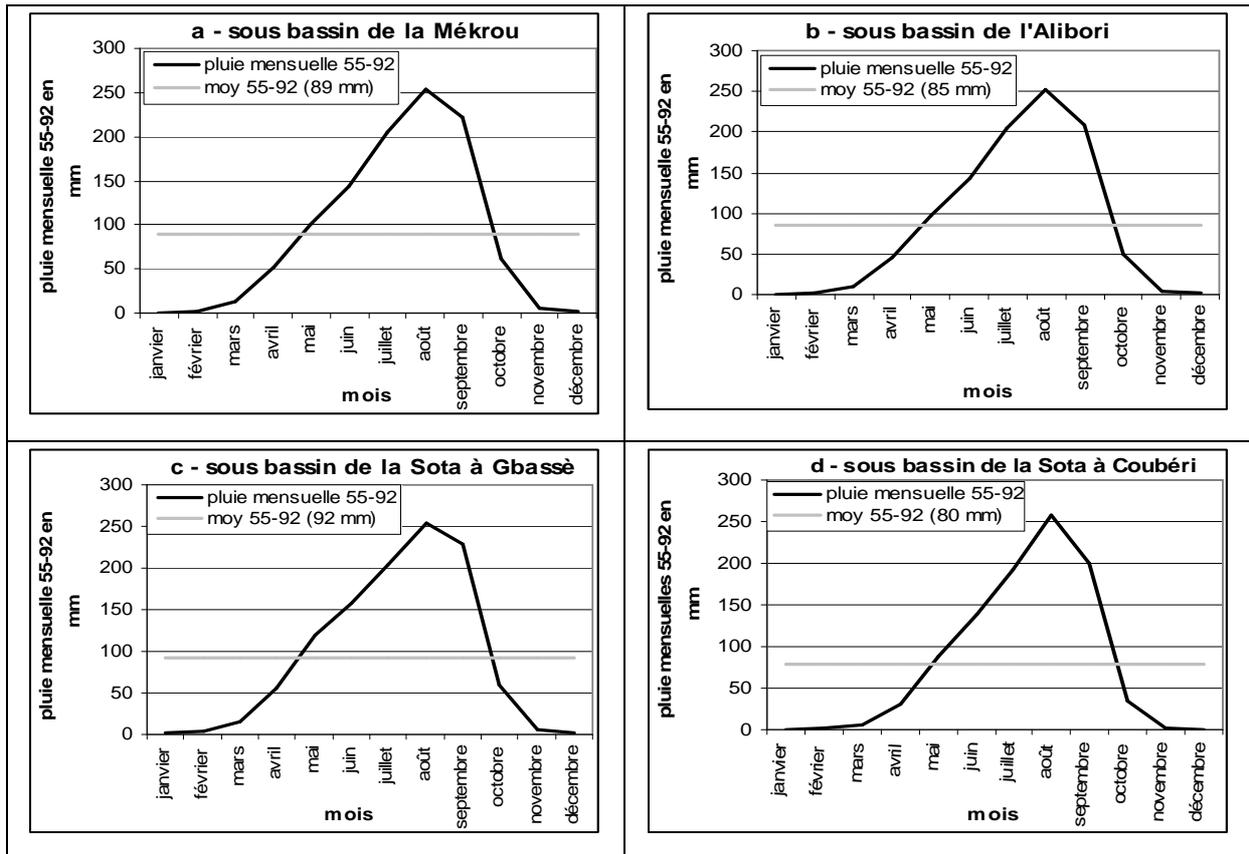


Figure 1.11 : Pluviométrie moyenne mensuelle dans le bassin du Niger au Bénin (1955 - 1992)

Les mois de juillet, août et septembre sont les plus humides de l'année et concentrent plus de 60 % des pluies saisonnières (Mékrou : 64 % ; Alibori : 65 % ; Sota à Gbassé : 62 % ; Sota à Coubéri : 68 %).

Sur l'ensemble du bassin béninois du fleuve Niger, les régimes présentent un caractère unimodal avec un maximum marqué (Figure 1.10). Excepté Bembéréké et Kouandé qui connaissent leur maximum en septembre, toutes les stations et tous les sous bassins enregistrent leur maximum en août comme l'ont d'ailleurs montré AFOUDA (1990), BOKO (1988), HOUNDENOU (1999) et CAMBERLIN (1987), pour la bande soudano-sahélienne de l'Afrique occidentale. Partout dans les stations et dans les sous bassins, les maxima sont supérieurs à 150 mm, mais restent généralement inférieurs à 300 mm. Toutefois, septembre reste partout abondamment pluvieux, avec, en moyenne 20 % de la pluviométrie totale (HOUNDENOU *et al.*, 2005).

Le mois d'octobre reste arrosé pour les stations de Kalalé, Bembéréké, Ina et Nikki situées au sud de 11°N. En revanche, il voit les moyennes s'effondrer dans les stations de Kandi, Banikoara, Malanville et Gaya situées au nord du 11° parallèle nord : 3 % à Kandi, 4 % à Banikoara et 2 % à Malanville et Gaya. Cette diminution brutale des précipitations en octobre-novembre est due au fait que le retrait de la ZCIT est plus rapide que sa migration vers le nord. En effet, à partir de cette période, l'influence du flux d'est ou de nord-est commence à se faire sentir sur la région, bloquant ainsi l'évolution vers le nord de la ZCIT et instaurant, comme au début de la saison humide, un type de temps favorable aux orages (octobre au Bénin s'appelle zosun, c'est-à-dire le mois de Zo, dieu de la foudre !) (AGLI, 1995).

Au total, les pluies de début de saison dans le bassin béninois du fleuve Niger sont dues essentiellement à la thermoconvection locale, tandis que les précipitations du cœur de la saison sont liées à la dynamique des flux de haute et de basse troposphère.

- La saison sèche soudanienne dans le bassin

La saison sèche s'étend d'octobre-novembre à mars-avril. Durant cette période, l'ensemble du domaine d'étude est sous l'influence du flux de nord-est sec, l'harmattan. L'indigence pluviométrique concerne l'ensemble du bassin. La lame d'eau recueillie n'atteint nulle part les 10 % du total annuel. De novembre à mars, les précipitations ne dépassent guère en moyenne 25 mm. Parmi ces mois secs, janvier apparaît le moins arrosé sur toutes les stations.

Avril se révèle un mois de transition sur l'ensemble du bassin : les pluies ne sont pas encore persistantes, puisque nulle part les hauteurs relevées ne dépassent 73 mm. Kandi, station synoptique de référence, n'a jamais connu durant ce mois, plus de huit jours de pluie pendant la période 1955-1992, sauf en 1978 (douze jours) (VISSIN *et al.*, 2003).

L'étude du rythme moyen des autres paramètres climatiques va compléter l'analyse des variations des précipitations ci-dessus présentées.

1.1.6.6. Rythmes moyens des autres paramètres climatiques du bassin

La température, l'insolation et la tension de vapeur sont déterminantes dans l'étude du bilan climatique et du bilan hydrologique. Le bilan hydrologique est le budget comptable des entrées et des pertes par évaporation. L'entrée principale est la pluie, mais les pertes ne peuvent être estimées, sans la température, le vent et l'insolation qui, grâce à leur action combinée, génèrent la circulation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Il est donc

indispensable d'étudier leur rythme moyen dans le bassin béninois du fleuve Niger.

1.1.6.6.1. Rythme saisonnier moyen des températures minimales et maximales

La température moyenne annuelle sur l'ensemble du pays est estimée à 25°C.

Dans le bassin béninois du fleuve Niger, à la station synoptique de Kandi, la température moyenne annuelle pour la période 1955-1992 sur le bassin est de 27°C. Cette moyenne cache d'importantes disparités entre les températures extrêmes dont les maxima atteignent et dépassent 38°C en avril (38,54°C) (figure 1.12) et dont les minima descendent en dessous de 16°C en décembre (15°C) (Figure 1.13).

Les températures les plus élevées s'observent en mars, avril et mai (figure 1.12 et figure 1.13) et les plus basses en décembre et janvier, période pendant laquelle sévit l'harmattan. En général, les températures moyennes maximales sont élevées sur toute l'année et varient entre 28°C et 38°C. En revanche, les minima s'échelonnent entre 15°C et 26°C.

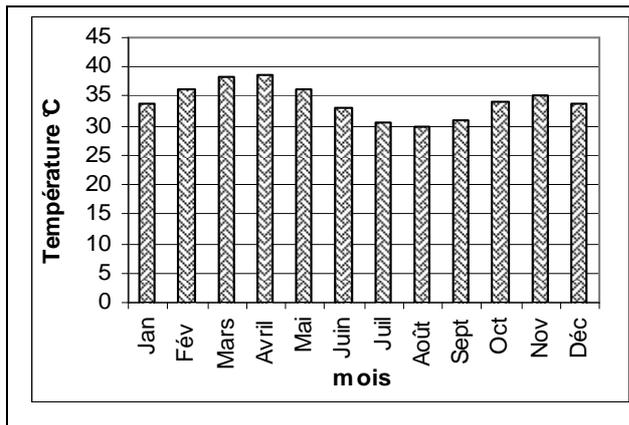


Figure 1.12 : Rythme des températures moyennes maximales dans le bassin (1955-1992)

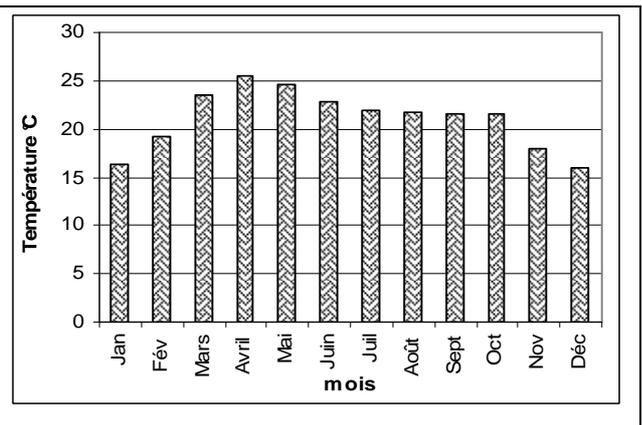


Figure 1.13 : Rythme des températures moyennes minimales dans le bassin (1955-1992)

La montée observée des températures en début d'année correspond à l'augmentation du rayonnement solaire dont l'action va être ensuite contrecarrée par l'arrivée des pluies, d'où la baisse des températures qui débute avec l'hivernage, et le minimum du mois d'août (29,9°C). La fin de la saison des pluies entraîne une augmentation de la température qui va être très rapidement contrariée par la baisse du rayonnement solaire dès novembre.

L'amplitude thermique diurne est maximale durant le mois sec de décembre, d'environ 20°C, et se réduit progressivement avec la progression de la mousson, pour être minimale au mois d'août, d'environ 8°C (LE BARBE *et al.*, 1993).

1.1.6.2. Rythme saisonnier moyen de l'insolation au Bénin

Dans le bassin béninois du fleuve Niger, les valeurs moyennes mensuelles de l'insolation en heures par jour et en pourcentage de la durée théorique du jour sont récapitulées dans le tableau 1.3. Comparées aux autres régions du pays, le bassin béninois du fleuve Niger a les plus fortes durées d'insolation pendant tous les mois de l'année (LE BARBE *et al.*, 1993 ; ADJINACOU et ONIBON, 2004). Il offre à ce titre les meilleures conditions pour l'utilisation de l'énergie solaire (POFAGI et TONOUHEWA, 2001).

Tableau 1.2 : Valeurs moyennes mensuelles de l'insolation (H/J) (1955-1992) à la station de Kandi

MOIS	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne annuelle
Durée moyenne insolation (heures /jour)	9,32	9,64	8,98	9,07	8,97	9,05	7,59	6,54	7,68	8,95	9,58	9,32	8,71
Pourcentage	81	83	75	74	72	73	61	54	65	77	84	82	

Source : ASECNA

L'insolation la plus importante est enregistrée en fin de la saison sèche en février (9,6 h/j). En revanche, la valeur la plus faible est observée en août, au cœur de la saison des pluies (6,54h/j).

La figure 1.14 montre que la radiation solaire a un rythme irrégulier sur une année. Les valeurs les plus faibles de la radiation sont enregistrées en août (6,29 watts/m²) et en septembre (5,27 watts/m²). Les valeurs les plus élevées s'observent d'octobre à février avec un maximum en novembre (9,39 watts/m²).

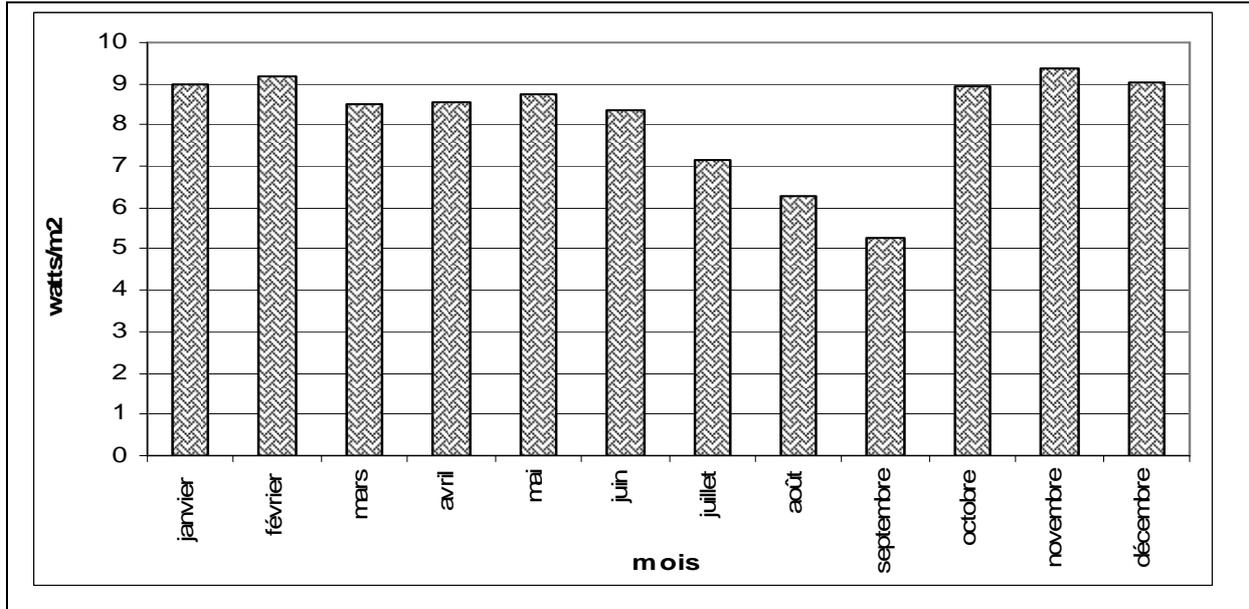


Figure 1.14: Rythme moyen de la radiation solaire en surface à Kandi (1955-1992)

Le rayonnement solaire au sol demeure assez faible pendant la grande saison sèche durant l'harmattan dans le bassin, malgré la siccité de l'alizé continental (tableau 1.3). Ceci est dû aux nombreuses particules solides en suspension que transporte l'alizé du nord-est et à la brièveté du jour. En revanche, vers la fin de la saison sèche, en mars, le bassin reçoit de fortes quantités d'énergie.

Tableau 1.3 : Répartition de l'énergie solaire reçue sur le sol horizontal pour la station de Kandi (d'après BOKO, 1988, extrait du projet FICU) ; (moy = moyenne; Tot = total en watts/m²).

	J	F	M	A	M	J	Jt.	At.	S	O	N	D	Moy par an	Tot/an
Kandi	4 868	5 587	6 081	5 893	5 470	5 524	5 129	4 701	5 548	5 574	5 295	4 592	5 432	65 192

1.1.6.6.3. Rythme saisonnier de la tension de vapeur

Logiquement, le rythme moyen de tension de vapeur est analogue à celui de la pluviométrie. Il est unimodal (Figure 1.15).

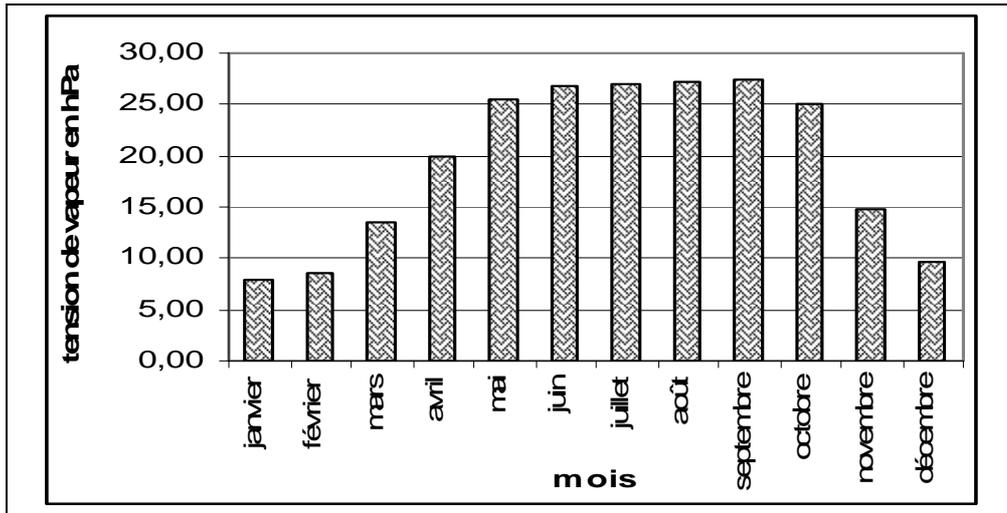


Figure 1.15 : Rythme annuel moyen de la tension de vapeur à la station de Kandi dans le bassin (1955-1992)

Dans le bassin, le minimum de tension de vapeur a lieu en janvier avec une valeur de 5,5 hPa. Sur la période 1955-1992, le maximum de tension de vapeur a lieu en septembre (25,85 hPa). Toutefois, on observe des valeurs élevées plus ou moins constantes de la tension de vapeur de mai à octobre, c'est-à-dire pendant toute la saison des pluies. C'est en cette période que la tension de vapeur d'eau est importante. L'humidité chute en novembre pour atteindre sa valeur la plus faible en janvier.

L'étude de l'évapotranspiration potentielle met en évidence l'évolution de la demande évaporatoire de l'atmosphère dans le temps.

1.1.6.6.4. Rythme saisonnier moyen de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

De nombreux paramètres climatiques interviennent dans l'estimation de l'ETP de Penman utilisée dans ce travail : rayonnement, température, humidité, vent.

La figure 1.16 montre que les mois de juillet, août et septembre enregistrent les ETP décadaires les plus faibles (variant entre 30 et 45 mm). Cette période correspond au cœur de la saison des pluies où la demande évaporatoire est peu importante, d'où la faible perte d'eau par évaporation des surfaces libres (phénomène physique) et par transpiration des végétaux (phénomène biologique). Ainsi, la plus faible valeur de l'ETP au cours de l'année est enregistrée pendant la première décade du mois d'août où la pluviométrie est maximale. En revanche, d'octobre à mai, l'ETP décadaire varie entre 40 et 70 mm dans tout le bassin. Cela correspondant à la période de stress hydrique, la demande évaporatoire de l'atmosphère est très importante d'où les fortes pertes par évapotranspiration observées. Ces pertes

couplées à l'absence de pluie favorisent le tarissement rapide des cours d'eau.

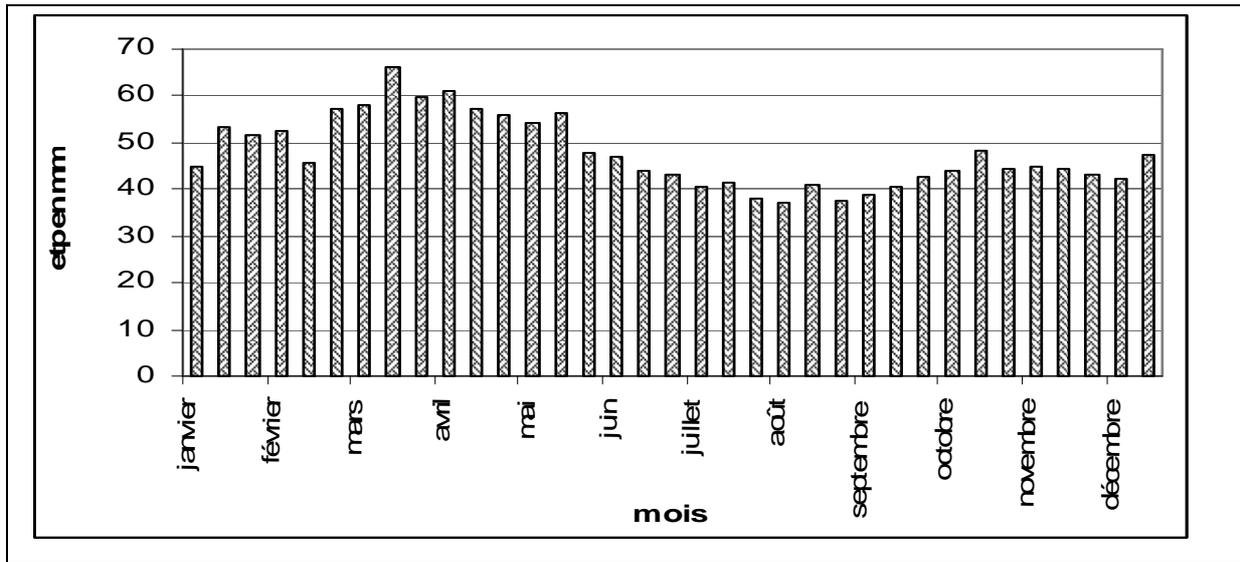


Figure 1.16 : Rythme moyen décadaire de l'évapotranspiration potentielle (ETP) à la station de Kandi (1955-1992)

La demande évaporatoire la plus importante de l'année est enregistrée dans la première décade de mars, en coincidence avec le tarissement total des cours d'eau.

Le rythme hydrologique étant influencé par le climat, les paramètres météorologiques déterminent la réalité du contexte hydrologique.

1.1.7. Contexte hydrologique

1.1.7.1. Réseau hydrographique

Le fleuve Niger constitue la frontière entre le Bénin et le Niger sur 135 km. Son bassin versant couvre, dans cette région, environ 1 000 000 km². Sur ce court parcours, le Niger a un tracé rectiligne orienté NW-SE et reçoit en rive droite trois importants affluents béninois qui sont, d'ouest en est : la Mékrou, l'Alibori et la Sota (Figure 1.17).

- La Mékrou, longue de 500 km, draine une superficie de 10 500 km². Sans affluent important, elle prend sa source à 640 m d'altitude environ sur les flancs nord-est des monts de Birni sur la chaîne de l'Atacora dans la commune de Kouandé (LE BARBE *et al.*, 1993 et BIO BIGOU, 1987). Les méandres et les coudes brusques sont très nombreux et le plus souvent d'origine structurale. Le lit est encombré de nombreux rochers et dans sa traversée de l'Atacora, le cours de la rivière est très perturbé.

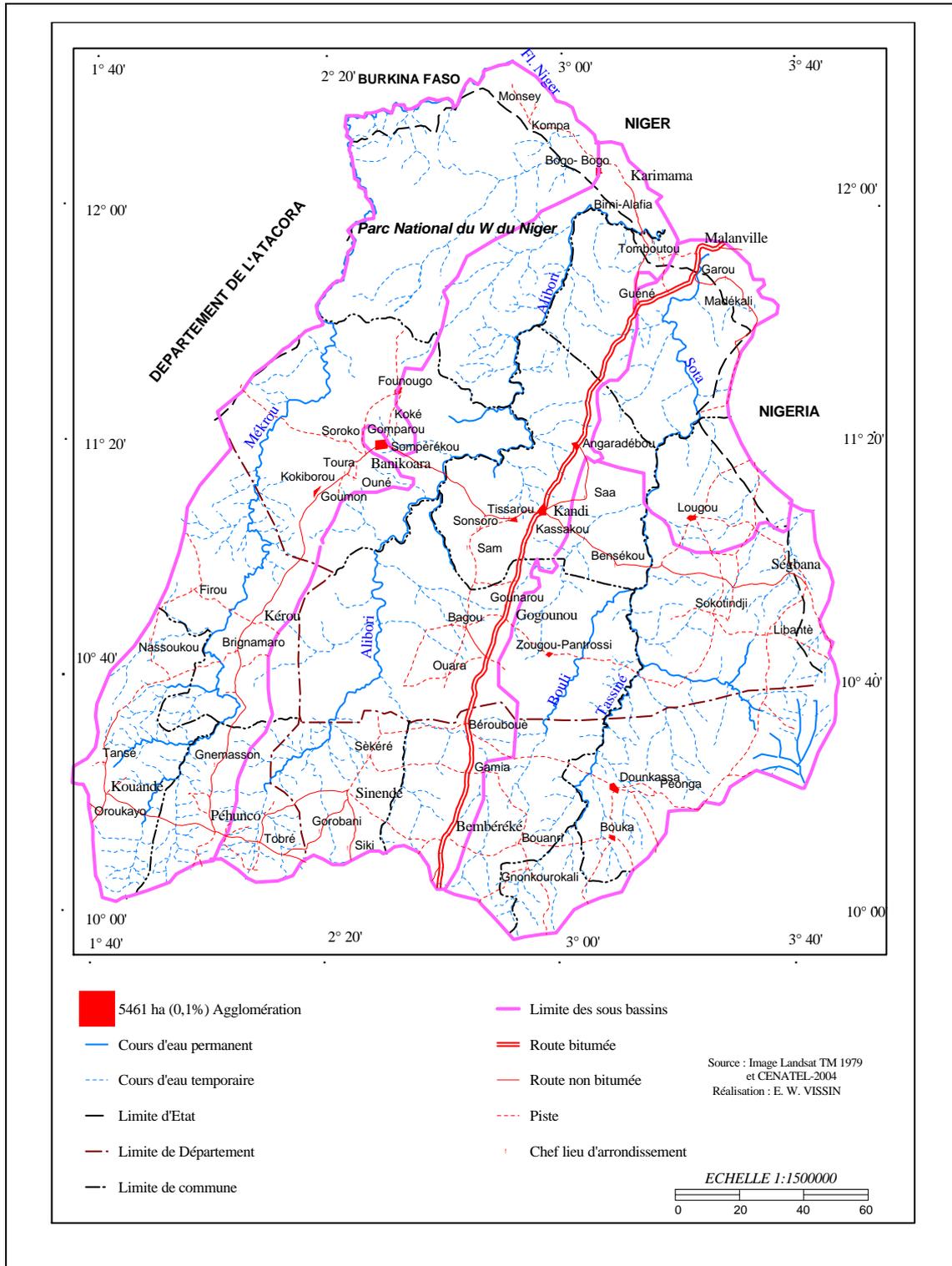


Figure 1.17 : Réseau hydrographique du bassin béninois du fleuve Niger

Les chutes de Koudou, les gorges de Dyodyonga et les rapides de Barou en sont les accidents les plus notables. Ses affluents sont dans l'ensemble peu importants, excepté dans la partie amont d'où proviennent de l'Atacora, le Tikou-Darou (bassin versant de 505 km²), le Yaourou et le Kourou (572 km²) (LE BARBE *et al.*, 1993).

- L'Alibori, d'une longueur de 427 km, a un bassin qui couvre 13 740 km². Elle naît à 410 m d'altitude environ, dans le massif granitique de Kita sur le flanc est de la chaîne de l'Atacora, dans la commune de Péhonco. Dans son cours moyen, le lit de l'Alibori est ainsi coupé de nombreux rapides. Elle suit d'abord une direction SSW-NNE, puis contourne le massif granitique de Sinendé pour décrire alors de nombreux coudes (LE BARBE *et al.*, 1993 et ADJINACOU et ONIBON, 2004). Mais la pente du lit de l'Alibori est dans l'ensemble faible, de 0,5 à 0,2 m/km. Le bassin de l'Alibori est bordé, à l'ouest, par les reliefs correspondant aux roches les plus basiques du groupe de Kandi ; à l'est, par les collines quartzitiques du groupe de Gbadagba dans la région de Bembèrèkè, puis par les reliefs formés sur les roches du groupe de Kandi. L'Alibori reçoit sur sa rive droite le Souédarou, le Sarédarou et le Darou-Woka ; sur sa rive gauche, le Morokou, la Kparé, le Kénou, le Konékoga et le Kpako avant de se jeter dans le Niger en amont de Malanville (LE BARBE *et al.*, 1993, et BIO BIGOU, 1987).

- Longue de 254 Km, la Sota draine une superficie de 13 410 km² et prend sa source à plus de 400 m d'altitude sur les flancs est du plateau gréseux de Kalalé qu'elle va contourner par le nord avant d'emprunter la direction SSW-NNE sur les formations du socle. Quatre-vingt-dix kilomètres après sa source, elle pénètre dans les formations gréseuses du crétacé qu'elle entaille assez profondément et elle rejoint, après 254 km de parcours, le Niger, un kilomètre à l'aval de Malanville. Sur les formations gréseuses, le réseau hydrographique est très peu dense et aucun affluent en provenance du plateau de Kandi n'a d'importance notable. En revanche, sur les granites et sur les formations gneissiques, le réseau hydrographique est beaucoup plus dense (LE BARBE *et al.*, 1993 ; BIO BIGOU, 1987). Elle reçoit successivement le Souamon sur sa rive gauche, le Tassiné (126 km), le Bouli (166 km) et l'Irané (102 km) sur sa rive droite. En aval de Coubéri, la Sota traverse sur quinze kilomètres les alluvions de la vallée du Niger avant de confluer avec ce dernier.

1.1.7.2. Régimes hydrologiques

A l'image des autres cours d'eau du Bénin, hormis le Niger lui-même, tous les cours d'eau étudiés connaissent leur crue en période de pluies et leurs basses eaux en saison sèche. Hormis la Sota qui est le seul des principaux affluents béninois du fleuve Niger à avoir un régime d'écoulement permanent avec un débit d'étiage évalué à 3,6 m³/s (LE BARBE *et al.*, 1993), tous les autres affluents se caractérisent par des régimes d'écoulement saisonniers.

Les observations montrent que les trois cours d'eau connaissent le maximum de débit en septembre (Figure 1.18). Les hautes eaux durent trois mois (août, septembre et octobre) qui, à eux seuls, représentent 80 à 90 % de l'écoulement annuel (LE BARBE *et al.*, 1993). Si l'on ajoute juillet et novembre, on obtient un total de 97 % pour la Mékrou et l'Alibori. La Sota a un régime un peu plus régulier qui se caractérise par un écoulement pérenne, mais les hautes eaux de septembre sont tout aussi manifestes. Les plus fortes crues observées aux quatre stations hydrométriques de référence sont comprises entre 250 m³/s et 400 m³/s.

La décrue est amorcée en octobre de façon brutale dans tous les sous bassins, pour atteindre son niveau critique en janvier sur la Mékrou et l'Alibori qui tarissent régulièrement tous les ans de janvier à mai-juin. L'étiage de la Sota survient en avril ou mai avec un débit généralement compris entre 3 et 6 m³/s (LE BARBE *et al.*, 1993).

La station hydrométrique de Malanville donne les caractéristiques du régime du fleuve Niger sur 130 km de son cours au Bénin. On peut distinguer nettement deux hautes eaux (Figure 1.18) : celle des affluents locaux, du Burkina Faso et du Niger, qui culmine en septembre-octobre et les hautes eaux maliennes (résultat de la prolongation des écoulements en provenance de la Guinée et du Mali) qui atteignent leur maximum en pleine saison sèche au Bénin, généralement entre décembre et février (LE BARBE *et al.*, 1993). L'importance relative des deux hautes eaux varie d'une année à l'autre. Après le maximum des hautes eaux maliennes, on observe chaque année à Malanville, de mars à juin, une diminution progressive du débit. L'étiage absolu du Niger à Malanville se produit une année sur deux dans la première quinzaine de juillet (Développement du Bassin de Niger, 1985). L'étiage absolu médian est de 130 m³/s. Ce cours d'eau n'étant pas l'objet de ce travail, nous ne l'aborderons plus dans la suite de cette recherche.

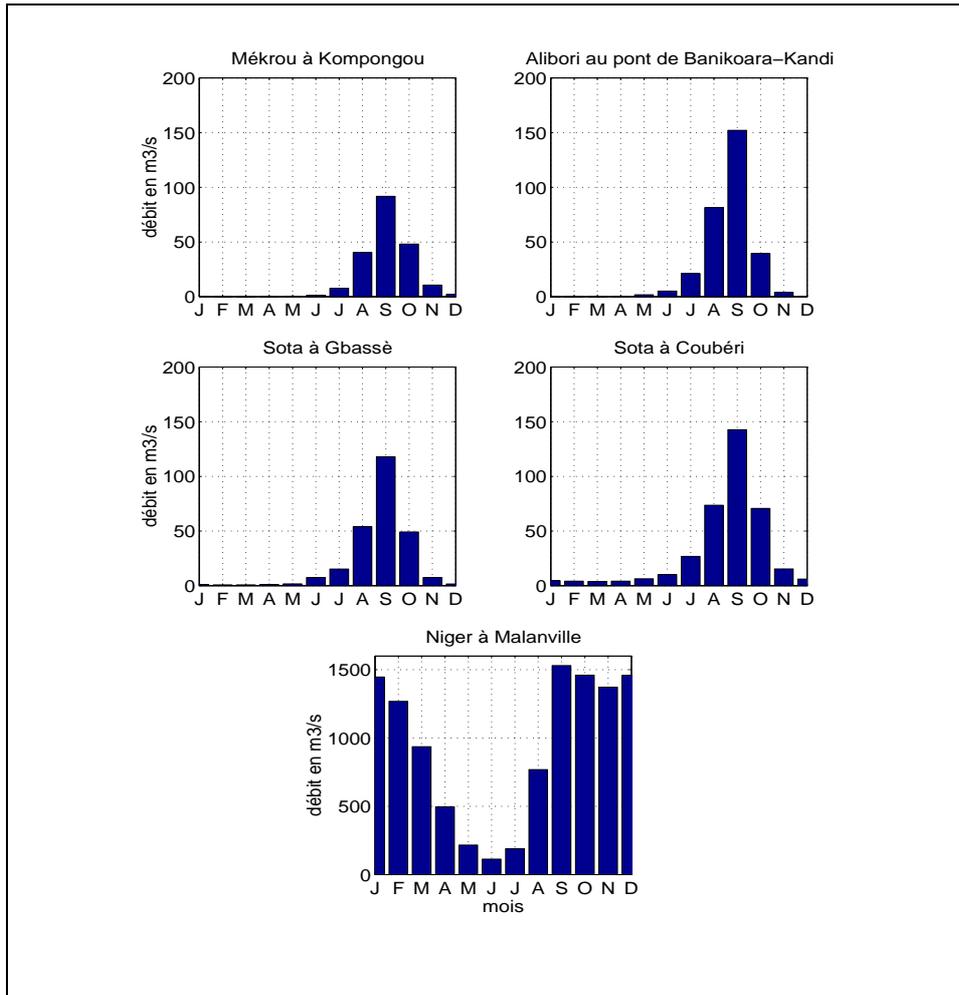


Figure 1.18 : Régime hydrologique moyen des affluents béninois du fleuve Niger (1955-1992)

L'étude de la caractérisation de la variabilité hydro-pluviométrique dans le temps et l'espace qui sera l'objet du chapitre 3, nécessite la clarification des normes hydrologiques.

1.1.7.3. Normes hydrologiques

Le diagnostic de l'évolution récente des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale montre que sur la période de référence de 1950 à 1990, les précipitations ont baissé en moyenne 15 à 20 % et les écoulements de plus de 50 % (OUEDRAOGO, 2001).

Ces déficits pluviométriques et hydrologiques observés sur une longue période soulèvent le problème de la période de référence à considérer pour l'estimation des caractéristiques hydrologiques employées par les aménageurs dans le cadre des projets.

– *Notion de norme*

On utilise généralement « la moyenne des valeurs observées », parfois remplacée ou complétée par la médiane ou le mode pour tenir compte de l'irrégularité interannuelle.

Toutefois, MOREL (1986) distingue la norme hydrologique qui est la moyenne de la série la plus longue possible pour pouvoir valider les occurrences cinquantennales ou centennales, de la norme météorologique qui désigne une moyenne sur trente ans.

– *Pour une révision des normes hydrologiques*

De nombreuses publications des caractéristiques de crue, d'étiage ou de module des cours d'eau ont été réalisées en prenant comme postulat la stabilité du climat.

De son côté, l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale) recommande une période de trente années de mesures d'une station hydrologique. Pouyaud (1986b) remarque que, compte tenu de la persistance interannuelle des phénomènes de sécheresse, cette recommandation semble insuffisante pour caractériser le régime hydrologique, en particulier pour Afrique soudano-sahélienne.

Ozer et Erpicum (1995) estiment que l'adoption d'une période de trente ans pour la cartographie des courbes isohyètes n'est plus adaptée et que le choix de cette durée de référence génère des problèmes de représentativité. Pour illustrer leurs propos, les auteurs prennent comme exemple la période trentenaire 1961-1990. Selon ces auteurs, la période très humide du début des années 1960, de même que les fortes sécheresses qui ont affecté le Sahel (Mali) pendant les périodes 1968-1973 et 1981-1987 influencent de manière notable les moyennes calculées sur les périodes 1961-1990, masquant ainsi le caractère non-stationnaire de la pluviométrie. Pour une meilleure représentation des conditions climatiques qui ont prévalu depuis 1950, ils recommandent 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 (rupture) de la pluviométrie, et l'autre à la phase sèche qui suit, afin de travailler sur une séquence homogène.

TODOROV (1985), qui a constaté d'importantes modifications pour d'autres caractéristiques des régimes pluviométriques (dates de début et de fin de la saison des pluies, durée de la (ou des) saison (s) 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, seize années

sèches consécutives constituent une période suffisamment longue pour affecter la végétation et les pratiques agricoles. Ainsi, il recommande l'établissement de nouvelles valeurs de moyennes ou normales pluviométriques incluant toutes les années récentes.

Tenant compte de cette non-stationnarité des pluies, 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, l'une avant et l'autre après 1970.

HUBERT *et al.*, (1989), après avoir mis en évidence des ruptures de stationnarité situées avec un 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 à partir de 1970. Ces auteurs affirment qu'il y a danger à utiliser les moyennes pluviométriques 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 année pourrait conduire à d'importantes conséquences en matière de planification. Ils citent l'exemple d'un projet d'irrigation à partir du lac Tchad qui n'a jamais atteint les prévisions du fait des valeurs utilisées lors de la conception du projet. Le pompage a ainsi été réduit fortement pour les cultures.

De cette analyse sur les normes hydrologiques, nous retenons qu'il est important de travailler sur une série normale regroupant les séquences humide et sèche (hétérogène), mais aussi de réaliser l'étude sur les séries homogènes (séquences humide et sèche) pour une analyse comparative. C'est ce que nous allons appliquer dans la suite de ce travail.

Le milieu physique dont les caractéristiques ont ainsi été brièvement présentées met en évidence les ressources naturelles du bassin exploitées par une diversité de populations. Compte tenu de leur mode de vie, de leur culture et de leur forme d'organisation, les groupes socioculturels du bassin béninois du fleuve Niger pratique diverses activités : agriculture, pêche, élevage. Toutefois, l'agriculture reste l'activité principale du bassin.

1.2. Description du milieu humain et économique

Depuis l'avènement de la décentralisation, soutenue par la réforme de l'administration territoriale, le bassin béninois du fleuve Niger s'étend sur trois départements qui sont l'Alibori (six communes : Banikoara, Gogounou, Kandi, Karimama, Malanville, Segbana),

l'Atacora (trois communes : Kérou, Péhounco et Kouandé) et le Borgou (quatre communes : Bembèrèké, Kalalé, Nikki et Sinendé) soit, treize communes (Tableau 1.4).

Différents groupes socio-culturels habitent ces communes et y pratiquent des activités très diverses.

Tableau 1.4 : Superficies des communes du bassin béninois du fleuve Niger

N°	Département	Communes	Superficie (km ²)	Arrondissement	Quartiers et villages
1	ALIBORI	Banikoara	4383	10	64
		Gogounou	4910	06	38
		Kandi	3421	10	48
		Karimama	6102	05	18
		Malanville	3016	05	32
		Ségbana	4471	05	30
Total Alibori			26303 (54,79 %)	41	230
2	ATACORA	Kérou	3745	04	28
		Péhounco	1900	03	27
		Kouandé	3605	04	29
Total Atacora			9250 (19,27 %)	07	55
3	BORGOU	Bembèrèkè	3348	05	40
		Kalalé	3586	06	44
		Nikki	3171	07	51
		Sinendé	2289	04	34
Total Borgou			12394 (25,84%)	22	169
TOTAL			48 000 (100%)	70	454

Source : INSAE : RGPH 3 (2002).

1.2.1. Population

En incluant l'ensemble des trois départements, donc sur un espace débordant légèrement du cadre strict des trois bassins, la population du bassin béninois du fleuve Niger est de 1 075 846 habitants (RGPH 3) (INSAE, 2002) sur 6 769 914 habitants pour le Bénin soit 15,89 % de l'ensemble. Cette population est essentiellement rurale. En effet, 70,64 % des individus vivent en milieu rural contre 29,36 % en milieu urbain.

La commune de Banikoara est celle qui présente la plus forte densité du bassin (34,7 hbts/km²) et qui pèse également le plus du point de vue démographique (15,26 % de la population du bassin). Cette zone à l'image de l'ensemble du Nord du Bénin (les quatre départements du nord et celui des Collines) présente néanmoins une densité faible avoisinant 22,44 hbts/km² contrairement aux communes du sud Bénin qui ont une densité supérieure à 100 hbts/km² avec un pic pour le département du Littoral (8 419 hbts/km²). La densité de

population du bassin béninois du fleuve Niger est passée de 15,98 hbts/km² en 1992 à 22,41 hbts/km² en 2002, soit un indice de croissance démographique de 1,52 (INSAE, 2002).

Le taux annuel d'accroissement inter-censitaire du bassin est de 4,36 %. Il est l'un des plus élevés du Bénin avec les départements des Collines (4,65 %) et de l'Atlantique (4,23 %) (INSAE, 2002).

La population du bassin béninois du fleuve Niger est essentiellement jeune ; 51,9 % ont moins de 15 ans et 43,6 % sont situés dans la fourchette de 15 à 59 ans.

1.2.2. Les groupes socioculturels du bassin béninois du fleuve Niger

Le bassin béninois du fleuve Niger est occupé par plusieurs groupes ethniques (AGLI, 1995). Ce sont les Baatombu, les Fulbé et les Gando, les Boko, les Dendi, les Gulmancé et les Mokolé. Ces divers groupes seraient venus à des époques différentes de divers empires africains du Moyen Âge (ADAM et BOKO, 1993). Les circonstances et les périodes précises d'installation de certains de ces peuples sont encore mal connues. Il semble que tous aient été attirés par le milieu en raison des ressources naturelles du bassin.

- Les *Baatombou ou Bariba et les Boko* sont originaires de Boussa au Nigeria et se sont installés au Bénin avant le XV^e siècle (BOKO, 1988 ; ADJINACO et ONIBON, 2004). Peuple de guerriers, ils fondèrent le célèbre royaume Bariba de Nikki, bien organisé et hiérarchisé, doté d'une organisation politique forte dont subsistent des traces aujourd'hui. Très tôt, ils imposent leur hégémonie aux autres ethnies et constituent des états esclavagistes dont les razzias ont peu à peu refoulé des peuples anciens, tels les Bètammaribé dans les zones refuges de l'Atacora (BIO BIGOU, 1987). Cette organisation politique des Baatombu explique l'étendue du territoire qu'ils occupent : depuis la région de Kandi-Banikoara au nord jusqu'à Parakou au sud et de Ségbana à l'est jusqu'à Kouandé à l'ouest. De nos jours, ils sont agriculteurs sédentaires et occasionnellement chasseurs. Ils représentent 49 % de la population et sont plus nombreux dans les communes de Kandi, Nikki, Kouandé, Bembéréké, Banikoara et de Ségbana.

- Les *Dendi*, originaires du Mali, sont issus de l'éclatement de l'empire de Gao en 1591 à Tondibi. Ils ont migré le long du fleuve Niger vers l'aval, avant de s'installer dans les communes de Malanville, Kandi et Karimama. Ils représentent 10 % environ de la population. C'est également un peuple d'agriculteurs sédentaires (BIO BIGOU, 1987, BOKO ; 1988).

● *Les Fulbe ou Peulh et les Gando* constituent un groupe socio-culturel plus récent. Deux directions migratoires ont marqué l'arrivée des *Fulbé* au Bénin : l'axe Niger et l'axe nord du Nigeria. Ils forment des peuples éleveurs nomades qui, aujourd'hui, commencent à se sédentariser à travers l'association de l'élevage et de l'agriculture. Les superficies qu'ils emblavent sont toujours fumées au préalable par les boeufs qui y séjournent longtemps (BIO BIGOU, 1987 ; ADAM et BOKO, 1993). Ils ont initié les Gando, anciens esclaves, aux techniques de l'élevage (AGLI, 1995). Les Fulbe et les Gando se trouvent dans toutes les communes et forment 33 % de la population.

● *Les autres groupes*

Il s'agit surtout des Gourmantché ou Gulmancé (2,5 %), Yowa (0,4 %), des Mokolé (2,2 %) et des Tchenga (0,9 %). Originaires de l'ancienne Haute-Volta (actuel Burkina Faso), les Gulmancé occupent les terres fertiles de la vallée du Niger. Ils ont créé les localités de Mamassy-Gulma, Kompati et Loumou-Loumbou. Les Tchenga occupent l'ouest de la vallée du Niger au Bénin. Ils sont originaires du Niger actuel. A ceux-ci, il faut ajouter les Boko venus du Nigeria et occupant les communes de Kandi et de Ségbana ; les Haoussa de Kalalé et les Mokolé également venus du Nigeria et apparentés aux Nagots qui sont dispersés dans les communes de Ségbana, Kandi et Nikki (AGLI, 1995).

Tous ces groupes socio-culturels minoritaires sont agriculteurs et ils représentent environ 8 % de la population du bassin.

Tous ces peuples regroupés en communautés rurales pratiquent en majorité la religion musulmane (72,6 % de musulmans contre moins de 9 % de catholiques) et ont développé des civilisations agraires différentes en rapport avec l'évolution de l'histoire agricole du bassin et le contexte économique national.

1.2.3. Les principales activités économiques

Des facteurs physiques (climat favorable et disponibilité des terres), historiques (héritage colonial : production de matières premières agricoles pour le fonctionnement des industries de la Métropole [la France]), politiques (création des centres de formation, de recherche et promotion de l'agriculture : exemple Faculté des sciences agronomique, Centre Régional pour la Promotion Agricole [CERPA]) ou économiques (achat d'intreuds aux producteurs, désenclavement des zones de production, organisation de l'exportation du coton) ont fait de l'agriculture le poumon de l'économie du bassin.

1.2.3.1. Agriculture

– Présentation générale de l'agriculture du bassin

De type traditionnel, l'agriculture pluviale est limitée par le manque de moyen. Un début de modernisation a été favorisé par la politique de promotion des cultures de rente, par l'encadrement du monde rural, par l'introduction de la culture attelée, par le développement du mouvement coopératif et par la mise à la disposition des producteurs de semences par les ex-CARDER (Centre d'Action Régionale pour le Développement Rural).

Les techniques culturales restent essentiellement traditionnelles et les augmentations de production d'une année à une autre sont en réalité beaucoup plus imputables à l'accroissement des superficies cultivées qu'à celui de la productivité.

En ce qui concerne les cultures vivrières, selon ADJINACOU et ONIBON (2004) au cours des années 1999-2003, les rendements moyens des deux principaux tubercules, l'igname et le manioc, bases de la nourriture de la région (Photo 1) ont respectivement chuté de 1,5 % et 16 % tandis que les superficies emblavées augmentaient de 35 % et 78 %. Les autres cultures vivrières ont enregistré une légère amélioration des rendements et une augmentation moyenne des superficies emblavées de l'ordre de 6 %, en dehors du maïs qui a connu une augmentation de superficie de 88,34 % (Photo 1).

La production du riz (Photo 1), bien qu'encore très faible, a quadruplé grâce aux effets combinés d'une nette amélioration des rendements et des superficies qui ont respectivement doublé. Toutefois, l'agriculture irriguée est restée très embryonnaire, essentiellement localisée dans la commune de Malanville où il existe un périmètre rizicole de 516 hectares irrigués par un système gravitaire. Il existe aussi de petits parcelles irriguées privées installées dans la basse vallée de la Sota (affluent du Niger) et dont le cumul des superficies fluctue annuellement entre 500 et 700 hectares (ADJINAKOU et ONIBON, 2004). La non systématisation de l'irrigation dans le bassin est liée au coût élevé de la mise en œuvre de ce système cultural.

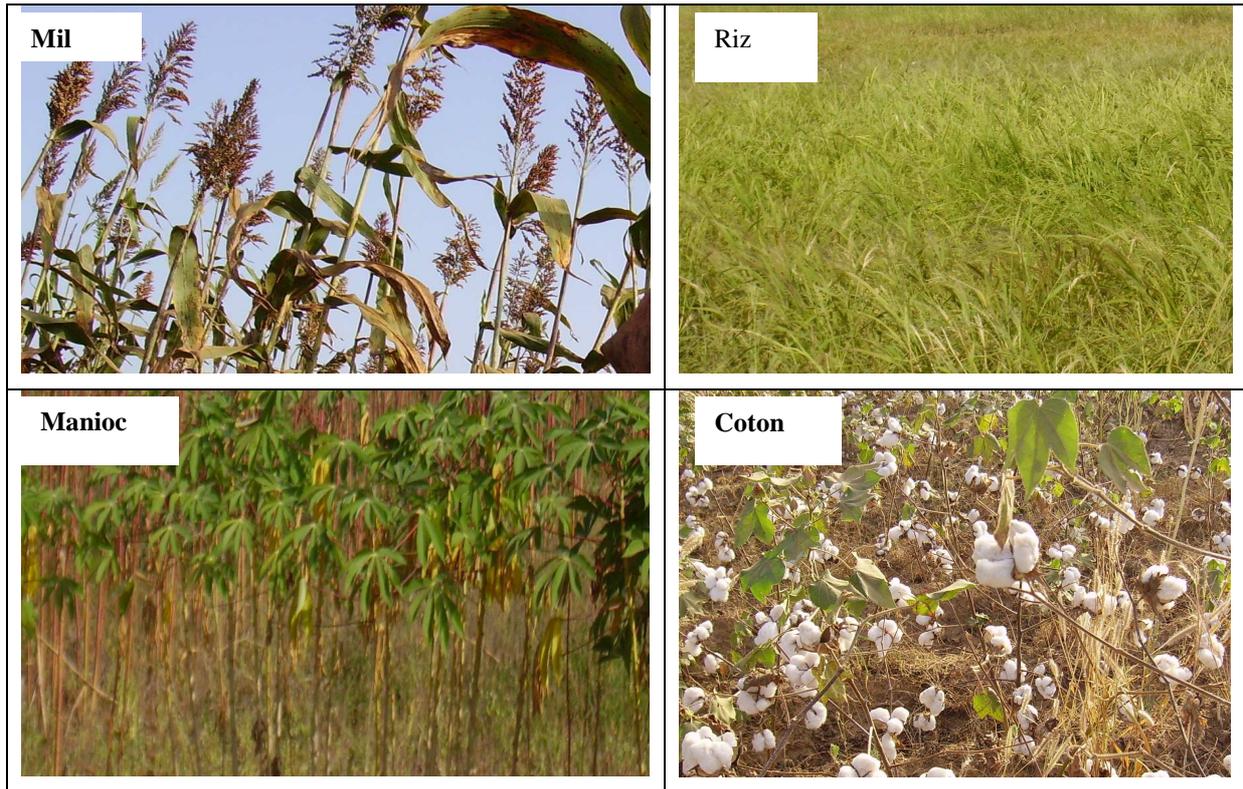


Photo 1 : Quelques cultures du bassin béninois du fleuve Niger
(cliché VISSIN, 2006)

De même, pour les cultures commerciales de 1999 à 2003 par exemple, la superficie totale emblavée en coton dans le bassin béninois du fleuve Niger a plus que doublé, passant de 100 755 hectares à 210 900 hectares contre un accroissement de la production de moins de 5 %. Le rendement a donc chuté de plus de 50 % en cinq ans. Cette baisse est liée à la péjoration pluviométrique enregistrée dans le bassin depuis les années 1970.

La seconde culture de rente est l'arachide qui a connu un meilleur sort pour la période 1999-2003, avec une légère amélioration des rendements (2,50 %), un accroissement des superficies emblavées de 74,82 % et une augmentation de la production de 79,40 %.

La forte emprise de la population sur les ressources en eau de surface (utilisation domestique), les techniques et les pratiques culturelles adoptées dans le bassin (brûlis), la surexploitation des terres (en particulier pour le coton), conduisent à une dégradation des formations végétales, y compris sur les zones officiellement protégées.

Par exemple, la pression humaine sur les forêts classées est forte, marquée par l'exploitation frauduleuse du bois-d'œuvre, le braconnage (qui entraîne la disparition de certaines espèces animales), la culture sur brûlis et les méfaits de la transhumance (destruction des cultures, conflits entre agriculteurs et éleveurs autour des points d'eau)

constatée dans toute la région.

L'espace rural du bassin béninois du fleuve Niger est essentiellement dominé par les paysages agraires *baatonu*, *dendi* et *otammari*, les autres peuples minoritaires n'ayant pas un mode d'organisation spécifique du terroir. Ainsi, les paysages agraires *boko* et *mokolé* ne diffèrent pas sensiblement de celui des *Baatombu*.

– *Les civilisations agraires du bassin*

Plusieurs géographes dont BRASSEUR-MARION (1951), PELISSIER (1963), HURAUT (1966), YAYA et NADJO (1980), YAYA (1980), DISSOU (1983), BIO BIGOU (1987) et BOKO (1988) ont décrit les paysages agraires du Nord-Bénin.

➤ *Le paysage agricole baatonou ou bariba*

D'après BOKO (1988), le domaine d'influence du paysage agricole baatonou s'étend de 9° à 11°15' de latitude nord. Dans cette aire, le brûlis constitue la phase préparatoire au billonnage et au buttage. Les buttes de taille impressionnante sur des sols de type ferrugineux tropical portent l'igname, le sorgho et le mil (Photo 1). Les champs, de grandes tailles, presque géométriques, sont dispersés assez loin des habitations groupées en gros villages. Les exploitations de chaque cellule familiale se répartissent sur une aire continue regroupant les champs en culture et les jachères. Mais les exploitations familiales ne se juxtaposent pas, ce qui explique la discontinuité du finage. Le système de rotation des terres et d'assolement est très rigoureux par exemple chez les *Baatombu* de *Banikoara*. Par contre, à Ségbana, la rotation des terres est moins systématique. Les champs sont de grandes dimensions, presque géométriques. Les jardins de case n'existent vraiment qu'autour des campements fulbé. Ce qui caractérise aujourd'hui ce paysage est la culture du coton qui connaît un essor prodigieux grâce à la charrue attelée et celle de l'igname que portent les buttes de taille impressionnante dans les terres plus riches et plus humides : les bas-fonds (BIO BIGOU, 1987 ; AGLI, 1995). En pays Bariba, la culture attelée est maintenant quasi généralisée, stimulée par le développement de la culture cotonnière et celui de l'élevage bovin. On note que le calendrier cultural est calqué sur le cycle saisonnier des précipitations.

➤ *Le paysage agricole dendi*

L'aire d'influence de la civilisation agricole dendi s'étend approximativement du 11^e parallèle nord jusqu'à la vallée du Niger. Le pays dendi est soumis au climat subsahélien du nord du bassin. Les terres cultivables sont peu étendues à cause des affleurements quartzitiques, des versants escarpés et surtout des nombreuses surfaces cuirassées. Dans la

plupart des cas, les parcelles s'étendent depuis les habitations jusqu'à deux ou cinq kilomètres au-delà, d'autant plus facilement que les maisons ne sont pas clôturées (BOKO, 1988). Chez les paysans de Mamassy-Gourma, dans la vallée du Niger par exemple, les groupes de cases sont séparés par des champs qui ne sont pas des jardins de case puisqu'ils portent les mêmes cultures que les parcelles éloignées. S'il existe de gros villages, ce sont des nébuleuses, et c'est ce qui distingue des villages Tanéka et Batonu. On n'y trouve pas non plus l'organisation du finage typique des paysages Baatombu (BOKO, 1988) L'association des cultures (sorgho et igname, sorgho et manioc, maïs et arachide) y est très poussée, surtout dans la vallée du Niger. La région de Malanville s'est spécialisée dans les cultures maraîchères (oignon, pomme de terre et tomate) vendus sur les marchés de l'intérieur, surtout sur le marché international de Dantokpa à Cotonou, au sud Bénin (BIO BIGOU, 1987 ; ADJINACOU et ONIBON, 2004). Deux cultures de rente sont aussi présentes : l'arachide (surtout à Malanville et Karimama) et surtout le coton. Les cultures vivrières sont essentiellement le mil, le sorgho et le niébé, cultivés sur billon depuis Kandi jusqu'à Angaradébou (BOKO, 1988 ; AGLI, 1995). On trouve aussi des cultures sur buttes vers Kandi et Ségbana où l'igname est répandue. Sur les pentes et des monadnocks semi-isolés, les labours sont faits parallèlement aux courbes de niveau de façon à empêcher l'érosion aréolaire, pourtant effective du fait des défrichements répétés pour la conquête de nouvelles terres.

➤ *Le paysage agraire otamari*

Il se rencontre au nord-ouest du bassin. Dans ce milieu les paysans privilégient les espèces adaptées à la sécheresse du climat à court cycle d'humidité, comme le fonio, le petit mil et diverses légumineuses. L'une des spécificités du pays otammari est son habitat très dispersé, caractérisé par une architecture originale de « Tata-Somba », type de « château fort » (ADAM et BOKO, 1993) construit en latérite et recouvert de chaume. On note ici une absence de jachère. Les mêmes parcelles sont remises en cultures chaque saison à cause des faibles étendues de terres cultivables au milieu des étendues d'affleurements quartzitiques parsemés de nombreux baobabs. L'outillage reste rudimentaire et les cultures (fonio, petit mil, haricot et arachide) sont également disposées perpendiculairement à la direction des pentes (BOKO, 1988 ; HOUNDENOU, 1999).

Dans toute la région, la combinaison du développement de la culture attelée et du besoin sans cesse croissant des populations en protéines animales favorise la production animale

dans le bassin béninois du fleuve Niger.

1.2.3.2. Elevage

L'élevage est, après l'agriculture, la plus importante activité de la zone nord du Bénin mais il ne couvre qu'environ 6 % des besoins annuels en protéines de la population. Les communes de Banikoara et de Kandi (Alibori), de Kalalé, de Nikki et de Bembéréké (Borgou) constituent en particulier de grands centres d'élevage de bovins, caprins et ovins. Les communes de Banikoara, de Kandi et de Kalalé abritent à elles seules 26 % du cheptel bovin du Bénin et les deux départements (Alibori et Borgou) rassemblent 69 % des bovins du pays (ADJINACOU et ONIBON, 2004).

Le cheptel connaît, depuis les années 1960, un état sanitaire satisfaisant et une progression régulière. Toutefois, il a été durement éprouvé par la sécheresse des décennies 1970 et 1980 (POFAGI et TONOUEWA, 2001). Cette activité est de type extensif. Le bétail (606 952 têtes de bovins) est généralement confié aux éleveurs Fulbé qui transhument au gré de la disponibilité des pâturages et surtout de l'eau. L'élevage des ovins (210 208 têtes), caprins (175 160 têtes), porcins (4 565 têtes), équins (1 005 têtes) et assins (641 têtes) se fait souvent autour des cases et sur jachères, ainsi que la volaille (559 242 têtes) que l'on retrouve partout (ADJINACOU et ONIBON, 2004).

Pendant la saison sèche, de nombreux problèmes liés à l'eau, aux pâturages et à la transhumance inter-états interviennent : à ce moment, le déficit fourrager est régulier car les feux courants éliminent toute la paille de graminées et la plupart des cours d'eau sont à secs. Le taux de charge en bêtes dépasse réellement la capacité de charge saisonnière des zones soudaniennes (ADJINACOU et ONIBON, 2004). A ce titre, la transhumance est une réaction nécessaire pour faire survivre les troupeaux, mais aussi une technique efficace d'exploitation des ressources naturelles dans ce système. Cependant, l'élevage de transhumance exerce une pression de plus en plus forte sur les pâturages naturels. Pendant la saison sèche, ce système induit des feux de brousse, l'élagage et l'étêtage des arbres pour permettre aux troupeaux de brouter les rejets ((POFAGI et TONOUEWA, 2001 ; ADJINACOU et ONIBON, 2004). Ainsi, la transhumance est donc perçue comme un système de production dégradant l'environnement, du fait qu'elle occasionne des déplacements massifs de cheptel à la recherche de pâturages et de points d'eau La pression animale avec la transhumance des bêtes (source de conflits entre éleveurs et cultivateurs) participe également à la destruction du couvert végétal exposant les sols aux effets de l'érosion (Photo 2).



Photo 2 : Transhumance peul dans le bassin béninois du fleuve Niger
(cliché VISSIN, 2006)

1.2.3.3 - Autres activités

La pêche est pratiquée dans le Niger et ses affluents. Il s'agit plus spécifiquement d'une activité artisanale de subsistance pratiquée individuellement et/ou en groupes par des pêcheurs béninois et des étrangers venus du Niger, du Mali, du Nigéria, du Togo et du Ghana. Dans le bassin, cette activité est la spécialité des *xla* venus du sud Bénin et installés surtout à Karimama et Malanville. Avec l'essor de la culture du coton, certains pêcheurs utilisent des pesticides pour la pêche (ADJINACOU et ONIBON, 2004). Cette technique qui détruit la ressource halieutique, entraîne aussi parfois des pertes en vies humaines ; elle traduit également un problème émergent dans le bassin cotonnier : la pollution des eaux d'origine agricole.

En matière de commerce, Kandi et Malanville constituent les grands centres où s'effectuent les échanges commerciaux avec les pays limitrophes. Du marché de Malanville partent vers l'intérieur du pays, au Togo, au Nigeria et au Niger les produits maraîchers : oignon et tomate. Les marchés de Karimama et de Malanville sont les principaux marchés de poisson fumé (en direction des pays limitrophes) et de pomme de terre (en direction du sud Bénin, du Nigeria, du Niger et du Burkina Faso). Il existe un secteur informel très actif, dont les animateurs sont les Ghanéens, les Nigériens et les autochtones (POFAGI et TONOUEWA, 2001).

Le bassin dispose également de richesses touristiques. Ainsi, il abrite la mare sacrée de la chute de Koudou dans le parc "W", la Mare 25, la mare Barboti et la mare aux crocodiles près du village de Kéré mou dans le sous bassin de l'Alibori (ADJINACOU et ONIBON, 2004). Il

dispose aussi de quelques beaux sites qui sont structurés autour des cours d'eau : la chute de Koudou, les cascades de Kota et de Kandifo sur la Mékrou, la forêt classées de Goungoun et la zone cynergétique d'Alfakoara dans le bassin de la Sota. A ces sites touristiques, s'ajoutent quelques patrimoines culturels : la tombe Bio Guéra à Baoura, et les tombeaux sacrés de Nikki (BIO BIGOU, 1987 ; TOMETY *et al.*, 2006).

L'importance de l'agriculture et de l'élevage dans l'économie du bassin béninois du fleuve Niger fait ressortir le rôle des ressources en eau qui sont constituées par les eaux atmosphériques, les eaux de surface et les eaux souterraines. A ce titre, on comprend la place de l'eau dans la tradition des peuples du bassin.

1.2.4. L'eau et les populations du bassin

1.2.4.1. Les ressources en eau disponibles dans le bassin béninois du fleuve Niger

L'eau atmosphérique ayant été déjà largement étudiée dans le chapitre, on ne présentera ici que les ressources en eau de surface et les ressources en eau souterraine (Cf. bilan hydrologique au chapitre 3).

- Les eaux de surface

Le Bénin dispose de ressources en eau relativement abondantes par rapport aux besoins des populations. D'après le rapport de l'étude sur la stratégie nationale de gestion des ressources en eau du Bénin (Direction de l'Hydraulique, 1998), les ressources en eaux superficielles du bassin du Niger (hors fleuve Niger), évaluées à partir des stations hydrométriques existantes, sont estimées à 2 485 millions de m³ sur les 13 106 millions que compte le Bénin, soit environ 19 % (TOMETRY *et al.*, 2006). Cependant, comme on peut le remarquer à travers les statistiques du tableau 1.5, les ressources en eaux superficielles ainsi estimées ne concernent qu'un bassin versant de 27 260 km², soit moins de 63 % du bassin béninois du fleuve Niger (LE BARBE *et al.*, 1993). Il en découle que les potentialités réelles de la portion nationale du bassin en eaux de surface dépassent largement les 2 485 millions de m³ d'eau qui résultent d'une estimation à partir des stations hydrométriques existantes. Par ailleurs, à la station de Malanville, les ressources en eaux de surface du fleuve Niger que le Bénin partage avec les autres pays sont estimées à 31 725 millions de m³ (ADJINACOU et ONIBON, 2004).

Tableau 1.5: Estimation des ressources en eaux superficielles sur le bassin du Niger au Bénin

Bassin	Station	Superficie à la station km ²		Volume moyen annuel (Mm ³ /an)	
Niger	Malanville	1 000 000		31 725	
Mékrou	Kompongou	5 700	27 260	583	2 485
Alibori	Kandi-Bani	8 150		883	
Sota	Koubéri	13 410		1 019	

Source : Direction de l'Hydraulique, 1998

- Les eaux souterraines

La disponibilité en eaux souterraines est largement conditionnée par le climat et la géologie. Les paramètres climatiques pertinents (les précipitations et les températures) déterminent la quantité d'eau qui, à un endroit donné, est disponible pour l'écoulement en surface et la recharge de la nappe. Les conditions géologiques déterminent les caractéristiques de stockage et de flux de l'eau souterraine. Les études menées sur les ressources en eau souterraine du Bénin (Direction de l'Hydraulique, 1998; VISSIN, 1998 ; ADJINACOU et ONIBON, 2004 ; TOMETY, 2006) ont révélé que les capacités annuelles de recharge des aquifères de Kandi sont de 123 m³/ha et 125 m³/ha respectivement en zone du socle et en zone sédimentaire (DH, 1998). Sur la base de ces hypothèses, la capacité totale de recharge annuelle des aquifères de la zone d'étude sont estimées à 535 millions de m³ d'eau (sur les 1 870 millions que compte le pays) dont la répartition est présentée dans le tableau 1.6.

Au total, le bassin béninois du fleuve Niger est relativement moins bien pourvu en eau comparativement aux ressources en eaux superficielles et souterraines dont dispose le pays. Il se trouve être la zone la moins arrosée et, sur une étendue représentant environ 42 % du territoire national, ne dispose que d'environ 19 % et 29 % des ressources respectivement en eaux superficielles et souterraines du pays (POFAGI et TONOUEWA, 2001 ; TOMETY, 2006).

Tableau 1.6 : Ressources en eaux souterraines du bassin béninois du fleuve Niger

<i>Unité</i>	Superficie (km ²)	Recharge (m ³ /ha)	Recharge annuelle en millions de m ³
Région du socle du bassin béninois du fleuve Niger	36 384	123	410
Grès de Kandi	10 000	125	125
TOTAL	46 384		535

Source : Direction de l'Hydraulique, 1998

1.2.4.2. La disponibilité de eau dans les localités du bassin

Dans la plupart des localités du bassin béninois du fleuve Niger au Bénin existent des puits forés par le programme d'hydraulique villageoise de la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau) qui a initié un important projet de forage et d'adduction d'eau dans les localités pour l'approvisionnement en eau des populations du bassin (Tableau 1.7). Celles-ci bénéficient de 3 146 ouvrages hydrauliques dont 1 508 forages, 1 596 puits modernes, 10 sources aménagées et 32 forages contre puits ou puits à grand diamètre.

Le système du puits à grand diamètre est généralement réalisé dans les régions où la nappe est trop profonde (sur le socle par exemple) et où on veut diminuer l'effort humain pour tirer l'eau et pour avoir un plus grand débit. Il comprend un puits à grand diamètre à côté duquel se trouve un forage à petit diamètre qui communique avec le puits par un canal. Un système de pompage se trouvant au niveau du forage permet de pomper l'eau et de la déverser par le biais du canal dans le puits où on peut puiser l'eau sans trop de difficulté.

On a aussi noté que les villes bénéficient des infrastructures de la Société Nationale de l'Eau du Bénin (SONEB) qui leur installe des bornes-fontaines.

Tableau 1.7 : Ouvrages hydrauliques dominant dans le bassin béninois du fleuve Niger

Communes	Forages	F.C.P	P.M	S.A	Total
Banikoara	243	4	213	-	460
Gogounou	180	9	102	-	291
Kandi	122	3	251	-	376
Karimama	50	-	66	-	116
Malanville	42	-	188	-	230
Ségbanan	116	-	127	-	243
Bembéréké	157	14	106	3	280
Kalalé	134	-	198	-	332
N'Dali	98	2	111	-	211
Nikki	165	-	113	-	278
Kérou	104	-	20	-	124
Kouandé	97	-	101	7	205
Total	1508	32	1596	10	3146

Source : Direction Générale de l'Eau (DG-Eau), mai 2006

Forages contre puits ou puits à grand diamètre : F.C.P

Puits modernes : P.M

Sources aménagées : S.A

Ainsi, le problème d'eau potable ne se pose plus avec acuité dans les villes du bassin. Par exemple, Kandi et Banikoara bénéficient respectivement de 251 et 213 puits modernes (Tableau 1.7). Mais dans les régions ou localités où les infrastructures d'approvisionnement en eau potable n'existent pas encore, l'eau de puits, des citernes et l'eau de marigot ou même des rivières sont les plus utilisées par les populations. Toutefois, en cas de pénurie d'eau, les populations de tous les villages creusent des puits aux abords immédiats des rivières pour s'alimenter.

Cependant, la portée de l'eau varie d'un groupe socio-culturel à un autre. Toutes les informations contenues dans la suite de ce chapitre sont tirées des résultats d'enquêtes de terrain qui ont été effectuées en décembre 2006 et des travaux du Laboratoire d'Etude des

Climats, des Ressources en Eau et de la Dynamique des Ecosystème (LECREDE) de l'Université d'Abomey-Calavi au Bénin.

1.2.4.3. Place de l'eau dans chaque ethnie du bassin

Appelée Hari en Dendi , Roua en Haoussa, Diam en peulh, Sim en Fon Nim en Baatonou, Igni en Mokolé et Omi en Yoruba, l'eau, source de vie occupe une place importante dans les communautés rurales.

En effet, en dehors de ses usages courants (ménage, agriculture, etc.), elle intervient dans toutes les cérémonies d'invocation des mânes des ancêtres, soit pour obtenir leur faveur, soit pour implorer leur pardon et leur clémence. Elle sert à nettoyer le nouveau-né et à purifier les dépouilles mortelles.

Par ailleurs, l'eau est une ressource capitale de grande importance. Ainsi pour accueillir un étranger, les populations du bassin béninois du fleuve Niger versent l'eau par terre là où l'hôte doit passer pour rentrer dans la demeure d'accueil. Ce geste symbolise que l'étranger rentre en paix dans cette maison et qu'il est le bienvenu.

En outre, l'eau des cours et plans d'eau est perçue comme un « habitat » privilégié des génies ou des divinités (ADJINACOU et ONIBON, 2004 ; VISSIN, 2006, enquête de terrain). On doit leur faire des sacrifices périodiques. On peut immoler un coq ou une poule blanche, voire un bœuf selon l'importance de l'événement. On peut faire des offrandes aux dieux de l'eau pour conjurer les disettes, les épidémies et les autres malheurs ou implorer leurs bienveillances (PERARD *et al.*, 1994 ; TOFFI, 1995).

1.2.4.4. Sacralisation des cours et plans d'eau dans le bassin

La plupart des nombreux cours d'eau du bassin sont vénérés par les populations. Parmi ces cours d'eau vénérés, on peut citer : Padé-darou, Donwari-darou, Gansosso-darou, Faranguérou dans la commune de Kandi (par les Bariba et les Boko) ; Gnonkyla, Taï, Zoana, Kpaïzia, Karwizia, Iranè dans la commune de Ségbana (par les Bariba, les Moo et les Mokolé), Sota dans la commune de Malanville (les Dendi) et les trois rivières (Irané, Tassiné, Boulli) à Gogounou. Ces trois rivières dans la commune de Gogounou sont vénérées par les Baatombu et les Boko à cause de la présence des caïmans (Kaaragu en Baatonou). Cette vénération se présente sous deux formes : le Yabon (prière collective) et le Kanaru (prière individuelle).

Le Yabon est une cérémonie rituelle collective qui regroupe tout le village et est d'une importance capitale. Elle se déroule un vendredi ou un dimanche en particulier. Elle se réalise pendant la saison sèche ou pendant la soudure et de préférence après la récolte du sorgho permettant ainsi de remercier les divinités tout en demandant la clémence des dieux pour la saison à venir.

Pour la réussite de l'événement, on collecte de l'argent pour l'achat d'un bœuf, de moutons et de coqs qui sont immolés au sanctuaire de la divinité. Le chef de culte est chargé de diriger la cérémonie en apportant la boisson traditionnelle (bière de sorgho appelée tchoukoutou) et sept cauris qui sont jetés dans l'eau à la fin de la cérémonie. Dans le même temps, une partie des animaux immolés est jetée dans l'eau pour nourrir les caïmans. La seconde part est destinée à la consommation sur place accompagnée de la pâte de sorgho. La troisième part (dernière part) est emportée à la maison pour la consommation familiale.

En ce qui concerne le Kanarou (prière individuelle), elle se passe dans les mêmes conditions que le Yabon, mais ne mobilise qu'une famille ou quelques individus.

Par ailleurs, les interdits dus à ces cours d'eau sont multiples. Ainsi, il est interdit de tuer les caïmans, de placer tout autre objet que laalebasse et la pirogue dans les endroits de la rivière où ils habitent. Le non respect de ces interdits entraîne des sanctions graves pour l'auteur par la communauté, sanction allant de son isolement du groupe à sa punition par les ancêtres (VISSIN, 2006, enquête de terrain).

Le cours d'eau Padédarou est honoré chaque année par un groupe de personnes initiées pour conjurer le mauvais sort (maladies, mauvaise récolte, etc.) et implorer le pardon des dieux. Pour cette cérémonie, les populations baatombou et boko du village de Padé (commune de Kandi) collectent de l'argent dont le montant varie entre 40 000 et 50 000 F CFA (VISSIN, 2006, enquête de terrain). Cette somme est utilisée pour l'achat de deux cabris, un mouton, des coqs... pour les sacrifices. Ainsi, les bêtes sont immolées et le sang est versé dans l'eau. Là encore, le cours d'eau a des interdits. Entre autres, une femme en menstruation ne doit pas aller au lieu de culte, pire encore se laver ou laver sa couche dans la rivière.

En cas de violation des interdits, tout contrevenant doit se dénoncer pour éviter les sanctions des dieux qui sont entre autres la ménopause précoce, le non arrêt de la menstruation, la stérilité... Une fois la déclaration faite, la coupable paie les amendes pour le pardon des dieux (par exemple 7 noix de cola, 2 coqs blancs puis 2 pagens traditionnels). Sans cette cérémonie, les populations baatombou et boko pensent se trouver exposées à de

nombreux dangers (mauvaises récoltes, famine, noyade, épidémie...) (VISSIN, 2006, enquête de terrain).

La rivière *Tai* dans la commune de Ségbana est également vénérée par les populations. En effet, une fois l'an, les populations *baatombou* et *boko* riveraines se rendent près du cours d'eau pour célébrer de grandes cérémonies au cours desquelles les chefs de culte et leurs adeptes implorant les dieux de l'eau contre les mauvaises récoltes et le mauvais sort. C'est également au cours de ces mêmes cérémonies que les femmes qui n'ont pas connu la joie de la procréation en formulent le vœu. Ce cours d'eau a les mêmes interdits que les précédents, à la seule différence qu'on ne peut pas y laver les marmites qui servent à préparer la sauce traditionnelle. Quant aux sanctions, elles varient ici selon la gravité du sacrilège, allant du paiement des amendes à l'exclusion de la communauté. La réintégration n'est faite que lorsque des cérémonies sont organisées pour implorer le pardon des dieux de ce cours d'eau. Il convient de noter que le cours d'eau *Tai* est considéré comme « naturellement méchant » par les populations, sans doute parce que plusieurs personnes s'y sont noyées, malgré sa faible profondeur.

La *Sota* au niveau de sa confluence avec le fleuve Niger est également objet de culte surtout des pêcheurs *xula* de l'île de Tounga (venus de Grand-Popo au sud ouest du Bénin) et située au nord-est de Malanville. Les populations organisent des prières, des cérémonies au bord de la rivière afin que les dieux de ses eaux leur donnent de bonnes pêches. Chaque année, ils immolent des brebis à tête et cou noirs communément appelées *Agbocodja* et deux coqs. Certaines cérémonies peuvent durer de trois à sept jours. Mais la *Sota* a elle aussi plusieurs interdits ; entre autres, citons : laver la vaisselle, toilette d'une femme en menstruation. En cas de violation de ces interdits, c'est la stérilité qui frappe la contrevenante. Le dieu de l'eau selon les riverains de la *Sota* s'appelle *Mamiwata* (mère des eaux ou déesse des eaux est une divinité du sud Bénin) (VISSIN, 2006, enquêtes de terrain).

Bonigui, une masse d'eau situé au nord-est de Banikoara et au sud-est de Karimama, est adoré par la plupart des populations *dendi* des villages environnants. Des cérémonies de prière sont également organisées chaque année par ces populations pour conjurer les mauvaises récoltes et implorer la grâce des dieux. Des animaux sont également immolés lors de ces cérémonies. Parmi ses interdits, on peut citer la fixation du regard sur l'eau, le regard de sa propre silhouette dans l'eau. Toute personne qui s'entête à aller à l'encontre de ces interdits est toujours victime de noyade immédiate dans cette masse d'eau. Lorsque cet événement intervient, les adeptes du culte se concertent et demandent à la famille de la

victime une modeste amende (deux pagnes traditionnels blancs, les tenues de la victime et un coq blanc) pour implorer le pardon des dieux.

Conclusion

Au terme de ce chapitre qui présente les fondements géographiques du bassin béninois du fleuve Niger, quelques points caractéristiques sont à relever :

- Le relief du bassin présente deux grandes unités topographiques : la pénéplaine cristalline et le plateau de grès de Kandi qui s'abaissent vers le nord. Cette topographie est profondément disséquée par un réseau hydrographique dense de trois rivières : Mékrou, Alibori et Sota. Toutefois, ce relief est modeste et très peu accidenté.
- Le bassin béninois du fleuve Niger s'étend sur deux formations géologiques (grès et socle) qui ont des réserves en eau de sous-sol contrastées. Ces types de formations géologiques portent une diversité de sols (sols faiblement ferrallitiques, sols hydromorphes, sols ferrugineux tropicaux) résultant essentiellement des processus de ferrallitisation et de ferruginisation. Ces sols portent une diversité de formations végétales qui s'atténue du sud vers le nord du bassin.
- Le domaine d'étude subit l'influence du climat tropical à deux saisons : une saison sèche et une saison de pluies. Ainsi, le bassin est caractérisé par une concentration des pluies (96 % annuels moyens) sur six mois (mai-octobre).
- La population du bassin de plus en plus nombreuse pratique diverses activités dont les principales sont l'agriculture et l'élevage. Le coton constituant la principale culture industrielle du bassin, il apparaît comme le moteur du développement rural, ce qui accentue le défrichement effréné favorisant la réduction de la jachère.
- Les ressources en eaux du bassin sont relativement modestes par rapport au besoin de la population et subissent l'influence des fluctuations climatiques et d'autres facteurs du milieu.
- L'eau occupe une place importante dans la vie des populations du bassin. Elle sert à divers usages, mais surtout les cours et plans d'eau sont vénérés parce qu'abritant un génie ou une divinité.

Ce milieu brièvement présenté constitue le domaine d'étude de ce travail qui nécessite la constitution de bases de données et le choix de méthodes adéquates.

**Chapitre 2 : Point des connaissances, données et
méthodes**

Introduction

Ce chapitre apporte d'abord la clarification des concepts hydroclimatiques et fait le point des connaissances des travaux effectués sur les différents aspects du sujet dans le bassin ou dans la sous région ouest africaine. Il présente ensuite les données météorologiques, hydrologiques et des états de surface utilisées pour l'étude de la variabilité hydro-pluviométrique et de l'impact de la dynamique des états de surface sur l'écoulement dans le bassin béninois du fleuve Niger, regroupant les sous bassins de la Mékrou à Kompongou, de l'Alibori au pont sur la route Kandi-Banikoara, de la Sota à Gbassè et à Coubéri. Enfin, à travers une présentation détaillée, il met en relief les méthodes les plus adaptées à cette étude.

2.1. Clarification des concepts

Nous voulons, à travers cette clarification, donner une compréhension claire des termes que nous allons utiliser dans ce travail et auxquels les travaux antérieurs donnent parfois des sens différents. Ainsi, on relève parfois chez certains auteurs une confusion entre bilan hydrologique (à l'échelle du bassin versant) et bilan hydrique (à l'échelle stationnelle de la plante, ou tout au plus d'une parcelle).

On note ainsi que la plupart des concepts sont acceptés par les auteurs dans des contextes différents.

- Bilan hydrologique

- Le *Glossaire International d'Hydrologie* (1992) donne pour le terme « **bilan hydrologique** » la définition suivante : « *Bilan d'eau fondé sur le principe selon lequel, pendant un certain intervalle de temps, le total des apports à un bassin versant ou à une formation aquatique doit être égal au total des sorties, plus la variation, positive ou négative, du volume d'eau stocké dans le bassin ou la formation* ».
- De son côté, le *Vocabulaire de l'hydrologie et de la météorologie* (1978) assimile le bilan hydrique au bilan hydrologique : "Bilan hydrologique" : « *Expression exprimant la répartition des différents volumes d'eau compris dans chacune des parties du cycle de l'eau, pour une période et un bassin donnés. On dit aussi bilan hydrique* »
- Le *Dictionnaire de la Géographie* (1984) définit indifféremment « bilan hydrique ou hydrologique » comme une « *Etude comparée de la lame d'eau tombée à la surface d'un*

territoire ou d'un bassin versant et les différentes formes de transfert de cette eau, soit par évapotranspiration, écoulement, infiltration et alimentation des nappes souterraines ».

• Le Grand Larousse encyclopédique (1970) donne le « bilan de l'écoulement ou bilan hydrologique » comme étant l'« Etat comparatif des pluies et des débits sur un bassin fluvial durant une période donnée (année, saison, averse) ». Le bilan hydrique est la « comparaison entre les quantités d'eau fournies à une plante et celles utilisées par elle ». Puis il précise sous la rubrique « agriculture » : Pour l'établissement des bilans hydriques, on comptabilise, au crédit, les apports d'eau pendant le cycle de la plante (pluie ou irrigation) dans la limite de la capacité d'absorption du sol (l'excès est considéré comme inutilisable) et la quantité d'eau présente dans le sol au moment de l'implantation de la culture ; au débit, à l'eau évaporée directement à partir du sol est ajoutée ce qui correspond à la transpiration de la plante.

Considérant ces définitions sensiblement différentes, on peut retenir que dans tous les cas, c'est l'aspect comptable du terme bilan qui prévaut en hydrologie, que ce soit au niveau des bilans hydriques ou des bilans hydrologiques. Trop souvent confondus, ces deux termes sont bien replacés dans leurs domaines respectifs par le Larousse Encyclopédique : le bilan hydrologique se situe à l'échelle du bassin versant et concerne un processus hydrologique, le bilan hydrique se situe à l'échelle de la plante ou des cultures et relève d'une démarche agronomique.

Simple opérations comptables, bilan hydrique et bilan hydrologique visent tous les deux à établir le bilan entre les entrées et les sorties en eau d'une unité géographique, pendant une période de temps donné.

- Recharge

C'est le mouvement de l'eau pénétrant dans un milieu poreux depuis la surface du sol qui conditionne aussi l'alimentation naturelle d'aquifères ou de réservoirs souterrains, réalisée par puits d'injection, par épandage ou par modification des conditions naturelles. C'est également un processus par lequel la zone saturée d'un aquifère reçoit un apport d'eau extérieur, soit directement dans la formation géologique elle-même, soit indirectement par l'intermédiaire d'une autre formation géologique (CASTANY, 1982).

- Pluie utile ou bilan climatique

C'est la quantité de pluie qui ruisselle strictement sur la surface du sol lors d'une averse. La pluie utile ou bilan climatique se définit comme la différence entre le total des abats pluviométriques et la valeur de l'évapotranspiration potentielle (ETP) (SUTCLIFFE et PIPER, 1985).

- Apports ou pluie efficace

Ils représentent la quantité d'eau fournie par les précipitations qui reste disponible, à la surface du sol, après soustraction des pertes par évapotranspiration réelle. « *Les apports sont égaux à la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration réelle* » (CASTANY, 1982).

- Modèles hydrologiques

Ils sont nécessairement simplificateurs et réducteurs de la complexité naturelle. Le modélisateur opère des choix de représentation du système en ne retenant que les aspects qui lui semblent les plus pertinents, pour tendre vers une solution la plus proche possible de la situation réalité.

Le développement du modèle repose généralement sur trois éléments :

1. le système observé et sa discrétisation spatiale et temporelle, qui en définissent l'objet et ses limites (spatiales ou temporelles). La connaissance du système est conditionnée par la mesure de ses caractéristiques et par l'acquisition de données sur les flux, les stocks et les transformations de phase (*Glossaire International d'Hydrologie*, 1992). Dans notre cas, le système pris en compte est typiquement le bassin versant défini plus loin.

2. l'objectif de la modélisation, pour lequel le modèle est développé. Le modèle est construit pour répondre à des questions et peut ainsi, au-delà d'un outil de représentation, être également un instrument de connaissance. L'étude du cycle de l'eau est l'objectif général de l'hydrologie. Nous nous intéresserons plus particulièrement dans ce travail à la représentation de la transformation de la pluie en débit.

3. le choix d'une formulation de la réalité. Après la définition des deux points précédents, l'essentiel de la démarche de modélisation consiste à trouver la formulation de la réalité la

plus satisfaisante relativement aux objectifs fixés. En fait, le modèle est, la plupart du temps, le résultat d'un compromis entre généralité, réalisme et précision (KAUARK-LEITE et NASCIMENTO, 1993). La formulation d'un modèle est conditionnée par la connaissance antérieure des processus ou des systèmes considérés, par les idées et l'imagination du modélisateur et par les hypothèses qui sont formulées. Notre travail n'utilise que des modèles mathématiques, c'est-à-dire ceux qui proposent une mise en équation du système observé. En effet, les modèles réduits du système naturel ne sont guère utilisés en hydrologie car ils sont souvent difficiles, soient trop coûteux et qu'ils laissent beaucoup moins de souplesse d'utilisation.

- Hydrogramme unitaire

L'emploi du terme « hydrogramme » est relativement récent (début des années 1950). On utilisait jusqu'alors, pour évoquer cette notion, des expressions telles que « le graphique des débits, la courbe de crue ou la variation des débits... ». Dans sa théorie sur l'hydrogramme unitaire établie en 1932, Sherman parle de " unit-graph ", le terme " unit-hydrograph " n'apparaissant que plus tard.

- Pour *Hydrologie de l'ingénieur* (REMENIERAS, 1960), c'est la « *Courbe $Q(t)$ des débits en fonction du temps dans une section d'un cours d'eau, résultante des diverses formes d'écoulement existant dans le bassin* ».

- Le *Dictionnaire français d'hydrologie de surface* (ROCHE, 1986) le définit comme le « Graphique de variation des débits en fonction du temps, souvent utilisé sous forme d'hydrogramme de crue ».

- Pour le *Glossaire International d'Hydrologie* (OMM, 1992), c'est l'« *Expression ou la représentation graphique ou non de la variation des débits dans le temps. Une expression de la variation des hauteurs s'appelle 'limnigramme'* ».

L'hydrogramme unitaire d'un bassin est défini comme l'hydrogramme de ruissellement pur résultant d'une pluie nette de hauteur unité produite de façon homogène sur la totalité du bassin (averse unitaire) en un temps donné. On admet que pour un bassin donné tous les hydrogrammes de ruissellement pur résultant d'averses unitaires ont le même temps de base et que les débits sont directement proportionnels à la valeur de la pluie nette (propriété d'affinité). On admet également que lors des averses de longue durée, l'hydrogramme

résultant correspond au cumul des hydrogrammes unitaires élémentaires (propriété d'additivité). Cette théorie permet ainsi la reconstitution de crues complexes.

Les notions décrites plus haut ne considérant qu'une partie de l'hydrogramme total, il est courant de voir décomposer l'hydrogramme en ses diverses composantes d'écoulement. Cette décomposition peut se faire par des approches très différentes :

- la décomposition graphique qui distingue trois composantes d'écoulement : rapide, retardée et lente au moyen de choix empiriques ; il s'agit de la méthode la plus ancienne (REMENIERAS, 1960) ;
- la décomposition fondée sur une analyse isotopique, le critère d'origine temporelle faisant la part entre « eau nouvelle précipitée » et « eau ancienne stockée » ;
- la décomposition géochimique fondée sur l'analyse de l'origine spatiale des « réservoirs ».

Ces deux dernières méthodes suggèrent qu'il y aurait souvent dans l'écoulement une contribution importante d'eau souterraine ancienne, ce qui remet en cause les conceptions classiques de crues constituées d'eau récente de ruissellement.

- **Tarissement**

« C'est la décroissance du débit d'une source en régime non influencé, liée à la baisse des niveaux et à la diminution de réserve en période sans alimentation du réservoir, ou de décroissance de l'écoulement souterrain d'un cours d'eau, dans les mêmes conditions » (**Dict. franç. d'hydrogéologie, 1977**).

La *courbe de tarissement* est exponentielle décroissante, asymptote à l'axe du temps.

Dans une vue théorique du phénomène, l'écoulement d'un cours d'eau, en l'absence de précipitations sur le bassin versant, a été assimilé à la vidange d'un réservoir à travers une paroi ou un bouchon poreux. Dans ces conditions, il est généralement admis que la décroissance du débit sur un même cours d'eau se fait toujours au même rythme, qui correspond aux caractères hydrogéologiques de son bassin.

L'analyse de la courbe de tarissement peut permettre d'estimer les réserves en eau souterraine d'un bassin versant. Elle est un outil usuel de prévision du débit dans les régions à saison sèche caractérisée.

- Fonction de production

En hydrologie, c'est le passage de la pluie précipitée à la lame ruisselée qui peut générer la crue. GIRARD (1982) définit cette fonction de production linéaire en accord avec les principes de la théorie de l'infiltration : lorsque l'intensité de l'averse croît, sa durée totale croît également et la durée de la pluie utile, définie pour un seuil donné d'intensité, augmente proportionnellement en rapport avec la hauteur d'eau produite. Si le seuil d'intensité est associé à une valeur de perméabilité moyenne, la pluie excédentaire et la lame ruisselée varient linéairement avec la hauteur de l'averse. L'expérience montre que cette linéarité est respectée, même pour des pluies exceptionnellement fortes, sachant toutefois que la perméabilité des sols d'un bassin varie sensiblement dans l'espace selon leur nature géologique, la couverture végétale, leur utilisation et leur état initial d'humidité.

Ainsi, la fonction de production régit la transformation de la pluie brute en pluie nette destinée au ruissellement. Elle constitue donc l'élément clé des modèles hydrologiques car elle est responsable du volume de ruissellement. Il existe différentes formulations plus ou moins élaborées de la fonction de production. La plus connue et la plus simple est celle qui définit le coefficient de ruissellement comme le rapport de la lame ruisselée à la pluie brute tel que :

$$P_E(t,i) = C_R(i) * P_B(t)$$

où : $P_E(t,i)$ est la lame ruisselée au moment t d'une maille de classe hydrologique i,

$C_R(i)$ est le coefficient de ruissellement de la maille de classe hydrologique i,

$P_B(t)$ est la pluie brute tombée dans la même maille au moment t.

- Fonction de transfert

C'est l'opération hydrologique permettant le transfert de la lame ruisselée au débit à l'exutoire. Elle régit le transport à l'exutoire du volume ruisselé déterminé par la fonction de production.

La fonction de transfert (ou routage) permet donc de traduire la façon dont la pluie destinée à l'écoulement atteint l'exutoire du bassin, tout en précisant le déroulement temporel. Elle permet d'estimer le temps moyen mis par une quantité de pluie tombée sur un bassin pour atteindre l'exutoire.

- Les écoulements

Le débit de la rivière est composé principalement de trois types d'écoulement :

- L'écoulement direct de surface qui représente le ruissellement. C'est un écoulement rapide.
- L'écoulement retardé souterrain, appelé débit de base. Alimenté par les nappes d'eaux souterraines, c'est un écoulement lent à cause du transit de l'eau dans le sol et le sous-sol.

L'écoulement dit hypodermique, sous-entend, quant à lui, un écoulement au niveau de la couche superficielle du sol.

- Etats de surface

Selon CASENAVE et VALENTIN (1989), « *Le terme état de surface désigne un système de surfaces élémentaires à un instant donné, système qui constitue un ensemble homogène au sein duquel les différentes composantes entretiennent des relations fonctionnelles quant au ruissellement et à l'infiltration* ».

On peut donc les définir comme l'ensemble des caractéristiques topographiques ainsi que la structure et les caractéristiques physionomiques de la couverture végétale et des formes d'utilisation du sol. Ils ont un impact particulièrement important sur les écoulements. Le sol joue en effet un rôle capital dans la distribution de l'eau. Il régule sa circulation et contribue notamment à un apport régulier pour les végétaux. Cependant, suivant les caractéristiques du sol et celles des précipitations, les conséquences observées sont différentes.

Si le sol est sec ou si sa surface est imperméable, l'eau ne s'infiltrer pas et a tendance à ruisseler. Le même phénomène se produit quand le sol est en pente car l'eau est peu retenue, elle n'a pas le temps de s'infiltrer et elle ruisselle jusqu'à un terrain plus favorable à l'infiltration.

La végétation exerce aussi un fort impact. Un sol recouvert de végétation ralentit le ruissellement. Par ailleurs, les plantes prélèvent une certaine quantité d'eau par leurs racines, eau qu'elles transpirent ensuite vers l'atmosphère, diminuant le taux d'humidité du sol et donc les risques de saturation en eau.

Connaître l'état de surface est donc important pour suivre notamment la capacité du sol à conserver l'eau et à la capter.

A ce titre, l'utilisation des cartes des types d'occupation du sol est très utile (cf. chapitre 5).

Elle constitue une carte thématique de la couverture physique de la surface du bassin mettant en évidence la nature des objets : forêts, cultures, zone urbaine, surfaces en eau, etc.

2.2. Point des connaissances

Sans être exhaustif, Il est nécessaire de présenter une synthèse des travaux antérieurs, en particulier ceux dont nous allons utiliser la ou les méthode(s) ou exploiter quelques résultats. Le choix de ces travaux a évidemment tenu compte de l'aire d'étude, des méthodes d'étude choisies et des problématiques développées. Nous avons privilégié les thèmes suivants :

- la variabilité climatique,
- la caractérisation de la variabilité hydroclimatique et l'étude du fonctionnement hydrologique,
- l'utilisation des modèles hydrologiques dans l'étude de la dynamique hydroclimatique,
- la dynamique des états de surface et des écoulements à l'échelle d'un bassin.

2.2.1. Variabilité climatique

De tous les paramètres climatiques, la pluie est le plus déterminant en milieu tropical, en particulier en Afrique de l'Ouest.

Dans son travail sur la caractérisation de la saison des pluies dans le centre-ouest du Sénégal, NDONG (2003) montre qu'il y a une tendance à la baisse des hauteurs de pluie de 1951 à 2000 et il détecte une rupture dans les séries pluviométriques en 1969. De l'étude comparative des sous périodes 1951-1969 (humide) et 1970-2000 (sèche), il ressort que les

débuts de saison des pluies étaient plus généralement plus précoces lors de la première sous période puis tardifs à partir des années 1970.

De leur côté, HOUNDENOU *et al.* (2002) mettent en évidence une forte instabilité et une réduction de la saison humide sur le bassin béninois du fleuve Niger. Ils montrent aussi que les séries pluviométriques de ce bassin connaissent une baisse marquée sur la période 1960-1990 avec une recrudescence de « pluies tardives ».

L'analyse des pluies dans la région de l'Atakora au nord-ouest du Bénin réalisée par HOUNDENOU et HERNANDEZ (1998) confirme l'existence d'une péjoration climatique sur la période 1960-1990. Cette péjoration se caractérise par une diminution remarquable des abats pluvieux, une réduction considérable du nombre de jours de pluie, un début tardif et une fin précoce de la saison pluvieuse.

En revanche, BOKO et ADJOVI (1994) n'ont pas pu identifier clairement une tendance dans les séries pluviométriques des stations du Bénin méridional, une région de forte variabilité des précipitations. Toutefois, les résultats de cette étude suggèrent l'existence d'une tendance à la baisse à partir des années 1970, qui reste à être confirmée par un autre test plus puissant que les tests utilisés dans leur étude, basés sur le coefficient « R_s » de Spearman et sur le coefficient « t » de Mann-Kendall.

La plupart des auteurs ont détecté une tendance à la baisse dans les séries pluviométriques ouest-africaines, ce qu'on essaiera d'approfondir dans notre domaine d'étude. Mais quel serait l'impact de ces modifications sur le rythme hydrologique ? Les études suivantes nous permettront de mieux le cerner.

2.2.2. Caractérisation de la variabilité hydroclimatique et étude du fonctionnement hydrologique

Dans une étude sur l'influence des fluctuations pluviométriques sur les écoulements, BRICQUET *et al.* (1995) mettent en évidence l'impact des déficits pluviométriques sur l'écoulement du bassin du fleuve Niger à Koulikoro au Mali. Les auteurs ont aussi montré qu'une baisse de la pluviométrie entraîne la diminution de l'écoulement souterrain et l'augmentation du coefficient de tarissement.

Par ailleurs, VISSIN (1998, 2001) a montré que les chroniques de la pluviométrie sur le bassin versant béninois du fleuve Niger ont connu une « rupture de stationnarité » en 1972.

Les changements pluviométriques observés se sont largement amplifiés dans les écoulements et la recharge des sous bassins versants. Il a aussi souligné que les déficits les plus marqués s'observent au cœur de la saison des pluies, entraînant des déficits d'écoulements très sensibles. Ainsi, la sécheresse pluviométrique des dernières décennies serait responsable de la sécheresse hydrologique enregistrée dans le bassin.

MAHE et OLIVRY (1995) ont montré que les variations des précipitations et les écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale sont liées aux flux d'humidité associés à la mousson et à l'alizé maritime de l'Atlantique. L'analyse des débits a été réalisée pour huit régions hydroclimatiques définies par les auteurs. Les relations pluie-débit ont permis d'évaluer les écoulements côtiers pour les petits bassins.

A partir des écarts centrés réduits des précipitations annuelles, les auteurs ont pu montrer que la hauteur de pluie diminue progressivement de 1951 à 1989, avec une rupture en 1970. Ainsi, selon eux, le déficit pluviométrique des décennies 1970 et 1980 conduit à une forte diminution du coefficient d'écoulement sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. Ces diminutions semblent liées à une modification des caractéristiques de la réponse des sols aux précipitations et à un changement des relations rivière-aquifère.

Dans une étude sur le bilan hydrologique en Guinée et au Togo, SUTCLIFFE et PIPER, (1986) ont appliqué une méthode de régionalisation fondée sur une expression simplifiée du bilan hydrologique. Ces auteurs mettent en relation les pluies nettes et la lame écoulée annuelle. Les corrélations obtenues au Bénin et au Togo sont satisfaisantes.

RODIER (1964) a, pour sa part, mis en évidence la dépendance du débit non seulement par rapport aux facteurs climatiques mais aussi au degré de perméabilité du sol ou des couches géologiques, à la pente, à la taille du bassin et aux formations végétales.

Abordant ce même axe de recherche, LE BARBE *et al.* (1993) ont analysé des données hydrométriques collectées au Bénin jusqu'en 1984, et proposent différentes méthodes d'estimation des écoulements. Leur étude prend en compte le bassin du Niger au Bénin et met en évidence des différences très nettes entre la zone de socle et celle de grès. L'importance des étiages et le tarissement sont fonction des superficies de grès. En conséquence, la répartition mensuelle des apports est très différente d'une formation géologique à l'autre. Pour les sous bassins situés sur la zone gréseuse, les apports de saison sèche représentent entre 10 et 20 % des volumes écoulés. Pour le grès, du fait de sa grande perméabilité, le

réservoir peut avoir le temps de se vider entre deux pluies successives, ramenant après chaque pluie son niveau de remplissage à son état initial.

Sur les autres formations géologiques, le socle en particulier, la perméabilité étant plus faible, il y a en revanche accumulation d'eau. Le niveau de remplissage varie alors d'autant plus que les pluies d'hivernage sont plus fréquentes.

L'évolution de la fonction de production mise en évidence par cette étude montre le comportement différent des formations du socle et des grès que drainent les affluents du Niger au Bénin.

De ces différents travaux, il ressort un impact très marqué des déficits pluviométriques des dernières décennies sur les écoulements et la recharge des bassins. Tout en mettant en évidence la dépendance de l'écoulement de la pluie et de la recharge, ces auteurs ont caractérisé le fonctionnement différentiel des formations géologiques. Toutefois, ces études, tout en aboutissant à des résultats intéressants, présentent quelques imprécisions. Elles ne sont faites qu'aux pas de temps mensuel et annuel et souvent ne mettent pas assez en évidence l'impact de la rupture pluviométrique des années 1970, ni le poids des mois humides dans la péjoration pluviométrique observée déjà depuis plus de trois décennies. Notre thèse tentera de le faire aux pas de temps annuel, mensuel et journalier, en utilisant, à l'instar de certains auteurs, des modèles hydrologiques pour mettre en évidence les relations hydroclimatiques et simuler les écoulements des bassins.

2.2.3. L'utilisation des modèles hydrologiques dans l'étude de la dynamique hydroclimatique

PERRIN (2000) montre que la simulation par des modèles mathématiques de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant a connu un essor considérable depuis le début des années 1960 grâce à l'évolution des capacités de calcul. Il existe aujourd'hui un nombre considérable de modèles, parmi lesquels on retrouve les modèles conceptuels ou empiriques globaux qui représentent le lien entre la pluie et le débit par agencements variés de réservoirs. Selon l'auteur, toutes les structures de ces modèles ont reçu les mêmes données et leurs paramètres ont été calés à l'aide d'une même procédure locale d'optimisation, la méthode « pas-à-pas », qui s'est montrée fiable pour localiser des optima satisfaisants. De nouvelles formulations de critères d'optimisation (critère de Nash) et du critère de bilan, jugées plus satisfaisantes, ont été proposées. Les résultats des tests indiquent

que les modèles « à réservoirs » sont nettement plus satisfaisants qu'un modèle de type « boîte noire » ne comprenant pas de schéma interne de suivi d'humidité du bassin. Par ailleurs, la structure du modèle, c'est-à-dire sa formulation interne, est apparue déterminante pour le succès du modèle. Il insiste également sur la complémentarité entre les différentes structures des modèles. Partant de ce constat, l'auteur opère des modifications dans la structure simple du modèle GR3J, qui était initialement parmi les plus performants, en une nouvelle organisation contenant quatre paramètres : la structure du modèle GR4J. Elle est jugée plus satisfaisante que les versions antérieures, notamment dans la simulation des étiages.

Les recherches de LE LAY (2002), faites dans le cadre du projet CATCH (Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique), ont simulé des écoulements de surface sur la période 1952-1984 à l'aide de deux modèles hydrologiques conceptuels simples à pas de temps mensuels (modèle GR2M et modèle de Conway) sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou (10 326 km²) au Bénin. Les résultats obtenus mettent en évidence la bonne aptitude de ces modèles à simuler les écoulements du bassin.

L'étude de OUEDRAOGO (2001) s'est intéressée aux limites de la notion de « norme hydrologique » et de « durée de retour » dans une région qui connaît un contexte climatique déficitaire depuis plus de trente ans. L'auteur utilise les modèles GR2M et Conway de la relation pluie-débit, basée sur les équations du bilan hydrique pour procéder à la régionalisation des lames d'eau écoulées mensuelles et annuelles, et cela afin de faire l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Il montre que les effets de la péjoration climatique se manifestent par une réduction des lames écoulées sur la période 1971-1997.

ARDOIN-BARDIN (2004) analyse le développement de modèles des régimes hydrologiques des grands bassins régionaux couvrant seize pays africains de la façade atlantique situés entre 1,25° et 24,25° de latitude nord . L'auteur prévoit la transmission de ces outils de modélisation aux gestionnaires des ressources en eau dans le but d'utiliser les simulations de pluie issues des scénarii climatiques. L'étude met aussi en évidence la sensibilité des modèles aux données d'entrée et aux paramètres choisis.

Le modèle GR2M utilisé par LELAY (2002) et OUEDRAOGO (2001) révèle une certaine fiabilité mais montre quelques difficultés à reproduire toute la variabilité des

écoulements (saison humide, saison sèche). Ainsi, il ne prend pas en compte les paramètres des états de surface qui jouent un rôle non négligeable dans la dynamique hydrologique. Certains modèles, notamment GR2M et Conway, sont marqués par une incapacité à simuler les écoulements journaliers.

Le modèle GR4J, qui a l'avantage de prendre en compte le pas de temps journalier, a été utilisé dans notre étude, ce qui permettra de simuler les événements extrêmes dans le bassin à un pas de temps plus fin. Ce modèle est robuste et il a des critères d'optimisation performants. Mais il faut souligner que les données journalières ne sont toujours pas disponibles dans les pays africains. En outre, ce modèle ne prend pas en compte non plus de façon quantitative les états de surface puisqu'il est de type empirique et que ses paramètres ne se prêtent à aucune interprétation physique.

Ces insuffisances du modèle GR4J devront nous conduire à rechercher des méthodes complémentaires mettant en évidence l'impact de la dynamique des états de surface sur les régimes hydrologiques.

2.2.4. La dynamique des états de surface et les écoulements d'un bassin

Dans cette sous-section, on fait une synthèse de quelques travaux réalisés en Afrique de l'Ouest. Une étude exhaustive (méthodes et résultats) sera faite dans le chapitre 5 consacré à l'étude de l'impact de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin.

GREGOIRE et GIOVANNI (1990) ont utilisé le suivi par télédétection pour détecter des changements dans les états de surface des bassins versants du Haut-Sénégal, de la Gambie et du Rio de Corubal. Les données enregistrées ont montré les possibilités qu'elles offrent pour la caractérisation des changements saisonniers des états de surface pouvant avoir des répercussions sur les écoulements. Les auteurs soulignent aussi que, partant de ces enregistrements, des indices ou paramètres descriptifs des changements d'états de surface peuvent être définis.

Cette méthode, quoique fiable, ne peut être utilisée dans notre travail car nous ne disposons que de deux images satellitaires issues de deux missions (1979 et 1992).

LAMACHERE et PUECH (2001) ont montré qu'en Afrique de l'Ouest la description et la cartographie des états de surface peuvent être réalisées en utilisant les relations hydro-pluviométriques du catalogue de CASNAVE et VALENTIN (1989). Ces relations ont été

établies à l'échelle du mètre carré pour de fortes averses. Les auteurs proposent l'utilisation des concepts de pluie utile et du potentiel de ruissellement afin d'appliquer ces relations à des averses naturelles, aux intensités faibles et variables. Le passage des potentiels de ruissellement aux écoulements réels s'effectue à l'aide d'une fonction de calage qui intègre les phénomènes de transfert à l'échelle des bassins versants.

Cette approche méthodologique a été appliquée à la prédétermination des crues de fréquence décennale pour des petits bassins versants en zone sahélienne et tropicale sèche dans le cadre d'un programme financé par la FAO et exécuté conjointement par le CIEH, l'IRD (ex-ORSTOM) et le CEMAGREF (FAO, 1996). Les résultats des travaux montrent qu'aucun coefficient de calage n'est nécessaire pour les très petits bassins versants imperméables de superficie inférieure à 10 km². Pour les autres bassins, plus le bassin versant est grand et plus il est perméable, plus faible est le coefficient de calage. Appliquée au cours d'une saison des pluies, la même méthodologie permet de modéliser le comportement hydrologique des sols d'un bassin versant en tenant compte de l'évolution temporelle des états de surface (végétation, travail du sol, encroûtement). L'exemple du calcul des apports potentiels, annuels et mensuels du petit bassin versant de Bindé (région de Manga, Burkina Faso) souligne qu'il est nécessaire d'établir une fonction de calage dont les paramètres varient au cours de la saison des pluies afin de rendre compte d'un fonctionnement hydrologique complexe.

Là encore, nous ne disposons pas de données suffisantes pour appliquer cette méthode, mais la cartographie des états de surface nous sera utile.

Par ailleurs LAMACHERE (1994) a prouvé qu'en zone sahélienne et soudanienne, les labours ou les sarclages modifient radicalement le comportement hydrodynamique superficiel des sols cultivés et qu'en zone soudanienne la croissance du couvert végétal herbacé sur brûlis modifie tout aussi radicalement le comportement hydrodynamique superficiel des sols de savane. Il montre aussi que la position de la surface élémentaire sur le versant est également susceptible de faire évoluer plus ou moins rapidement les caractéristiques de son état de surface en fonction des apports hydriques. L'auteur précise toutefois que l'étude de l'évolution des états de surface et de leur comportement hydrodynamique est un domaine encore très peu exploré en zones sahélienne et soudanienne.

Sans en considérer les conséquences sur l'écoulement, les travaux de POCCARD et RICHARD (1996), RICHARD et POCCARD (1998), POUCHIN *et al.* (2002) ont utilisé le NDVI (indice de végétation normalisé) pour étudier la dynamique des états de surface. Ils ont, dans leur recherche, mis en évidence une relation entre les précipitations mensuelles et le NDVI en Afrique tropicale. Ainsi, la réponse du NDVI à la pluie peut se réaliser avec un décalage de un ou deux mois.

Dans notre étude, nous allons également utiliser le NDVI (indice de végétation normalisé) pour analyser la dynamique des états de surface et tenter d'établir une relation entre le NDVI et les pluies. Mais aucun de ces auteurs ayant travaillé sur les NDVI n'a établi de relation entre ces indices et l'écoulement. L'un des objectifs de cette thèse étant d'analyser l'impact de la dynamique des états de surface sur l'écoulement du bassin, nous allons tenter de le faire.

L'analyse des travaux a permis de faire l'état des lieux des recherches entreprises dans le même axe scientifique que notre thème. Elle nous a aussi permis d'identifier avec plus de précision quelques-unes des données et les méthodes les mieux adaptées à cette étude.

2.3. Les données : présentation et analyse critique

2.3.1. Méthode de collecte de données

Elle consiste à rechercher des documents scientifiques généraux et spécifiques, des documents cartographiques, des données statistiques à l'ASECNA et au Service de l'Hydrologie de la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau) et autres documents pouvant nous aider à améliorer nos connaissances sur notre thème d'étude. Cette recherche est essentiellement faite dans les centres de documentations (Centre de documentation de la DG-Eau, de la faculté de Lettres, Arts et Sciences Humaines (FLASH)), les bibliothèques (bibliothèque Centrale de l'Université d'Abomey-Calavi, bibliothèque de la faculté des Sciences Agronomiques), dans la base documentaire du Centre de Recherches de Climatologie de l'Université de Bourgogne à Dijon et sur Internet.

Ensuite, pour mieux cerner les manifestations hydro-climatologiques et les états de surface dans le bassin, des observations, des relevés et des entretiens avec des personnes ressources ont été réalisés. Les outils de collecte d'informations sur le terrain ont été la grille d'observation et le guide d'entretiens portant sur les phénomènes hydroclimatiques et les ressources en eau dans le bassin suivant les techniques d'échantillonnage. Ainsi, un

échantillon de cent vingt six ménages (soient quarante-deux ménages par sous bassin) a été sélectionné suivant la méthode d'échantillonnage stratifiée (taux d'échantillonnage moyen de 26 %) appuyé par un échantillonnage aléatoire. Un questionnaire a été utilisé comme moyen d'enquête auprès des populations.

2.3.2. Historique et présentation du réseau d'observations météorologiques

Toute étude sur la variabilité hydroclimatique au Bénin est confrontée actuellement à des difficultés. D'abord, en dehors des banques de données satellitales, seule l'ASECNA (Agence pour la Sécurité et la Navigation Aérienne en Afrique et Madagascar) fournit les relevés de terrain et, par ailleurs, la distribution géographique des postes d'observations météorologiques constitue un handicap avec une faible densité spatiale du réseau limitant les analyses statistiques multivariées.

L'histoire de la création du réseau est étroitement liée à l'évolution de la colonie du Dahomey et à son insertion dans l'agriculture commerciale. La plupart des premières stations créées étaient situées sur la côte.

On distingue quatre générations de stations, à savoir la génération 1921, la génération 1922-1950, la génération 1951-1960 et la génération 1961-1990 (BOKO, 1988 ; HOUNDENOU, 1999). Ainsi, les relevés ne couvrent pas des périodes identiques dans les différentes stations et on note aussi beaucoup de lacunes.

Sur le plan spatial, le réseau météorologique béninois est caractérisé par une anisotropie spatiale des données qui constitue un paramètre important à prendre en compte dans l'interprétation des résultats d'analyse des données. Les départements de l'Alibori et du Borgou, s'étendant jusqu'aux rives du fleuve Niger sur une superficie de 51 082 km², ne sont couverts que par quinze postes d'observations (1 poste pour 3 405 km²) dont deux stations synoptiques, soit 22 % des stations pour 45 % de la superficie du pays. Dans l'Atacora et la Donga, au nord-ouest du pays, on note onze stations réparties sur 31 200 km² (1 poste pour 2 836 km²), soit 14 % des postes pour 27 % de la superficie. Le bassin béninois du fleuve Niger, localisé dans cette partie Nord-Bénin, est couvert par treize stations pluviométriques (Figure 2.1) pour 48 000 km² (1 station pour 3 692 km²), soit 17,10 % de l'ensemble des stations pour 42 % de la superficie du Bénin.

Dans cette thèse, nous avons utilisé deux types de données : les données brutes et les données élaborées.

2.3.3. Données brutes

2.3.3.1. Choix de l'échelle spatio-temporelle

Le choix des pas de temps annuel, mensuel, journalier et de l'espace couvrant les trois sous bassins du Niger au Bénin se justifie par une suite de contraintes liées à l'acquisition des données de base, aux simulations envisagées et à l'ambition de l'étude.

L'étude climatique nécessite, en principe, un réseau climatologique dense, d'où la prise en compte de certaines stations des pays limitrophes du bassin. Dans le contexte africain, il est parfois difficile d'obtenir, pour tous les pays, des données à un pas de temps plus fin que mensuel. En outre, toutes les stations n'ont pas une série de longueur identique, car elles ne sont pas toutes de la même génération.

Pour cette étude hydro-climatologique, afin de respecter une bonne homogénéité des séries, nous avons choisi de travailler sur la période 1955-1992. Ce choix est motivé par quatre raisons principales :

- 1955-1992 est la seule série commune à toutes les stations hydrométriques et climatologiques considérées ;
- nous avons voulu considérer un maximum de stations pour pallier l'insuffisance du réseau d'observations du bassin, de manière à couvrir le plus vaste espace géographique possible, pour les besoins de cartographie des indices définis plus loin ;
- il est nécessaire de travailler sur une longue série pour obtenir des analyses fréquentielles fiables. La période choisie (1955-1992) présente aussi l'avantage de prendre en compte des séquences d'années pluvieuses (1955-1972) et d'années sèches (1973-1992) ;
- il y a trop de données manquantes dans la plupart des séries hydrologiques existantes après 1992, surtout à la station de Gbassè dans le sous bassin de la Sota.

2.3.3.2. Données climatologiques

Les données de base utilisées sont exclusivement des données pluviométriques journalières recueillies à l'ASECNA (Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar) de Cotonou, au CRC (Centre de Recherches de Climatologie) de l'Université de Bourgogne et celles de la base de données BADOPLU (Base de Données

Pluviométriques de l’Afrique de l’Ouest) de l’IRD au Bénin. Seules les stations ayant moins de 5 % de données manquantes ont été retenues. Ainsi, nous avons retenu vingt-deux sites (stations synoptiques, stations climatologiques et postes pluviométriques). Le fichier des données comprend onze stations du bassin, six stations hors du bassin localisées au Bénin et cinq stations situées en dehors du bassin et localisées dans les pays limitrophes du Nord-Bénin.

On trouvera sur la figure 2.1 et dans les tableaux 2.1 a, b, c, la liste des stations retenues.

A partir du fichier originel (précipitations journalières), nous avons mis au point le fichier des données mensuelles et annuelles pour la suite de l’étude. Sur les vingt-deux stations sélectionnées neuf présentent des données manquantes reconstituées au moyen d'une régression linéaire.

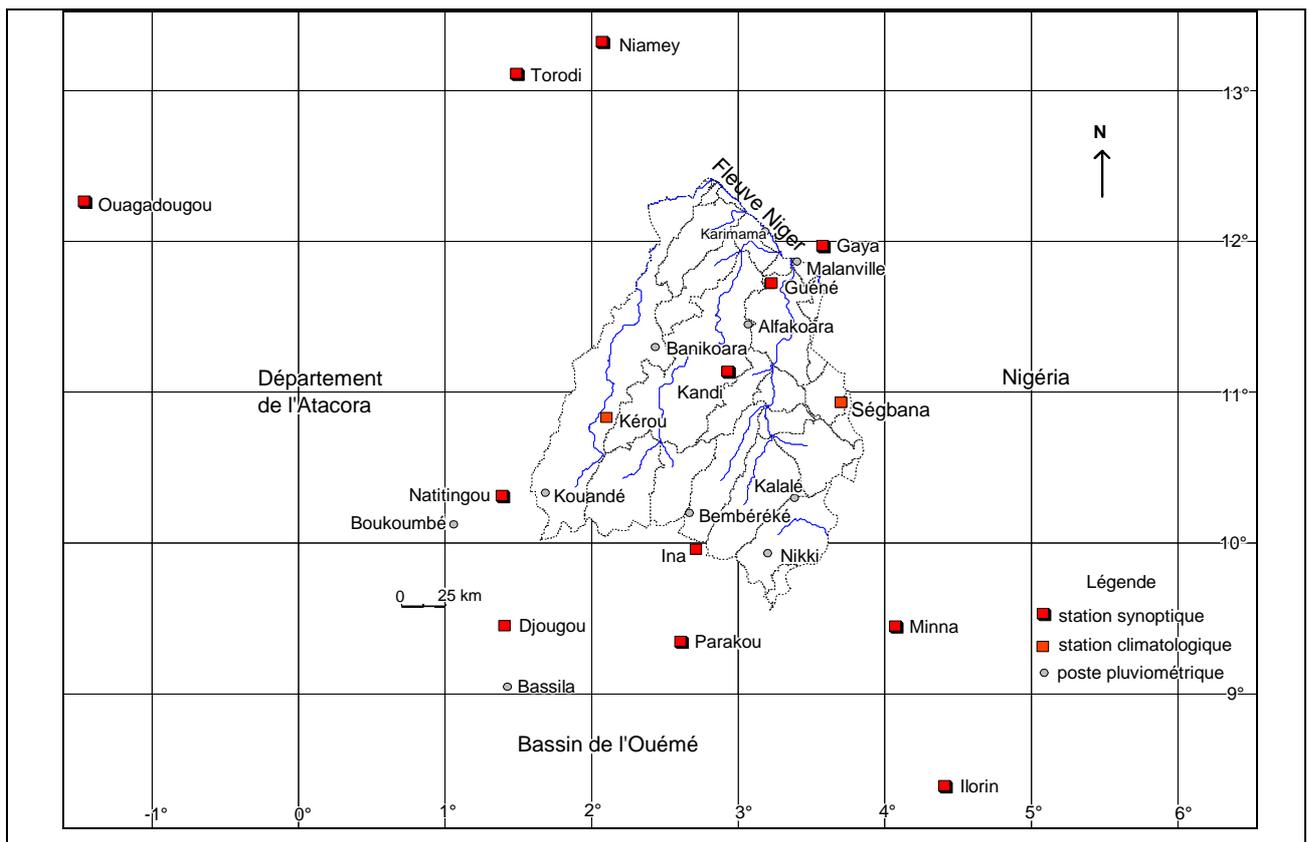


Figure 2.1 : Réseau pluviométrique du bassin béninois du fleuve Niger

Tableau 2.1.a : Stations météorologiques du bassin béninois du fleuve Niger

	Nom des stations	Type	Lat.	Long.	Altit.	Mesures	Nbre d'obs/jour	Ouverture
1	<i>Banikoara</i>	p	11°18 N	2°26 E	310 m	précipitation	1	1954
2	<i>Bembèrèkè</i>	p	10°12 N	2°40 E	491 m	précipitation	1	1921
3	<i>Ina</i>	clim	9° 58 N	2°44 E	358 m	☐☐	3	1944
4	<i>Kalalé</i>	p	10°18 N	3°23 E	410 m	précipitation	1	1957
5	<i>Kandi</i>	synop	11°08 N	2°56 E	290 m	☐☐☐☐	8	1921
6	<i>Kouandé</i>	p	10°20 N	1°41 E	442 m	précipitation	1	1931
7	<i>Malanville</i>	p	11°52 N	1°39 E	160 m	précipitation	1	1942
8	<i>Ségbana</i>	clim	10°56 N	3°42 E	277 m	☐☐	3	1954
9	<i>Alfakoara</i>	P	11°27N	3°04E	342 m	précipitation	1	1969
10	<i>Kérou</i>	P	10°50N	2°06E	256 m	précipitation	1	1960
11	<i>Karimama</i>	P	12°10N	3°20E	172 m	précipitation	1	1976

Source s: ASECNA et BADOPLU (IRD)

Tableau 2.1.b : Stations météorologiques béninoises complémentaires

	Nom des stations	Type	Lat.	Long.	Altit.	Mesures	Nbre d'obs/jour	Ouverture
1	<i>Boukoumbé</i>	p	10°11 N	1°06 E	247 m	précipitation	1	1923
2	<i>Djougou</i>	clim	9°42 N	1°40 E	439 m	☐☐	3	1921
3	<i>Natitingou</i>	synop	10°19 N	1°23 E	460 m	☐☐☐☐	8	1921
4	<i>Parakou</i>	synop	9°21 N	2°36 E	392 m	☐☐☐☐	8	921
5	<i>Tanguiéta</i>	p	10°37 N	1°16 E	225 m	précipitation	1	1939
6	<i>Nikki</i>	p	9°56 N	3°12 E	402 m	précipitation	1	1921

Source : ASECNA et Base de données du Centre de Recherche de Climatologie (CRC)

Tableau 2.1.c : Stations météorologiques étrangères complémentaires

N°	Nom des stations	Pays	Type	Lat.	Long.	Altit.	Mesures	Ouverture
1	<i>Gaya</i>	Niger	synop	11°53 N	3°27 E	202 m	☐☐☐☐	1931
2	<i>Minna</i>	Nigéria	synop	9°40 N	4°10 E	262 m	☐☐☐☐	1915
3	<i>Niamey</i>	Niger	synop	13°29 N	2°10 E	223 m	☐☐☐☐	1905
4	<i>Torodi</i>	Burkina-Faso	synop	13°07 N	1°48 E	274 m	☐☐☐☐	1931
5	<i>Ouagadougou</i>	Burkina-Faso	synop	12°21 N	1°30 E	316 m	☐☐☐☐	1902

Sources : Base de données du Centre de Recherches de Climatologie (CRC) et BADOPLU (IRD)

☐☐☐☐ vent, température, humidité, précipitation, insolation, évaporation, pression

☐☐ vent, température, humidité, précipitation, insolation, évaporation

p = pluviométrique - clim = climatologique - syno = synoptique

2.3.3.3. Données hydrométriques

Elles proviennent des stations de Kompongou sur la Mékrou, du pont de la route Kandi-Banikoara sur l'Alibori, de Gbassè et de Coubéri sur la Sota et de Malanville sur le Niger (Figure 2.2). Il s'agit des mesures de hauteurs d'eau et de jaugeage permettant de définir les courbes de tarage utilisées pour transformer les hauteurs d'eau en débits par le Service de l'Hydrologie (LE BARBE et BOREL, 1987). Le choix de deux stations hydrométriques sur la Sota se justifie par le fait que chacune des stations enregistrent la dynamique hydrologique de deux formations géologiques différentes : Gbassè en amont sur les formations granito-gneissiques et Coubéri en aval sur les grès.

- Station de Kompongou sur la Mékrou

Installée en 1950, elle est située à 11°24' de latitude nord et 01°11' de longitude est et couvre le bassin versant d'une superficie de 5 670 km² (LE BARBE *et al.*, 1993). Nous disposons de relevés sur la période 1955-1994. Avec moins de 8 % de données manquantes, cette station dispose de vingt-cinq années complètes. La série observée a été complétée chaque fois que cela était possible à partir de la régression linéaire et par corrélation.

- Station du pont de la route Kandi-Banikoara sur l'Alibori

Cette station est située à 11°14' de latitude nord et 02°34' de longitude est. Elle couvre le bassin versant pour une superficie de 8 170 km². La station présente plus de trente-cinq années d'observations complètes sur la période 1952-1995. Toutefois, 4 % de données manquantes ont dû être comblées à partir de la régression linéaire.

- Station de Gbassè

Située à 10°59' de latitude nord et 03°15' de longitude est sur le pont de la route Kandi-Ségbana, la station de Gbassè sur la Sota a été installée le 25 juin 1952. Elle est accessible en toute saison et couvre le bassin versant d'une superficie de 8 300 km². Du fait de son éloignement, cette station présente des données manquantes au cours des années 1952, 1954, 1959, 1962, 1967, 1975, 1978, 1986, 1988, 1990. Ces lacunes, estimées à environ 7 % ont dû être reconstituées : nous disposons ainsi de trente années complètes d'observations sur la période 1952-1992.

- Station de Coubéri

Installée sur la Sota en 1953, elle est située à 11°45' de latitude nord et 03°20' de longitude est, sur la rive gauche, sur la route Ferikéré-Coubéri, à 5 km de Malanville (LE BARBE *et al.*, 1993). Elle couvre une superficie de 13 410 km² et connaît une cadence de relevés d'une ou deux lectures par jour. Elle présente généralement des données manquantes sur les années 1953, 1980, 1988, 1993 et 1997. Plus de trente-cinq années complètes ont été observées à cette station sur la période 1952-1997.

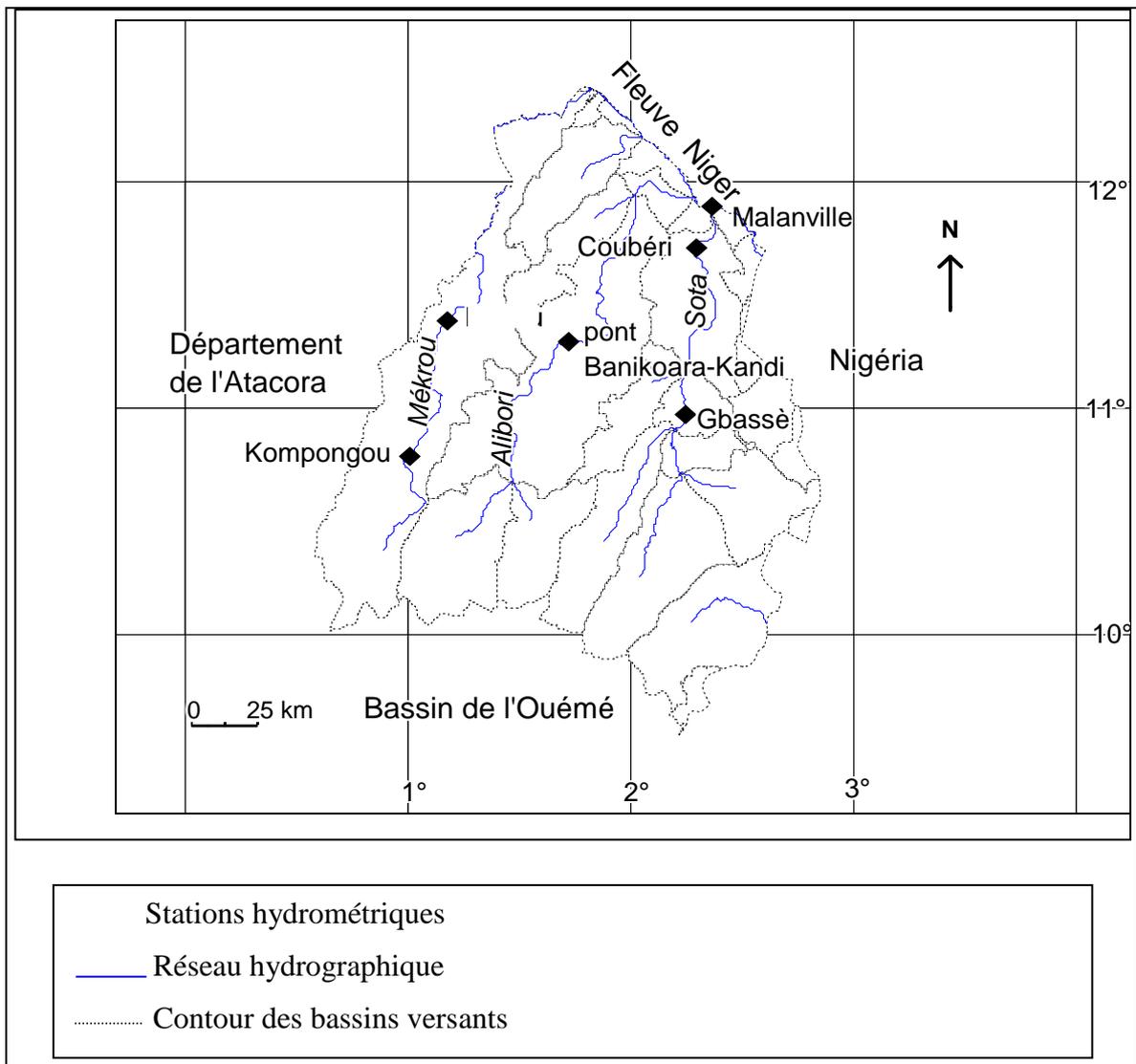


Figure 2.2 : Réseau hydrométrique du bassin béninois du fleuve Niger

- Station de Malanville sur le Niger

Située à 11°52' de latitude nord et 2°23' de longitude est, elle a été mise en place le 23 juillet 1952 et contrôle une superficie de 1.000.000 km².

L'analyse des jaugeages effectués à cette station indique que les cotes à l'échelle sont liées au débit du Niger et non au débit de la confluence avec la Sota. Vingt-neuf années de données complètes sur la période 1952-1995 ont été rassemblées.

Toutes ces stations hydrométriques, gérées jusqu'en 1979 par l'Institut pour la Recherche et le Développement (IRD), sont depuis 1980 sous la responsabilité directe du Service de l'Hydrologie (SH) de la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau) du Bénin qui manque de moyens pour bien entretenir ce réseau.

2.3.3.4. Elimination des données douteuses

Une vérification manuelle systématique a été réalisée sur les fichiers de données brutes des hauteurs de pluie et des débits journaliers de l'ensemble du réseau hydro-pluviométrique. On a cherché à éliminer de la base de données toutes les erreurs aléatoires flagrantes dues à des fautes de frappe ou à la saisie des relevés, parfois purement inventés par les lecteurs. Cet exercice a entraîné la suppression de certaines données trop douteuses. Ce contrôle n'a permis d'éliminer que les valeurs manifestement fausses, mais la justesse des données conservées n'en est pas pour autant garantie.

2.3.3.5. Données des états de surface

Les mesures hydrologiques effectuées sous pluies simulées en Afrique de l'Ouest ont mis en évidence l'influence déterminante de trois facteurs principaux sur le comportement des sols à l'infiltration et au ruissellement (CASENAVE et VALENTIN, 1989) : le type de sol, le couvert végétal et la structure pédologique superficielle. Dans cette étude, nous utiliserons, le couvert végétal, les sols en culture et en jachère auxquels on a ajouté la structure géologique du bassin qui est déterminante dans la compréhension de la dynamique hydrologique souterraine.

2.3.4. Données élaborées

2.3.4.1. Données hydro-climatologiques

Le Service de l'Hydrologie a pour mission, entre autres, de dresser l'inventaire des ressources en eaux superficielles du Bénin pour permettre la définition des moyens à mettre en œuvre pour les valoriser et, le cas échéant aussi, pour prévenir les risques d'inondation. A ces fins, le Service de l'Hydrologie met à la disposition des aménageurs des données hydro-pluviométriques élaborées, plus facilement utilisables que les données brutes. Il s'agit :

- des cartes numérisées sous format " SURFER " des champs pluviométriques mensuels, de 1950 à nos jours ;
- des cartes numérisées des champs de paramètres journaliers d'un modèle stochastique décrivant les distributions des nombres et hauteurs d'événements pluvieux avant et après 1970 ;
- de cartes de l'ETP moyenne mensuelle et annuelle.

Par ailleurs, à partir des données journalières ponctuelles des différentes stations pluviométriques, nous avons calculé des indices régionalisés des hauteurs de pluies journalières, mensuelles et annuelles par interpolation linéaire aux nœuds d'une grille régulière de 0°125 de résolution et par krigeage sur tous les différents sous bassins du Niger au Bénin. Puis, nous avons déterminé les lames écoulées dans les différents sous bassins à partir des volumes et des débits d'eau fournis par le SH/DG-Eau. Enfin, nous avons calculé l'ETR et estimé l'infiltration à partir de la formule du bilan hydrologique pour les différents sous bassins. Les méthodes utilisées pour ces interpolations et calculs sont développées dans la section 2.4.3.6.

2.3.4.2. Données caractérisant les états de surface

Il s'agit d'une part des données fournies par les cartes des types d'occupation du sol de 1979 et 1992 dont la méthode de réalisation est présentée dans la section 2.4. Les types d'occupation du sol suivants ont été identifiés : forêt et galerie forestière, forêt claire et savane boisée, savane arborée et arbustive, mosaïque de cultures et de jachères et la prairie. La superficie de chacun des états de surface élémentaires a été déterminée pour les années 1979 et 1992.

D'autre part, pour décrire la variabilité interannuelle de l'activité végétative, un indice de végétation, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), est extrait de la base de

données NOAA-AVHRR à une résolution de 8 km du groupe GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) de la NASA (NASA, 2004) pour la période 1982-1992. Partant de cette base, nous avons constitué une mini-base de données de NDVI de chacun des sous bassins et pour chaque type d'occupation du sol.

Le NDVI ne permet pas de distinguer directement la physiologie des types végétaux mais plutôt leur phénologie générale. Il est fortement corrélé à la production primaire nette et à l'accumulation de matière sèche (GOND *et al.*, 1992 ; DAVENPORT et NICHOLSON, 1993). Toutes surfaces confondues, les valeurs normalisées du NDVI sont comprises entre -1 et 1. Celles de la végétation varient en moyenne entre 0,1 et 0,8, traduisant une forte réflectance dans le proche infrarouge et faible dans le visible. Les fortes valeurs de NDVI sont associées aux densités les plus importantes des biomasses vertes (BARIOU *et al.*, 1986). Mais, cet indice a également tendance à saturer dans les valeurs élevées, rendant par exemple difficiles certaines distinctions au sein des forêts tropicales (BIGOT, 2004). L'utilisation de ces données en région tropicale humide, doit être faite avec précaution, une contamination nuageuse peut subsister.

L'éventail de ces données mais aussi, le cas échéant, leurs imperfections, ont conduit au choix de méthodes appropriées.

2.4. Méthodes et outils de travail

Les méthodes d'études diagnostiques du climat et du régime hydrologique utilisées dans ce travail sont essentiellement statistiques. Elles permettent d'analyser l'organisation de l'espace géographique sur les plans de la pluviométrie et de l'hydrologie, de mettre en évidence les liens existant entre ces différents paramètres et les états de surface. On utilise aussi dans ce travail plusieurs modèles conceptuels.

2.4.1. Bilan climatique : un indicateur des disponibilités en eau

« *Un climat devient sec quand les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration, et qu'il n'y a pas de réserve d'eau disponible* » (HUFTY, 1976).

Le bilan climatique traduit ainsi, en particulier, le rythme des excédents ou des déficits en eau. Il exprime la différence entre la somme des abats pluviométriques et celle de l'évapotranspiration potentielle (*ETP*) et constitue, lorsqu'il est positif, le surplus disponible pour la recharge en eau du sol et pour l'écoulement (SUTCLIFFE et PIPER, 1985). Il s'exprime par la formule suivante : $Bc = P - ETP$, avec :

- B_c , bilan climatique en mm
- P , pluie totale annuelle en mm
- ETP , évapotranspiration réelle en mm.

L' ETP est définie comme la demande climatique en vapeur d'eau.

- Si $P - ETP > 0$, alors le bilan est excédentaire ;
- Si $P - ETP < 0$, alors le bilan est déficitaire ;
- Si $P - ETP = 0$, alors le bilan est équilibré.

Le bilan climatique a souvent été utilisé, notamment dans une étude régionale des ressources hydroélectriques en l'Afrique de l'Ouest (THOMSON, 1985 ; OLIVRY, 1993 ; LE BARBE *et al.*, 1993) ou encore dans une étude du bilan hydrologique en Guinée et au Togo-Bénin (SUCLIFFE et PIPER, 1985), c'est-à-dire dans les régions où les pluies sont abondantes et concentrées sur une seule saison de l'année, l'autre étant sèche.

Une étude approfondie de la variabilité pluviométrique et hydrologique nous permettra de mettre en évidence la caractérisation hydro-pluviométrique du bassin béninois du fleuve Niger.

2.4.2. Etude de la variabilité pluviométrique et hydrologique

Cette étude a nécessité l'utilisation des paramètres et méthodes statistiques suivants :

2.4.2.1. Le paramètre de tendance centrale, la moyenne arithmétique

La moyenne arithmétique est utilisée pour étudier les régimes pluviométrique et hydrologique aux différentes stations et dans les sous bassins hydrologiques. C'est le paramètre fondamental de tendance centrale, représentée ici par la « normale », moyenne calculée sur une

série de trente-huit ans. Elle s'exprime de la façon suivante :
$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

La moyenne \bar{X} nous a permis de caractériser l'état hydroclimatique moyen et de calculer les indices de dispersion les plus significatifs.

2.4.2.2. Les paramètres de dispersion

2.4.2.2.1. Ecart type

Le calcul de l'**écart type** permet d'évaluer la dispersion des valeurs autour de la moyenne « normale ». Il se détermine par le calcul de la racine carrée de la variance :

$$\sigma(x) = \sqrt{V} \quad \text{où } V \text{ est la variance}$$

L'écart type est par excellence l'indicateur de la variabilité.

2.4.2.2.2. Anomalies centrée réduite

A partir de l'écart type, ont été calculées les anomalies centrées réduites pluviométriques et hydrométriques mensuelles et interannuelles, en standardisant les données. Les anomalies sur chaque station et sur les différents bassins se calculent par la formule suivante :

$$x'_i = \frac{x_i - \bar{X}}{\sigma(x)} \quad \text{où : } x'_i = \text{anomalie centrée réduite pour l'année } i$$

x_i = la valeur de la variable

\bar{X} = la moyenne de la série

$\sigma(x)$ = l'écart type de la série

Toutefois, les paramètres de dispersion ne suffisent pas à eux seuls à mesurer la variabilité car ils ne décrivent pas l'évolution temporelle des séries pluviométriques et hydrométriques. Il convient donc de les compléter par d'autres.

La détection de tendances et de ruptures dans les séries pluviométrique et hydrométrique a été appréhendée par plusieurs méthodes.

2.4.2.3. Mise en évidences des tendances

L'étude des tendances pluviométriques et hydrologiques générales a utilisé les **moyennes mobiles et la méthode de la régression**

- Les moyennes mobiles

Quand une chronique est très complexe (« bruit » important, cycle irrégulier, plusieurs tendances successives), on peut la simplifier pour donner une représentation graphique des phénomènes essentiels qui la composent.

La technique des moyennes mobiles consiste à lisser les irrégularités en associant aux valeurs y_{it} d'une chronique de nouvelles valeurs z_{it} qui sont les moyennes arithmétiques d'une valeur originale y_{it} et des valeurs qui l'encadrent. Les moyennes mobiles peuvent être calculées sur trois ans (1 valeur de part et d'autre de y_{it}) ou cinq ans (2 de part et d'autre de y_{it}).

Cette méthode a permis d'avoir des séries hydrométriques et pluviométriques lissées pour les

différentes stations et pour les sous bassins hydrologiques, aux pas de temps journalier, mensuel et annuel.

- La régression linéaire simple

Elle montre l'évolution linéaire sur le long terme et permet de détecter les tendances dans les séries hydro-pluviométriques. Toutefois, il faut aussi rechercher d'éventuelles « ruptures » de stationnarité, la « rupture » étant définie par un changement dans la loi de probabilité d'une série chronologique à un instant donné (LUBES *et al.*, 1994).

2.4.2.4. La recherche de ruptures

Le test de Pettitt (1979), non paramétrique, est efficace pour détecter les « ruptures » dans les séries pluviométriques et hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger. Ce test dérive du test de Mann-Whitney. L'absence de rupture dans la série (Xi) de taille N constitue l'hypothèse nulle. La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N, les séries chronologiques (Xi) i=1 à t et t+1 à N appartiennent à la même population. Ce test repose sur le calcul de la variable $U_{t,N}$ définie par :

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

où $D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j)$ avec $\text{sgn}(Z) = 1$ si $Z > 0$; 0 si $Z = 0$ et -1 si $Z < 0$.

Soit K_N la variable définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$ pour t variant de 1 à N-1. Si K désigne la valeur de K_N prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur K est donnée approximativement par :

$$\text{Pr ob}(K_N > K) \approx 2 \exp\left(-6 K^2 / (N^3 + N^2)\right)$$

Pour un risque α de première espèce donné, si $\text{Pr ob}(K_N > K)$ est inférieure à α , l'hypothèse nulle est rejetée. Ce test est réputé pour sa robustesse (LUBES *et al.*, 1994).

Nous avons également utilisé le test de Mann-Kendall, non paramétrique, pour mesurer le degré de significativité des tendances et des ruptures de stationnarité dans les séries pluviométriques et hydrométriques de notre domaine.

Soit x_1, \dots, x_T une séquence de données. A chaque x_i est associé un nombre n_i comptabilisant les éléments x_j tel que $i > j$ et $x_i > x_j$. On peut écrire :

$$t = \sum_{i=1}^T n_j . \text{ On calcule la statistique } U(t) : U(t) = \frac{t - E(t)}{\sqrt{\text{var}(t)}} . \text{ Cette statistique, sous l'hypothèse}$$

nulle de l'absence de tendance, suit une loi de répartition $E(t)=\frac{T(T-1)}{4}$;
 $\text{var}(t)=\frac{T(T-1)(2T+5)}{72}$.

L'application progressive du test décrite par SNEYERS (1975) permet de déterminer de manière détaillée les périodes où des groupes de valeurs supérieures ou inférieures à la moyenne apparaissent.

Une fois l'année de rupture déterminée, l'étude des deux échantillons permet de comparer le comportement hydro-pluviométrique des sous périodes.

2.4.2.5. Comparaison de deux échantillons temporels

Cette évaluation a ici pour objectif de mettre en évidence la péjoration hydro-pluviométrique intervenue dans le bassin au cours des années 1970. Le choix des périodes sera issu des résultats de l'application des tests de Pettitt et de Mann-Kendall sur les différentes séries.

- **L'écart** e entre la moyenne m_1 de la période avant la rupture et la moyenne m_2 de la période après la rupture est déterminé par la formule suivante :

$$e = m_2 - m_1$$

- **Le déficit** (en %) est calculé comme suit :

$$\text{Déficit} = \frac{e}{m_1} \times 100$$

- **Le test paramétrique « t » de Student** est utilisé pour comparer les hauteurs d'eau précipitées et écoulées au cours des deux périodes. Il a permis de caractériser et de valider les changements pluviométriques et hydrologiques entre la période avant et la période après la rupture.

Il s'écrit de la façon suivante : $t = \frac{e}{\sqrt{S^2 + \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$

où : (m_1 = moyenne de la période avant la rupture, m_2 = moyenne de la période après la rupture) et n_1 et n_2 les effectifs des sous séries.

S^2 = la valeur pondérée du groupe entier des deux échantillons se formulant comme suit :

$$S^2 = \frac{((n_1-1)S_1 + (n_2-1)S_2)}{n_1 + n_2 - 2}$$

S_1 représente la variance du premier échantillon (avant la rupture) et S_2 correspond à la variance du deuxième échantillon (après la rupture).

La valeur « t » obtenue est comparée à une valeur tirée de la table de Student, pour un nombre de degrés de liberté ν , tel que $\nu = n_1 + n_2 - 2$

L'ensemble de ces paramètres étant calculé, on peut alors cerner le bilan hydrologique et le comportement hydro-pluviométrique des sous bassins de la zone d'étude.

2.4.3. Etude du bilan hydrologique

Cette étude est indispensable pour estimer les ressources en eau du bassin, évaluer l'impact des fluctuations pluviométriques sur les autres termes du bilan et mettre aussi en évidence la relation existant entre la sécheresse pluviométrique observée depuis 1970 et la sécheresse hydrologique de ces trois dernières décennies.

L'équation du bilan hydrologique (LE BARBE *et al.*, 1993) au cours d'une période peut s'écrire de la façon suivante :

$$P = E + L + I + (S_1 - S_0)$$

avec : P = pluie, en mm

E = évaporation, en mm

L = écoulement, en mm

I = recharge (infiltration), en mm

$S_1 - S_0$ = variation du stock d'eau présent dans le bassin, en mm

Des cinq termes de cette équation, deux (I et $S_1 - S_0$) ne sont pas quantifiables par des mesures directes.

Pour diminuer le nombre d'inconnues, $(S_I - S_0)$ est supposé négligeable. C'est pourquoi nous avons décidé de travailler en année hydrologique, déterminée par la date des étiages absolus, dans cette région. Travailler sur une année hydrologique permet de minimiser des erreurs dans la variation du stock d'eau du bassin et cela facilite l'estimation de l'infiltration. Celle-ci n'étant pas mesurée, elle doit donc être déduite à partir des autres termes. Toutefois, l'évaluation des autres termes pose également certains problèmes.

2.4.3.1. Evaluation de la hauteur de pluies régionalisée

Pour le bilan hydrologique, il est nécessaire d'estimer la pluie moyenne sur l'ensemble du bassin à partir d'un nombre limité de mesures ponctuelles. Il faut réaliser une interpolation ici en tenant compte de la répartition du réseau de pluviomètres (Figure 2.1) aux pas de temps journalier, mensuel et annuel.

Dans cette étude, deux méthodes d'interpolation communément utilisées ont été testées sur notre domaine : interpolation linéaire multiple et interpolation par krigeage

- Interpolation linéaire multiple

Dans cette méthode, la valeur en un point quelconque de l'espace V_{xy} , est interpolée par une combinaison linéaire des S observations M_i , aux différentes périodes de mesures :

$$V_{xy} = \sum_{i=1}^s (\lambda_i M_i)$$

avec $0 \leq \lambda_i \leq 1$

Le coefficient λ est égal à 1 pour les postes les plus proches et 0 pour tous les autres.

Cette méthode d'interpolation nous a permis d'estimer la pluviométrie journalière, mensuelle et annuelle aux nœuds d'une grille de $0^\circ 125$ de côté couvrant l'ensemble de la région. Vingt-deux stations pluviométriques ont permis la réalisation de cette interpolation linéaire multiple sur la période 1955-1992.

A titre d'exemple, la figure 2.3 présente l'interpolation des pluies des mois de juillet et août 1955 sur le bassin béninois du fleuve Niger. Les isohyètes moyennes de juillet et août 1955 (entre 150 et 500 mm) sont représentatives du cœur de la saison pluvieuse avec les valeurs les plus faibles enregistrées dans l'extrême nord-est. Nous avons ensuite extrait les

valeurs interpolées aux points de grilles appartenant à chacun des différents sous bassins délimités par un trait noir (Figures 2.3 et 2.4). La répartition spatiale des pluies du mois de juillet (Figure 2.3) présente des valeurs de hauteurs de pluie assez importantes au nord par rapport au sud, surtout dans les sous bassins de l'Alibori et de la Mékrou. En revanche, en août (Figure 2.4), la structure de la diminution progressive des pluies du sud vers le nord est respectée. Si les données issues de cette interpolation sont acceptables, celle-ci produit des configurations géométriques parfois peu réalistes.

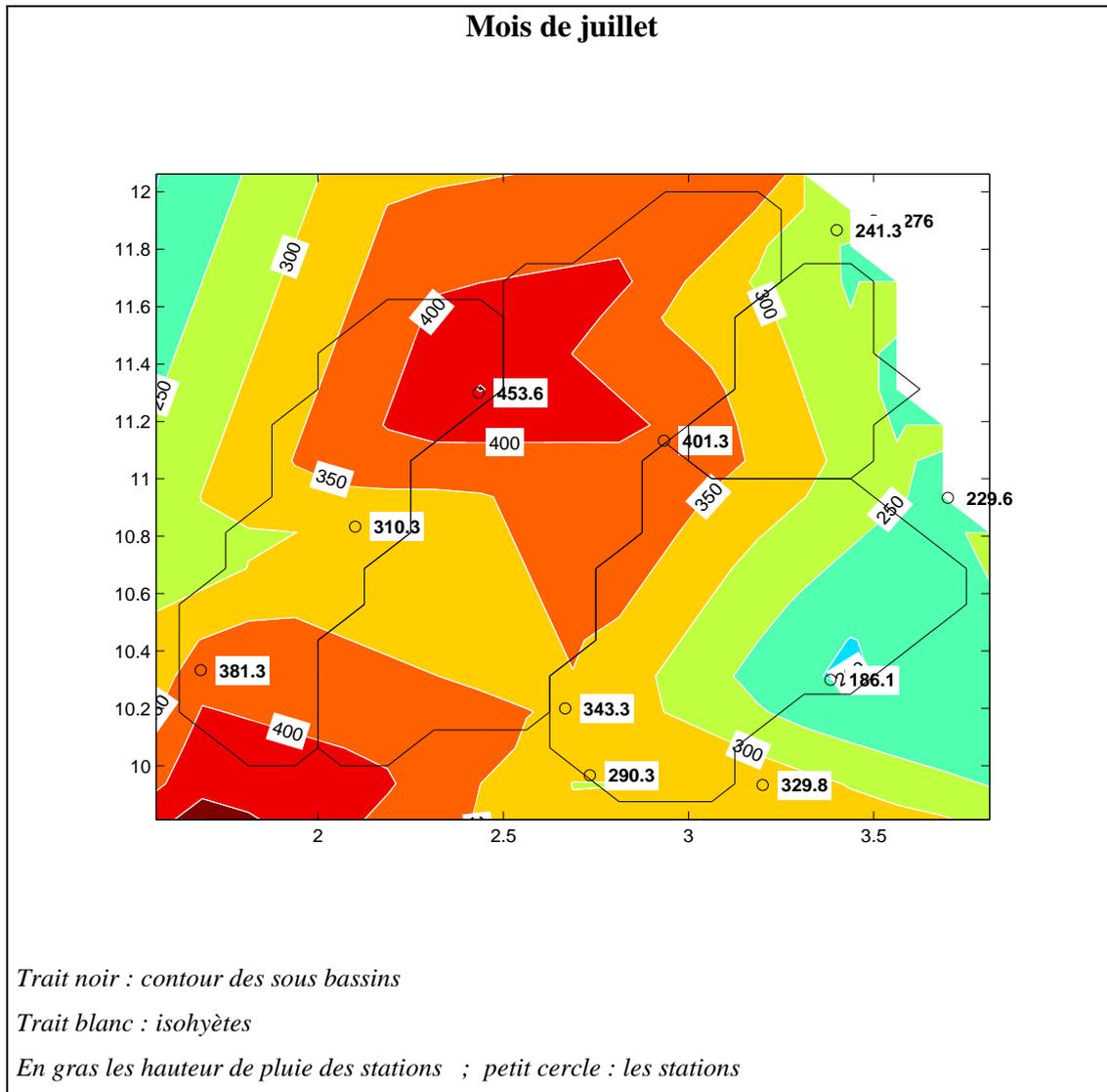


Figure 2.3 : Interpolation des données pluviométriques du mois de juillet 1955

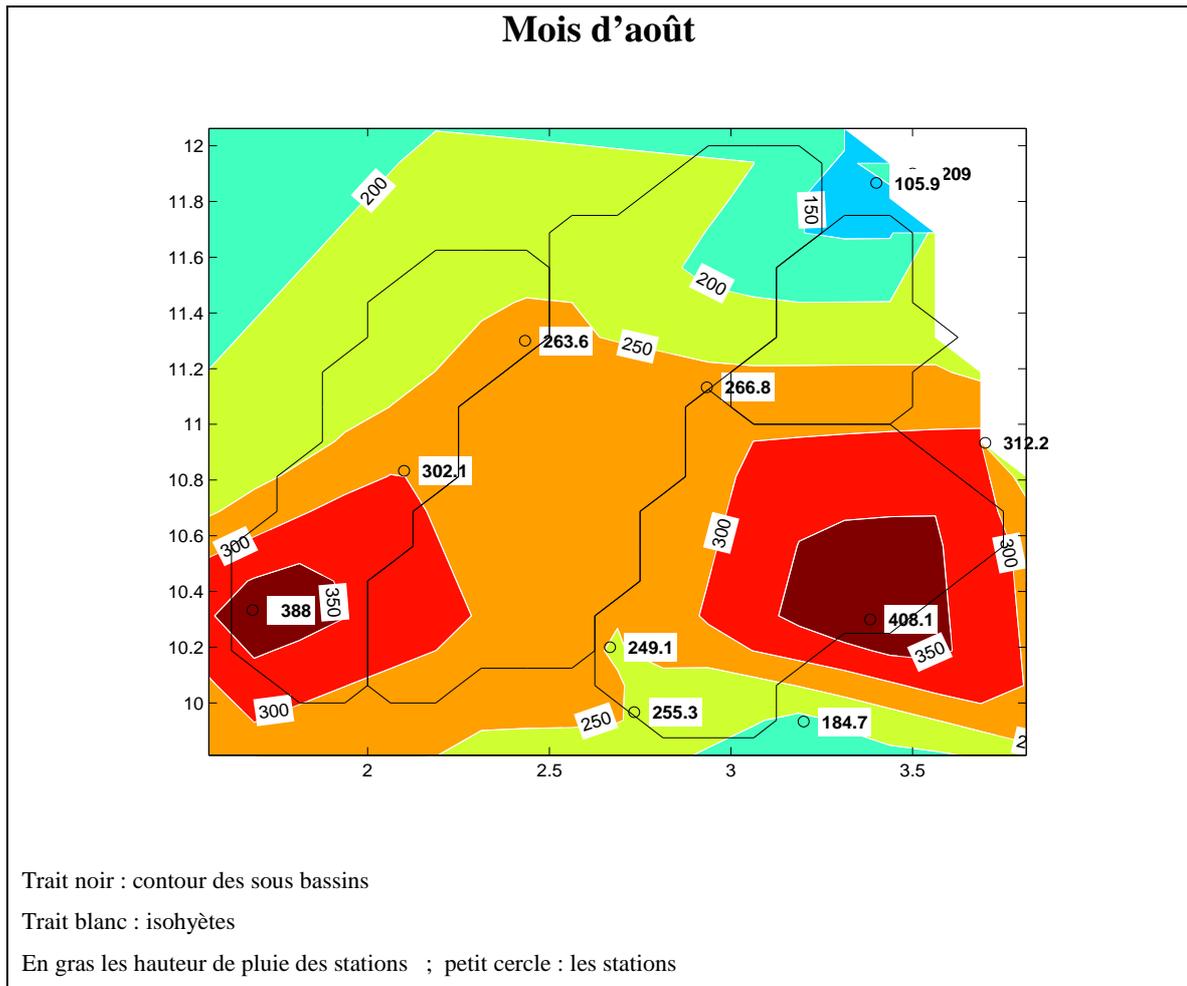


Figure 2.4 : Interpolation des données pluviométriques mensuelles de 1955

-Interpolation par Krigeage

Dans le krigeage (KRIGE, 1951 ; MATHERON, 1965), la structure de la variation spatiale du champ est caractérisée par le variogramme, expression de l'espérance du carré des écarts des valeurs entre deux points. C'est aussi une fonction expérimentale qui décrit la corrélation entre les mesures simultanées en différents points de l'espace, en fonction de la distance les séparant. Il représente la fonction de la structure du phénomène analysé. Un variogramme se caractérise par sa pépite, sa portée et son palier (Figure 2.5). Il est nécessaire de tracer et d'étudier le variogramme car son allure permet de mettre en évidence deux caractéristiques principales (DELCLAUX *et al.*, 2000) :

- la présence ou non d'une pépite (ordonnée non nulle) à l'origine, due soit à une discontinuité du phénomène dans l'espace, soit à un espacement des points de mesure trop

important afin de connaître la variabilité aux petites distances, ou encore à des erreurs de mesure ;

- la présence (l'absence) d'un palier, qui indique que la variance théorique du champ est finie (non bornée). L'absence de palier peut également indiquer la présence d'une dérive que l'on cherchera à éliminer.

Pour cette interpolation, nous avons utilisé le variogramme climatologique (LE LAY, 2006) dont l'utilisation présente plusieurs avantages :

- l'influence du variogramme se manifeste de manière plus robuste, car l'information spatiale est renforcée par l'information temporelle ;

- le variogramme de chaque événement est connu à un facteur d'échelle près : son palier. En effet, si l'on note γ_k le variogramme relatif à l'événement k, et α_k, β_k ses paramètres, on a :

$$\beta_k = \beta_u = \beta,$$

Les paramètres de forme sont égaux, et $\gamma_k(h, \alpha_k, \beta) = \alpha_k / \alpha_u \gamma_u(h, \beta)$.

Si le palier du variogramme par événement n'est pas connu, α_k / α_u peut être estimé par S_k , écart-type expérimental du champ k.

La conséquence est que la détermination du variogramme et l'ajustement d'un modèle se font en une seule fois pour tous les événements.

Le krigeage permet :

- de tenir compte de la structure statistique du champ de données ;
- de procéder à une estimation optimale, c'est-à-dire possédant une variance d'estimation minimum ;
- d'éviter une erreur systématique, par exemple la surestimation de la moyenne sur une surface ou dans un volume à partir de la moyenne des échantillons prélevés.

Ses inconvénients concernent sa mise en application car son temps d'exécution est long, en particulier pour des variances d'estimation ou des moyennes surfaciques (DELHOMME, 1976).

Dans l'interpolation à l'aide du variogramme climatologique, si on possède une série d'événements supposés issus du même processus aléatoire, une série de pluies provenant du phénomènes météorologiques du même type par exemple, on peut en déterminer le variogramme climatologique (Figure 2.5) et s'en servir pour interpoler les observations. On suppose en effet que tous les événements peuvent être représentés par le même variogramme, à un facteur d'échelle près, leur palier.

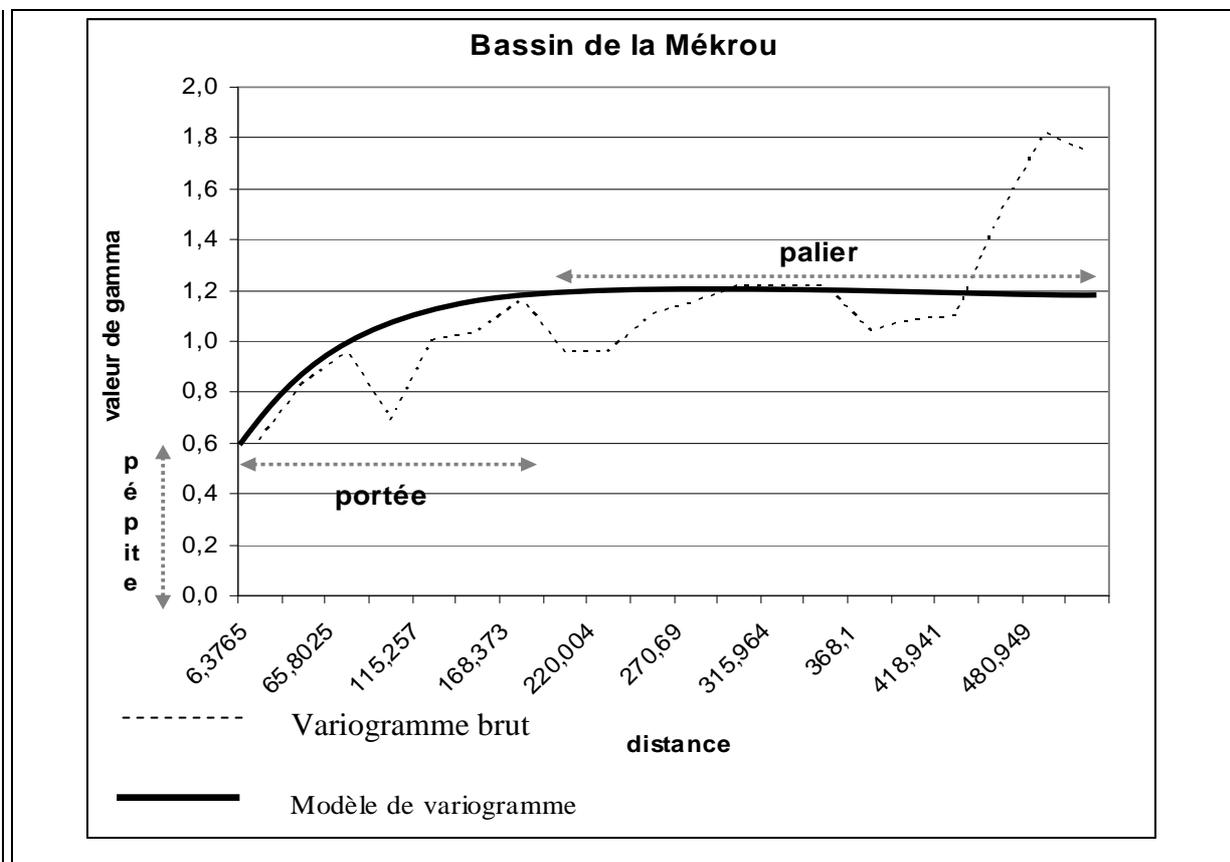


Figure 2.5 : Modèle du variogramme climatologique : exemple des pluies journalières sous bassin de la Mékrou

L'analyse de la figure 2.5, donne les valeurs caractéristiques du variogramme suivantes : pépite : 0,6 ; portée : 180 ; palier : 1,2

Ces valeurs du variogramme climatologique ont permis de kriger les données pluviométriques journalières sur chacun des sous bassins du bassin du Niger au Bénin.

La corrélation linéaire entre les pluies krigées et celles issues l'interpolation simple sur le bassin béninois du fleuve Niger (Figure 2.6) présente des coefficients de détermination satisfaisants.

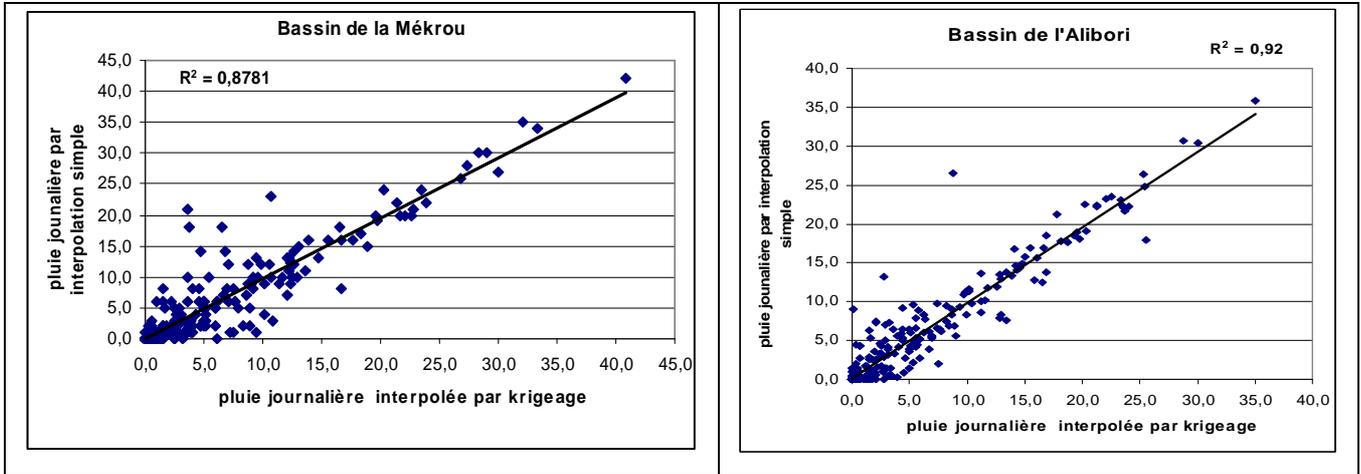


Figure 2.6 : Corrélation pluie journalière interpolée par krigage et pluie journalière par interpolation simple dans le bassin (1955-1992)

Ainsi, l'utilisation de l'une ou l'autre méthode dans le cas de notre recherche, nous amènerait à des résultats relativement identiques. Toutefois, seules les données issues de l'interpolation par krigage sont utilisées ici, compte tenu du fait qu'elles tiennent mieux compte des structures spatiales d'organisation des précipitations.

2.4.3.2. Estimation de l'Evaporation (E)

Deux types de mesures permettent d'évaluer les paramètres de l'évapotranspiration. Ce sont :

- Les mesures directes de l'évaporation : elles se font de deux manières différentes, au « Piche » et sur « Bac », mais aucune des deux méthodes n'est satisfaisante. Les mesures au « Piche » sont inexploitable en zone tropicale (RIOU, 1980). Les mesures sur « Bac » bien que meilleures, sont néanmoins peu précises, surtout pendant la saison des pluies.

- les mesures indirectes à partir de l'évapotranspiration potentielle (ETP) : on peut schématiquement écrire l'évaporation d'une surface par l'équation suivante :

$$E = \alpha . ETP$$

La première étape consiste à obtenir les valeurs d'ETP. La meilleure estimation de l'Evapotranspiration Potentielle (ETP) est donnée par la formule de PENMAN (qui utilise

plusieurs paramètres climatologiques : pression atmosphérique, tension de vapeur, radiation, insolation, rayonnement global...). L'ETP est, par définition, l'évaporation maximale que pourrait fournir un couvert végétal (gazon) suffisamment irrigué pour satisfaire la demande en eau de l'atmosphère. C'est cette formule essentiellement basée sur le bilan radiatif qu'a utilisée le Service de la Météorologie Nationale (SMN) et que nous retenons.

Il convient ensuite de calculer l'évaporation (E). Le coefficient α qui traduit la disponibilité en eau dans les premiers horizons du sol est toujours inférieur ou égal à 1. Il faut, pour l'exprimer de façon rigoureuse, connaître à la fois le stock d'eau présent dans le sol et les résistances opposées par le système sol/végétation à l'évaporation. Nous avons donc adopté la même hypothèse que SUTCLIFFE et PIPER, (1986), à savoir :

- si $P_i > ETP_i$ $\alpha = 1$ où P_i = pluie mensuelle en mm

- si $P_i < ETP_i$ $\alpha = \frac{P_i}{ETP_i}$ ETP_i = évapotranspiration potentielle mensuelle en mm

Cette méthode donne des résultats insuffisants lorsqu'elle s'applique à l'échelle mensuelle. Elle ne s'applique vraiment que pour les mois extrêmes très pluvieux ou secs. Toutefois, à l'échelle annuelle, une compensation s'opère entre les erreurs de début et de fin de saisons de pluie, erreurs résultant respectivement d'une surestimation (car il faut reconstituer les réserves en eau du sol et régénérer la végétation) ou d'une sous-estimation (à cause des réserves d'eau dans le sol) de l'ETR.

2.4.3.3. Evaluation de l'écoulement (L=Léc_i)

Lorsqu'on veut établir un bilan hydrologique et qu'on dispose d'une ou de plusieurs stations hydrométriques bien suivies et bien étalonnées, l'écoulement est connu de manière précise. C'est le seul terme du bilan dont la mesure est directement faite dans le bassin. Les autres nécessitent toujours une régionalisation. Malheureusement, les stations hydrométriques dont nous disposons sur le bassin comportent des lacunes qu'il est nécessaire de combler.

Par ailleurs, l'équation du bilan, telle qu'elle a été exprimée plus haut, suppose qu'on détermine les écoulements causés par les pluies tombées au cours de la période considérée. Une partie du volume V_{i-1} écoulé (une partie du volume de l'année précédente) de l'année $i-1$ (année précédente) causé par la pluie P_{i-1} (pluie année précédente) se répercute sur le volume

V_i de l'année suivante i causé par la pluie P_i . Connaissant la loi de tarissement de Maillet (ROCHE, 1963), nous pouvons l'appliquer au débit moyen du dernier mois de l'année hydrologique Q_{mars} , pour apporter des corrections aux lames écoulées observées au cours de l'année hydrologique i , selon la démarche suivante :

On estime que le volume V_{i-1} en m^3 de l'année hydrologique $i-1$ qui reste à s'écouler s'écrit : $V_{(i-1)} = \int_0^{\infty} Q_{mars(i-1)} \text{Exp}\left(-\frac{t}{Tar}\right) dt \Rightarrow V_{(i-1)} = Q_{mars(i-1)} Tar$

De même, à la fin de l'année i , il reste à s'écouler un volume V_i qui est :

$$V_i = \int_0^{\infty} Q_{mars_i} \text{Exp}\left(-\frac{t}{Tar}\right) dt \Rightarrow V_i = Q_{mars_i} Tar$$

Ainsi, la lame d'eau provenant de la pluviométrie et observée au cours de l'année est :

$$\boxed{Léc_i = Lem_i + (Q_{mars_i} - Q_{mars_{(i-1)}}) \times \frac{Tar}{S}}$$

avec $Léc_i$ = lame écoulée due aux pluies de l'année i (mm)

Lem_i = lame écoulée effectivement mesurée au cours de l'année i (mm)

Tar = durée du tarissement (en seconde), elle est présentée plus amplement dans le chapitre 3 de ce travail.

S = superficie du bassin (km^2)

Q_{mars} = débit de mois de mars (m^3)

$$Q_{mars} \cdot Tar = Q_{mars} \cdot \int_0^{\infty} \text{Exp}\left(-\frac{t}{Tar}\right) \cdot dt = \text{Volume correspondant à un tarissement complet}$$

L'évaluation de la recharge constitue le dernier paramètre indispensable à l'étude de la variabilité du bilan hydrologique sur chacun des sous bassins.

2.4.3.4. Estimation de la recharge (I)

La méthode d'estimation de l'infiltration retenue dans cette étude représente le solde du bilan hydrologique. Les autres termes du bilan sont eux-mêmes connus avec une certaine imprécision. Cette imprécision va se répercuter sur l'infiltration estimée. Du fait de ces incertitudes, nous ne pouvons pas assimiler directement l'infiltration à la recharge de la nappe. Néanmoins, l'analyse de ce paramètre peut reconstituer l'évolution de la recharge sur le bassin béninois du fleuve Niger. On peut définir :

$I = P - (L + E)$ Avec : I : infiltration en mm ; P : pluie en mm ; L : écoulement en mm ; E : évaporation en mm.

2.4.3.5. Etude du tarissement par la loi de Maillet

On observe, à partir d'un certain stade de la décrue sur l'hydrogramme annuel, une décroissance régulière des débits définissant la phase de tarissement. Elle correspond à la période où la vidange des nappes souterraines constitue la seule contribution à l'écoulement du cours d'eau du bassin.

Ainsi, pour évaluer les tarissements sur le bassin du Niger au Bénin, nous adoptons la loi de la décroissance exponentielle de Maillet (ROCHE, 1963) qui se formule comme suit :

$$Q_i = Q_o e^{-\alpha(t_i - t_o)}$$

avec Q_i et Q_o , débits aux instants t_i et t_o exprimés en jours, et α , coefficient de tarissement dépendant des caractéristiques physiques et géométriques de l'aquifère qui a la dimension α , dont la valeur est l'inverse du temps. Il se formule comme suit :

$$\alpha = \frac{1}{T}$$

L'application de cette loi nécessite l'adoption de la méthode de la charnière. En effet, l'estimation de α peut se faire en analysant le faisceau des hydrogrammes observés aux différentes stations durant la période des basses eaux et reportés sur un graphique.

Dans le cas le plus complexe, celui de la recharge des nappes, on n'observe pas une courbe continue de tarissement, même virtuelle, mais des tronçons assez courts. La

détermination de Q_o , revient donc à rechercher une caractéristique de débit que nous appellerons charnière, pouvant servir de départ au tarissement. Ce point se trouve donc sur la courbe de récession et il ne doit pas être éloigné de la période des hautes eaux de façon que l'on puisse, par corrélation serrée, trouver une correspondance entre le débit et les pluies de cette période.

Cette méthode, déjà utilisée par plusieurs auteurs, dont LE BARBE *et al.* (1983) ou BAMBA *et al.* (1996), a permis de déterminer l'évolution temporelle des coefficients de tarissement et d'apprécier la durée de tarissement des cours d'eau sur les bassins béninois. Cette méthode a l'avantage de bien mettre en évidence la sécheresse hydrologique, en particulier dans un contexte de forte variabilité interannuelle.

Le coefficient d'écoulement permet, par exemple, d'analyser le comportement hydro-pluviométrique des sous bassins.

2.4.3.6. Le coefficient d'écoulement

Il se détermine à partir de la formule : $C = \frac{Q}{P} \times 100$ qui traduit la capacité de ruissellement du bassin, avec Q l'écoulement et P la pluie. C évolue suivant les variations climatiques et souligne les différences de comportement entre les pluies et les écoulements. Il doit aussi permettre de mettre en évidence le fonctionnement hydrologique différentiel des formations de grès sédimentaires et du socle du bassin du Niger au Bénin.

L'étude de la caractérisation hydro-pluviométrique du bassin étant faite, on peut dès lors tenter la simulation des écoulements à partir de différents modèles hydrologiques

2.4.4. Les modèles hydrologique retenus dans l'étude

Les modifications climatiques ont de fortes répercussions sur les ressources en eau, comme l'atteste la persistance au cours des décennies 1970 et 1980 de conditions déficitaires sur la zone ouest africaine (OLIVRY, 1993). Les modèles de circulation générale génèrent des séries temporelles de variables climatiques et il est possible d'intégrer ces données au sein des modèles hydrologiques, nonobstant la qualité de ces séries. Les modèles pluie-débit sont ainsi des outils particulièrement adaptés à l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau, à condition que les modèles retenus soient robustes et correctement calés.

2.4.4.1. Justification du choix du type de modélisation proposée

Il existe de nombreux modèles hydrologiques. Notre choix s'est porté sur des modèles globaux de types conceptuels, élaborés à partir d'équations du bilan (ARDOIN-BARDIN, 2004). Ces modèles pluie-débit fonctionnent à des pas de temps variables : journalier, mensuel et annuel.

Compte tenu de l'échelle d'espace à laquelle nous travaillons (milliers de km²) et l'état actuel des données disponibles, il serait totalement illusoire de vouloir mettre en œuvre une modélisation à base physique. Celle-ci est en effet complexe et nécessite un grand nombre de variables pour lesquelles il n'existe généralement pas de séries observées, en particulier sur notre domaine. On peut comprendre que, dans le cadre d'une approche expérimentale limitée dans le temps et dans l'espace, il soit envisageable de mettre en œuvre un tel type de modèle. En revanche, pour une évaluation des ressources en eau abordée à grande échelle et avec des séries chronologiques présentant souvent des lacunes, son utilisation serait peu réaliste.

De leur côté, les modèles hydrologiques conceptuels, généralement utilisés dans un cadre global, sont peu consommateurs de données autres que les données hydro-climatologiques habituellement enregistrées par les services nationaux. Ils sont donc d'une utilisation aisée et permettent d'aboutir à des simulations d'hydrogrammes de qualité relativement satisfaisante. Toutefois, on peut leur faire quelques critiques (PERRIN, 2000) : par exemple la « non-unicité » de la solution liée au processus d'optimisation des paramètres (problème de l'équifiabilité) ; l'efficacité réelle des processus d'optimisation utilisés ; l'influence de la longueur et de la nature des périodes de calage et de validation. Il est ainsi difficile de les utiliser en toute confiance sur des bassins versants pour lesquels ils n'ont pas été calés et pour des périodes autres que celles du calage et de la validation initialement retenues.

Conscient de ces limites et sans autre alternative, nous avons dû utiliser ce type de modèles ; mais il convient d'être extrêmement prudent pour l'interprétation de leurs résultats. Néanmoins, ces modèles nous permettront d'identifier des tendances, des ressemblances entre sous bassins et de comparer évolution climatique et évolution hydrologique.

L'application de ce type de modèle nous offrira aussi l'occasion de proposer quelques améliorations de leurs algorithmes.

2.4.4.2. Présentation des modèles choisis

Nous avons retenu deux modèles :

- le modèle GR2M : il tourne au pas de temps mensuel et utilise en entrées la pluie et l'ETP, mais aussi deux paramètres caractéristiques des réservoirs superficiels (production) et souterrain (transfert). Il favorise l'estimation des écoulements moyens saisonniers. Toutefois, il ne peut restituer les écoulements événementiels et ne prend pas non plus en compte les états de surface.

- le modèle GR4J est très performant : il tourne au pas de temps journalier et compte en entrées également la pluie et l'ETP. Il utilise quatre paramètres qui sont la capacité du réservoir de production (niveau d'eau dans les premiers horizons du sol qui gère le bilan d'eau dans le sol) dont le remplissage est fonction de la nature du sol ; le paramètre d'échange (gain ou perte) qui permet de prendre en compte les erreurs dues au forçage climatique (P et ETR) ; la vitesse de vidange du réservoir de routage (eau souterraine qui alimenterait le cours d'eau à l'exutoire avec un effet retard) et le temps de base (maximal) de l'hydrogramme unitaire. Le chapitre 4 décrira plus précisément ces modèles.

Pour mesurer leur performance, on a défini un protocole d'identification et d'analyse des paramètres à travers le choix des critères d'optimisation et de qualité de l'ajustement.

2.4.4.3. Protocole d'identification et d'analyse des paramètres

2.4.4.3.1. Identification des paramètres

Les modèles GR2M et GR4J comportent des paramètres dont les valeurs numériques sont obtenues après optimisation d'un critère de qualité des débits générés par ces modèles.

La démarche utilisée 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 dans notre domaine d'étude. Pour chaque sous bassin, cette démarche est constituée de deux étapes (OUEDRAOGO, 2001) : une étape de calibrage et une étape de validation.

Une analyse des résultats obtenus nous amènera plus loin dans cette étude à retenir sur chaque sous bassin les paramètres donnant plus de performance et de robustesse au modèle.

2.4.4.3.2. Critères d'optimisation et de qualité de l'ajustement des modèles

La fonction critère que nous avons retenue pour l'optimisation des paramètres des modèles est un critère numérique de calage. Cette fonction doit aboutir à une valeur donnée (minimum, maximum, ou constante) lorsque les valeurs calculées tendent vers les valeurs observées (ARDOIN-BARDIN, 2004). La fonction critère que nous avons utilisée est celle proposée par NASH et SUTCLIFFE (1970), que nous désignons par « Nash ». Elle se définit par :

$$Nash(Q) = 100 \left[1 - \frac{\sum_i (Q_{obs}^i - Q_{cal}^i)^2}{\sum_i (Q_{obs}^i - Q_{moy}^i)^2} \right] \text{ en } \%$$

avec : Q_{obs}^i débit mensuel ou journalier observé ; Q_{cal}^i débit mensuel ou journalier calculé ; Q_{moy}^i débit moyen mensuel ou journalier observé, et i mois ou jours considérés.

Les modèles ajustés sont meilleurs quand la valeur du critère se rapproche de 100 %. Ce critère adimensionnel permet de juger de la qualité d'ajustement des modèles et facilite la comparaison entre les bassins dont les écoulements sont d'ordres de grandeur différents. NASH et SUTCLIFFE (1970) indiquent qu'il n'y a eu aucun essai objectif sur la signification de leur critère puisque l'on ne connaît pas les degrés de liberté du modèle.

Pour apprécier la robustesse des modèles durant les séquences sèches et humides, des modifications ont été apportées au critère de « Nash ». Les transformations préalables sur les débits que nous avons utilisées n'ont cependant pas été choisies avec pour premier objectif d'avoir des résidus en adéquation avec des hypothèses mathématiques. Nous nous sommes plutôt placé d'un point de vue de l'utilisateur qui choisit un critère (de calage et/ou d'évaluation) en fonction de ses objectifs. Certaines transformations choisies, néanmoins, diminuent l'hétéroscédasticité des résidus.

Une caractéristique de ce critère de « Nash » est de donner une importance prépondérante aux périodes de hautes eaux. Pour avoir un critère donnant un poids plus important aux périodes de basses eaux, nous avons utilisé une première transformation logarithmique sur les débits qui se formule comme suit :

$$Nash(\ln(Q)) = 100 \left[1 - \frac{\sum_i \left(\ln(Q_{obs}^i) - \ln(Q_{cal}^i) \right)^2}{\sum_i \left(\ln(Q_{obs}^i) - \ln(Q_{moy}^i) \right)^2} \right] \text{ en } \%$$

Cette transformation a été utilisée par AMBROISE *et al.* (1995). Elle nivelle les valeurs des débits, les erreurs du modèle variant alors dans un même ordre de grandeur pour toutes les classes de débits. Les périodes de hautes eaux étant généralement plus courtes que celles des basses eaux, on accorde ainsi une importance prépondérante à ces dernières (PERRIN, 2000).

La deuxième transformation utilisée est une transformation puissance (transformation avec une puissance $\frac{1}{2}$, c'est-à-dire en racine carrée), qui permet d'avoir un critère intermédiaire entre le critère de Nash calculé sur les débits et celui calculé sur les logarithmes des débits. CHIEW *et al.* (1993) ont utilisé une telle transformation puissance (avec une puissance $\frac{1}{5}$). C'est ce critère que nous utilisons comme fonction objectif pour l'optimisation des paramètres des structures des modèles lors de la comparaison. On peut écrire :

$$Nash(\sqrt{Q}) = 100 \left[1 - \frac{\sum_i \left(\sqrt{Q_{obs}^i} - \sqrt{Q_{cal}^i} \right)^2}{\sum_i \left(\sqrt{Q_{obs}^i} - \sqrt{Q_{moy}^i} \right)^2} \right] \text{ en } \%$$

Toutes les valeurs de ces critères varient entre $]-\infty;100]$ et permettent de réaliser des moyennes sur les performances des modèles sur un échantillon de bassins (PERRIN, 2000).

2.4.4.3.3. Méthode numérique d'optimisation

Les deux méthodes d'optimisation retenues sont les algorithmes développés par ROSENBROCK (1960) et NELDER et MEAD (1964). Couramment utilisées en hydrologie, elles sont non linéaires et s'appuient sur un cheminement dans l'espace vers la valeur minimale d'un critère d'écart entre les réponses observées et celles calculées par le modèle. Ces méthodes dites « méthodes locales » (PERRIN, 2000) adoptent une stratégie interactive 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 (OUEDRAOGO, 2001). Le jeu de paramètres trouvés correspond ainsi à l'optimum de la fonction critère.

- Principe de la méthode de Rosenbrock

Cette méthode a la particularité de permettre le calcul de l'optimum d'une fonction qui n'est ni dérivable, ni continue (GUILBOT, 1971 ; SERVAT, 1986). Partant d'un point donné, cette méthode procède par recherches unidimensionnelles successives le long d'un jeu de n directions orthonormées dans l'espace des paramètres à optimiser. La recherche débute en introduisant une modification d'un pas de Δx_I dans la première direction, correspondant à l'axe du premier paramètre. Si la valeur de la fonction critère à ce nouveau point est inférieure ou égale à la valeur du point précédent (succès), le pas Δx_I est alors multiplié par un facteur coefficient α positif et on remplace le premier point par le nouveau point. Si la valeur est supérieure à celle du point précédent (échec), le premier point n'est pas remplacé et le pas de recherche Δx_I est multiplié par un facteur β négatif (ARDOIN-BARDIN, 2004).

ROSENBROCK recommande l'utilisation de $\alpha=3$ et $\beta=0,5$. Cela signifie que, lorsqu'on se déplace dans une bonne direction sur un axe, le pas de recherche est multiplié par 3 dans cette direction ($\alpha>0$) et lorsqu'on se déplace dans la mauvaise direction, le pas de recherche est divisé par 2 ($\beta<0$) dans la direction opposée. Ce processus se poursuit jusqu'à enregistrer un succès suivi d'un échec. On change alors le système d'axe. On répète le processus jusqu'à ce qu'on enregistre à nouveau un succès suivi d'un échec sur chaque axe. L'arrêt de la méthode s'effectue à partir d'un nombre donné d'étapes de recherches (itérations) ou lorsque les variations de la fonction critère restent inférieures à une valeur donnée. Cette méthode a connu quelques modifications afin de l'adapter à la modélisation pluie-débit (SEVAT et DEZETTER, 1988). La version modifiée limite le nombre d'échecs successifs à cinq fois le nombre de paramètres : on se place alors au début de l'algorithme. Une succession d'échecs entraîne en effet une forte réduction du pas de recherche et gêne ainsi les possibilités de progression de la méthode (DEZETTER, 1991).

- Principe de la méthode de NELDER et MEAD (1964)

Elle repose sur un algorithme antérieur, la méthode du simplexe de SPENDLEY *et al.* (1962). Un simplexe est un polyèdre régulier à $n+1$ sommets dans un 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 d'un simplexe. La fonction critère peut être évaluée en chacun des sommets du simplexe. On peut faire une projection du point présentant la valeur la plus élevée passant par le barycentre des autres sommets. Ce point est alors supprimé et un nouveau simplexe obtenu par « réflexion » peut être constitué à

partir des points restants et du nouveau point projeté. L'utilisation de cette procédure, à savoir l'élimination systématique du sommet présentant la valeur la plus élevée de la fonction critère et de quelques règles permettant de réduire la taille du simplexe, permet une recherche directe à pas fixe mais à direction variable.

Une des difficultés des méthodes numériques d'optimisation est l'identification de solutions qui peuvent correspondre à des minima relatifs. Dans l'application pratique, pour pallier 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 optimale ;

- le résultat de la recherche est enfin affiné par l'utilisation de la méthode de Nelder et Mead.

Le processus d'optimisation est limité à un nombre d'itérations égal à cinquante 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.

Les modèles n'ayant pas pu mettre en évidence l'impact de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin, nous sommes contraint d'utiliser une autre approche pour tenter de le faire. L'une des étapes de celle-ci est la cartographie des états de surface.

La cartographie des états de surface nous permettra d'identifier les états de surface et de déterminer leur superficie sur chacun des sous bassin en 1979 et 1992.

2.4.5. L'analyse des états de surface

Le but est de comparer les modifications intervenues dans les types d'occupation du sol entre 1979 et 1992.

La télédétection utilisée pour la cartographie des états de surface permet par exemple d'envisager une spatialisation de l'aptitude des sols à l'infiltration et au ruissellement. A partir des observations de terrain décrivant les états de surface, la procédure cartographique proposée (LAMACHERE et PUECH, 1995) consiste à réaliser deux décodages à deux dates différentes d'images satellitales et de photographies aériennes. Le choix de cette méthode se justifie par le fait que c'est la seule qui puisse nous permettre d'identifier les types d'occupation du sol, mais aussi de déterminer l'évolution de leur superficie.

2.4.5.1. Réalisation des cartes des types d'occupation du sol de 1979 et 1992

2.4.5.1.1. Documents planimétriques, photographies et images satellitales exploités

Pour le bassin béninois du fleuve Niger, on a utilisé :

a) un fond topographique au 1/50000^e sur lequel figurent les principaux axes routiers, les cours d'eau et quelques agglomérations. Celui-ci est établi à partir des cartes suivantes :

* la carte générale de la République Populaire du Bénin au 1/600000^e,

*la carte topographique de l'Afrique de l'Ouest : feuille de GAYA, échelle 1/200000^e.
Institut Géographique National, Paris ;

b) des cartes pédologiques et géologiques du bassin :

*la carte pédologique de reconnaissance du Dahomey, 1969, au 1/200000^e,

* la carte géologique : étude de cartographie et de prospection minière de reconnaissance au nord du 11^e parallèle. Projet FED, n° 4105 - 011 - 13 - 20, échelle 1/200 000^e, IRB (Istituto. Ricerche. Breda. Div Geomineradia, RPB),

* la carte géologique - feuille de Malanville, échelle 1/200 000^e,

- feuille de Kandi, échelle 1/200 000^e

- feuille de Karimama. Echelle 1/200 000^e, RPB/Ministère de l'Industrie et de l'Energie/Office béninois des Mines. 1^{ère} édition, 1989 ;

c) la carte hydrogéologique du Bénin, échelle 1/500 000^e, Géohydraulique, maison – Alfort, France. Hainque, - Perin, Paris, France (FED) 1985 ;

d) une carte de végétation au 1/50000^e présentant les différentes formations végétales (CENATEL, 1999) ;

e) les photographies aériennes de la mission Kenting de 1979 à l'échelle de 1/50 000^e ;

f) les images satellitales SPOT et LANDSAT TM de 1992 à l'échelle de 1/100 000^e.

Elles ont servi à l'élaboration des facettes topographiques et des cartes des états de surface.

2.4.5.1.2. Démarche suivie pour l'établissement des cartes des types d'occupation du sol 1979 et 1992

Deux cartes d'occupation du sol ont été respectivement réalisées à partir de l'interprétation des photographies aériennes de la mission Kenting de 1979 à l'échelle de 1/50 000^e et des images satellitales SPOT (résolution 10 m) et LANDSAT TM (résolution 30 m) de 1992 à l'échelle de 1/1 000000^e. Le calage, le géo référencement et le traitement des images ont été fait pas le Centre National de Télédétection (CENATEL) Les travaux ont été effectués par étapes successives.

- La première étape : photo-interprétation

La photo-interprétation concerne non seulement l'interprétation des photographies aériennes, mais aussi l'analyse des images satellitales.

➤ Photographies aériennes

L'interprétation des photographies aériennes a été faite au moyen du stéréoscope à miroir de la mission AAP de 1996. Pour mieux lire les photographies aériennes, il existe une clé d'interprétation qui se présente comme suit (Tableau 2.2) :

Tableau 2.2 : Clé d'interprétation des photographies aériennes

Code	Forme	Ton de Gris	Texture	Structure	Objet Identifié
1	Irrégulière	Moyennement gris	Peu granulé et peu lisse	Granulée et lisse	Savane arborée
2	Irrégulière	Gris assez sombre	Très peu lisse et assez granulée	Granulée et lisse	Savane boisée ou forêt claire
3	Régulière	Assez claire	Lisse à peu lisse	Homogène	Jachère ou champ nu
4	Irrégulière	Gris clair	Très peu granulée	Homogène	Savane arbustive
5	Régulière	Gris sombre	Granulée et alignée en ordre	Très homogène	Plantation
6	Irrégulière	Très claire	Granulée et groupée	Assez homogène	Agglomération
7	Sinueuse	Gris sombre	Floconnée	Assez homogène	Galerie forestière
8	Sinueuse	Très claire	Lisse	Homogène	Voie: route ou piste
9	Sinueuse	Gris sombre	Lisse	Homogène	Cours d'eau
10	Irrégulière	Très claire	Lisse	Homogène	Sol nu ou affleurement

Source : CENATEL (Centre National de Télédétection)

➤ Images satellites

Les images satellites ont été interprétées à partir des tonalités issues du signal d'origine. La clé d'interprétation utilisée est la suivante (Tableau 2.3) :

Tableau 2.3 : Clé d'interprétation des images satellites

Code	Forme	Tonalité	Identification
1	Irrégulière	Rouge vif	Forêt claire
2	Sinueuse	Rouge vif	Galerie forestière
3	Irrégulière	Rouge modéré	Savane boisée
4	Irrégulière	Rouge pâle	Savane arborée
5	Irrégulière	Vert parcouru de fines traces rouges	savane arbustive
6	Effilée	Bleu	Cours d'eau

Source : CENATEL (Centre National de Télédétection)

- La deuxième étape : cartographie des minutes d'interprétation

Après l'interprétation des photographies aériennes ou des images satellitaires, on obtient des minutes d'interprétation. Ces minutes sont scannées et géo-référencées.

➤ Géo-référencement

Sur les minutes d'interprétation, on choisit des points géodésiques remarquables dont on connaît les coordonnées. Si ces coordonnées ne sont pas connues auparavant, on les détermine. Pour le géo-référencement, il faut choisir au moins quatre points.

➤ **Numérisation**

Après le géo-référencement, vient l'étape de la numérisation qui consiste à faire passer les objets (ponctuels, linéaires et surfaciques) de la forme analogique à la forme numérique. Cette opération est faite avec un logiciel approprié, ici Arc View.

➤ **Edition et mise en forme**

Les objets transformés sont ensuite édités en leur donnant la couleur ou le symbole approprié selon les signes conventionnels et les règles de la cartographie. Ainsi, par exemple, les cours d'eau et plan d'eau sont représentés en bleu et la végétation en vert. D'autres couleurs sont aussi utilisées pour rendre la carte plus lisible.

Cet ensemble est mis en forme pour l'espace disponible et sous le format voulu.

L'étude diachronique permet alors la comparaison des cartes réalisées (1979 et 1992) afin de faire ressortir la dynamique des états de surface.

- La troisième étape : étude diachronique

L'étude diachronique s'est déroulée en trois phases :

➤ **Carte des types d'occupation du sol en 1979 et en 1992**

Les cartes des types d'occupation du sol ont été respectivement réalisées à partir de la comparaison entre l'interprétation des photographies aériennes de 1979 (mission Kenting) à l'échelle de 1/50 000^e et les images satellites SPOT et LANDSAT TM de 1992 à l'échelle de 1/1 000000^e. On a successivement abordé :

➤ **La cartographie dynamique des types d'occupation du sol**

Elle consiste à superposer les cartes issues de l'analyse de l'occupation du sol de 1979 et 1992 pour établir celle de l'évolution de la végétation entre ces deux états. Dans cette étude, on n'a pas présenté de carte de synthèse. On a seulement réalisé un tableau synthèse récapitulant les types d'occupation du sol en 1979 et 1992 et les progressions ou régressions enregistrées au niveau de chacun des types d'occupation du sol.

➤ **L'analyse et l'interprétation des données**

L'analyse et l'interprétation des données concernent la dynamique spatio-temporelle. Les photographies aériennes, les images satellites et les cartes des types d'occupation du sol sont utilisées comme produit de la télédétection, et le GPS, les logiciels Atlas GIS, Arc View sont les outils du SIG (Système d'Information Géographique).

La cartographie des types d'occupation du sol a donc permis d'identifier les types d'occupation du sol de chacun des sous bassins et d'évaluer leur superficie, données indispensables à l'étude de la dynamique des types d'occupation du sol entre 1979 et 1992.

L'analyse de la corrélation et de la corrélation partielle a tenté d'identifier les relations de dépendance entre pluie, écoulement, recharge et NDVI dans le bassin.

2.4.5.2. Recherche de liaison ou de dépendance statistique entre pluie et lame écoulee et NDVI et lame écoulee

Cette étude consiste à mettre en évidence les relations possibles pouvant exister entre pluie et écoulement et écoulement et recharge d'une part, et entre pluie et NDVI et écoulement et NDVI d'autre part.

2.4.5.2.1. Coefficient de corrélation linéaire

Il permet d'évaluer le degré de liaison ou de dépendance linéaire entre les lames précipitées, les lames écoulees et le NDVI sur les différents sous bassins de l'Alibori, de la Mékrou et de la Sota. Il sert à déterminer le coefficient de détermination ($R=r^2$).

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma(x) \cdot \sigma(y)}$$

où : N est le nombre total d'individus ; x_i et y_i sont les valeurs des séries,

\bar{x} et \bar{y} sont les moyennes des deux variables dont on calcul la corrélation; $\sigma(x)$ et $\sigma(y)$ en représentent les écarts-types.

2.4.5.2.2. *Corrélation partielle*

La plupart des phénomènes environnementaux sont causés par plusieurs variables plus ou moins liées et il est souvent difficile d'évaluer l'influence réelle d'une variable sur le phénomène au sein de la complexité des relations entre variables.

Cette méthode est utilisée ici pour déterminer les relations entre l'activité photosynthétique mesurée par le NDVI et l'écoulement ou la recharge, sachant qu'écoulement, recharge et activité photosynthétique sont également liés à la pluie. Il s'agit donc d'identifier une relation entre les deux variables indépendamment d'une troisième (dans ce cas-ci, il s'agit de la pluie).

Démarche suivie :

Sachant que : $NDVI$ = activité photosynthétique

Q = écoulement

P = pluie

-Première étape

On retire du $NDVI$ l'influence de P . Autrement dit, on va écrire qu'une partie du $NDVI$, $NDVI'$, celle qui nous intéresse, n'est pas expliquée (au sens de la corrélation) par P :

$$NDVI = aP + b + NDVI'$$

Nous venons tout simplement d'écrire l'équation de la régression de P en $NDVI$. $NDVI'$ partie de $NDVI$ non expliquée par P est donc le résidu de la régression de P en $NDVI$. Elle décrit les variables de l'état de la végétation non liées à celles de la pluie et intègre donc potentiellement l'effet des modifications d'utilisation du sol par l'homme.

- Deuxième étape : faisons la même chose pour Q

On retire de Q l'influence de P . On écrit qu'une partie de Q , Q' , celle qui nous intéresse, n'est pas expliquée (au sens de la corrélation) par P .

$$Q = a'P + b' + Q'$$

Nous venons d'écrire l'équation de la régression de P en Q . Q' partie de Q non expliquée par P est donc le résidu de la régression de P en Q . Elle décrit les variables de l'écoulement non liées à celles de la pluie et intègre donc l'effet des variables de l'évaporation et de la recharge, notamment celles liées aux changements d'utilisation du sol.

- Troisième étape

La relation entre $NDVI$ et Q , compte tenu de P , est la relation entre la partie de $NDVI$ non expliquée par P , soit $NDVI'$ et la partie de Q non expliquée par P soit Q' . Nous calculons donc la corrélation entre le résidu de $NDVI$ par P et le résidu de Q par P . En fait, cette corrélation revient à effectuer le calcul, à partir des données brutes, de la corrélation partielle de $NDVI$ avec Q , compte tenu de P . Le coefficient de corrélation partielle entre $NDVI$ et Q , indépendamment de P se formule plus généralement comme suit :

$$r_{NDVIQ.P} = \frac{r_{NDVIQ} - (r_{NDVIP} \cdot r_{QP})}{\left[(1 - r_{NDVIP}^2)(1 - r_{QP}^2) \right]^{0,5}}$$

avec : r_{NDVIP} = coefficient de corrélation entre $NDVI$ et pluie ;

r_{QP} = coefficient de corrélation entre écoulement et pluie ;

r_{NDVIQ} = coefficient de corrélation entre $NDVI$ et écoulement.

La réalisation de cette recherche a nécessité l'utilisation de quelques outils informatiques indispensables.

2.5. Les quelques outils informatiques utilisés

Les différents traitements et calculs et la conception des cartes ont été réalisées avec plusieurs logiciels informatiques :

- Excel 5.0 est une marque déposée de Microsoft Corporation. C'est un tableur intégrant graphique, tableau et base de données.
- Matlab 6.2 est abréviation de MATrix LABoratory. MATLAB est avant tout un programme de calcul matriciel. Il permet entre autres d'améliorer la lisibilité d'une figure et de réaliser des opérations et fonctions portant sur les vecteurs, des opérations et fonctions portant sur les matrices.

- Surfer 8 for Windows est une marque déposée de Golden Software. Inc. Surfer possède plus de cent options pour créer le contour des cartes et déterminer la surface des espaces tridimensionnels.
- Atlas Gis version 3.00 est un logiciel utilisé pour éditer les cartes dont la numérisation a été faite par la version sous MS-DOS.
- Parmi les outils informatiques de cartographie, le logiciel Arc View est un SIG de référence. C'est un puissant outil permettant de visualiser, d'explorer, d'interroger et d'analyser des données géographiques. Il permet de manipuler les données de manière aisée.

Conclusion

Il convient de retenir, au terme de ce chapitre, que d'assez nombreuses études ont été réalisées sur des axes de la thématique de cette thèse. Les résultats de ces recherches sont appréciables. Mais nous tenterons ici d'utiliser quelques nouvelles méthodes d'investigation mieux adaptées aux complexités de notre terrain d'études. Toutefois l'emploi de ces nouveaux outils nous a amené à appliquer des tests pour vérifier l'efficacité de leurs résultats. Malgré ces indispensables contrôles, plusieurs obstacles subsistent :

- L'insuffisance du réseau des stations pluviométriques qui ont servi la régionalisation des données pluviométriques et de la méthode d'estimation très approximative de l'évaporation,
- Face à la quasi-inexistence d'images et de photographies aériennes sur le domaine d'étude, l'utilisation du NDVI peut-elle rendre compte de la dynamique des états de surface dans le bassin

Malgré ces incertitudes, la constitution d'une base de données météorologiques et hydrométriques à différentes échelles de temps sur une longue période (1955-1992), celle d'une mini-base de données cartographiques des types d'occupation du sol et enfin d'une base de données de NDVI sur chacun des sous bassins du fleuve Niger au Bénin constitue une avancée sensible, permettant le cas échéant d'autres études sur le domaine et, dans l'immédiat, d'analyser le comportement hydroclimatique du bassin béninois du fleuve Niger.

Chapitre 3 : Caractérisation de la variabilité hydro-pluviométrique

Introduction

Ce chapitre expose une partie des résultats des traitements et des analyses des mesures et observations. Ces résultats doivent permettre de caractériser la dynamique des régimes hydroclimatiques et la réalité des déficits récents, liés notamment au climat. Sont également mises en évidence les modifications induites par la persistance de plus faibles précipitations sur le comportement des différentes rivières du bassin.

Nous présentons d'abord l'étude de la variabilité pluviométrique du bassin béninois du fleuve Niger aux échelles annuelle, mensuelle et journalière. Elle repose sur des indices régionaux obtenus d'une interpolation par krigeage à partir de vingt-deux stations pluviométriques :

- un indice régional qui représente la pluviométrie de l'ensemble du bassin hydrologique du Niger au Bénin ;
- des indices régionaux qui décrivent chacun des sous bassins hydrologiques (Mékrou à Kompongou, Alibori à la route Kandi-Banikoara, Sota à Gbassè, sur plus de 80 % de formations de socle et Sota à Coubéri, dans 93 % de grès poreux) ;
- des séries stationnelles ont été parfois utilisées pour préciser les particularités locales.

Par la suite, nous analysons l'évolution du bilan climatique et de l'écoulement dans les différents sous bassins hydrologiques.

Nous présentons enfin le bilan hydrologique de l'ensemble du bassin béninois du Niger en insistant sur l'impact des fluctuations pluviométriques sur les termes du bilan hydrologique (évaporation, écoulement et infiltration ou recharge) et l'analyse du fonctionnement hydrologique des sous bassins.

Avant d'aborder l'étude de la variabilité pluviométrique sur le bassin béninois du fleuve Niger, il est nécessaire de procéder à la validation des différents indices régionaux calculés.

3.1. Validation des indices régionaux

Elle consiste à vérifier l'existence de liens statistiques entre une station de chaque sous bassin et les indices pluviométriques déterminés après interpolation. On note ici que les stations choisies ne sont pas utilisées dans l'interpolation et donc dans la détermination des indices. Ce sont des stations de référence.

La figure 3.1 met en évidence une bonne corrélation entre les indices moyens des sous bassins et les données stationnelles indépendantes de la période 1955-1992 :

- indice du sous bassin de la Mékrou et la station de Birni (Figure 3.1a) ;

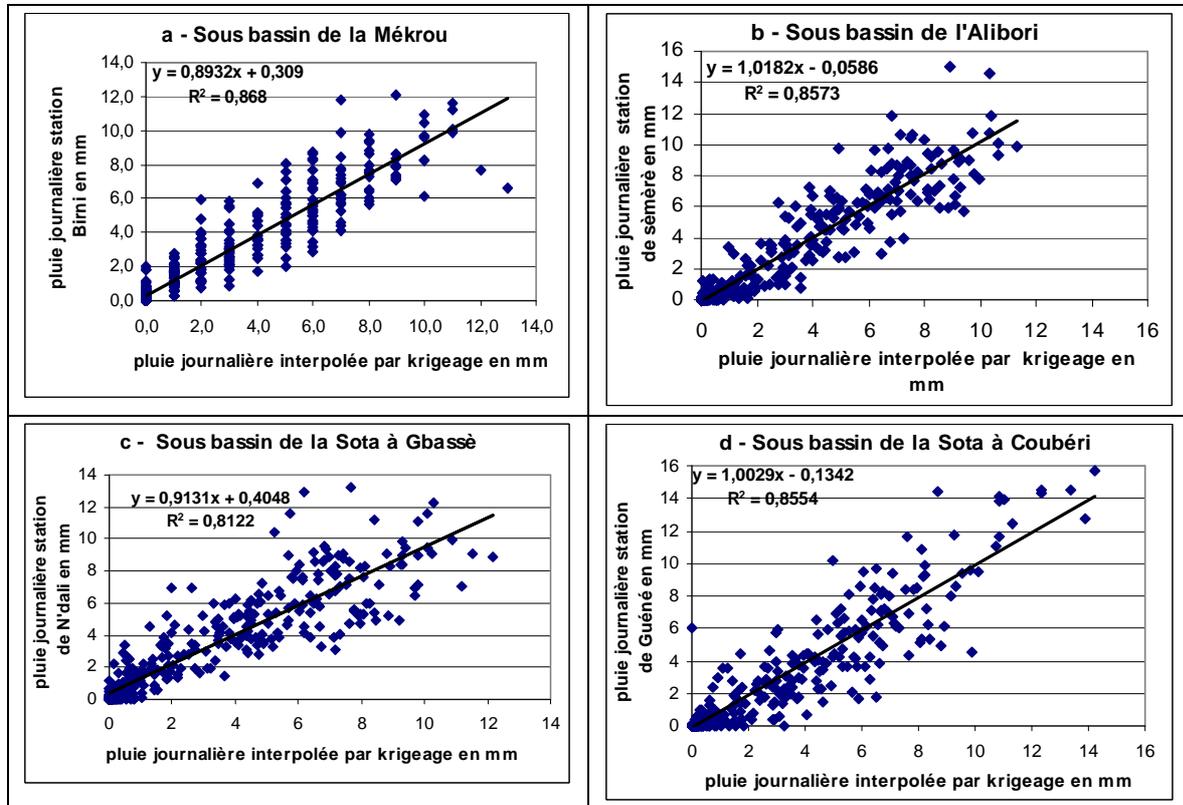


Figure 3.1 : Validation des indices régionaux des sous bassins du bassin béninois du fleuve Niger par corrélation des pluies journalières d'une station des sous bassins et les pluies journalières krigées.

- indice du sous bassin de l'Alibori et la station de Sèmèrè (Figure 3.1b) ;

- indices du sous bassin de la Sota à Gbassè et la station de N'Dali (Figure 3.1c) ;

- indices du sous bassin de la Sota et la station de Guéné (Figure 3.1d).

Tous les coefficients de détermination sont supérieurs à 0,80 (dans le sous bassin de la Mékrou : 0,86 ; l'Alibori : 0,85 ; la Sota à Gbassè : 0,81 et la Sota à Coubéri : 0,85), avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0,85, ce qui implique des liens statistiques significatifs entre les indices et les données des stations choisies et autorise l'analyse de la variabilité pluvieuse à partir des indices.

3.2. Variabilité de la pluviométrie

3.2.1. Variabilité pluviométrique interannuelle

3.2.1.1. Evolution des hauteurs de pluie dans le bassin béninois du fleuve Niger

L'analyse de l'évolution interannuelle des pluies dans le bassin du fleuve Niger au Bénin porte sur la période 1955-1992.

L'ensemble du bassin a connu une baisse importante de sa pluviométrie annuelle aux alentours des années 1970. La figure 3.2 montre que la pluviométrie annuelle a diminué irrégulièrement de la décennie 1950 à la décennie 1980. Le début de la décennie 1990 (Figure 3.2) est en revanche marqué par une légère reprise des pluies annuelles.

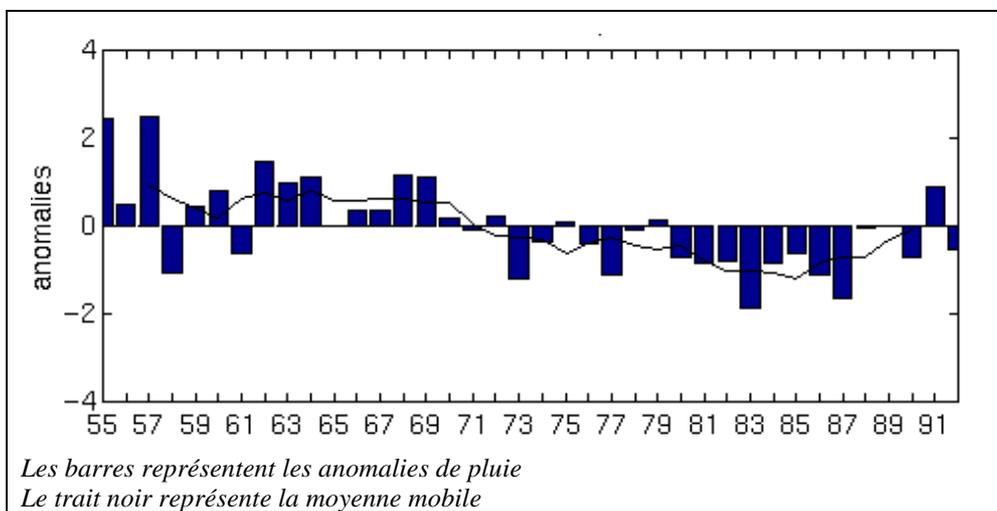


Figure 3.2 : Variabilité interannuelle des hauteurs de pluies dans le bassin béninois du fleuve Niger (1955-1992)

3.2.1.2. Evolution des indices pluviométriques régionaux des différents sous bassins

L'étude de la variabilité interannuelle des indices pluviométriques des différents sous bassins (1955-1992) montre aussi une baisse sensible depuis les années 1970 comme dans l'ensemble du bassin béninois du fleuve Niger. Partout on observe une baisse progressive des hauteurs de pluie de 1955 à 1992 avec une remontée relative au début de la décennie 1990, sauf dans le sous bassin de la Sota à Coubéri.

La figure 3.3 souligne les baisses pluviométriques marquées dans une première phase aiguë des années 1973 et 1974 (OLIVRY, 1993). Ces baisses se sont poursuivies, même si elles ont varié en intensité et en étendue suivant les années. Une recrudescence sensible de la

sécheresse s'est manifestée en 1983 et 1987 dans tous les sous bassins et l'indigence pluvieuse reste la règle jusqu'en 1992 dans le sous bassin de la Sota à Coubéri. Les anomalies positives sont plus fréquemment observées avant 1972, en particulier en 1957, 1962, 1969, marquées par un net excédent pluviométrique.

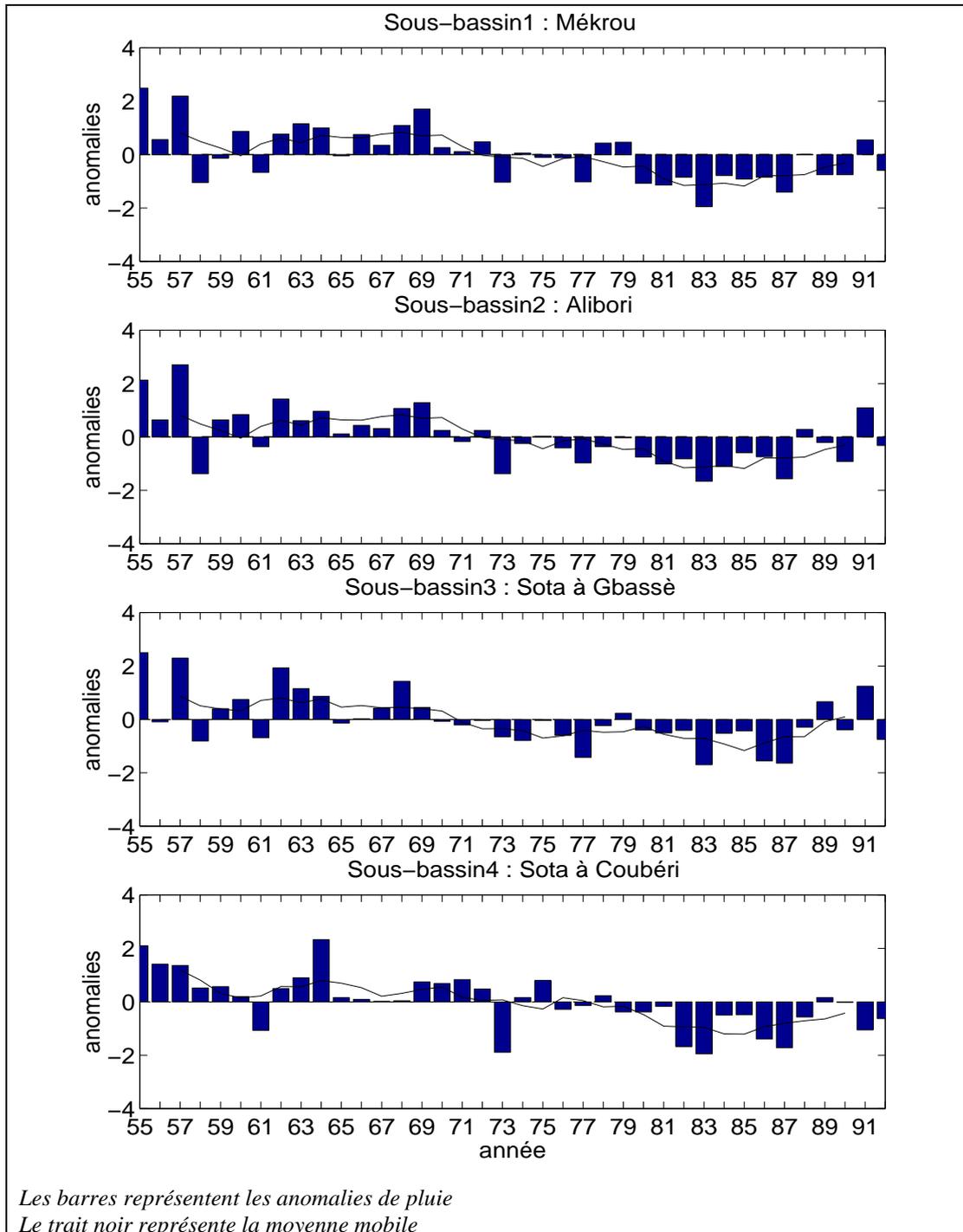


Figure 3.3 : Evolution de la pluviométrie dans les sous bassins hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger pour la période 1955-1992

3.2.1.3. Variabilité pluvieuse à l'échelle stationnelle dans le bassin béninois du fleuve Niger

Afin de mieux contrôler l'évolution pluviométrique, les données de neuf stations (Tableau 3.1) sont analysées pour la période 1955-1992, en comparant chaque décennie.

Tableau 3.1 : Pluviométrie moyenne décennale en mm

Stations	Latitude	Longitude	1961-1970	1971-1980	1981-1990	Moyenne en mm (1955-1992)
Nikki	9°56 N	3°12 E	1 167	1 052	1 054	1 133
Kalalé	10°18 N	3°23 E	1 253	1 082	1 090	1 153
Kouandé	10°20 N	1°41 E	1 307	1 183	1 030	1 190
Ina	9°58 N	2°44 E	1 272	1 143	1 035	1 180
Bembéréké	10°12 N	2°40 E	1 271	990	1 018	1 143
Kandi	11°08 N	2°56 E	1 087	1 036	897	1 090
Banikoara	11°18 N	2°26 E	1 030	949	888	978
Malanville	11°52 N	1°39 E	842	776	744	805
Gaya	11°53 N	3°27 E	860	784	747	795

Source : d'après les données de l'ASECNA, période 1955-1992.

On constate que les années 1960 ont été bien arrosées dans toutes les stations, mais que la décennie 1970 se caractérise par une baisse considérable de la pluviométrie. Les décennies 1970 et 1980 ont été déficitaires par rapport à la moyenne 1955-1992 sur l'ensemble du bassin. Seule la station de Kandi a connu un excédent pluviométrique durant les années 1970. A Kouandé, Bembéréké, Ina et Kandi, la récession pluvieuse est plutôt intervenue durant les années 1980. Au cours des années 1970, ce sont les stations de Kalalé, Nikki et Bembéréké qui ont été affectées par les baisses les plus marquées (Tableau 3.1).

L'étude des tendances présentée sur la figure 3.4 indique une baisse des précipitations des années 1955 jusqu'en 1985. Pour toutes les stations, une reprise des précipitations semble s'amorcer au cours des années qui suivent, avec en particulier l'année 1988, très excédentaire dans les neuf stations. En dépit de cette baisse générale, l'évolution des précipitations est loin d'être linéaire, puisque aux épisodes secs annuels succèdent des épisodes plus humides, sans pour autant qu'aucun caractère cyclique n'apparaisse.

L'étude des moyennes mobiles (Figure 3.4) confirme l'analyse des moyennes annuelles décennales. Les années 1950-1960 ont été les plus pluvieuses, tandis que les deux dernières décennies considérées (1970 et 1980) sont caractérisées par une forte tendance à la diminution des précipitations.

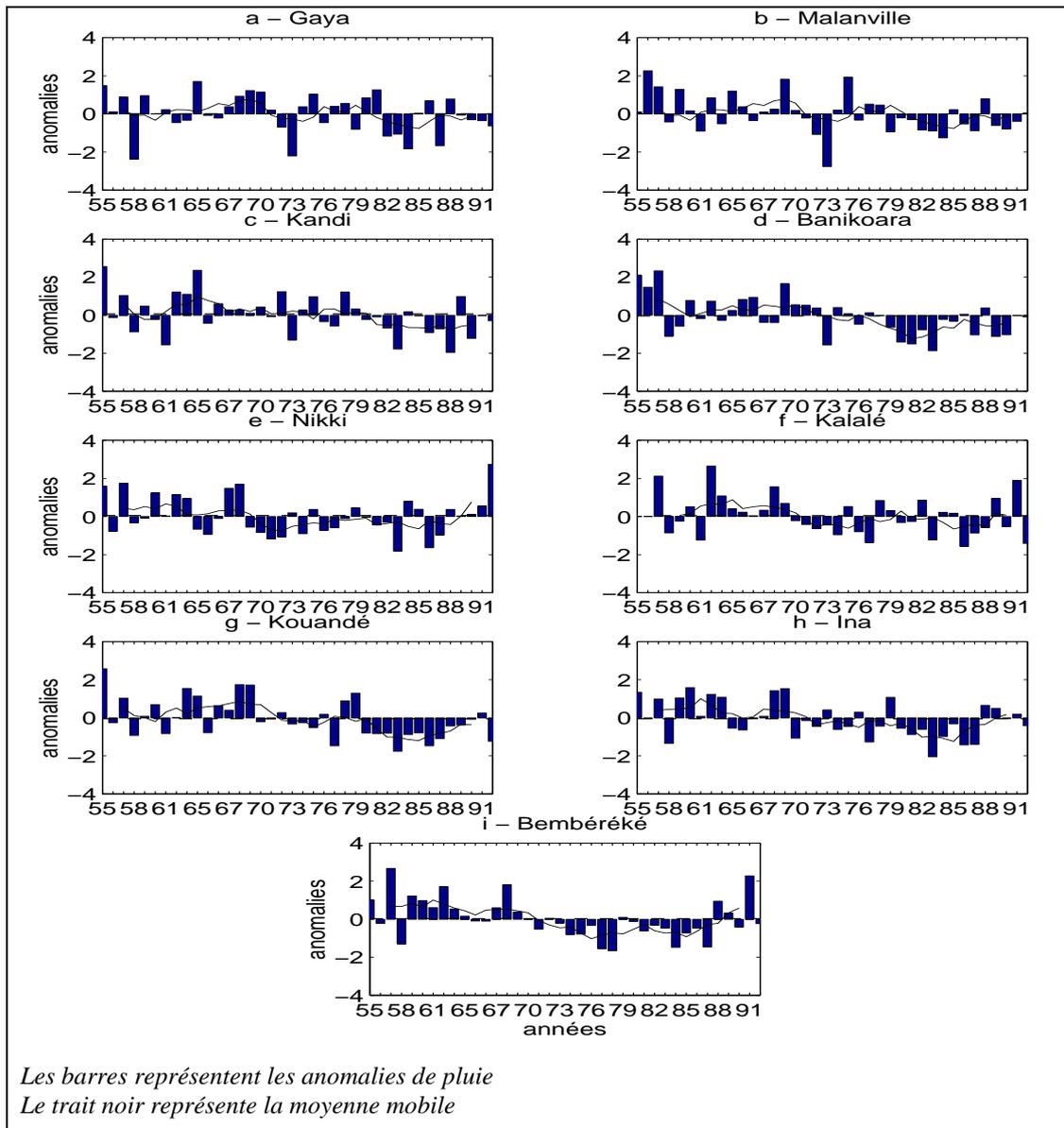


Figure 3.4 : Variabilité interannuelle de la pluie aux stations du bassin béninois du fleuve Niger (1955-1992)

L'évolution interannuelle du nombre de jours de pluie de 1955 à 1992 (Figure 3.5) confirme ces résultats. Elle montre des valeurs élevées d'occurrences pluvieuses dans les années 1960 sur toutes les stations et une baisse sensible dans les années 1970. A la station de Nikki située au sud du bassin, le nombre de jours pluvieux n'a connu une baisse sensible qu'à partir les années 1980. Cette baisse plus tardive pourrait justifier l'absence de rupture constatée dans la série de cette station.

Ainsi, toutes les stations n'ont pas connu simultanément leur déficit pluviométrique, même si certaines années paraissent exceptionnellement sèches comme 1958, 1973 et 1982 ou exceptionnellement pluvieuses (1957, 1962 et 1965) dans l'ensemble des sous bassins.

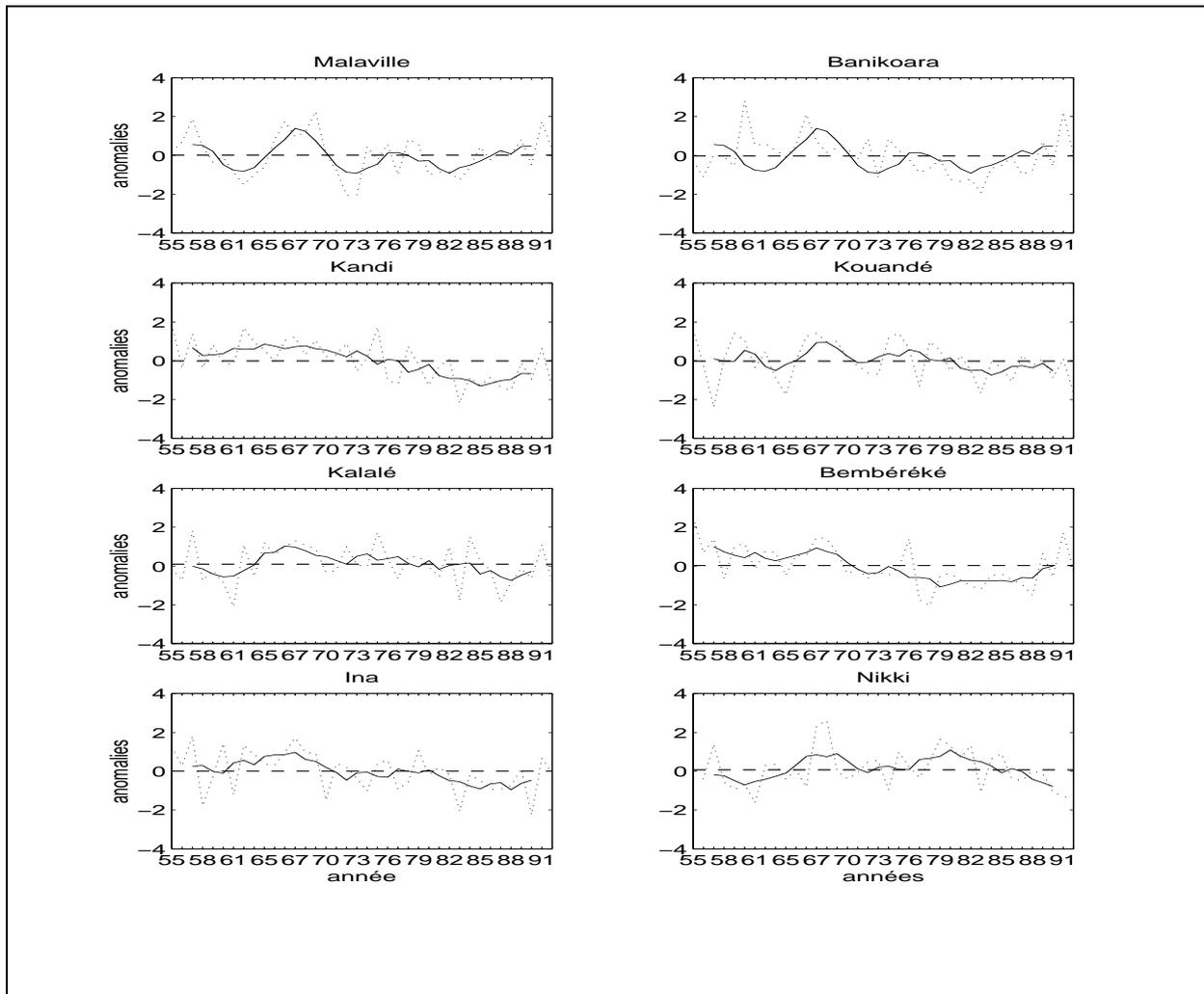


Figure 3.5 : Variation annuelle du nombre de jours de pluies aux stations du bassin béninois du fleuve Niger (1955-1992)

La diminution du nombre de jours de pluies aux différentes stations accompagne d'importantes baisses pluviométriques. Dans le bassin du Niger au Bénin, la diminution de la ressource pluviométrique explique 23 % de la variabilité à Bembéréké et 17 % à Kandi, comme l'ont montré HOUNDENOU (1999) et VISSIN (2001).

3.2.2. Recherche de rupture de stationnarité dans les séries pluviométriques

3.2.2.1. Détection de rupture de stationnarité dans la série pluviométrique du bassin du Niger au Bénin

Le test de Pettitt (Figure 3.6) souligne une rupture de stationnarité, significative au seuil de 99 % au début des années 1970, la statistique de coupure atteignant son maximum en 1972. Le test de Mann Kendall appliqué sur la même série témoigne d'une péjoration pluviométrique qui devient significative au seuil de 95 % à partir de 1974 (Figure 3.7). Cette

diminution est ponctuée par une rupture de stationnarité en 1971-1972 (croisement des courbes directe et rétrograde sur la figure 3.7) avec des déficits pluviométriques entre la période avant et après 1972. Ces résultats confirment la rupture de stationnarité des années 1970 soulignée par de nombreux auteurs : en Afrique de l'Ouest (FONTAINE, 1990), au Bénin (BOKO, 1988 ; PERARD et BOKONON-GANTA, 1993 ; HOUNDENOU, 1999) et dans le bassin béninois du fleuve Niger (VISSIN, 2001 ; VISSIN *et al.*, 2003 ; VISSIN *et al.*, 2004).

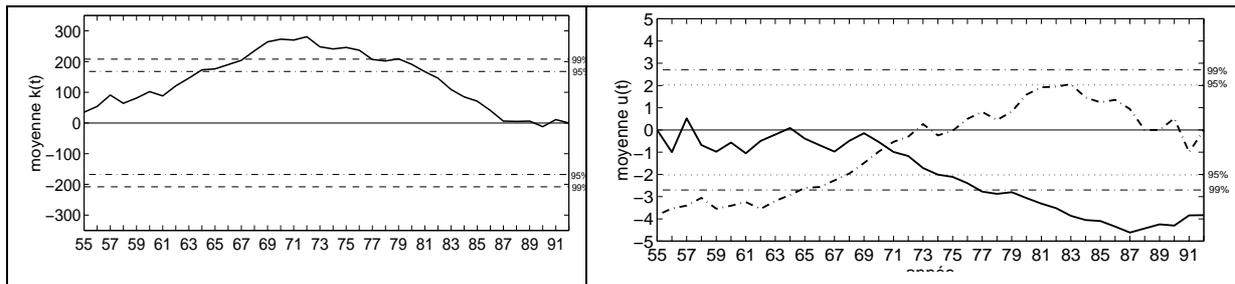


Figure 3.6 : Recherche de rupture de stationnarité par le test de Pettitt dans les dans la série pluviométrique du bassin béninois du Niger (ensemble des sous bassins)

(le seuil de signification de 95 % est en points-tirets ; le seuil de signification de 99 % est matérialisé par des tirets)

Figure 3.7 : Mise en évidence de rupture de stationnarité par le test de Mann-Kendall dans la série pluviométrique du bassin béninois du Niger (ensemble des sous bassins)

(la courbe directe est en trait plein ; la courbe rétrograde est représentée en points-tirets ; le seuil de signification de 95 % est en points ; le seuil de signification de 99 % est matérialisé par un point-tiret en gras)

Le test de Student sur les sous-séries de 1955-1972 et de 1973-1992 confirme que les moyennes de ces sous-périodes sont différentes au seuil de signification de 99 %.

3.2.2.2. Détection de rupture de stationnarité dans les indices pluviométriques régionaux des différents sous bassins

L'application du test de Pettitt (Figure 3.8) sur les séries 1955-1992 des quatre sous bassins souligne clairement la présence d'un changement progressif à partir de 1972 (HOUNDENOU *et al.*, 2005 ; VISSIN *et al.*, 2007) dans les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota à Gbassè. Dans le sous bassin de la Sota à Coubéri, ce changement s'étale sur l'ensemble des années 1970 (VISSIN *et al.*, 2006).

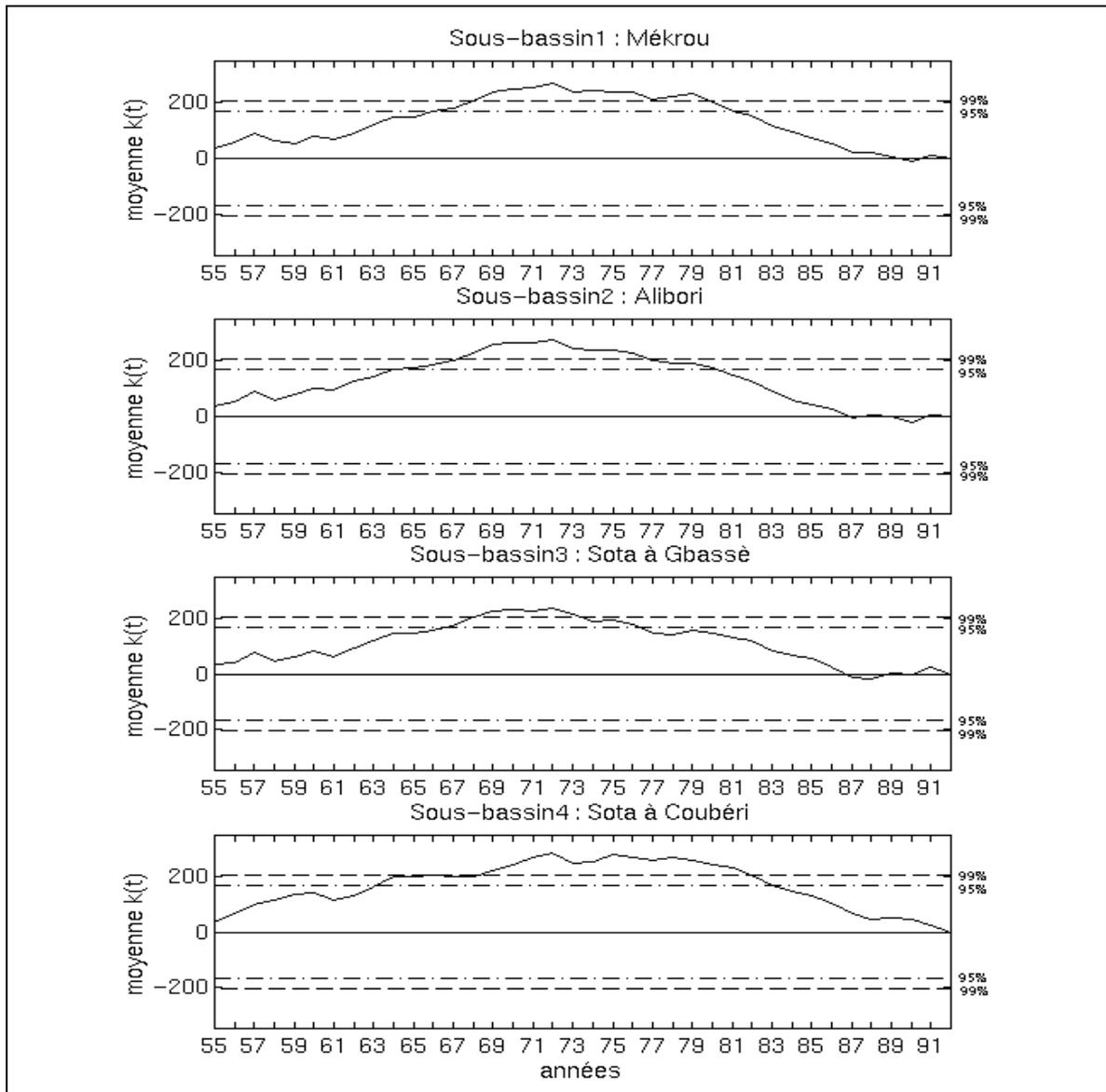


Figure 3.8 : Mise en évidence de rupture de stationnarité par le test de Pettitt dans les séries pluviométriques des sous bassins hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger

(le seuil de signification de 95 % est en points-tirets ; le seuil de signification de 99 % est matérialisé par des tirets)

Le test de Mann Kendall (Figure 3.9) met en évidence une tendance décroissante significative au seuil de 5 % dans chacun des sous bassins.

L'application du test de Pettitt sur les sous-séries 1955-1972 et 1973-1992 (Figure 3.10) n'a identifié aucune rupture, confirmant les résultats du test de Mann Kendall. Il n'y a donc pas de rupture secondaire dans les sous-séries (1955-1972 et 1973-1992) des sous bassins.

Le test de Student appliqué aux sous-séries pluviométriques 1955-1972 et 1973-1992 confirme une différence entre les moyennes des deux périodes, significative au seuil de 95 % pour tous les sous bassins.

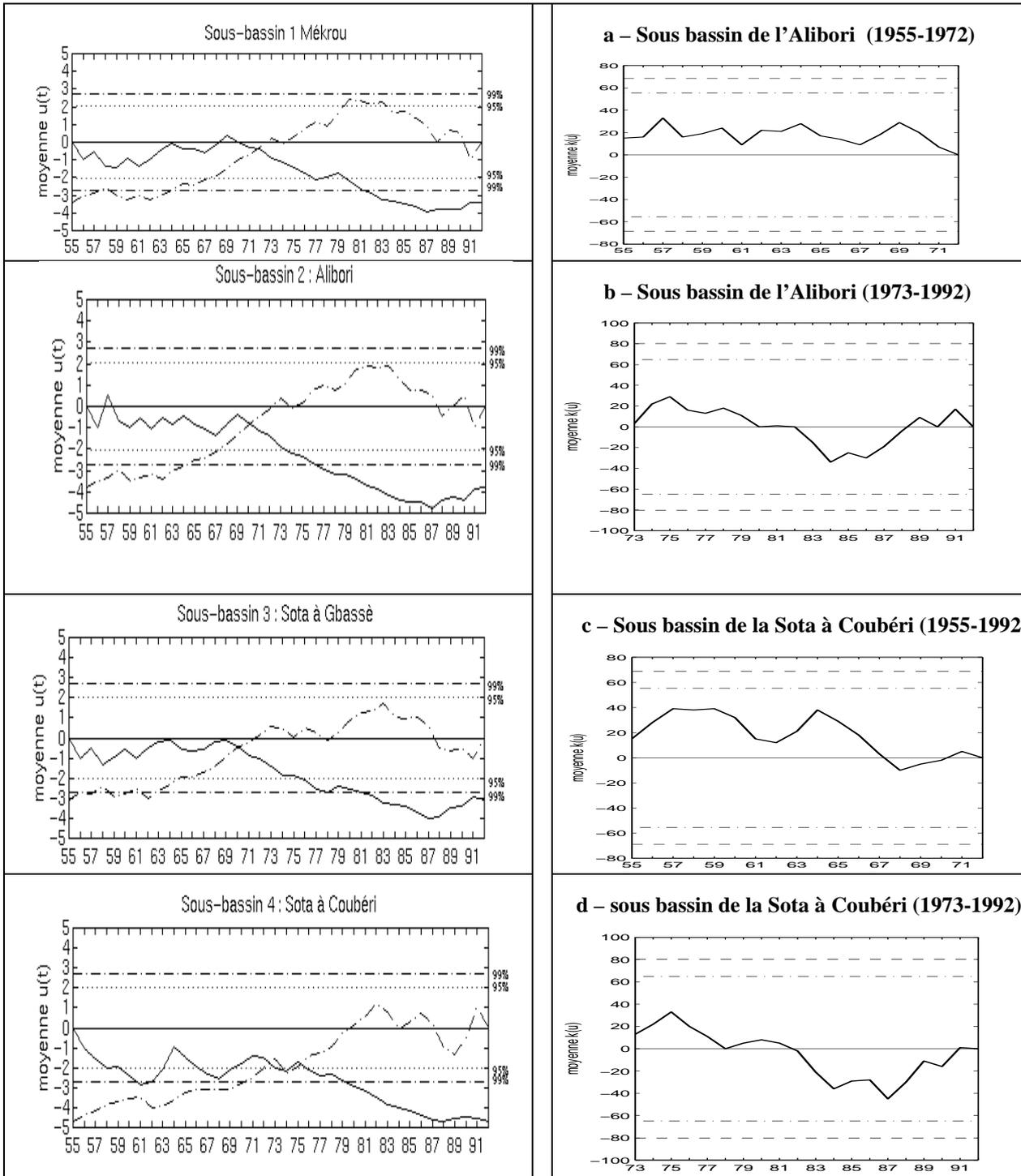


Figure 3.9 : Mise en évidence de ruptures de stationnarité par le test de Mann-Kendall dans les séries pluviométriques des sous bassins du bassin béninois du Niger

(la courbe directe est en trait plein ; la courbe rétrograde est représentée en points-tirets ; le seuil de signification de 95 % est en points ; le seuil de signification de 99 % est matérialisé par un point-tiret en gras)

Figure 3.10 : Recherche de ruptures de stationnarité par le test de Pettitt dans les sous-séries pluviométriques du bassin béninois du Niger

(le seuil de signification de 95 % est en points-tirets le seuil de signification de 99 % est matérialisé par des tirets)

3.2.2.3. Détection de ruptures de stationnarité dans les séries pluviométriques stationnelles du bassin béninois du fleuve Niger

Le test de Pettitt (Figure 3.11) appliqué aux séries pluviométriques des différentes stations montre des ruptures de stationnarité en 1970 à Bembéréké et Ina au sud du bassin et Banikoara au nord du bassin. Malanville à l'extrême-nord présente un changement entre 1971 et 1979 au seuil de signification de 95 %. A Kandi, la péjoration pluvieuse s'amorce en 1968 et devient significative à 95 % en 1979, comme l'ont montré HOUNDENOU (1999) et AGLI (1995). Les stations de Gaya, Kalalé et de Nikki ne présentent pas de rupture significative, même au seuil de 95%. On peut donc dire qu'à l'échelle stationnelle, les ruptures deviennent moins souvent significatives et sont plus réparties dans le temps.

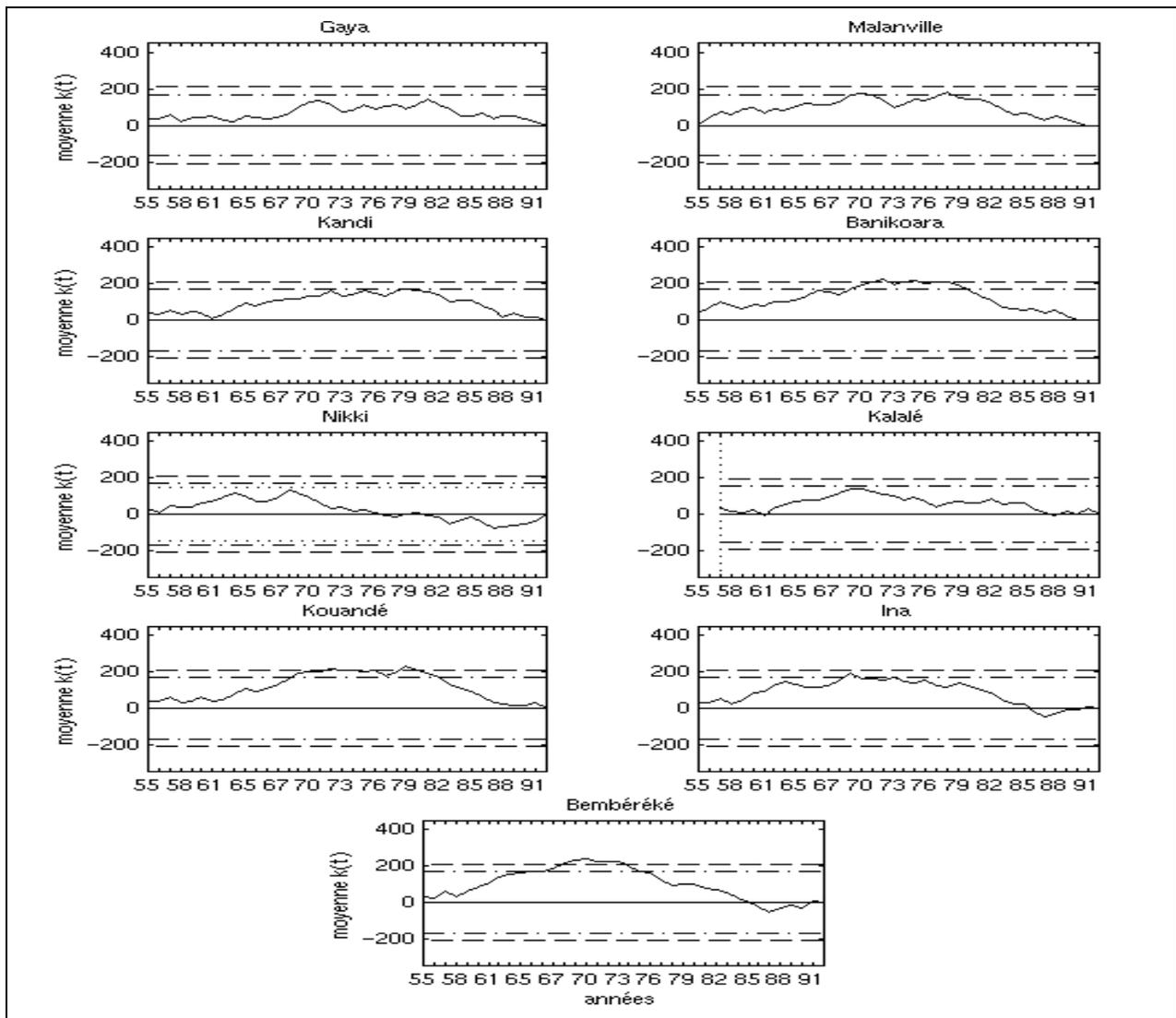


Figure 3.11 : Mise en évidence de rupture de stationnarité dans les séries pluviométriques des stations par le test de Pettitt

(le seuil de signification de 95 % est en points-tirets ; le seuil de signification de 99 % est matérialisé par des tirets)

3.2.3. Répartition intra-saisonnière comparée des précipitations des sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992

3.2.3.1. Evolution dans l'ensemble du bassin du Niger au Bénin

L'étude comparée des deux sous-périodes permet de mettre en évidence la baisse marquée des hauteurs de pluie saisonnières sur la sous-période 1973-1992. La figure 3.12 montre que la saison pluvieuse de la sous-période 1955-1972 est plus arrosée, avec un maximum d'août supérieur à 250 mm.

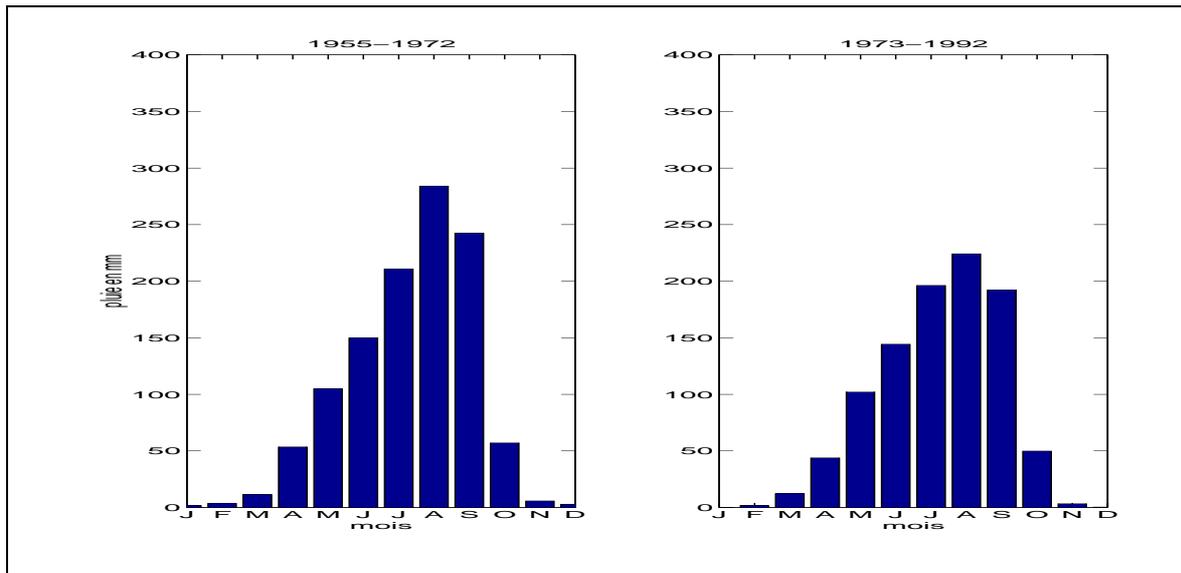


Figure 3.12 : Régime pluviométrique des périodes 1955-1972 et 1973-1992 dans le bassin béninois du fleuve Niger

La sous-période 1973-1992 est nettement déficitaire (Tableau 3.2). Les quatre mois les plus humides (juin, juillet, août et septembre) fournissent 78.28 % de la pluviométrie annuelle de la période 1955-1992. Le déficit de ces mois durant la sous-période 1973-1992 par rapport à la sous-période 1955-172 est de 15 %. Le mois d'août paraît marqué par la plus forte péjoration pluviométrique observée dans le bassin béninois du fleuve Niger, avec un déficit pluviométrique de plus de 22 %.

Tableau 3.2 : Déficients entre les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 des mois les plus humides dans le bassin béninois du fleuve Niger

Mois	Pluviométrie en mm			Déficit (%)
	1955-1992	1955-1972	1973-1992	
Juin	147	150	144	-4
Juillet	203	211	196	-7
Août	253	284	225	-22
Septembre	216	243	192	-21
Total	819	888	757	-15

Pour étudier le bilan hydrologique dans chacun des sous bassins, il est nécessaire d'analyser des indices régionaux de ces sous bassins permettant de cerner l'évolution des hauteurs de pluie dans le bassin béninois du fleuve Niger

3.2.3.2. Evolution dans les sous bassins

L'évolution de la pluviométrie moyenne intermensuelle des deux sous-périodes (Figure 3.13) indique, pour tous les sous bassins, une saison pluvieuse avant 1972 très importante, avec un maximum d'août supérieur à 250 mm.

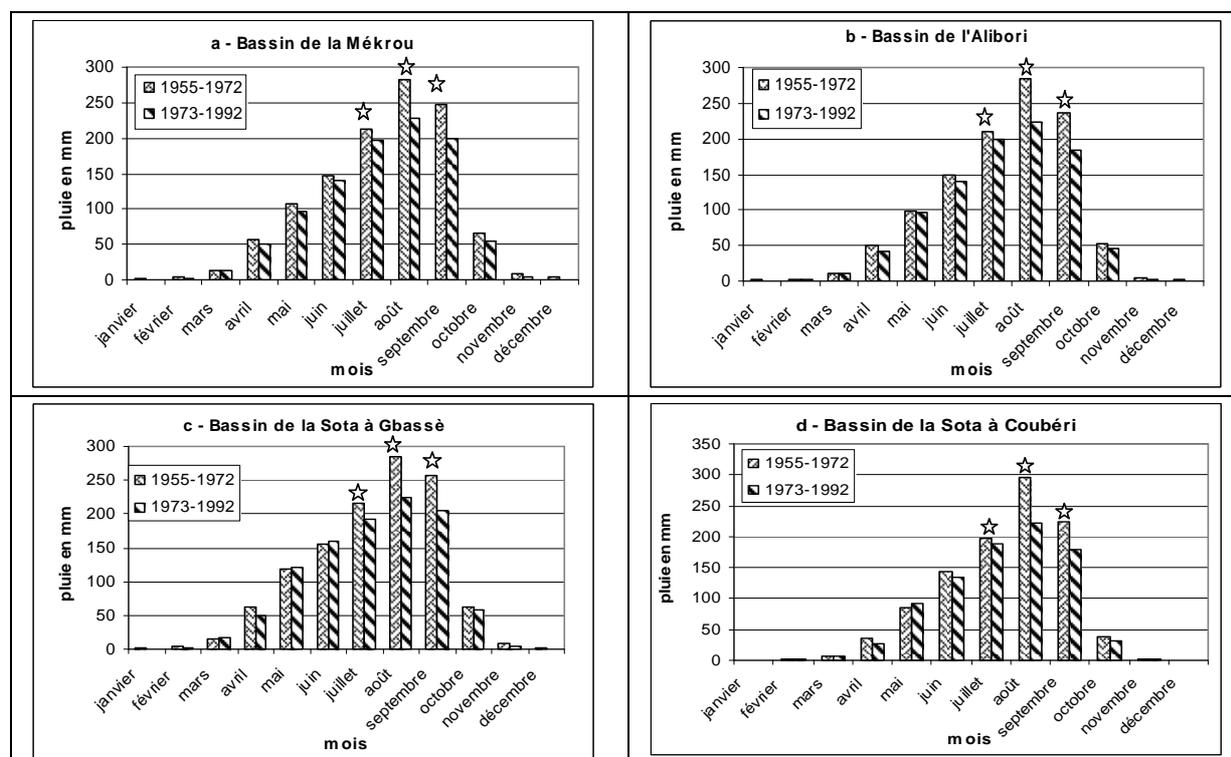


Figure 3.13 : Régime pluviométrique des périodes 1955-1972 et 1973-1992 dans les sous bassins du bassin béninois du fleuve Niger

☆ mois présentant une différence significative entre les deux sous-périodes au test de Student à 95 %

La sous-période 1973-1992 est en revanche marquée par une baisse des lames d'eau précipitées pendant les mois les plus humides (juin, juillet, août, septembre) et par un étalement plus sensible des pluies pendant la saison. La diminution n'est significative à 95 % qu'en juillet, août et septembre, dont la moyenne pluviométrique 1955-1992 représente, pour chacun de ces mois, 18 à 27 % de celle de l'ensemble de l'année (Tableau 3.3). Le mois de juin, bien que son poids dans la pluviométrie annuelle des sous bassins soit non négligeable (13 % à 15 %, Tableau 3.3) ne présente pas de baisse significative des pluies.

Tableau 3.3 : Poids de chacun des mois les plus arrosés dans la moyenne annuelle de la période 1955-1992 dans les sous bassins du bassin béninois du fleuve Niger

Sous bassin	Poids de chaque mois en %			
	juin	juillet	août	septembre
Mékrou	13	19	24	21
Alibori	14	20	25	20
Sota à Gbassè	14	18	23	21
Sota à Coubéri	15	20	27	21

Le Tableau 3.4 souligne bien le rôle important joué par ces quatre mois pluvieux dans la péjoration pluviométrique du bassin. Le déficit cumulé des mois de juin, juillet, août et septembre de la sous-période 1973-1992 par rapport à la sous-période 1955-1972 est important et varie très peu d'un sous bassin à l'autre : -15 % pour la Mékrou, -16 % pour l'Alibori, -15 % pour la Sota à Gbassè et -16 % pour la Sota à Coubéri. Les déficits des mois d'août et de septembre paraissent déterminants dans la baisse pluviométrique observée dans les sous bassins, puisque on assiste à une diminution d'un cinquième à un quart des hauteurs de pluie durant ces deux mois. Cependant, le déficit du mois de juillet n'est pas négligeable.

Tableau 3.4 : Déficit pluviométrique des mois les plus humides entre les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 dans les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori, de la Sota à Gbassè et de Sota à Coubéri

A – Sous bassin de la Mékrou

Mois	Pluviométrie en mm				
	1955-1992	1955-1972	1973-1992	Ecart	Déficit (%)
Juin	143	147	140	-7	-5
Juillet	204	211	188	-23	-11
Août	254	283	227	-56	-20
Septembre	222	247	199	-48	-20
Total	823	888	754	-134	-15

B – Sous bassin de l'Alibori

Mois	Pluviométrie en mm				
	1955-1992	1955-1972	1973-1992	Ecart	Déficit (%)
Juin	144	149	139	-10	-7
Juillet	205	213	193	-20	-9
Août	252	285	222	-63	-23
Septembre	207	232	181	-51	-21
Total	808	879	735	-144	-16

C – Sous bassin de la Sota à Gbassè

Mois	Pluviométrie en mm				
	1955-1992	1955-1972	1973-1992	Ecart	Déficit (%)
Juin	158	159	150	-9	-6
Juillet	203	215	183	-33	-15
Août	253	284	225	-59	-21
Septembre	230	255	205	-50	-20
Total	844	913	778	-135	-15

D – Sous bassin de la Sota à Coubéri

Mois	Pluviométrie en mm				
	1955-1992	1955-1972	1973-1992	Ecart	Déficit (%)
Juin	139	143	136	-8	-5
Juillet	193	211	189	-22	-11
Août	257	283	221	-62	-22
Septembre	201	224	179	-45	-20
Total	790	861	725	-136	-16

La pluviométrie cumulée des mois de juin, juillet, août et septembre représente une part importante de la moyenne annuelle de la période 1955-1992 dans les sous bassins (Tableau 3.5) : 77 % dans la Mékrou, 79 % dans l'Alibori, 76 % dans la Sota à Gbassè et 83 % dans la Sota à Coubéri.

On note une diminution du poids de ces quatre mois de la sous-période 1973-1992 (74 à 84 %) par rapport à la sous-période 1955-1972 (77,3 à 85 %). Cependant, il n'y a pas de transformation radicale du régime pluviométrique dans les sous bassins.

Tableau 3.5 : Récapitulation de l'impact du déficit des mois humides sur le déficit global entre les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 dans les sous bassins

a. Mékrou	1955-1992	1955-1972	1973-1992	Ecart (mm)	Déficit (%)
	(mm)	(mm)	(mm)	1955-1972 et 1973-1992	1955-1972 et 1973-1992
12 mois de l'année	1 063	1 149	985	-164	-14*
4 mois plus arrosés (juin, juillet, août, septembre)	823	888	754	-134	-15*
Mois secs (janv., fév., mars, avr., mai, oct., nov., déc.)	240	261	231	-30	-11
Poids des 4 mois dans la pluie annuelle (%)	77 %	77,3 %	76,5%		

b. Alibori	1955-1992	1955-1972	1973-1992	Ecart (mm)	Déficit (%)
	(mm)	(mm)	(mm)	1955-1972 et 1973-1992	1955-1972 et 1973-1992
12 mois de l'année	1 019	1 103	943	-160	-14*
4 mois plus arrosés (juin, juillet, août, septembre)	808	879	735	-144	-16*
Mois secs (janv., fév., mars, avr., mai, oct., nov., déc.)	211	224	208	-16	-7
Poids des 4 mois dans la pluie annuelle (%)	79 %	80 %	79 %		

c. Sota à Gbassè	1955-1992	1955-1972	1973-1992	Ecart (mm)	Déficit (%)
	(mm)	(mm)	(mm)	1955-1972 et 1973-1992	1955-1972 et 1973-1992
12 mois de l'année	1108	1190	1034	-156	-13*
4 mois plus arrosés (juin, juillet, août, septembre)	844	913	778	-135	-15*
Mois secs (janv., fév., mars, avr., mai, oct., nov., déc.)	264	277	252	-25	-8
Poids des 4 mois dans la pluie annuelle (%)	76 %	77 %	74 %		

d. Sota à Coubéri	1955-1992	1955-1972	1973-1992	Ecart (mm)	Déficit (%)
	(mm)	(mm)	(mm)	1955-1972 et 1973-1992	1955-1972 et 1973-1992
12 mois de l'année	955	1033	885	-148	-14*
4 mois plus arrosés (juin, juillet, août, septembre)	790	861	725	-136	-16*
Mois secs (janv., fév., mars, avr., mai, oct., nov., déc.)	165	172	160	-12	-6
Poids des 4 mois dans la pluie annuelle (%)	83 %	85 %	82 %		

☆ Présentant une différence significative à 95 % entre les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 au test de Student

3.2.2.3. Etude de la variabilité interannuelle des lames précipitées des mois humides et des mois secs dans les sous bassins pour la période 1955-1992

L'analyse de la figure 3.14, met en relief une évolution interannuelle différente entre les mois humides et les mois secs pour la période 1955-1992.

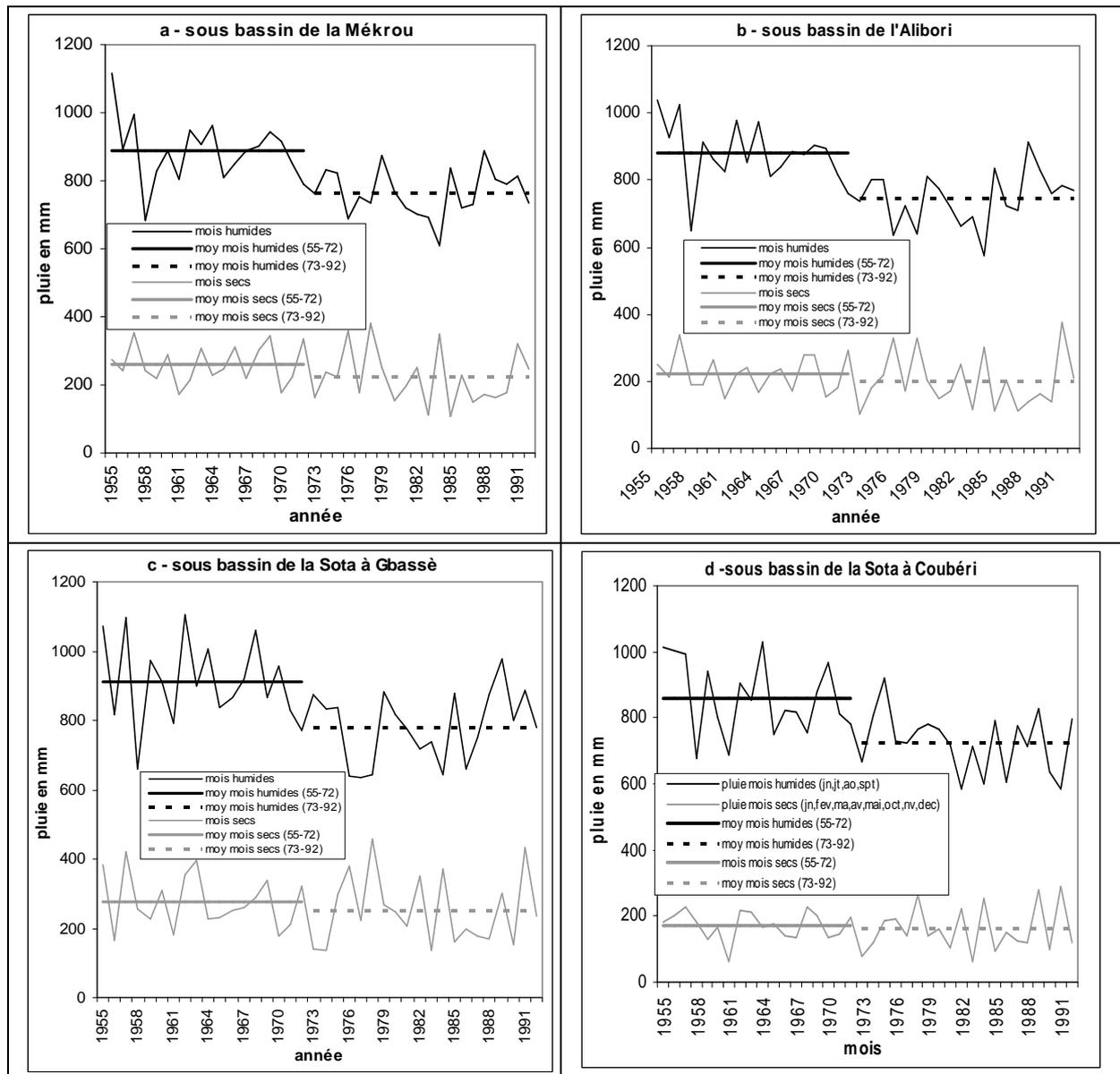


Figure 3.14 : Evolution interannuelle des précipitations des mois humides et des mois sec (1955-1992)

En effet, les mois humides connaissent une tendance non linéaire à la baisse avec un fléchissement important vers 1972. Le cas de l'Alibori le montre bien : avant 1972, juin-septembre recueille 878 mm, et après, 745 mm, soit un écart de -134 mm entre les deux sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992.

En revanche, pendant les mois secs, on voit une certaine stationnarité ; l'écart entre les moyennes des sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 est en effet très faible : pour l'Alibori, par exemple, 224 mm (1955-1972) et 208 mm (1973-1992), soit un écart de 16 mm.

Cette étude souligne bien que les mois humides sont déterminants dans la péjoration pluviométrique (« perte » météorologique) de ces dernières décennies dans tous les sous bassins du bassin du Niger au Bénin.

3.2.3. Comparaison des régimes pluviométriques des sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 à partir des hauteurs journalières

Les données journalières de hauteurs pluvieuses ont été lissées sur vingt jours afin de faire apparaître clairement l'évolution entre les deux sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992.

L'analyse des courbes des précipitations journalières (Figure 3.15) montre une baisse sensible de la pluviométrie après 1972 en août et septembre concentrant le déficit au cœur de la saison humide en particulier durant les maxima journaliers d'août.

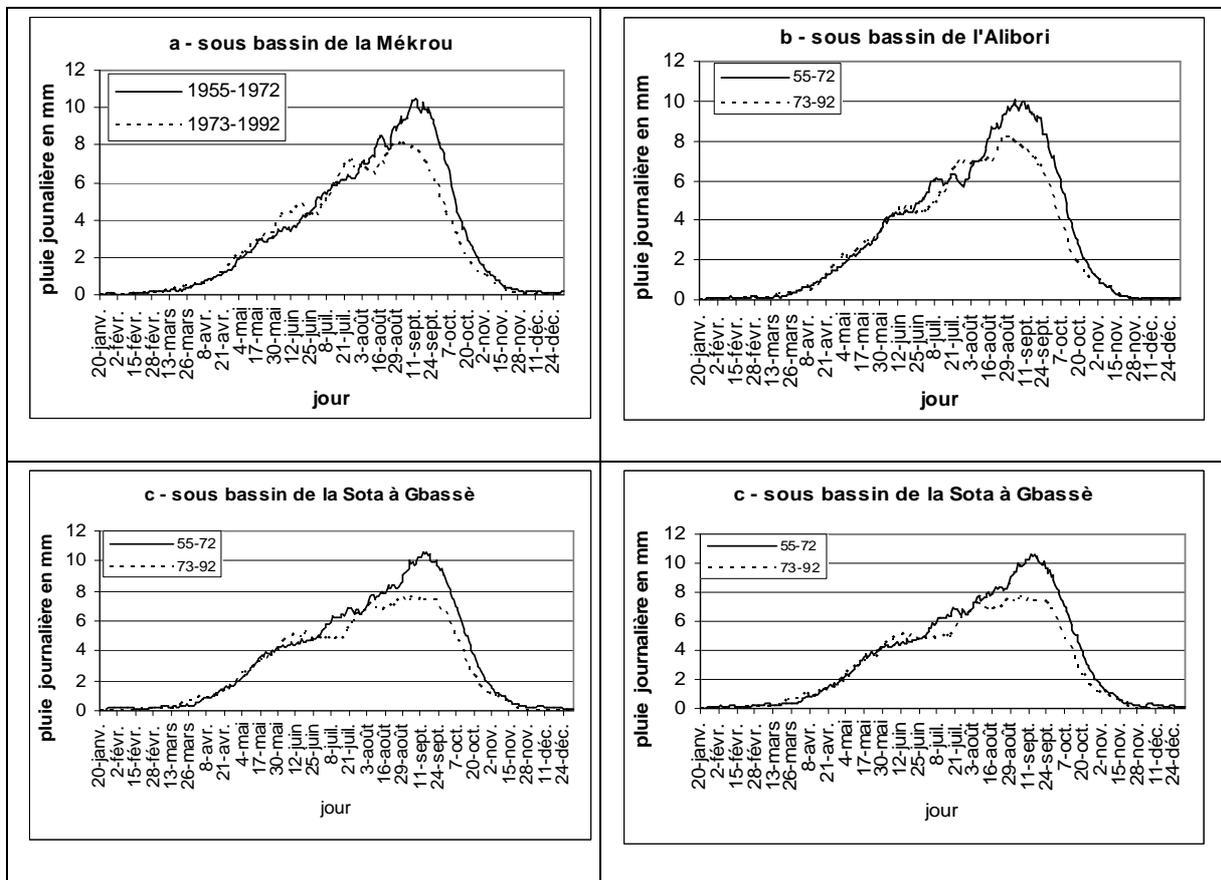


Figure 3.15 : Variabilité pluviométrique journalière sur les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992

On note une augmentation irrégulière des pluies en début de saison des pluies, avec des pauses en mai, juin et juillet. Cependant, la diminution est beaucoup plus nette en fin de saison dans tous les sous bassins.

L'écart de la pluviométrie du mois de juin entre les deux sous-périodes n'est ainsi pas très marqué, alors que ce mois représente une part non négligeable de la pluviométrie annuelle. Tous ces résultats confirment ceux des études antérieures (LOUVET, 2002).

3.2.4. Evolution interannuelle des maxima journaliers dans les sous bassins pour la période 1955-1992

Les maxima journaliers, calculés annuellement, connaissent une très faible tendance à la baisse entre 1955 et 1992 (Figure 3.16). La variabilité interannuelle des maxima diffère d'un sous bassin à l'autre.

Toutefois, dans tous les sous bassins, les valeurs les plus élevées des maxima pluvieux journaliers sont enregistrées avant 1972 :

- Mékrou en 1964 avec 91 mm, en 1969 avec 75 mm et en 1971 avec 56 mm ;
- Alibori en 1957 avec 62 mm, en 1969 avec 92 mm et 1971 avec 72 mm ;
- Sota à Gbassè en 1958 avec 113 mm, en 1969 avec 67 et en 1970 avec 63 mm ;
- Sota à Coubéri en 1965 avec 79 mm, en 1968 avec 61 mm et en 1970 avec 107 mm.

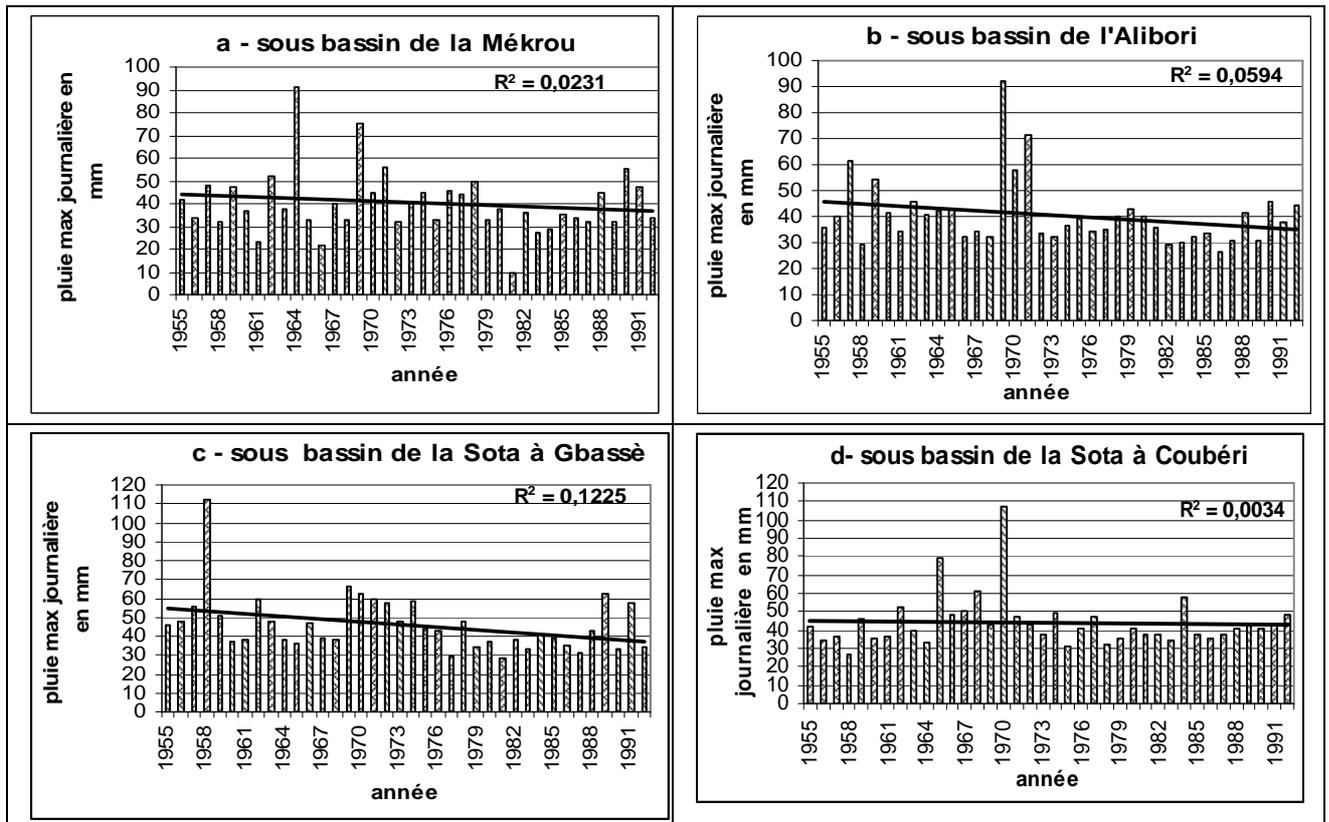


Figure 3.16 : Maxima journaliers dans le bassin béninois du fleuve Niger

L'analyse de la variabilité du bilan climatique permet de mettre en évidence les périodes saisonnières et les années sèches ou humides.

3.3. Bilan climatique ou pluie utile

Il exprime la différence entre le total des abats pluviométriques et la valeur de l'évapotranspiration potentielle (ETP) (SUTCLIFFE et PIPER, 1985). Le bilan climatique permet donc de mettre en évidence l'évolution du climat donné par la différence entre les apports pluvieux et les pertes partielles par évaporation. Cet indicateur a surtout été appliqué à des régions ayant une saison sèche et une saison des pluies. C'est bien le cas du bassin béninois du fleuve Niger.

3.3.1. Bilan climatique annuel dans les sous bassins

Au pas de temps annuel, le bilan climatique est déficitaire pour la période 1955-1992 dans tous les sous bassins car l'évapotranspiration potentielle annuelle est supérieure à la pluie totale annuelle quelle que soit l'année considérée. L'étude mensuelle montre que ce déficit n'est pas vérifié tout au long de l'année.

3.3.2. Bilan climatique mensuel dans les sous bassins

Le bilan climatique réalisé au pas de temps mensuel (Figure 3.17) dans les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori, de la Sota à Gbassè et de la Sota à Coubéri identifie deux périodes opposées :

- trois mois humides s'observent de juillet à septembre, avec un maximum en août, sauf sur le sous bassin de la Sota à Gbassè qui en compte quatre (juin, juillet, août septembre). Ces mois fournissent d'importants surplus d'eau aux rivières et favorisent l'alimentation des réservoirs souterrains des sous bassins.

- entre octobre et mai, ce sont les mois secs où la demande évaporatoire de l'atmosphère est très importante, avec un fort amenuisement et même l'assèchement des réserves d'eau du sol.

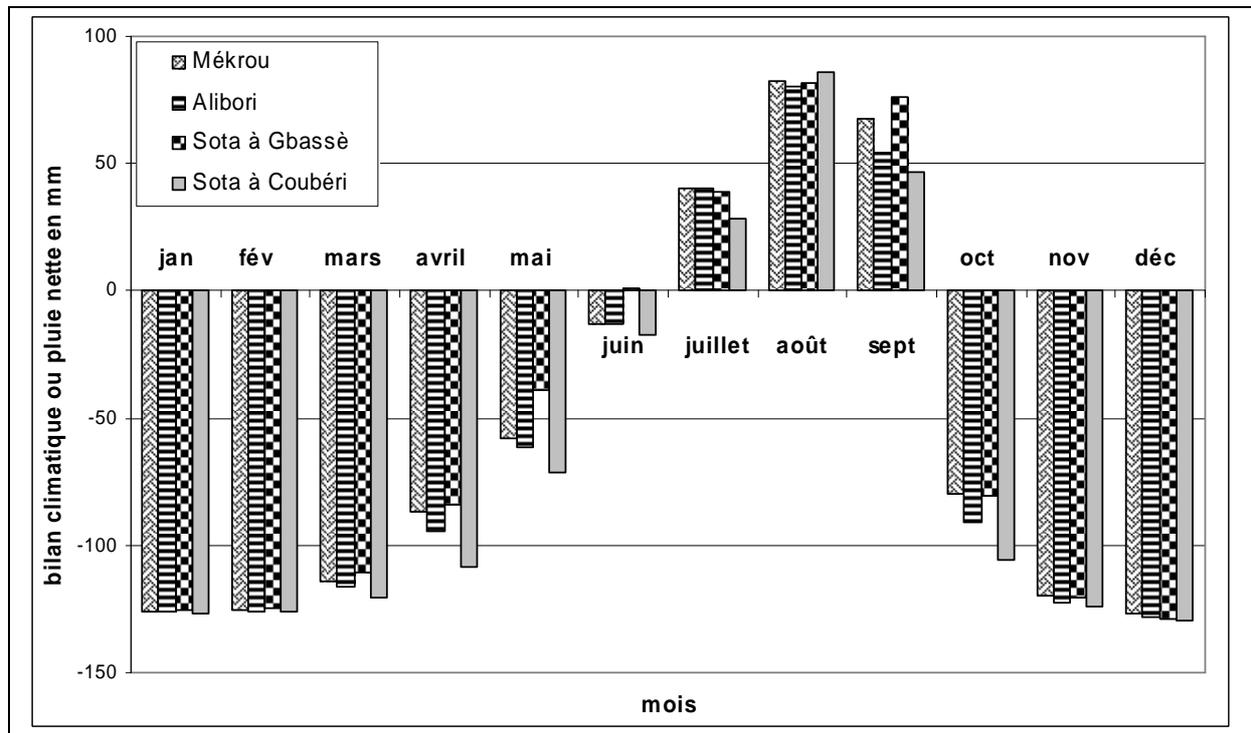


Figure 3.17 : Evolution saisonnière du bilan climatique dans les sous bassins (1955-1992)

Le bilan climatique mensuel comparé (Figure 3.18) montre une baisse marquée du bilan climatique de la sous-période 1973-1992 par rapport à la sous-période 1955-1972. Les mois humides connaissent des déficits climatiques sensibles entre les sous-périodes ci-dessus citées dans tous les sous bassins. Toutefois, les mois secs le deviennent davantage.

Le test de Student sur les moyennes mensuelles des mois humides des sous-périodes montre une différence significative au seuil de 95 %.

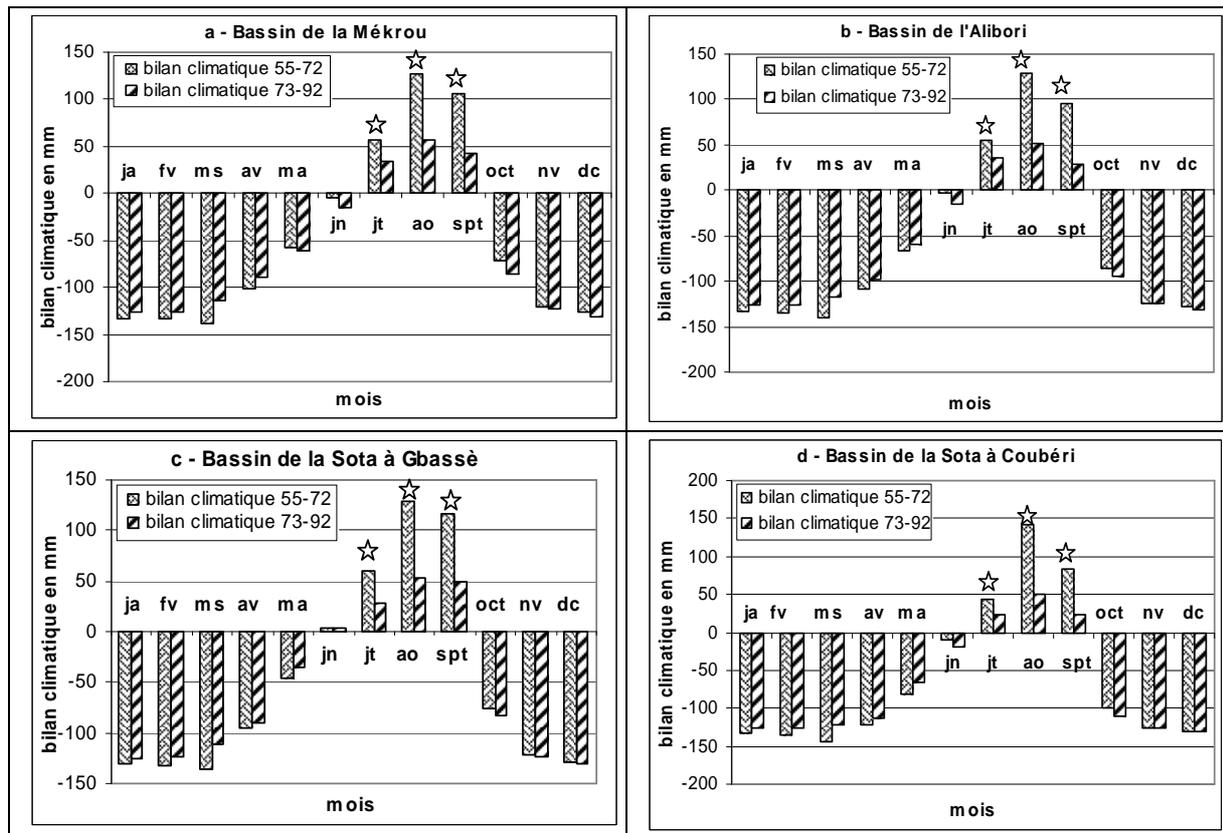


Figure 3.18 : Variation du bilan climatique mensuel sur les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992

* Moyenne bilan climatique des mois significativement différentes au test de Student à plus de 95% sur les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992.

Cependant, les déficits très marqués de la pluie utile des mois humide de la sous-période 1973-1992 par rapport à la sous-période 1955-1972 ne change pas le régime climatique annuel.

3.3.3. Evolution du bilan climatique journalier

La figure 3.19 montre que les bilans des mois de juin, juillet, août et septembre enregistrent les excédents journaliers les plus marqués tout particulièrement concentrés sur les vingt derniers jours du mois d'août et les vingt premiers jours du mois de septembre.

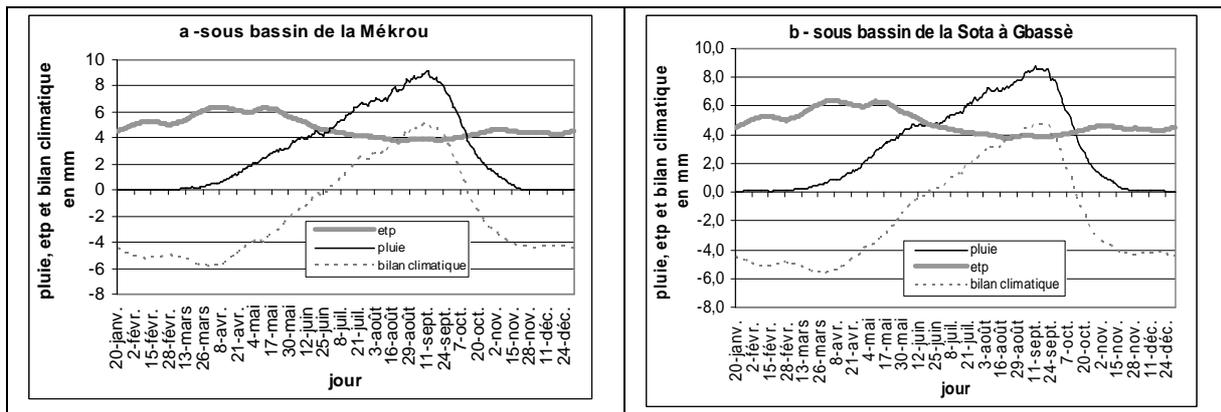


Figure 3.19 : Variation journalière du bilan climatique sur la période 1955-1992
(courbes lissées sur 20 jours)

Ainsi, le bilan climatique journalier présente une baisse marquée de la sous-période 1973-1992 par rapport à la sous-période 1955-1972 (Figure 3.20). Toutefois, on note que ces baisses sont plus marquées au cœur (jours plus arrosés en août et septembre) et vers la fin de la saison des pluies

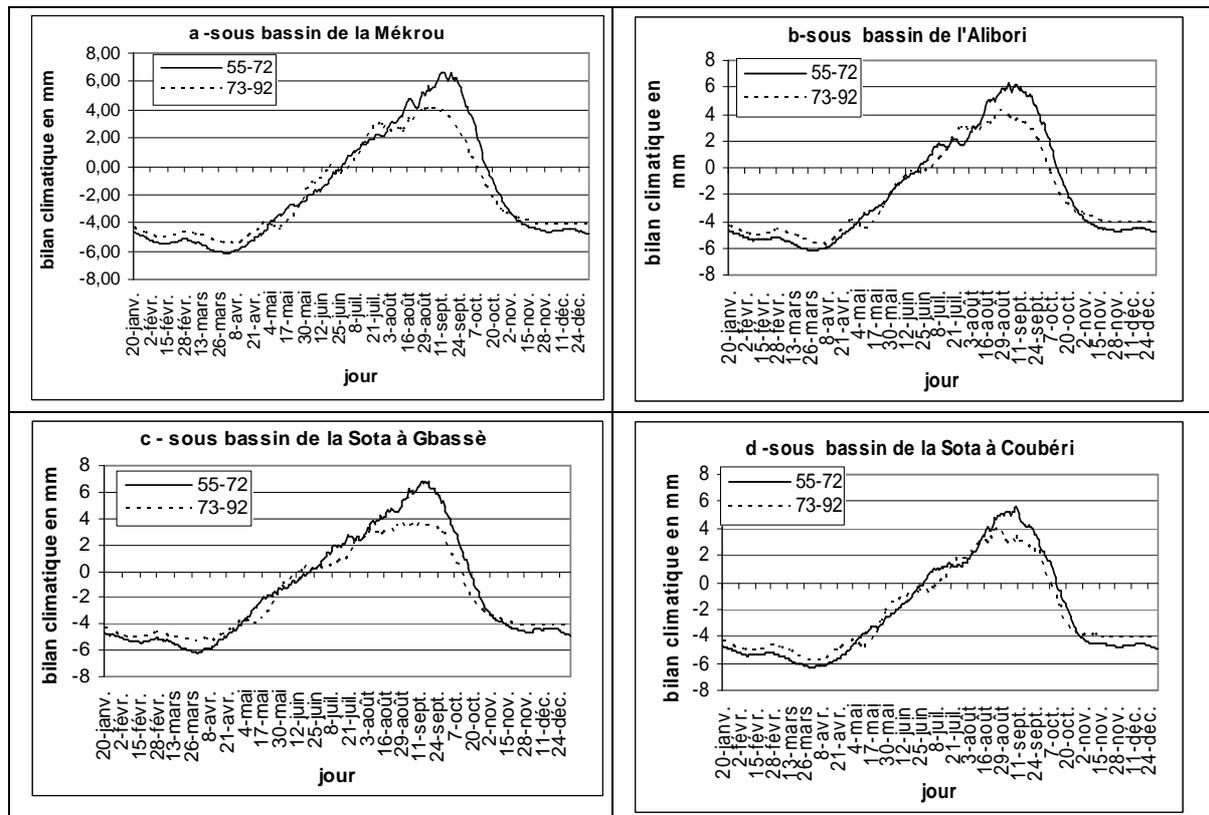


Figure 3.20 : Evolution journalière du bilan climatique dans les sous bassins pour les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992
(courbe lissées sur 20 jours)

Dans ce contexte, il faut suivre l'évolution des apports pluvieux dans chacun des sous bassins pour mieux apprécier les pertes par évaporation.

3.4. Caractéristiques des apports pluviométriques dans les sous bassins pour la période 1955-1992

3.4.1. Apports pluvieux annuels dans les sous bassins

Les apports pluviométriques exprimés par les pluies efficaces déterminent le rythme des excédents ou des déficits en eau, c'est-à-dire la différence entre le total des abats pluviométriques et la valeur de l'évapotranspiration réelle (ETR). Ces apports conditionnent en effet le surplus disponible pour la recharge en eau du sol et pour l'écoulement (Sutcliffe et Piper, 1985 ; Le BARBE *et al.*, 1993). Ils sont donnés par la formule suivante :

$$P_n = P - ETR$$

avec : P_n , apports pluvieux, ou pluie efficace, en mm

P , pluie totale annuelle en mm

ETR, évapotranspiration réelle en mm

La figure 3.21 présente l'évolution interannuelle des apports pluvieux, ou pluie efficace, dans les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori, de la Sota à Gbassè et de la Sota à Coubéri. Dans l'ensemble des sous bassins, les apports au cours des décennies 1951-1960 et 1961-1970 sont très importants avec des maxima dépassant 600 mm par an. Toutefois, on note quelques années avec des apports très faibles, inférieurs à la moyenne interannuelle : ainsi 1961, 1963 et 1965 ; à partir des années 1970, on observe une dégradation sensible des apports pluvieux dans les différents sous bassins. Par exemple, on enregistre 47,86 mm en 1987 dans le sous bassin de la Mékrou, 79,34 mm en 1978 dans le sous bassin de l'Alibori, 42,03 mm en 1977 dans le sous bassin de la Sota à Gbassè et 42,03 mm en 1977 dans le sous bassin de la Sota à Coubéri. L'apport devient généralement inférieur à 200 mm par an.

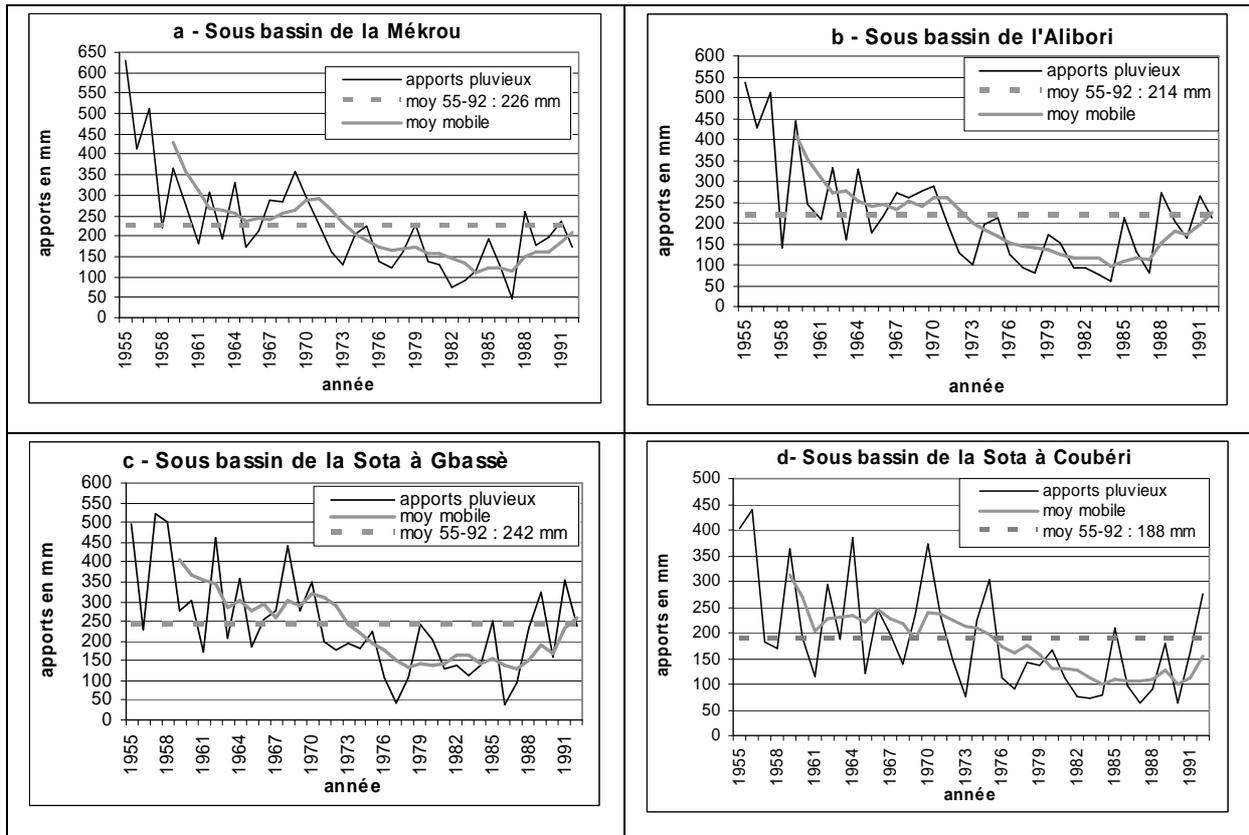


Figure 3.21 : Variabilité des apports pluvieux saisonniers dans le bassin du fleuve Niger au Bénin (1955-1992)

Les décennies 1971-1980 et 1981-1990 connaissent les baisses les plus marquées, avec de légères reprises vers la fin des années 1980, mais toute relatives. L'évolution entre 1955 et 1992 se caractérise donc par une tendance à la baisse. D'une façon générale, avant 1972, les apports demeurent importants et montrent une disponibilité en eau pour l'ensemble des sous bassins du bassin béninois du fleuve Niger. La période après 1972 a connu, en revanche, de graves déficits, reflétant la récession pluviométrique qui s'est installée vers le début de la décennie 1970 et qui a largement contribué à l'émergence des contraintes hydriques dans les sous bassins.

Pour analyser la variabilité de la réserve en eau du sol dans les sous bassins, on a déterminé le coefficient α ou $\alpha = \frac{P_i}{ETP_i}$, avec P_i : la pluie de l'année i en mm et ETP_i : l'évapotranspiration potentielle de l'année i en mm, (Cf chapitre 2) qui traduit la disponibilité en eau des premiers horizons du sol (SUTCLIFFE et PIPER, 1985 ; LE BARBE *et al.*, 1993).

Cette évaluation est approximative parce que l'on ne connaît pas précisément le comportement du système sol/végétation vis-à-vis de l'évaporation. Toutefois, le suivi du coefficient α permet d'avoir une certaine idée de l'évolution du stock d'eau dans le sol au cours de la période 1955-1992. La figure 3.22 souligne des anomalies négatives très marquées à partir de la décennie 1970. Ce qui justifie la tendance à la baisse de la disponibilité en eau observée dans le bassin.

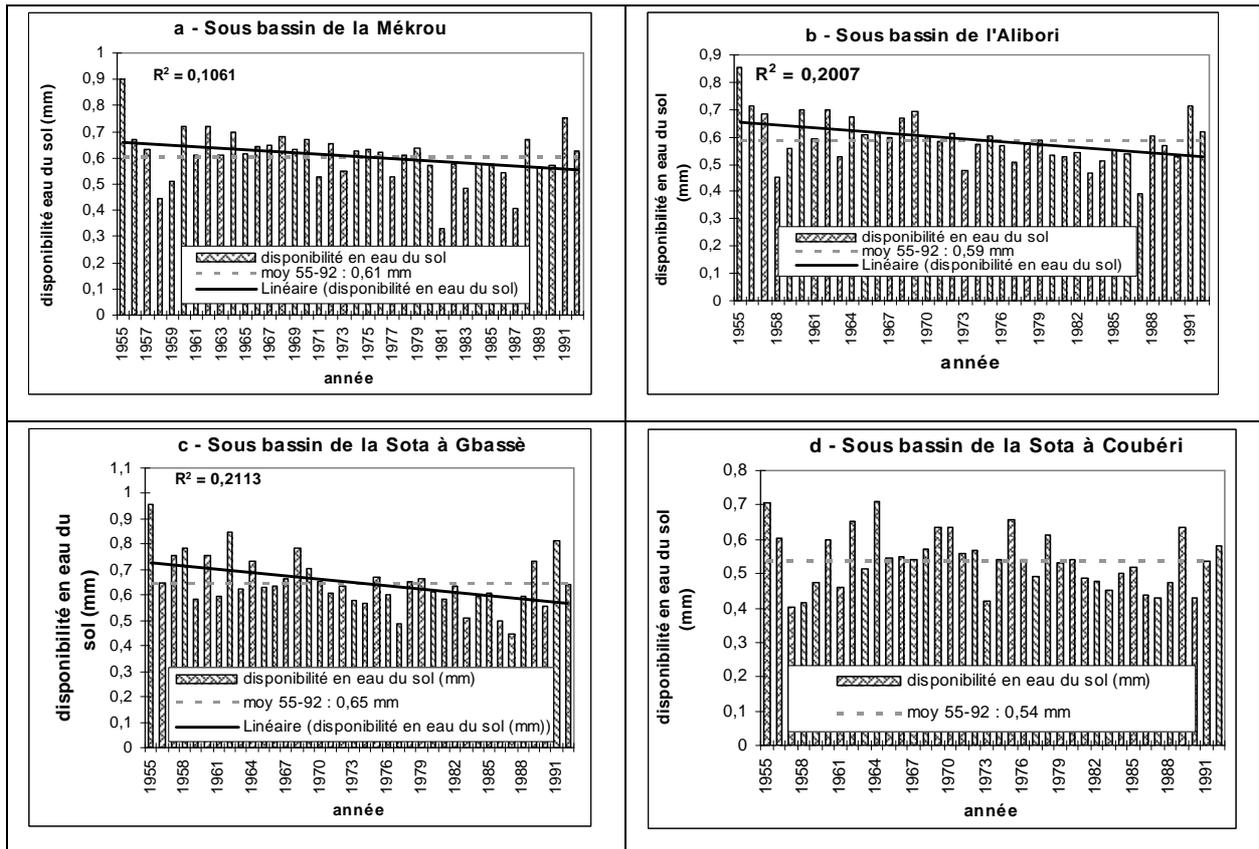


Figure 3.22 : Evolution de la disponibilité en eau des premiers horizons du sol (rapport P/ETP) dans les sous bassins (1955-1992)

Ainsi, l'évolution du stock d'eau dans le sol semble être conforme à celle de la pluie efficace.

La récession pluviométrique des années 1970 a eu des répercussions importantes sur la disponibilité en eau de tous les sous bassins, en accord avec les résultats obtenus par THOMSON (1985) et SUTCLIFFE et PIPER (1986).

L'étude des apports pluvieux met bien en évidence la tendance à la baisse du reste de la lame précipitée après évaporation.

L'analyse mensuelle précise le comportement saisonnier des apports pluvieux aux sous bassins.

3.4.2. Apports mensuels moyens dans les sous bassins

Ils sont très importants pendant les mois dont le bilan climatique est excédentaire : juillet, août et septembre (Figure 3.23).

Les sous bassins de la Mékrou et de la Sota à Gbassè bénéficient d'apports pluvieux à partir du mois d'avril, alors que ceux de l'Alibori et de la Sota à Coubéri n'en reçoivent qu'à partir du mois de mai, c'est-à-dire avec un retard d'un mois. Pendant que tous les sous bassins bénéficient d'au moins six mois d'apports pluvieux pour l'écoulement et la recharge, le bassin de la Sota à Coubéri n'en enregistre, lui, que cinq. Ceci peut se justifier par la position géographique du sous bassin de la Sota à Coubéri, sous influence d'un climat soudano-sahélien au nord-est du bassin béninois du fleuve Niger. Toutefois, ce sous bassin possède le réservoir souterrain le plus important, drainant une grande superficie de grès et il reçoit, au cœur de la saison des pluies (août), la hauteur d'eau la plus élevée : 96 mm, contre 91 mm pour la Mékrou et pour la Sota à Gbassè, 90 mm pour l'Alibori.

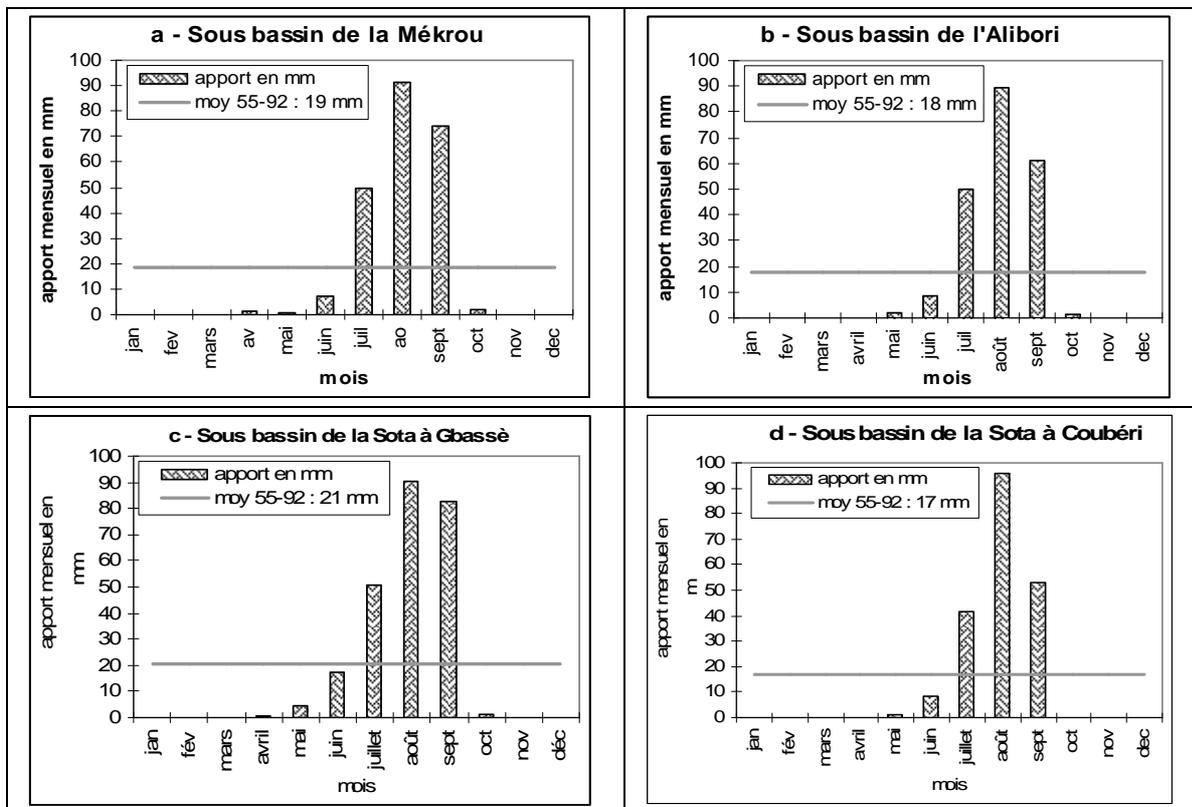


Figure 3.23 : variabilité intra-saisonnière des apports pluvieux dans le bassin béninois du fleuve Niger (1955-1992)

L'étude de la variabilité des écoulements permet d'apprécier la dynamique hydrologique dans les sous bassins du fleuve Niger au Bénin

3.5. Evolution de l'écoulement dans les sous bassins pour la période 1955-1992

3.5.1. Variabilité interannuelle de l'écoulement annuel

Pour analyser les variations de l'écoulement, le choix du bassin versant comme unité spatiale d'étude s'impose. Nous étudions cette évolution dans les sous bassins hydrologiques de la Mékrou, de l'Alibori, de la Sota à Gbassè et de la Sota à Coubéri.

La figure 3.24 présente l'évolution interannuelle des débits moyens annuels (valeurs centrées réduites) de chacune des rivières. La période de plus forts débits entre 1955 et 1972 a été marquée par les crues de 1955, 1957, 1959, 1960, 1962, 1967 et 1969. Des années de grands déficits d'écoulement comme 1976, 1983, 1984, 1987 sont observées sur la période 1973-1992 et dans tous les sous bassins, les débits sont en baisse au cours des deux dernières décennies (1971-1980 et 1981-1990). Cette tendance persistante mérite d'être soulignée, montrant une dégradation durable des conditions du système hydrologique sur tout l'espace d'étude, malgré un retour à de meilleures conditions de précipitations après 1989-1990.

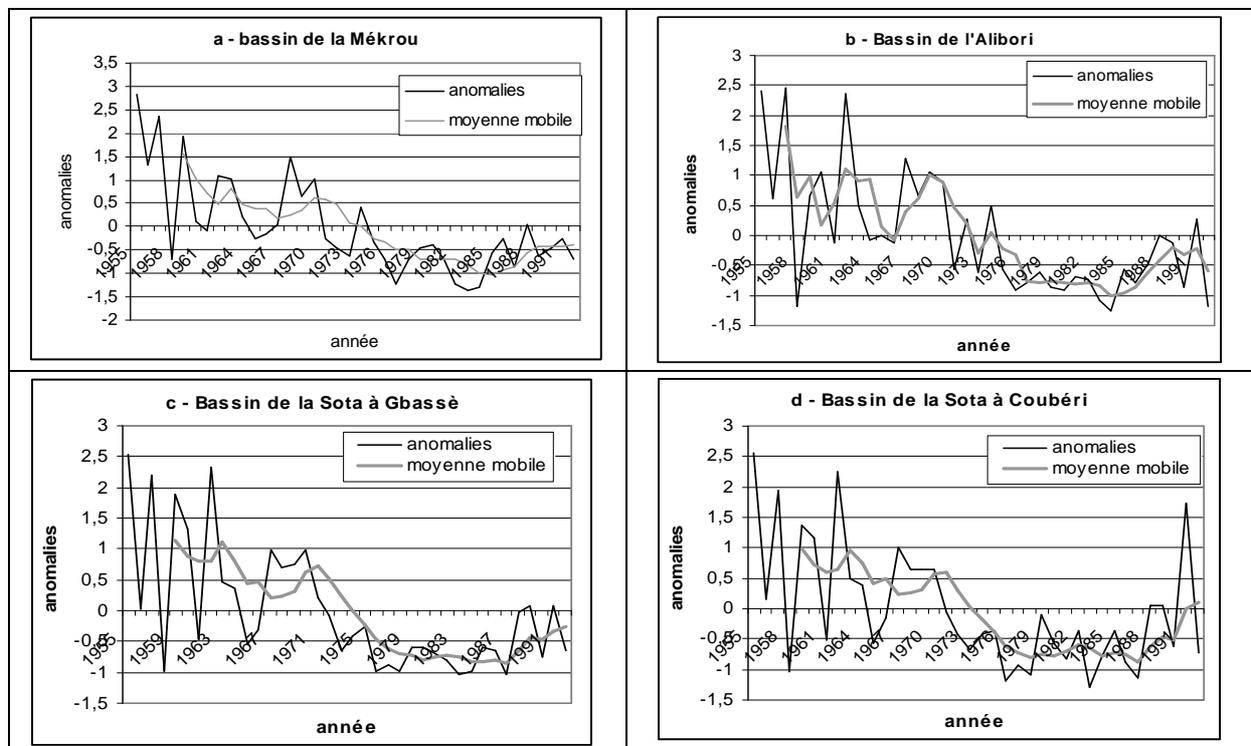


Figure 3.24 : Evolution des écoulements dans les sous bassins (1955-1992)

La recherche de rupture de stationnarité dans les séries hydrométriques permet de mieux comprendre le comportement de l'écoulement dans les sous bassins sur la période 1955-1992.

3.5.2. Détection des ruptures de stationnarité dans les séries hydrométriques annuelles des sous bassins

Le test de Pettitt appliqué aux séries hydrométriques des sous bassins (période 1955-1992) détecte des ruptures de stationnarité de l'écoulement (valeur du débit moyen annuel) au début de la décennie 1970 en particulier entre 1970 et 1975, significatives à 99 % (Figure 3.25). Le test de Mann-Kendall dont nous ne présentons pas les graphiques, décele également un changement dans l'écoulement des sous bassins entre les périodes 1955-1972 et 1973-1992.

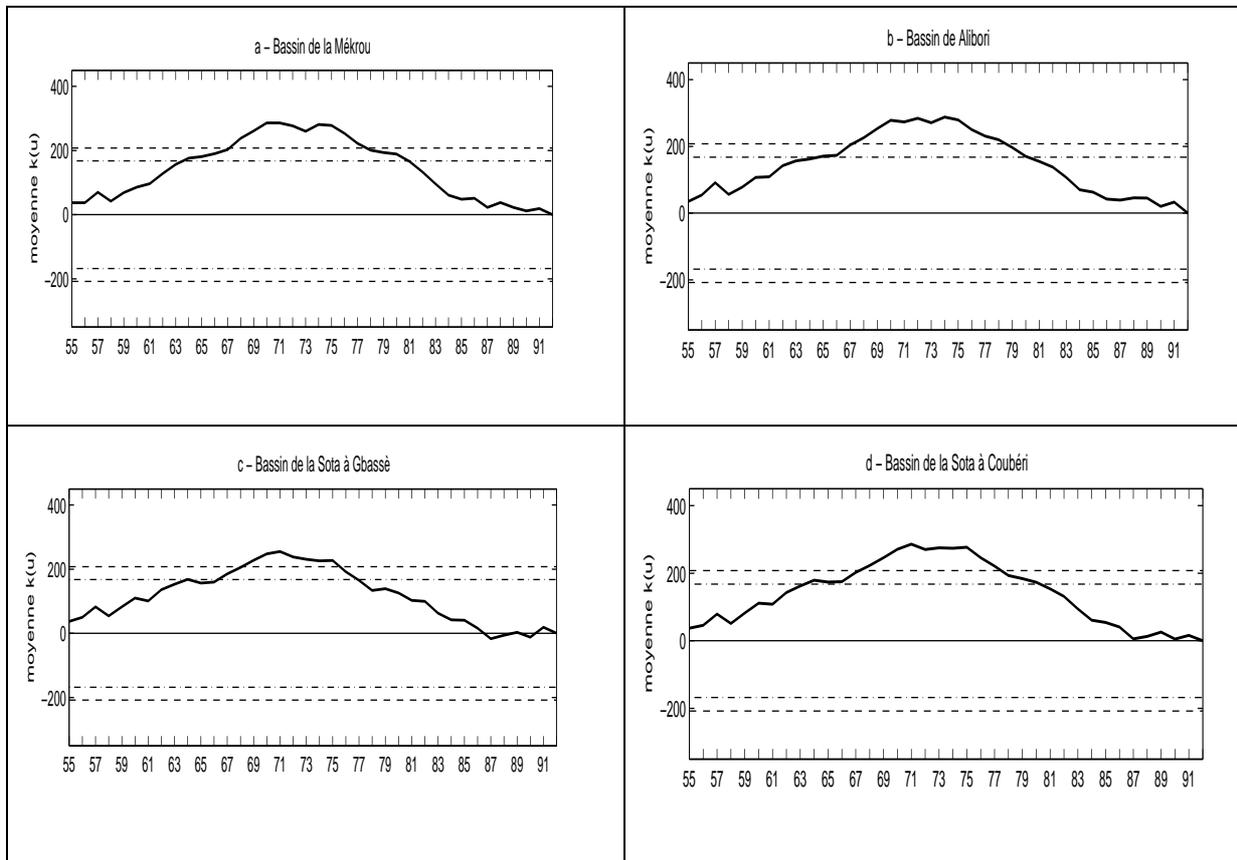


Figure 3.25 : Mise en évidence de rupture de stationnarité dans les séries hydrologiques annuelles par le test de Pettitt dans les sous bassins pour la période 1955-1992

3.5.3. Etude de la variabilité interannuelle des lames écoulées dans les sous bassins pour les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992

La rupture identifiée dans les séries hydrologiques est explicitée par le tableau 3.6 qui montre une nette différence entre les débits des deux sous-séries 1955-1972 et 1973-1992. Le test de Student réalisé sur les moyennes des sous-séries met en évidence leur différence significative au seuil de 95 % quel que soit le sous bassin. Entre les sous-périodes, le débit moyen est divisé par deux voire par trois (par exemple dans le sous bassin de la Sota à Gbassè).

Tableau 3.6 : Déficit d'écoulement entre les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 dans les sous bassins

Sous bassins	Débit en m ³ /s		
	moyenne 1955-1972	moyenne 1973-1992	écart moyenne 1973-1992 et moyenne 1955-1972
Mékrou	30	12	-18
Alibori	38	15	-23
Sota à Gbassè	34	10	-24
Sota à Coubéri	42	20	-22

Ainsi, depuis les années 1970, le bassin béninois du fleuve Niger, comme ceux d'une bonne partie de l'Afrique tropicale (COUREL, 1988 ; OLIVRY, 1993 ; MAHE et OLIVRY, 1995 ; AFOUDA et ADISSO, 1997 ; PARTUREL *et al.*, 1997 ; VISSIN, 2001 ; VISSIN *et al.*, 2003 ; HOUSSOU *et al.*, 2004 ; VISSIN *et al.*, 2006) connaît une baisse importante de ses ressources en eau. L'évolution de l'écoulement est en accord avec les déficits pluviométriques, marqués par une première phase aiguë dans les années 1972 et 1973 et qui n'ont jamais cessé, même s'ils ont varié en extension et en intensité suivant les années. Une recrudescence sensible de la sécheresse s'est manifestée en 1983 et 1984 et les déficits ont globalement perduré jusqu'à la période actuelle, exacerbés au niveau des écoulements des cours d'eau du bassin. L'incidence de la sécheresse s'est donc largement amplifiée dans les écoulements. Les causes de l'écart entre le déficit pluviométrique et le déficit d'écoulement sont à rechercher, en particulier à l'échelle saisonnière.

3.5.4. Répartition intra-saisonnière comparée des écoulements des sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992

L'étude du régime hydrologique des deux périodes sur les sous bassins (Figure 3.26) met en évidence la baisse considérable de l'écoulement en période de hautes eaux à partir des années 1970.

Ce sont surtout les mois d'août, septembre et octobre qui ont subi les plus fortes baisses d'écoulement. La diminution est plus forte en fin qu'en début de saison. Le déficit relatif de la sous-période 1973-1992 par rapport à la sous-période 1955-1972 s'accroît de juillet à octobre dans la Mékrou, l'Alibori, la Sota à Gbassè comme dans la Sota à Coubéri (Tableau 3.7 a, b, c et d). L'écart des débits cumulés des mois de juillet, août, septembre et octobre entre ces deux périodes est très important : -52 % dans le sous bassin de la Mékrou, -62 % dans le sous bassin de l'Alibori, -68 % dans le sous bassin de la Sota à Gbassè et -53 % dans le sous bassin de la Sota à Coubéri. Le mois d'octobre connaît le déficit d'écoulement le plus élevé, marqué par un retard de deux mois par rapport à celui des pluies (août).

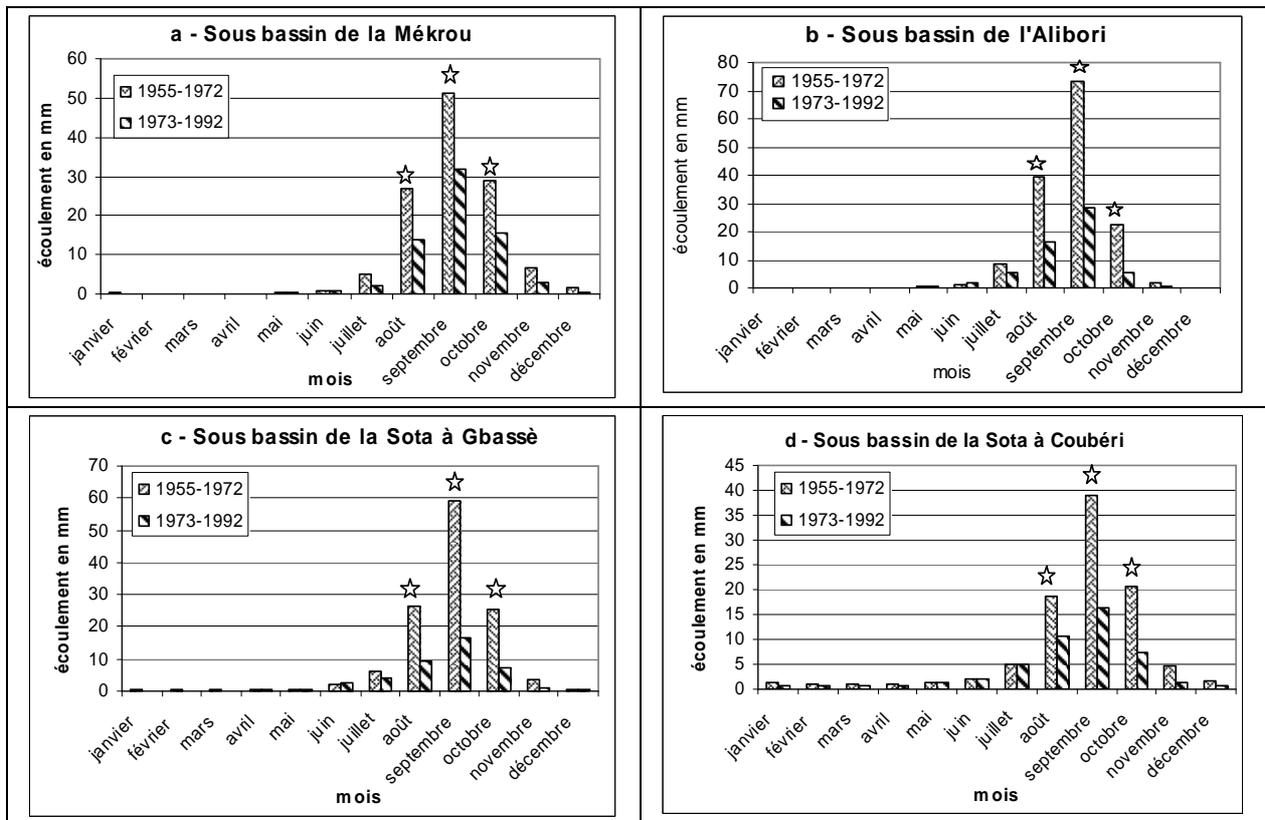


Figure 3.26 : Variation saisonnière de l'écoulement rapporté à la surface des sous bassins sur les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992

☆ Moyennes mensuelles de l'écoulement significativement différentes au test de Student à plus de 95 % sur les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992.

Tableau 3.7 : Déficit d'écoulement entre les périodes 1955-1972 et 1973-1992 des mois à débits importants dans les sous bassins du bassin béninois du fleuve Niger

a. Mékrou à Kompongou

Mois	Débit en m ³ /s				Déficit (%)
	1955-1992	1955-1972	1973-1992	Ecart	
Juillet	8	11	6	-5	-45
Août	42	57	29	-28	-49
Septembre	90	112	52	-60	-53
Octobre	46	61	27	-34	-56
Moyenne	47	60	29	-31	-52

b. Alibori à la route Kandi-Banikoara

Mois	Débit en m ³ /s				Déficit (%)
	1955-1992	1955-1972	1973-1992	Ecart	
Juillet	21	27	16	-11	-41
Août	83	119	50	-69	-58
Septembre	156	231	89	-142	-61
Octobre	42	69	17	-52	-75
Moyenne	76	112	43	-69	62

C - La Sota à Gbassè

Mois	Débit en m ³ /s				Déficit (%)
	1955-1992	1955-1972	1973-1992	Ecart	
Juillet	15	19	12	-7	-37
Août	54	82	29	-53	-65
Septembre	118	189	53	-136	-72
Octobre	49	79	21	-58	-73
Moyenne	59	92	29	-63	-68

D - La Sota à Coubéri

Mois	Débit en m ³ /s				Déficit (%)
	1955-1992	1955-1972	1973-1992	Ecart	
Juillet	26	29	25	-4	-14
Août	72	93	53	-40	-43
Septembre	140	202	84	-118	-58
Octobre	69	104	38	-66	-63
Moyenne	77	107	50	-57	-53

Ainsi, les déficits d'écoulements les plus marqués sont enregistrés en août, septembre et octobre, décalés dans le temps par rapport à ceux des pluies du fait du temps de réponse des systèmes hydrologiques aux apports pluviométriques.

Par ailleurs, les déficits d'écoulements très élevés observés pourraient être le résultat de l'effet conjugué de la récession pluvieuse et d'importantes pertes d'eau par évaporation. Ce point sera examiné dans la section 3.6.

3.5.5. Fluctuation journalière de l'écoulement

Les écoulements moyens journaliers (lissés sur vingt jours) ont une évolution identique pour les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 dans tous les sous bassins hydrologiques (Figure 3.27), avec des maxima enregistrés en septembre : 2,44 mm (1955-1972) et 0,98 mm (1972-1992) pour la Mékrou ; 2,51 mm (1955-1972) et 0,84 mm (1973-1992) pour l'Alibori ; 1,98 mm (1955-1972) et 0,77 mm (1972-1992) pour la Sota à Gbassè et 1,27 mm (1955-1972) et 0,53 mm (1973-1992) pour la Sota à Coubéri.

L'étude de l'écoulement journalier sur les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 montre là aussi une baisse sensible des écoulements journaliers de la sous-période 1972-1992 par rapport à la sous-période 1955-1972 dans tous les sous bassins (Figure 3.27).

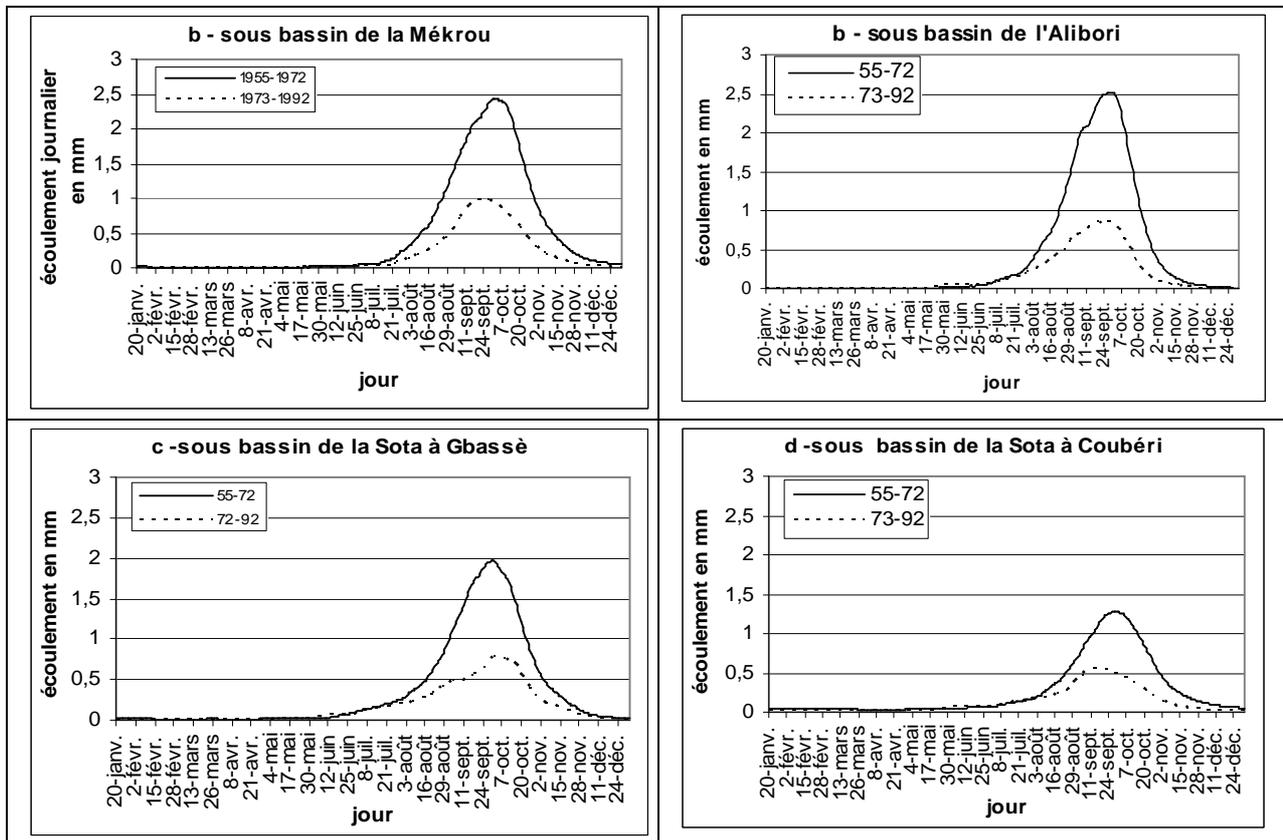


Figure 3.27 : Variation de l'écoulement journalier lissé sur vingt jours sur les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992

L'analyse des valeurs extrêmes de l'écoulement journalier permet d'appréhender d'avantage les différentes phases du comportement de l'écoulement dans les sous bassins.

3.5.6. Analyse des maxima et minima hydrologiques dans les sous bassins (1955-1992)

Les minima journaliers d'écoulement déterminés annuellement, marquent logiquement une forte baisse pendant la période 1955-1992. Dans les sous bassins de la Mékrou et de l'Alibori, ces valeurs sont presque nulles pour toutes les années, sauf pour quelques années isolées, entre 1955 et 1960 (Figure 3.28).

Les écoulements d'étiage les plus importants sont enregistrés dans les sous bassins de la Sota, surtout celui de Coubéri où ils sont rarement inférieurs à moins de 2 m³/s. C'est ainsi le seul sous bassin qui continue significativement de drainer de l'eau pendant la saison sèche. Pourtant, partout ces débits d'étiage ont fortement décliné entre 1955 et 1992.

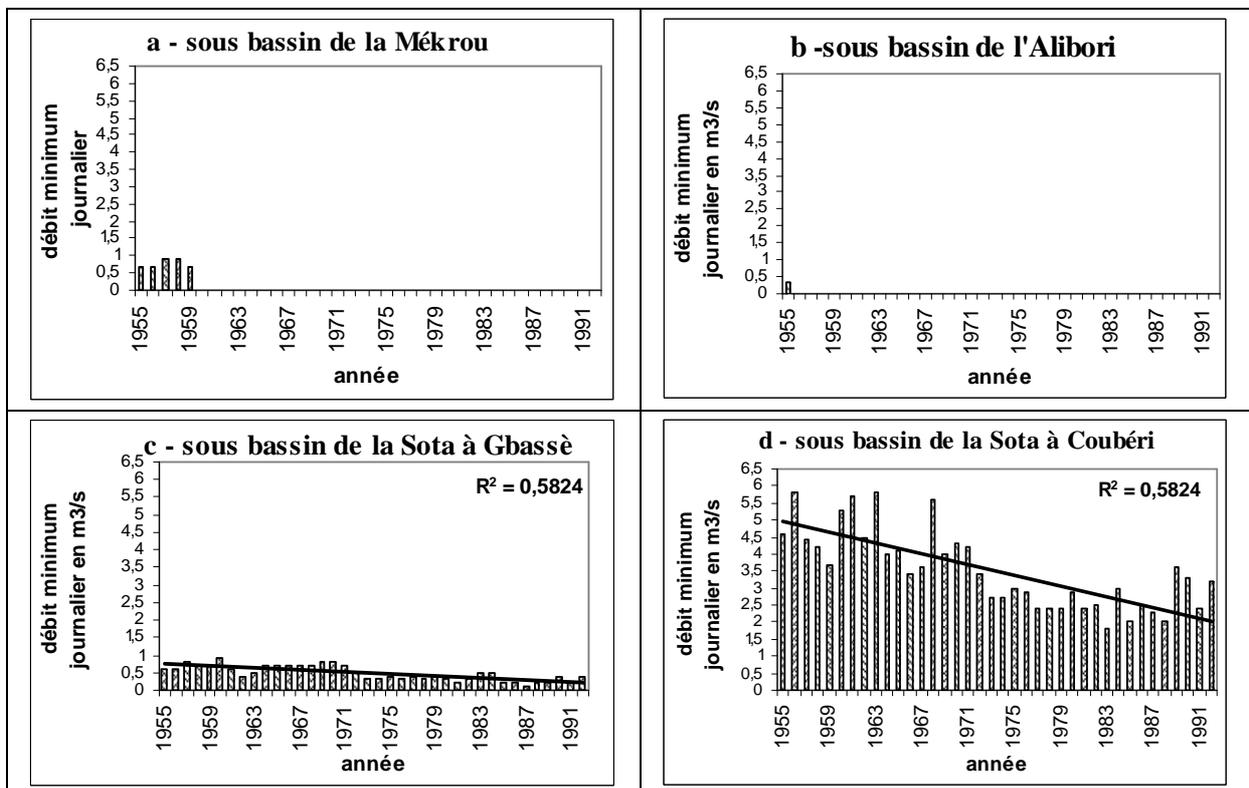


Figure 3.28 : Variation des débits minima journaliers dans les sous bassins (1955-1992)

Dans l'ensemble du bassin, les écoulements maxima journaliers sont également affectés par la baisse durant la période 1955-1992 (Figure 3.29). Les sous bassins de la Sota à Gbassè, de la Mékrou et de l'Alibori, parcourant le socle en majorité et qui connaissent normalement les valeurs maximales les plus importantes, ont logiquement subi les pertes les plus sensibles comme l'indiquent la figure 3.29 et le tableau 3.8. Dans ces sous bassins à faible infiltration,

les écoulements sont soumis à de fortes pertes par évaporation, accentuée par la dégradation des formations végétales.

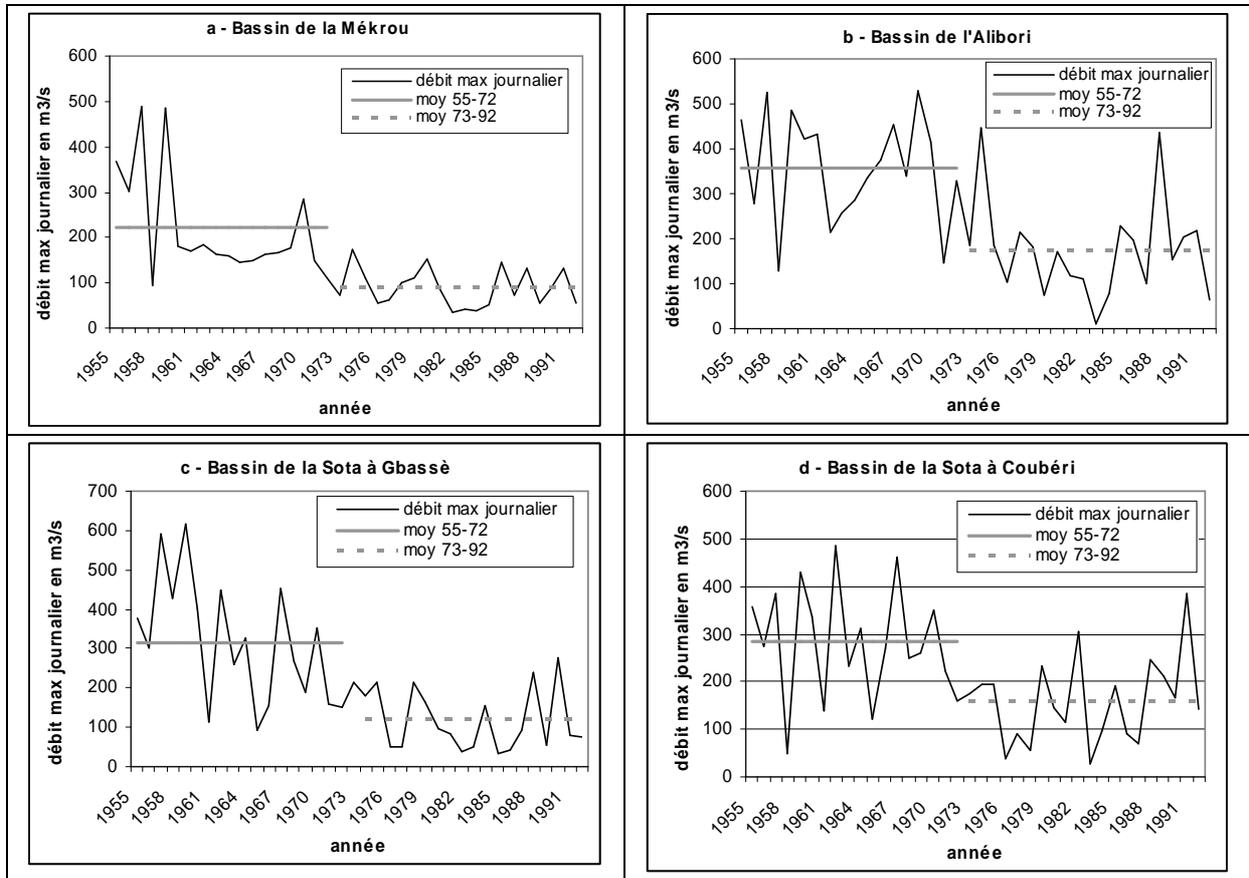


Figure 3.29 : Variation des débits maxima journaliers dans le bassin (1955-1992)

Le tableau 3.8 montre aussi une baisse très marquée des débits maxima journaliers de la sous-période 1973-1992 par rapport à la sous-période 1955-1972. Le test de Student appliqué aux moyennes des deux sous-périodes montre qu'elles sont significativement différentes au seuil de 95 %. Les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota à Gbassè présentant les crues moyennes les plus fortes subissent ainsi les déficits les plus marqués entre les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 : -60 % pour la Mékrou, -51 % pour l'Alibori et -62 % pour la Sota à Gbassè (Tableau 3.8).

Tableau 3.8 : Déficits des maxima d'écoulement dans le bassin entre 1955-1972 et 1973-1992

Sous bassins	1955-1992 (m ³ /s)	1955-1972 (m ³ /s)	1973-1992 (m ³ /s)	1955-1972 Ecart 1973-1992	1955-1972 Déficit (%) 1973-1992
Mékrou	150	222	88	-134	-60*
Alibori	260	356	174	-182	-51*
Sota à Gbassè	213	316	120	-196	-62*
Sota à Coubéri	217	283	159	-124	-44*

* moyenne des sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 différentes au seuil de significativité de 95 % au test de Student

L'étude du tarissement permet de préciser la variabilité des écoulements, notamment en fonction du substratum géologique.

3.5.7. Etude du tarissement

Le tarissement principal, par les volumes qu'il implique et sa représentativité de l'ensemble des aquifères du bassin, constitue une caractéristique importante du régime hydrologique tropical (BRIQUET *et al.*, 1996). Il peut correspondre à deux processus : le destockage de l'eau accumulée dans le réservoir hydrographique et/ou à la vidange de la nappe souterraine. Sur la quasi-totalité des rivières, il existe, dans la courbe de tarissement, deux périodes situées de part et d'autre d'un « débit charnière » (QC), caractérisées chacune par un coefficient de tarissement différent : TR1 et TR2 (Figure 3.30). TR1 décrit la première phase de tarissement avant le « débit charnière » et TR2, la deuxième phase.

Pour les rivières drainant les formations de socle, où la contribution des nappes souterraines aux écoulements est négligeable, un tarissement lent précède un tarissement beaucoup plus rapide (TR1>TR2) (Figure 3.30a). C'est le cas de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota à Gbassè. Pour ce qui concerne les rivières situées sur les formations gréseuses où le débit est souvent régulé par la nappe souterraine, à un tarissement « rapide » succède un tarissement « lent » (TR2>TR1) (Figure 3.30b). Seul le sous bassin de la Sota à Coubéri se trouve dans cette situation.

Chaque année, l'écoulement s'estompe dans presque tous les sous bassins, sauf dans celui de la Sota à Coubéri. L'arrêt de la pluie s'accompagne d'une période de tarissement lent (Figure 3.30b). Après le débit charnière (LE BARBE *et al.*, 1993), on constate en revanche une accélération brutale du tarissement (Figure 3.30a).

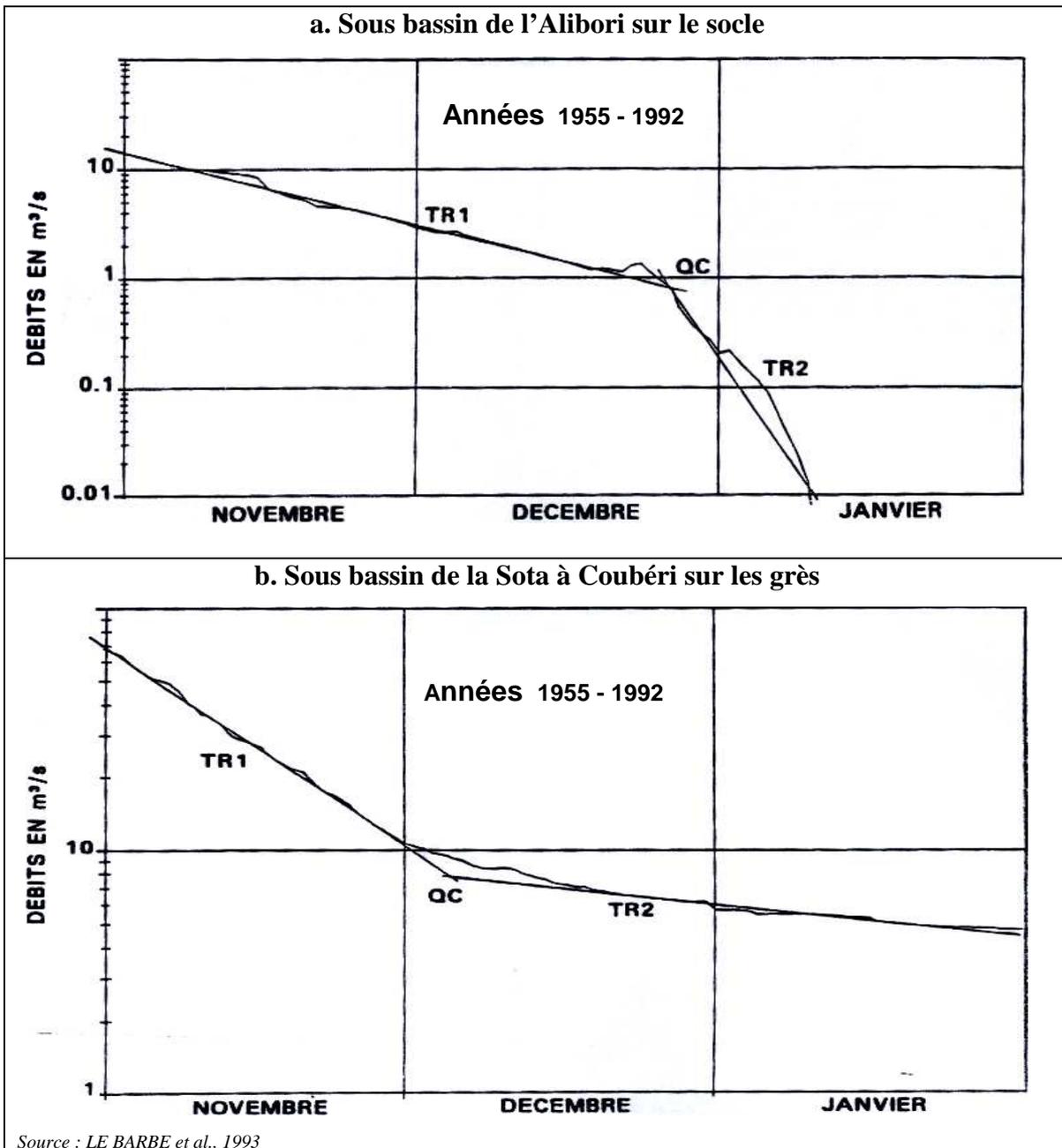


Figure 3.30 : Courbes de tarissement dans le bassin (1955-1992)

L'analyse des coefficients de tarissement et de la durée de tarissement en jours pour la période 1955-1992 (Tableau 3.9), montre que la durée de tarissement varie sur les différents sous bassins entre 15,39 jours et 105,66 jours. Le bassin de la Sota à Coubéri a le tarissement le plus lent et le plus étalé dans le temps, compte tenu de la grande capacité de son réservoir souterrain.

Il est intéressant de comparer ces résultats avec ceux obtenus par LE BARBE *et al.* (1993) sur la période 1951-1984 : 142 jours avec un débit charnière de 8,22 m³/s pour la Sota à Coubéri ; 30,30 jours avec un débit charnière de 2,60 m³/s pour la Sota à Gbassè ; 15,39 jours avec un débit charnière de 0,072 m³/s pour le bassin de l'Alibori. Pour la période, on remarque une réduction très sensible de la durée de tarissement dans l'ensemble du bassin.

Tableau 3.9 : Coefficients et durées de tarissement dans les sous bassins pour la période 1955-1992

	Sous bassins hydrologiques			
	Mékrou	Alibori	Sota à Gbassè	Sota à Coubéri
Coefficient de tarissement j-1	0,0328	0,065	0,033	0,009
Tarissement en jours	15,94	0,5	17,68	105,66
Débit charnière (m ³ /s)	0,53	0,03	1,55	6,65

Le test de Mann Kendal (Figure 3.31), appliqué aux coefficients de tarissement des sous bassins, montre une tendance remarquable à la hausse depuis les années 1970. Ce changement sensible s'observe à différentes dates dans les sous bassins, compte tenu du temps de réponse du système hydrologique aux précipitations. Il faut aussi rappeler que le coefficient de tarissement est lié au substratum géologique drainé par chaque cours d'eau du bassin du fleuve Niger au Bénin. Les rivières qui sont exclusivement sur du socle (Mékrou et Alibori) connaissent la hausse des coefficients de tarissement un peu avant la « rupture » pluviométrique de 1972. Les autres (Sota à Gbassè et Sota à Coubéri), coulant totalement ou en partie sur des grès, montrent une « rupture » un peu plus tardive.

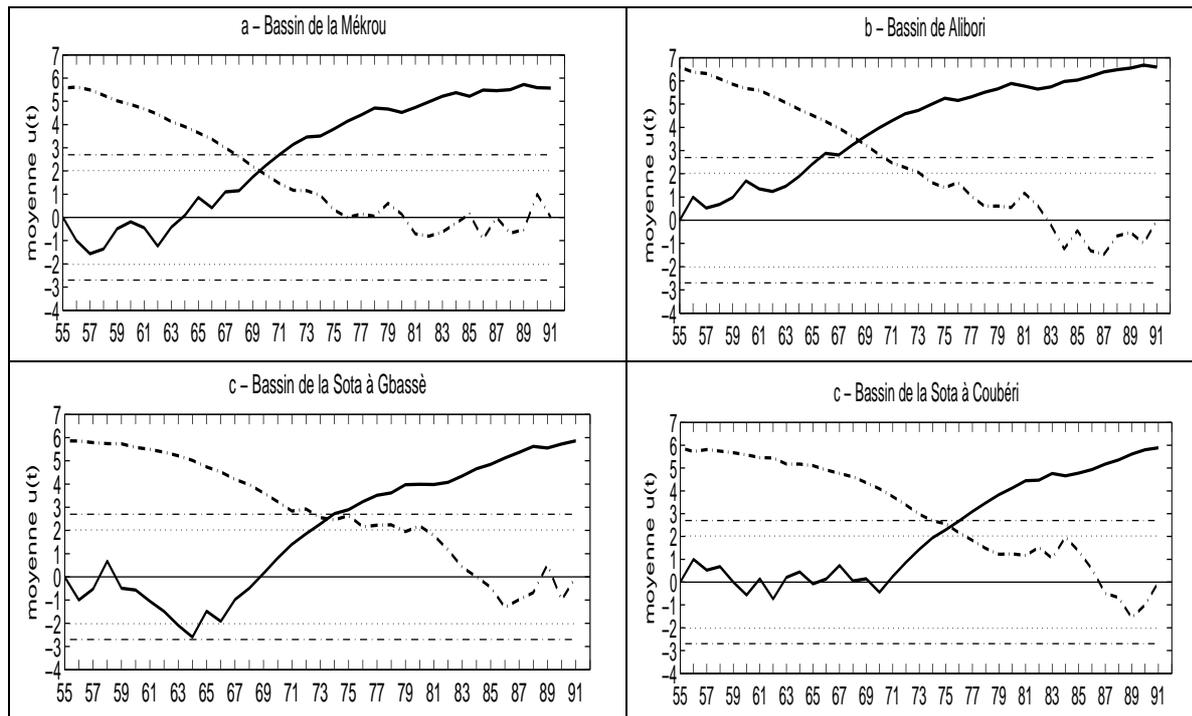


Figure 3.31 : Mise en évidence de ruptures de stationnarité dans les séries des coefficients de tarissement par le test de Mann-Kendall dans les sous bassins

La variation des coefficients de tarissement pour la période 1955-1992 (Figure 3.32), montre, jusqu'aux années 1971/1972 une relative régularité des valeurs, avec un coefficient moyen de $0,033j^{-1}$ dans la Mékrou, $0,049j^{-1}$ dans l'Alibori, $0,038j^{-1}$ dans la Sota à Gbassè et de $0,007j^{-1}$ dans la Sota à Coubéri (Tableau 3.10). Au cours des années 1970, intervient une montée brutale des coefficients de tarissement, jusqu'à des valeurs de $0,101j^{-1}$ dans le sous bassin de l'Alibori en 1976.

Les coefficients les plus importants sont enregistrés dans les sous bassins sur socle à tarissement rapide (Mékrou, Alibori et Sota à Gbassè), tandis que les plus faibles valeurs caractérisent le sous bassin de la Sota à Coubéri sur les grès, comportant un grand réservoir souterrain.

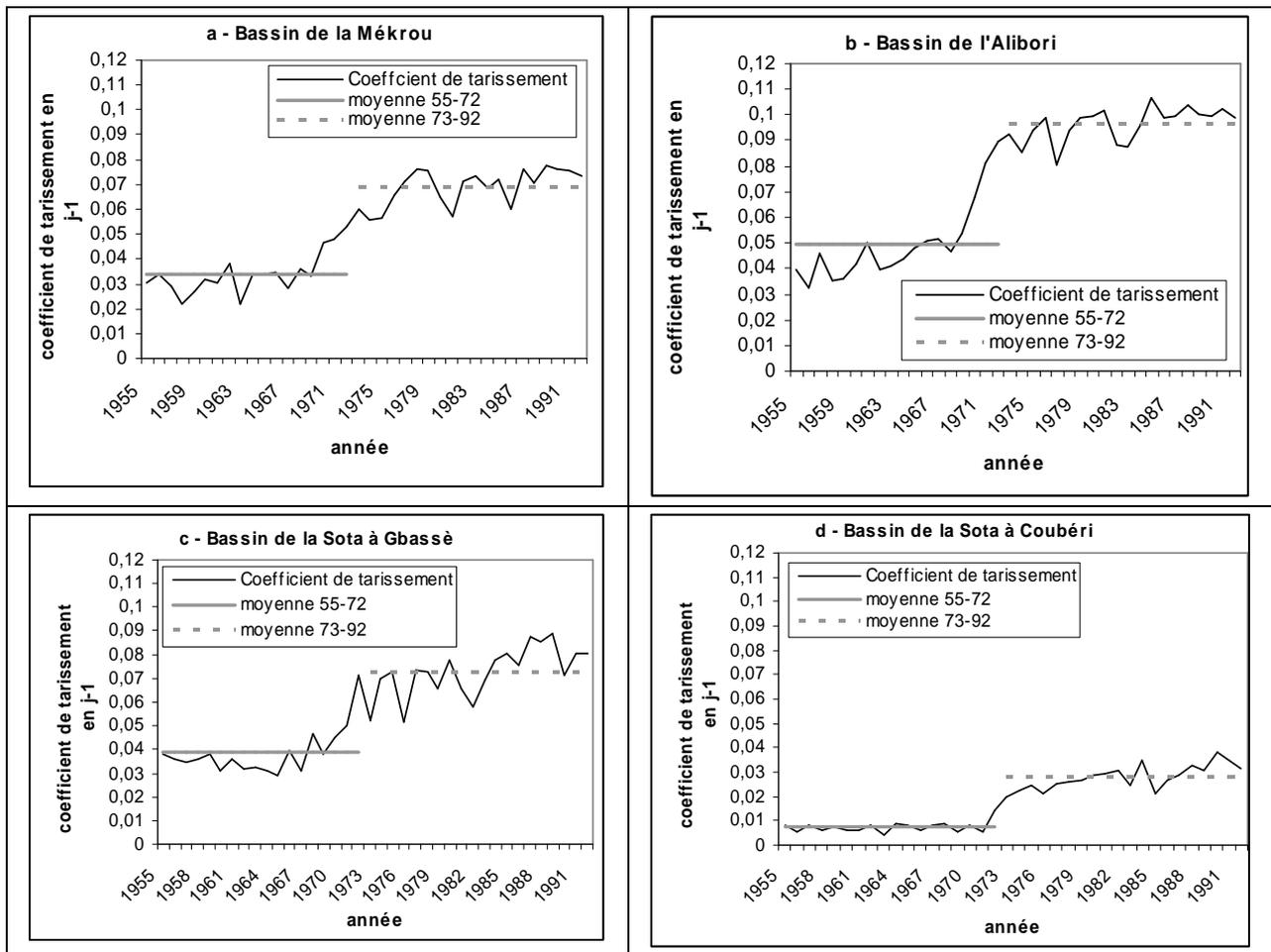


Figure 3.32: Variation des coefficients de tarissement dans les sous bassins (1955-1992)

Le tableau 3.10 souligne que les coefficients de tarissement moyen de tous les sous bassins ont beaucoup augmenté après 1972, année de « rupture » de stationnarité dans la pluviométrie. L'écart entre les coefficients 1955-1972 et 1973-1992, très élevé, varie entre -0,02 et -0,47 : le coefficient moyen de la sous-période 1972-1992 est le double de celui de la sous-période 1955-1972 sur les formations de socle, et varie de 1 à 4 sur les grès dans le sous bassin de la Sota à Coubéri entre les deux sous-périodes.

Tableau 3.10 : Coefficients de tarissements moyens dans les sous bassins pour les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 en j-1

	Sous bassins hydrologiques			
	Mékrou	Alibori	Sota à Gbassè	Sota à Coubéri
1955-1972	0,033	0,049	0,038	0,007
1973-1992	0,068	0,096	0,072	0,027
Ecart 1955-1972 1973-1992	-0,035	-0,047	-0,034	-0,02

Cet affaiblissement généralisé des volumes d'étiages dans le bassin traduit un amenuisement croissant des réserves souterraines des sous bassins sous l'effet des déficits pluviométriques récurrents.

L'étude du bilan hydrologique dans les sous bassins précise l'impact des fluctuations pluviométriques sur l'écoulement et la recharge.

3.6. Etude du bilan hydrologique dans les sous bassins pour la période 1955-1992

3.6.1. Incidence des fluctuations pluviométriques sur les termes du bilan

3.6.1.1. Au pas de temps annuel

La lame d'eau écoulee dans les quatre sous bassins, moyennée pour les trois dernières décennies et comparée aux hauteurs précipitées, à l'évaporation et à la recharge (infiltration) est donnée dans le tableau 3.11. Le déficit pluviométrique observé dans les sous bassins entre les périodes 1955-1972 et 1973-1992 est de -12 % dans la Mékrou, -15 % dans l'Alibori, -15 % dans la Sota à Gbassè et -9 % dans la Sota à Coubéri. Les déficits d'écoulement entre les deux périodes sont respectivement de -72 %, -60 %, -66 % et -52 %, soit plus de quatre fois le déficit pluviométrique observé dans ces mêmes sous bassins. La baisse de la pluviométrie entre les deux périodes a évidemment aussi des répercussions fortes sur la recharge des sous bassins. Le déficit de la recharge entre les deux périodes est de -43 % pour la Mékrou, -34 % pour l'Alibori, -31 % pour la Sota à Gbassè et -42 % pour la Sota à Coubéri.

Ainsi, les déficits pluviométriques observés au cours des décennies 1970 et 1980 ont été considérablement amplifiés dans les écoulements sur les sous bassins. A des déficits pluvieux

de -5 à -20 % correspondent des déficits d'écoulement majoritairement situés entre -50 et -80 %. On note aussi que les déficits pluvieux s'amplifient remarquablement dans la recharge des sous bassins de la Sota à Coubéri (sur 93 % de grès) et de la Sota à Gbassè (sur 20 % de grès). Ces résultats confirment ceux obtenus par l'IRD (2001) dans la zone non-sahélienne.

On notera aussi (tableau 3.11) que les sous bassins de la Mékrou (dans le parc « W » à

Tableau 3.11 : Evolution comparée des fluctuations pluviométriques et des autres termes du bilan hydrologique en mm dans les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota sur la période 1955-1992

		Mékrou	Alibori	Sota à Gbassè	Sota à Coubéri
Pluie	1955-1992 (mm)	1 048	1 021	1 125	929
	1955-1972 (mm)	1 117***	1 103***	1 220***	977***
	1973-1992 (mm)	983***	943***	1 034***	885***
	Ecart	-134	-160	-186	-92
	Déficit (%)	-12	-15	-15	-9
Evaporation	1955-1992 (mm)	820	805	881	740
	1955-1972 (mm)	816*	817*	905*	731*
	1973-1992 (mm)	824*	794*	859*	748*
	Ecart	+8	-23	-46	+17
	Déficit (%)	+1	-3	-5	+2
Écoulement	1955-1992 (mm)	103	102	81	52
	1955-1972 (mm)	141***	148***	122***	71***
	1973-1992 (mm)	68***	59***	42***	34***
	Ecart	-73	-89	-80	-37
	Déficit (%)	-72	-60	-66	-52
Recharge	1955-1992 (mm)	125	114	163	138
	1955-1972 (mm)	160***	138***	193***	175***
	1973-1992 (mm)	91***	91***	133***	102***
	Ecart	-69	-47	-60	-73
	Déficit (%)	-43	-34	-31	-42

*** moyennes significativement différentes au test de Student à 95 %

* moyennes non significativement différentes au test de Student

couvert végétal important) et de la Sota (dans la zone cynégétique) enregistrent une légère hausse de l'évaporation après 1972.

La hausse de l'évaporation peut se justifier par la tendance à la hausse des températures moyennes minimales et maximales sur la période 1955-1992 (Figure 3.33 et figure 3.34).

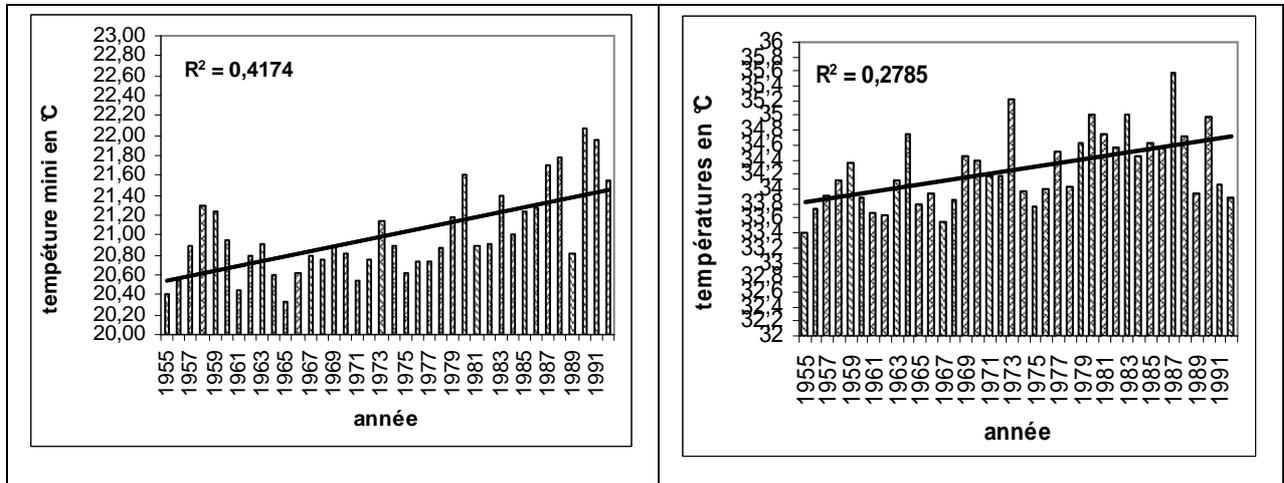


Figure 3.33 : Variation inter-annuelle des températures moyennes minimales dans le bassin béninois du fleuve Niger (1955-1992)

Figure 3.34 : Variation des températures moyennes maximales sur la période 1955-1992 dans le bassin

Ainsi, la décennie 1960 connaît les minima les plus faibles (plus humide). Les minima les plus importants sont enregistrés au cours des décennies 1970 et 1980 (plus sèches) (tableau 3.12), ce qui vient confirmer la tendance à la hausse observée sur la figure 3.33.

Tableau 3.12 : Température moyenne minimale par décennie sur la période 1955-1992 en °C

décennie	1960	1970	1980
Bassin du Niger au Bénin	20,70	20,91	21,30

Il est évident que la hausse des minima et des maxima de températures pour la période 1955-1992 (Figure 3.33 et Figure 3.34), montre que le bassin béninois du fleuve Niger n'est pas épargné par le réchauffement planétaire (LITYNSKI, 1994 ; WAHL, 2003 ; MPOUNZA *et al.*, 2003) observé pour contribuer à l'amenuisement rapide des ressources en eau disponibles par perte par évaporation.

La figure 3.35 et le tableau 3.13 présentent l'évolution du bilan hydrologique et de chacun de ses termes pour la période 1955-1992.

Pour une hauteur de pluie de 100 % reçue dans les sous bassins, on relève 70 à 85 % pour l'évaporation, 9 à 20 % pour la recharge et 5 à 15 % pour l'écoulement. Ainsi, la plus faible part revient à l'écoulement et il y a d'énormes pertes par évaporation, évaluées à environ 80 % des précipitation dans l'ensemble des sous bassins. L'écoulement le plus faible et la recharge la plus importante sont, sans surprise, enregistrés dans le sous bassin de la Sota à Coubéri.

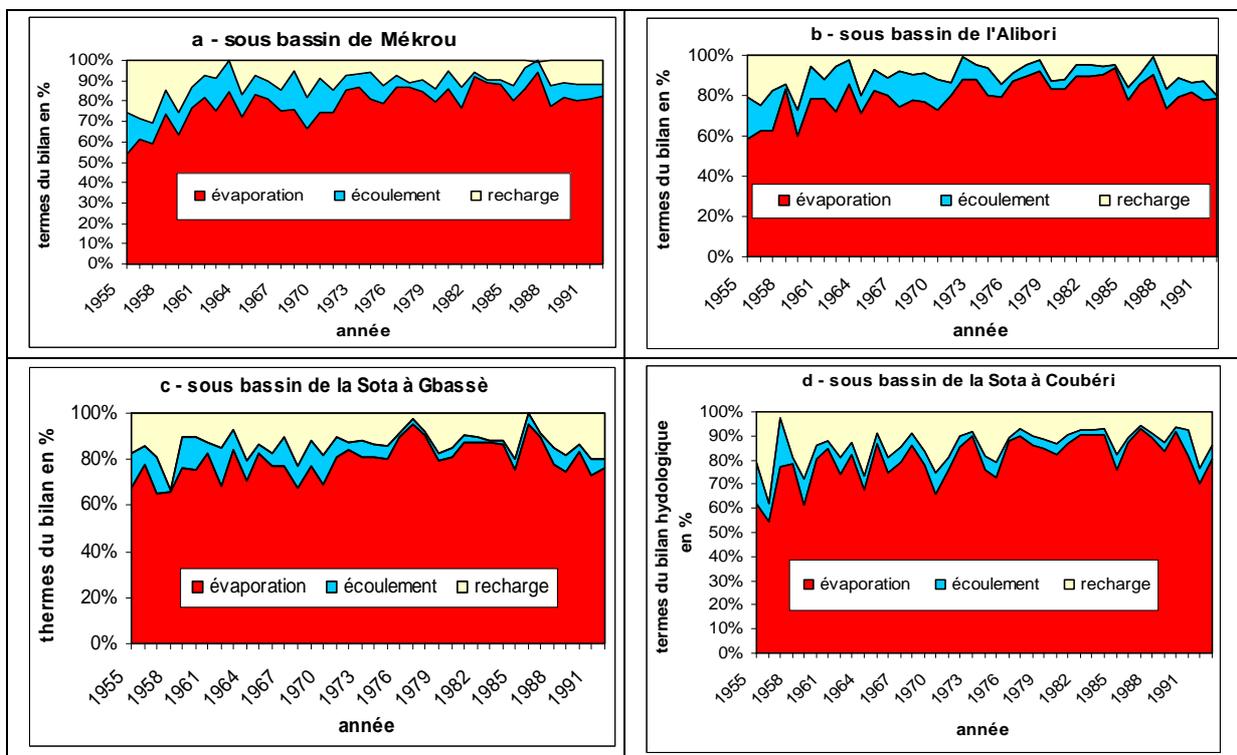


Figure 3.35 : Bilan hydrologique du Bassin béninois du fleuve Niger en %

Sur le tableau 3.13, la comparaison entre les deux périodes 1955-1972 et 1973-1992 montre que la part de l'évaporation a connu une hausse sensible (variant entre 9 et 11 %) durant la sous-période 1973-1992 dans les sous bassins. Dans le même temps, l'écoulement moyen entre les deux sous-périodes diminue de -3 à -7 % dans les sous bassins. Le plus faible écart est enregistré dans le sous bassin de la Sota à Coubéri (-3 %). L'écart de la recharge le plus important (-7 %) entre les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 y est également

observé. Dans les autres sous bassins, le déficit de la recharge entre les deux sous-périodes varie seulement entre -3 et -5 %.

Tableau 3.13 : Proportion de chaque terme du bilan hydrologique dans 100 % de pluie dans les sous bassins pour la période 1955-1992 et les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992

		Mékrou	Alibori	Sota à Gbassè	Sota à Coubéri
Pluie (%)	1955-1992	100	100	100	100
	1955-1972	100	100	100	100
	1973-1992	100	100	100	100
Evaporation (%)	1955-1992	79	80	79	80
	1955-1972	73	75	75	75
	1973-1992	84	85	84	85
	Ecart	+11	+10	+9	+10
Écoulement (%)	1955-1992	9	9	7	5
	1955-1972	12	13	10	7
	1973-1992	7	6	4	4
	Ecart	-5	-7	-6	-3
Recharge (%)	1955-1992	12	11	14	14
	1955-1972	14	12	15	18
	1973-1992	9	9	12	11
	Ecart	-5	-3	-3	-7

Le suivi des différents termes du bilan hydrologique sur les deux périodes de référence montre que dans tous les sous bassins, les hauteurs de pluie et l'évaporation ont connu une évolution similaire (Figure 3.36). L'évaporation n'a pas connu de modifications très marquées sur la période 1955-1992. En revanche, l'écoulement et la recharge ont enregistré une baisse sensible après 1972 dans le bassin béninois du fleuve Niger.

Ainsi, l'évolution de l'écoulement est fortement lié à celle de la pluviométrie dans les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota à Gbassè coulant sur le socle, alors que, dans le sous bassin de la Sota à Coubéri , coulant exclusivement sur du grès, la recharge de la nappe souterraine a un rôle prégnant.

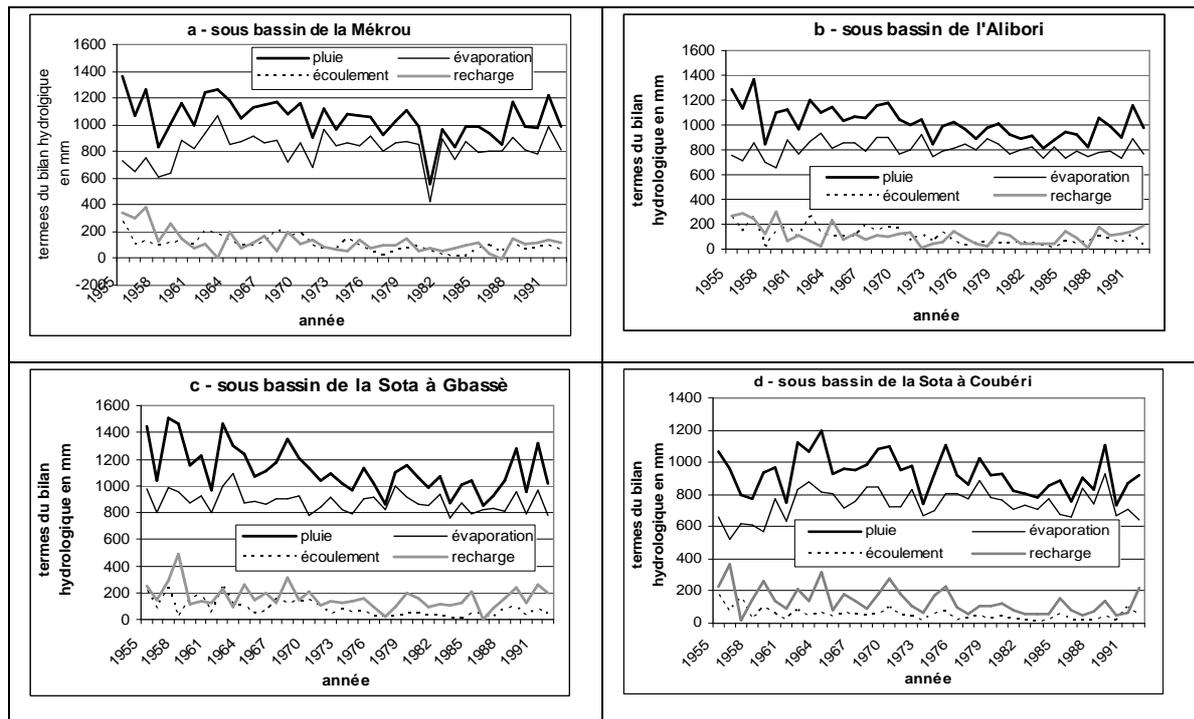


Figure 3.36 : Bilan hydrologique du bassin béninois du fleuve Niger en mm

Le tableau 3.14 présente les corrélations Pluie/Ecoulement et Ecoulement/Recharge. Il vient confirmer cette évolution du bilan hydrologique (Figure 3.37). La corrélation Pluie/Ecoulement est partout significative, évoluant entre 0,65 et 0,86. Toutefois, seul le sous bassin de la Sota à Coubéri présente une bonne corrélation Ecoulement/Recharge, ce qui témoigne à nouveau du rôle de vidange joué par les grès en période sèche.

Tableau 3.14 : Corrélations entre les moyennes interannuelles des termes du bilan hydrologique (1955-1992)

Sous bassins	Corrélation pluie/écoulement	Corrélation pluie/recharge	Corrélation écoulement/recharge
Mékrou	0,69	0,43	0,36
Alibori	0,86	0,56	0,34
Sota à Gbassè	0,77	0,70	0,45
Sota à Coubéri	0,65	0,80	0,60

Corrélation significative entre les termes (au seuil de 95 %)

Le bilan hydrologique annuel nous a permis d'analyser le mode de répartition des lames d'eau précipitées et d'apprécier l'impact des fluctuations pluviométriques interannuelles sur l'écoulement et la recharge des sous bassins.

L'étude saisonnière du bilan hydrologique permet de montrer que les régimes des cours d'eau du bassin béninois du fleuve Niger sont directement influencés par celui des précipitations, mais subissent, avec un effet de retard, l'incidence du cumul de déficits pluviométriques.

3.6.1.2. Au pas de temps mensuel

L'étude du bilan hydrologique au pas de temps mensuel est plus délicate. En effet, il existe un biais au début de la saison sèche pour déterminer l'évaporation, ce qui se répercute sur la recharge et conduit à ses valeurs négatives. En effet, la méthode d'estimation de l'évaporation ne prend pas en compte les prélèvements du stock d'eau dans le sol. Cela étant, le suivi intermensuel du bilan hydrologique apporte des informations intéressantes.

- Période 1955-1992

Le bilan hydrologique mensuel sur la période 1955-1992 (Figure 3.37) montre clairement la dépendance entre les autres termes du bilan et les hauteurs de pluie. Les pluies, l'évaporation et la recharge atteignent ainsi leurs valeurs maximales en août dans tous les sous bassins. La réponse du sol aux événements pluvieux mensuels s'effectue néanmoins avec un certain retard marqué par un décalage d'un mois pour les maxima d'écoulement qui n'interviennent qu'en septembre.

Le temps de réponse dépend de la nature du substratum géologique drainé par le cours d'eau : la réponse est plus rapide sur les formations du socle que sur les grès au début de la saison des pluies, puisque l'écoulement ne s'amorce sur les grès qu'après une saturation complète et que l'écoulement perdure ensuite.

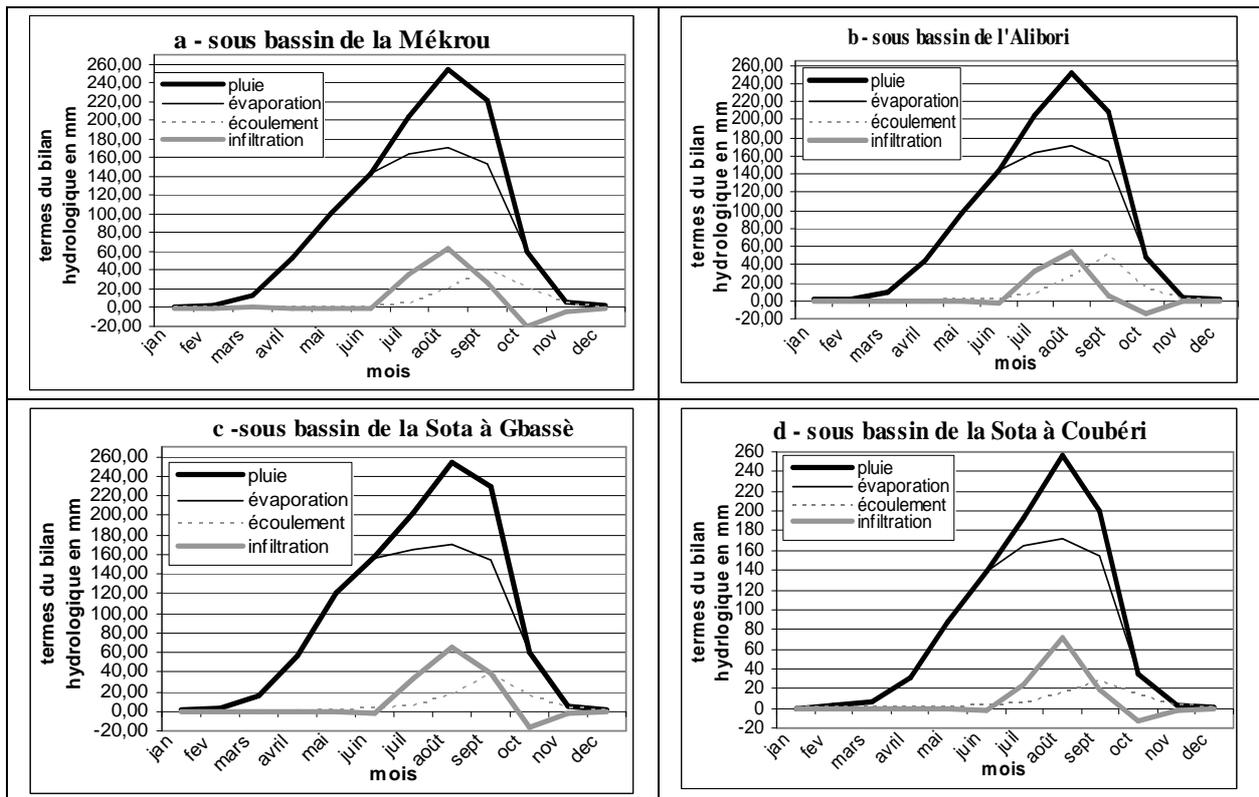


Figure 3.37 : Evolution inter mensuelle des termes du bilan (1955-1992)

– Comparaison des sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992

Les termes du bilan hydrologique mensuel de tous les sous bassins du bassin béninois du fleuve Niger ont beaucoup changé après 1972. On note, par exemple, une augmentation sensible de l'évaporation pendant la sous-période 1972-1992 par rapport à la période précédente, ce qui concrétise la sécheresse hydrologique du bassin.

Une analyse ciblée de la variabilité intra-mensuelle de l'évaporation (Figure 3.38) sur les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 montre une diminution générale pendant les mois de transition (avril, mai, juin, octobre), lorsque les pluies sont insuffisantes pour satisfaire l'ETP. En revanche, au cœur de la saison des pluies, en juillet, août et septembre, l'évaporation a connu une hausse après 1972, qui a amplifié l'impact du déficit pluviométrique sur la recharge. La hausse peut être attribuée à l'augmentation du pouvoir évaporant de l'atmosphère, notamment du fait du réchauffement, les pluies étant, en cette saison, suffisantes pour satisfaire l'ETP.

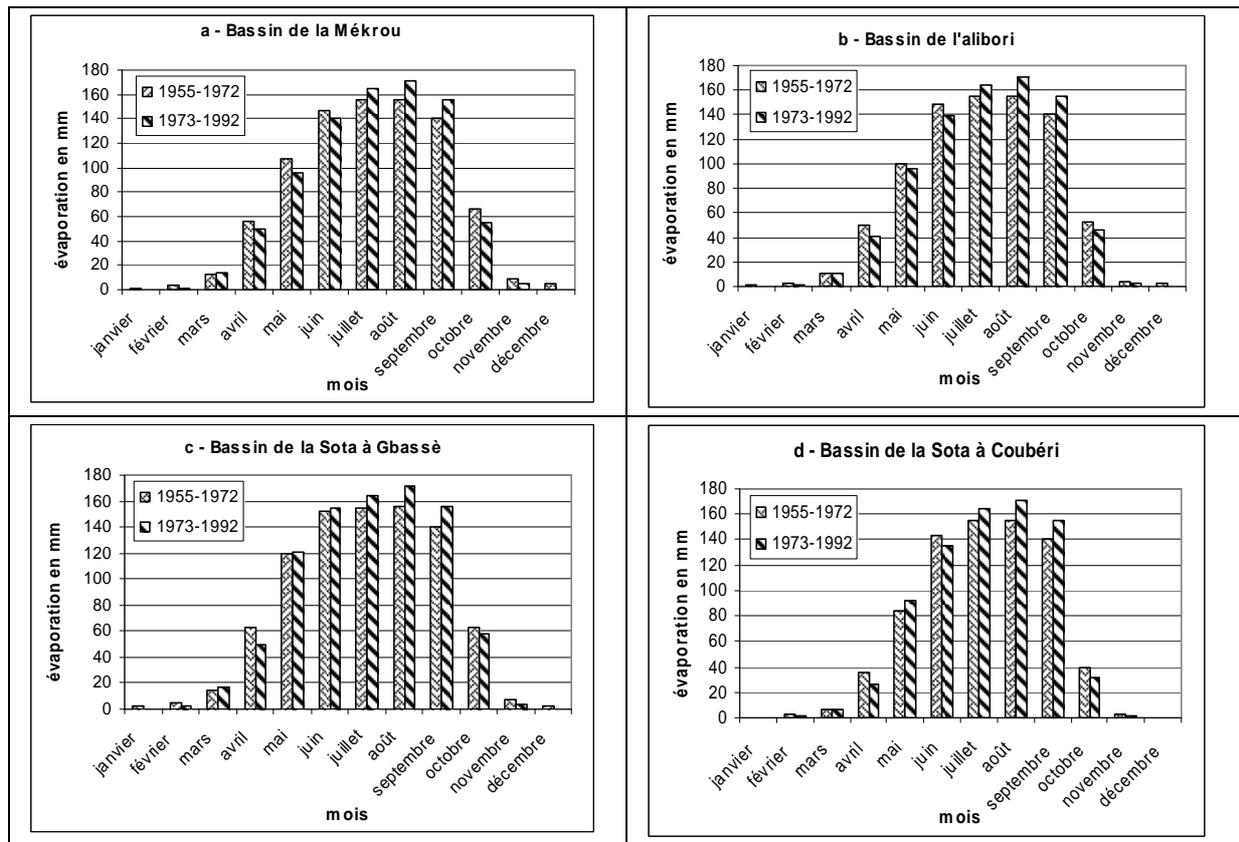


Figure 3.38 : Evolution intra-saisonnière de l'évaporation dans le bassin (1955-1992)

Le suivi de la recharge (Figure 3.39) souligne un amenuisement important du réservoir souterrain des sous bassins après 1972 pour les mois de juillet, août et septembre, lié à la baisse importante de la recharge durant la même période. Le test de Student appliqué aux moyennes des deux périodes 1955-1972 et 1973-1992 montre, par ailleurs, que l'évolution est significative à plus de 95 %. On note qu'en septembre la recharge devient nulle ou insignifiante après 1972 dans trois sous bassins (Mékrou, Alibori et Sota à Coubéri).

L'assèchement de l'aquifère est ainsi couplé à une augmentation du pouvoir évaporatoire de l'atmosphère après 1972 pendant les mois de juillet, août et septembre, concrétisant la dégradation hydrique du bassin souterrain, en particulier de celui de la Sota à Coubéri.

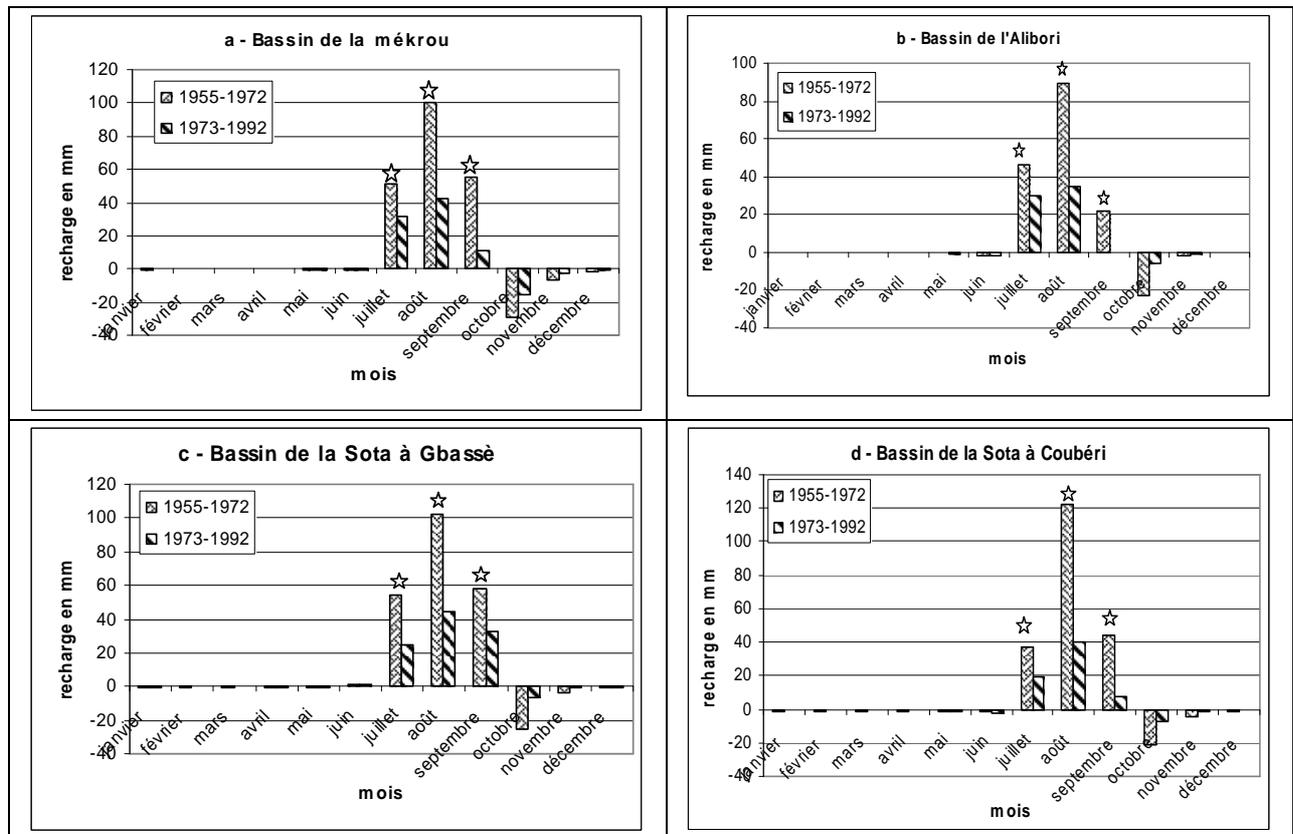


Figure 3.39 : Variabilité intra saisonnière de la recharge dans le bassin (1955-1992)

☆ Moyennes mensuelles de la recharge significativement différentes au test de Student à plus de 95 % sur les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992.

Pour mieux cibler l’impact des fluctuations pluviométriques des quatre mois les plus arrosés sur les autres termes du bilan hydrologique (Tableau 3.15), nous avons suivi l’évolution des hauteurs de pluie, de l’évaporation et de la recharge pendant les mois de juin, juillet, août et septembre. Pour l’écoulement, compte tenu du mois de retard par rapport aux autres termes, nous avons considéré les valeurs des mois de juillet, août, septembre et octobre.

Tableau 3.15 : Récapitulatif de l'impact de la fluctuation de quatre mois humides sur les autres termes du bilan hydrologique

		Mékrou	Alibori	Sota à Gbassè	Sota à Coubéri
Pluie	1955-1992 (mm)	823	808	844	790
	1955-1972 (mm)	888	879	916	874
	1973-1992 (mm)	764	745	763	725
	Ecart	-124	-134	-153	-149
	Déficit (%)	-14	-15	-17	-17
Evaporation	1955-1992 (mm)	633	633	646	663
	1955-1972 (mm)	598	600	604	564
	1973-1992 (mm)	631	630	646	627
	Ecart	+33	+30	+42	+33
	Déficit (%)	+6	+5	+7	+5
Ecoulement	1955-1992 (mm)	86	98	75	60
	1955-1972 (mm)	112	144	117	83
	1973-1992 (mm)	63	56	37	39
	Ecart	-49	-89	-80	-44
	Déficit (%)	-44	-61	-69	-53
Recharge	1955-1992 (mm)	125	90	136	112
	1955-1972 (mm)	206	156	215	202
	1973-1992 (mm)	85	63	103	65
	Ecart	-121	-93	-112	-137
	Déficit (%)	-59	-60	-52	-68

L'évolution comparée de tous les termes du bilan entre les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 (Tableau 3.15) souligne que pour des déficits pluviométriques variant entre -10 et -20 %, les déficits d'écoulement et de recharge atteignent respectivement entre -40 et -70 % et -50 et -70 % dans tous les sous bassins. On note une légère augmentation de l'évaporation aggravant un peu le déficit des pluies, donc pénalisant la recharge.

A un déficit pluviométrique mensuel de -15 % dans le sous bassin de l'Alibori correspond un déficit d'écoulement de -61 % et de recharge de -60 % : une nouvelle fois, l'amplification des déficits pluviométriques sur les autres termes du bilan est manifeste.

On remarque aussi que c'est dans le sous bassin de la Sota à Coubéri que l'impact des déficits pluviométriques sur la recharge est le plus marqué (-68 %), du fait de l'important réservoir souterrain de grès qui constitue son substratum.

Ainsi, le suivi sur les quatre mois les plus pluvieux atteste de leur rôle majeur dans la sécheresse pluvio-hydrologique observée dans les sous bassins du bassin béninois du fleuve Niger ces dernières décennies et il vient confirmer les résultats obtenus au pas de temps annuel.

L'étude journalière du bilan hydrologique permet de mettre d'avantage en évidence le comportement des différents termes.

3.6.1.3. Bilan hydrologique au pas de temps journalier pendant les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992

La variation du bilan hydrologique journalier dans le bassin sur les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 (Figure 3.40 et Figure 3.41) atteste là encore d'une diminution des hauteurs des termes du bilan après 1972. Les valeurs maximales de l'écoulement correspondent à la baisse importante de l'infiltration dans les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota à Gbassè (Mékrou et Gbassè ne sont pas présentés ici). On constate que, sur le socle, l'écoulement ne peut atteindre ses maxima que lorsque le sol est totalement imprégné d'eau, alors que, dans les grès, la chute des valeurs de l'infiltration correspond à un fléchissement très lent de l'écoulement parce qu'il est soutenu par la recharge.

L'évolution du coefficient d'écoulement précise le comportement hydrologique des grès et du socle.

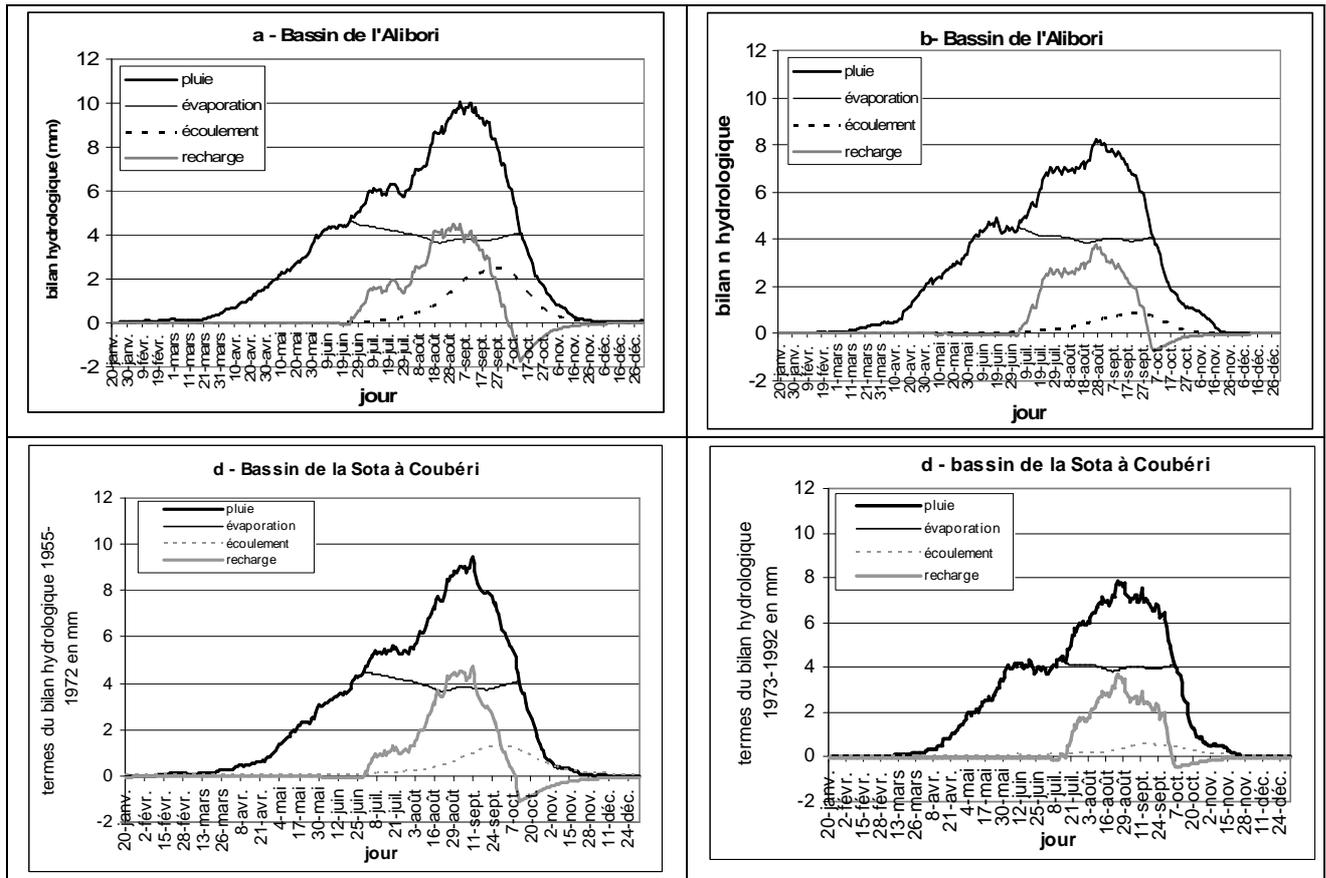


Figure 3.40 : Variabilité des termes du bilan pendant la sous-période 1955-1972

Figure 3.41 : Variabilité des termes du bilan pendant la sous-période 1973-1992

3.6.2. Fonctionnement hydrologique des sous bassins en fonction de leur substratum

Pour mieux expliquer la différence trop grande entre le déficit hydrologique et le déficit pluviométrique, il faut prendre en compte les caractères de la surface des sous bassins en vue de la modélisation au chapitre 4.

3.6.2.1. Variabilité des coefficients d'écoulements sur les formations de socle et de grès

La figure 3.42 présentant les coefficients annuels d'écoulement (1955-1992) montre une très forte diminution de ses valeurs (qui définissent le rendement annuel du bassin) dans tout le bassin béninois du fleuve Niger. La baisse est cependant plus ou moins marquée d'un sous bassin à l'autre. On peut distinguer sur la base des coefficients d'écoulement dans leur évolution temporelle, des caractères géologiques et des conditions d'occupation des sols, deux types de sous bassins. Le premier comprend les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori

et dans une moindre mesure de la Sota à Gbassè qui reposent à plus de 80 % sur des formations de socle où l'infiltration est très faible. Ce groupe se caractérise également par une destruction importante du couvert végétal (surtout des forêts classées) du fait de la culture du coton, devenue la première culture de rente du Bénin. Cette dégradation expose les sous bassins à une très forte évaporation et à une très faible infiltration. Ici, un écoulement hypodermique drainé par les premiers horizons du sol alimente très faiblement les rivières en saison sèche et il s'estompe très vite. Dans ce groupe, le substratum géologique moins perméable associé à une évaporation relativement plus élevée, entraîne un déficit hydrique important. En absence d'un important aquifère régulateur, les régimes hydrologiques reflètent plus fidèlement le régime pluviométrique, comme le confirme la bonne corrélation Pluie/Ecoulement dans ces sous bassins (Tableau 3.16).

Le second type est représenté par le seul sous bassin de la Sota à Coubéri, constitué à plus de 93 % de grès. L'important aquifère du plateau gréseux perméable de Kandi que la Sota draine à Coubéri atténue ici l'impact de la péjoration pluviométrique sur les lames écoulées, d'où la pérennité de l'écoulement fortement lié à la vidange de la nappe souterraine, quelle que soit la saison de l'année.

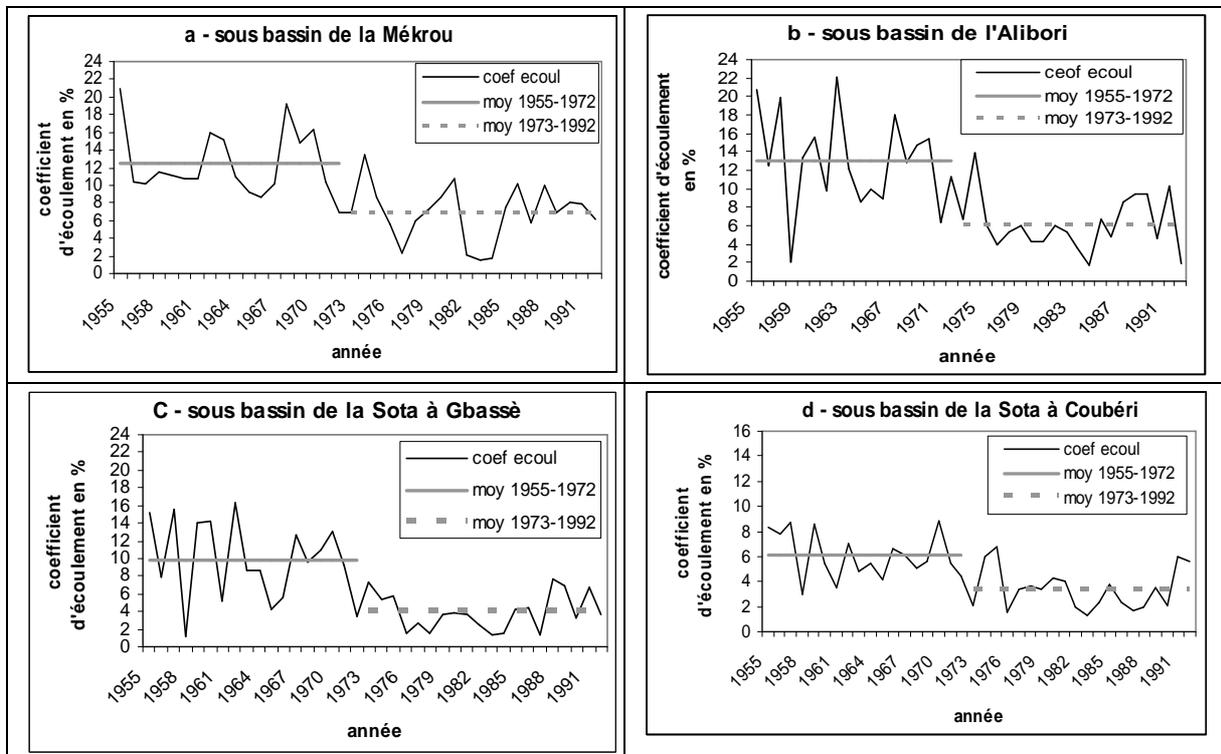


Figure 3.42 : Variation interannuelle des coefficients d'écoulement dans les sous bassins (1955-1992)

En tout cas, le cumul des déficits pluviométriques entraîne un amenuisement croissant des réserves souterraines dans l'ensemble des sous bassins. La vidange des nappes de versant, caractéristique de l'hydrogéologie de chacun des sous bassins, suit une loi de tarissement à décroissance exponentielle particulièrement affirmée quand la saison sèche est très marquée.

Dans notre recherche sur l'évolution du comportement hydrologique, en particulier d'un changement de la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant du Niger au Bénin au cours de la période 1955-1992, nous avons corrélé le coefficient d'écoulement avec les pluies annuelles de chaque sous bassin.

L'analyse de la figure 3.43 montre que seul le sous bassin de l'Alibori a un coefficient de détermination supérieur à 0,50, avec $R^2 = 0,64$, montrant la très forte dépendance de l'écoulement à la pluviométrie de ce sous bassin. A l'opposé, le sous bassin de la Sota à Coubéri présente le coefficient de détermination le plus faible, soit $R^2=0,067$ confirmant que l'écoulement de la Sota à Coubéri a un long temps de réponse aux apports pluvieux et dépend fortement de la recharge du réservoir souterrain. Les sous bassins de la Mékrou et de la Sota à Gbassè ont des coefficients moyens (respectivement de 0,24 et 0,38), signifiant que l'écoulement de ces sous bassins peut être influencé par d'autres facteurs du milieu, à développer dans la suite de ce travail.

L'analyse du modèle conceptuel du fonctionnement hydrologique du bassin mettra davantage en évidence le fonctionnement différentiel des grès et du socle dans chaque sous bassin.

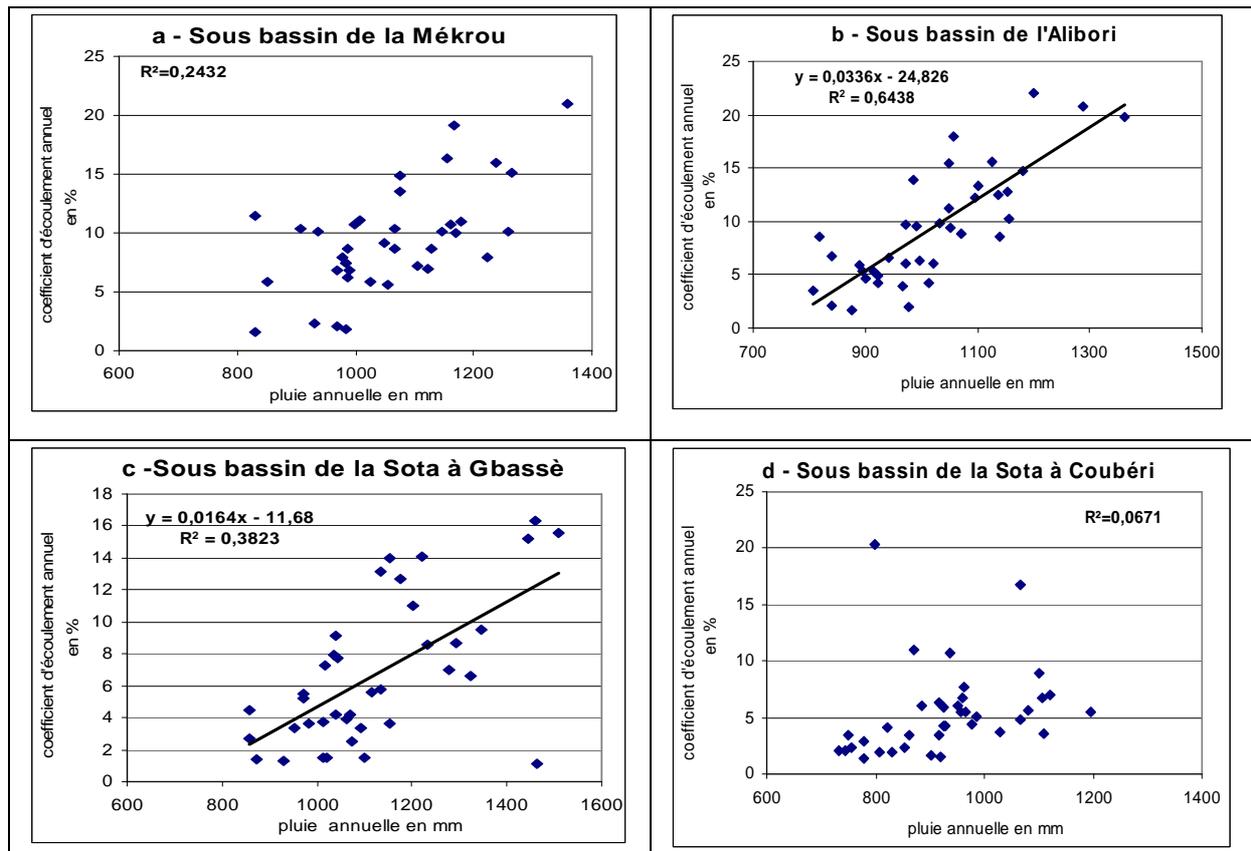


Figure 3.43 : Relation entre coefficient d'écoulement annuel et précipitations dans les sous bassins (1955-1992)

3.6.2.2. Modèle conceptuel du fonctionnement hydrologique des formations de socle et de grès

La figure 3.44 représente le schéma du fonctionnement hydrologique des bassins-versants sur socle (Mékrou, Alibori) intégrant la morphologie de surface et la roche-mère, respectivement au début et au cœur de la saison des pluies. Une surface très irrégulière délimite des zones de stockage d'eau. On constate que l'écoulement ne débute qu'après une pluie nette relativement importante, quand les premiers horizons des sols de surface sont saturés. C'est un écoulement « hypodermique » qui intervient lorsque les réservoirs à la surface de la roche- mère sont complètement remplis.

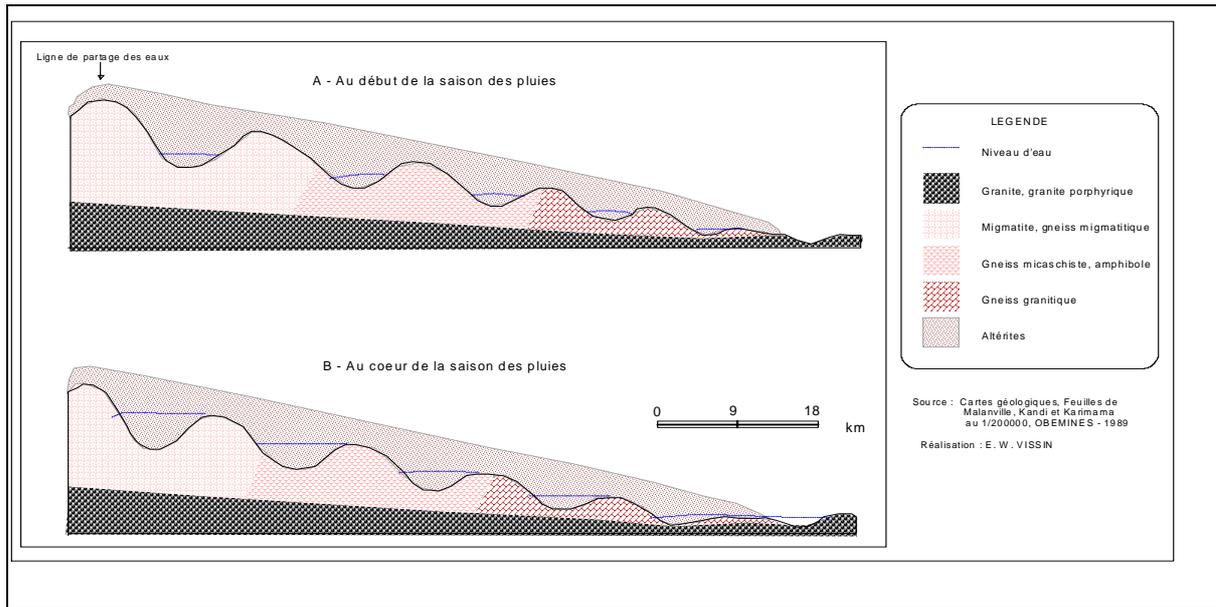


Figure 3.44 : Fonctionnement hydrologique des formations du socle dans les sous bassins de la Mékrou et de l'Alibori

Cet écoulement « hypodermique » peut alimenter le cours d'eau au début de la saison sèche, mais il va vite cesser compte tenu de sa très faible capacité. Le tarissement rapide observé dans les sous bassins de la Mékrou et de l'Alibori drainant les formations de socle imperméables reproduisent ce scénario. On note des étiages complets au cœur de la saison sèche, car les apports pluvieux s'arrêtent à la fin de la saison des pluies. L'écoulement ne se produit que si la fréquence des pluies est assez marquée pour que puissent se remplir les réservoirs souterrains. Ainsi, la variation interannuelle des écoulements sur ces formations dépendent exclusivement de la pluie, confirmant les résultats obtenus précédemment dans les sous bassins de la Mékrou et de l'Alibori.

Sur les grès du sous bassin de la Sota à Coubéri en revanche (Figure 3.45), les apports pluvieux s'infiltrent pour alimenter l'écoulement souterrain dans les différentes couches de grès. Cette importante réserve souterraine alimente le cours d'eau pendant la saison sèche. On note donc une pérennité de l'écoulement dans la partie du sous bassin drainant les grès. Ainsi, les débits caractéristiques d'étiages dans la Sota à Coubéri varient de 2,5 à 6m³/s (VISSIN, 2001, VISSIN *et al.*, 2006). Toutefois, seule une partie de la recharge est récupérée à l'exutoire (à Coubéri). Il est très probable que toute l'eau infiltrée n'alimente pas l'écoulement de la Sota à Coubéri. La nappe sur l'ensemble des grès se répartirait sur une grande partie du bassin du Niger.

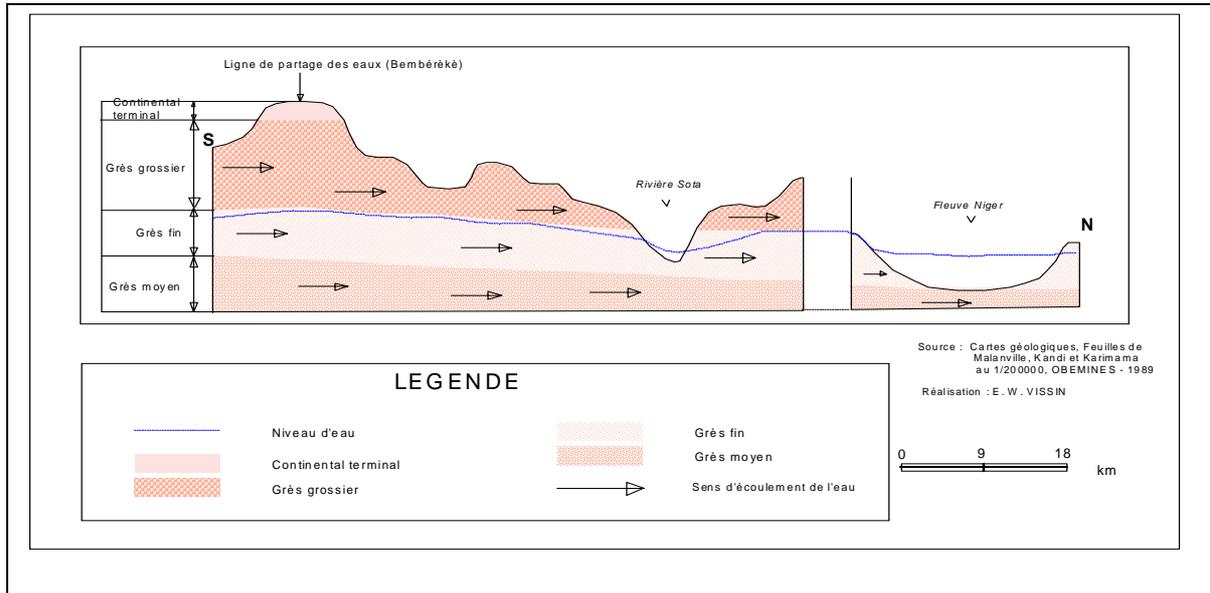


Figure 3.45 : Fonctionnement hydrologique des grès

Pour conceptualiser le fonctionnement hydrologique sur les grès et sur le socle, nous avons privilégié « le modèle des réservoirs » (LE BARBE *et al.*, 1993 ; VISSIN, 1998 ; VISSIN *et al.*, 2006) qui nous semble le mieux pour simuler les résultats que nous avons obtenus plus haut (Figure 3.46).

Dans ce « modèle du réservoir », l'écoulement dépend de la manière dont le réservoir se vide après chaque pluie. Deux types de réservoirs ont été distingués :

- sur le socle, l'écoulement est fonction du remplissage, qui détermine la variation du niveau « *Si* » de l'eau dans le réservoir (Figure 3.46a). L'évaporation est déterminante puisque l'infiltration est presque nulle.
- sur les grès, par contre, après chaque pluie, le niveau « *Si* » de l'eau dans le réservoir ne varie pas (Figure 3.46b). La forte infiltration limite les effets de l'évaporation.

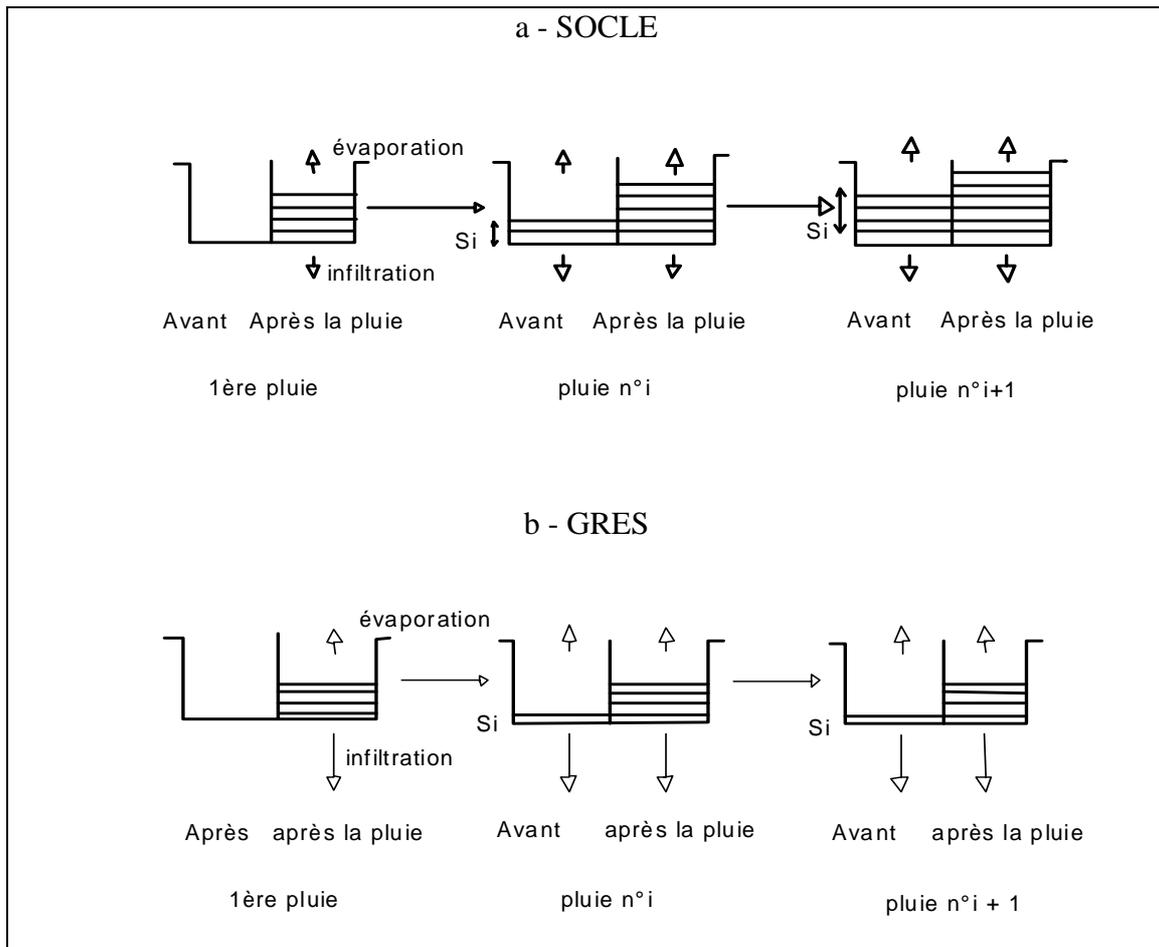


Figure 3.46 : Conceptualisation du fonctionnement hydrologique du socle et des grès

On peut donc dire que l'écoulement sur les grès est le résultat de l'effet cumulatif des apports pluvieux et de la recharge.

Conclusion

Ainsi les déficits pluviométriques des décennies 1970 et 1980 ont été largement amplifiés dans les écoulements de toutes les rivières du bassin béninois du fleuve Niger et particulièrement dans la recharge de la Sota, surtout à Coubéri. Cela suggère une diminution importante des aquifères et de leurs niveaux piézométriques.

Les corrélations entre les termes du bilan hydrologique présentent, sur l'ensemble du bassin, des valeurs élevées. La dépendance des écoulements à la pluie brute dans les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota à Gbassè est cependant beaucoup plus importante que celle observée dans le sous bassin de la Sota à Coubéri. Dans ce dernier sous bassin, on note en revanche une forte liaison entre écoulement et recharge, ce qui n'est pas le cas des autres sous bassins situés presque entièrement sur les formations de socle.

Le fonctionnement hydrologique du bassin semble donc étroitement lié aux deux types de formations géologiques drainés par ces cours d'eau.

Sur le socle, les ressources en eau superficielle montent rapidement avec la pluie à partir d'un seuil ; elles connaissent un ruissellement rapide, mais elles s'amenuisent rapidement quand cesse l'alimentation. A ce titre, les sous bassins sur socle ne peuvent être utilisés dans le cadre des aménagements hydrauliques importants.

Sur les grès, la baisse corrélative de l'écoulement et de la recharge s'explique par le fait que l'écoulement est directement lié à la recharge de la nappe souterraine, surtout en saison sèche. On ne peut pas, là non plus, installer de barrages hydroélectriques à cause de l'importance de l'infiltration, même si la variation du débit est moins forte. On note aussi que toute l'eau infiltrée dans les grès n'alimente pas la Sota en période sèche. Où va alors le reste ? Probablement vers le cours principal du Niger.

Les modèles GR4j et GR2M seront utilisés pour la simulation des écoulements et pour la recherche de tendances dans le comportement hydrologique des sous bassins.

Chapitre 4 : Contribution des modèles GR4J et GR2M à l'étude du comportement hydrologique du bassin

Introduction

Dans le chapitre 3, nous avons présenté les résultats de l'application des méthodes de détection de la non-stationnarité dans les séries hydropluviométriques des différents sous bassins du bassin du Niger au Bénin.

Ce chapitre a pour objectif principal de tester les modèles hydrologiques GR4J et GR2M en tant que représentations mathématiques du fonctionnement des bassins versants. Fondée sur l'évaluation des performances, du réalisme et de l'incertitude des simulations, la démarche proposée ici est appliquée au bassin béninois du fleuve Niger. Les critères d'efficacité choisis nous permettent de mettre en évidence la robustesse ou non des modèles à simuler les écoulements.

Les deux modèles prennent aussi en compte le cas particulier et délicat de l'identification de tendances dans le comportement hydrologique des sous bassins-versants. A ces fins, nous nous fondons sur les tableaux de simulations croisées utilisés au CEMAGREF pour construire deux tests statistiques non-paramétriques d'interprétation (ANDREASSIAN, 2002). Ces tests ont été validés pour les sous bassins dont nous avons pu montrer un changement de comportement hydrologique lié aux fluctuations climatiques dans le chapitre 3.

4.1. Objectifs de la modélisation par GR4J et GR2M

La principale raison qui motive l'utilisation des modèles du fonctionnement hydrologique est le nombre limité de mesures dont nous disposons sur notre domaine d'étude. Ces mesures partielles dans le temps et dans l'espace incitent à l'utilisation de modèles mathématiques capables d'interpoler, voire d'extrapoler la physique des bassins-versants, à la fois temporellement et spatialement (PERRIN, 2000 ; LE LAY, 2006). Ces modèles constituent également une formalisation des connaissances sur les processus intervenant dans le cycle de l'eau. Ils permettent de les associer de façon dynamique et, ainsi, de mieux comprendre leur nature, leur rôle et leurs interactions spatiales et temporelles. Ils sont aussi, par conséquent, des outils pour valider, infirmer ou proposer des concepts ou des théories.

En tant que projection mathématique de nos connaissances, la modélisation hydrologique peut également permettre de répondre aux questions que pose la dynamique des eaux continentales en termes de risques et de ressources, comme la prévision des crues et des étiages, la recherche précise des impacts de changements climatiques et/ou anthropiques sur le

cycle de l'eau, mais toute modélisation hydrologique rencontre d'importants obstacles qu'il est nécessaire de rappeler ici.

4.2. Problèmes de la modélisation hydrologique dans un contexte non stationnaire

Depuis une vingtaine d'années, le réchauffement global du climat et l'augmentation de la pression humaine mobilisent l'attention de nombreux scientifiques sur la question épineuse de leurs impacts sur l'environnement. Pour les chercheurs hydrologues, le problème est de comprendre et de formaliser les interactions entre le climat, l'homme et le cycle de l'eau, tant en termes de ressources que de risques hydrologiques (LE LAY, 2006). Il convient néanmoins de reconnaître que notre capacité à traiter ces questions est très limitée, étant donné le manque de connaissances et les nombreuses incertitudes inhérentes aux outils et méthodes utilisés. BRONSTER (2004) liste à ce titre un certain nombre de pierres d'achoppement :

- les incertitudes sur les scénarios climatiques, qui limitent la portée des résultats obtenus. Les approches probabilistes aujourd'hui préconisées (prévisions d'ensemble) visent à placer cette notion d'incertitude au centre des prévisions effectuées ;
- les différences d'échelles entre les modèles climatiques : Modèle de Circulation Générale (MCG) ou Modèle de Circulation Régionale (MCR) et les modèles hydrologiques, qui imposent l'application de méthodes de transferts d'échelles ;
- la calibration des modèles hydrologiques, qui limite leur application à des conditions peu modifiables ;
- les conditions extrêmes (crue et sécheresse hydrologique par exemple) qui sont mal prises en compte, aussi bien par les modèles climatiques que par les modèles hydrologiques ;
- les interactions complexes entre le climat et les conditions de surface, rarement intégrés du fait de l'application des modèles en mode forcé (*one-way mode*) et non en mode couplé (*two-way mode*) (LE LAY, 2006).

Les deux modèles (GR4J au pas de temps journalier et GR2M au pas de temps mensuel) utilisés ici n'échappent pas à ces difficultés, dont il faut tenir compte dans l'interprétation des résultats.

4.3. Présentation des modèles GR4j et GR2M

4.3.1. Modèle GR4J

4.3.1.1. Présentation générale

La première version de ce modèle a été créée par MICHEL (1983), et EDIJATNO (1991). NASCIMENTO (1995), EDIJATNO *et al.* (1999), PERRIN (2000) et PERRIN *et al.* (2003) l'ont successivement améliorée. C'est sous cette forme, avec seulement quatre paramètres, que le modèle est appliqué ici à un pas de temps journalier.

Quelques applications intéressantes du modèle ont été réalisées par MAKHLOUF (1994) pour la régionalisation des paramètres et les changements environnementaux dans la région de la Bretagne et du bassin de la Moselle, tandis que YANG (1993) l'a utilisé pour la prévision des inondations à Paris.

GR4J est un modèle Génie Rural journalier à quatre paramètres :

- deux paramètres de production :

- $X1$: capacité du réservoir de production (S = niveau d'eau dans les premiers horizons du sol qui gère le bilan d'eau dans le sol) dont le remplissage est fonction de la nature du sol ;
- $F(X2)$: paramètre d'échange (gain ou perte) qui permet de prendre en compte les erreurs dues au forçage climatique (P et ETR) ;

- deux paramètres de transfert :

- $X3$: capacité du réservoir de routage (R = eau souterraine qui alimenterait le cours d'eau à l'exutoire avec un effet retard) ;
- $X4$: temps de base (maximal) de l'hydrogramme unitaire.

C'est donc un modèle global pluie-débit robuste dont les quatre paramètres disposent d'un degré de liberté assez important. Il se compose de deux compartiments reliés : l'un responsable du module non-linéaire de production avec un magasin d'humidité de sol et l'autre responsable du cheminement quadratique des précipitations excessives, couplé à deux hydrogrammes unitaires pour l'écoulement de surface et l'écoulement souterrain.

Pour utiliser GR4J sur un bassin donné, les informations suivantes sont nécessaires pour les calculs : la superficie du bassin en kilomètres carrés ; les chroniques journalières de pluie (P) sur le bassin (moyenne spatiale) en millimètres, les chroniques journalières d'évapotranspiration potentielle (ETP) en millimètres et les valeurs initiales des taux de remplissage des deux réservoirs : production ($X1$) et transfert ($X3$).

Les données de « sortie » du modèle sont l'écoulement retardé (Qr), l'écoulement direct (Qd) et l'écoulement à la sortie de l'exutoire (Q).

4.3.1.2. Description de la structure du modèle

La description de la version GR4J proposée par EDIJATNO (1999) est présentée en figure 4.1, avec les modifications introduites par PERRIN (2000).

En entrée du modèle, on a deux variables : P (pluie journalière en mm) et E (évapotranspiration potentielle en mm).

Le bilan d'eau du sol (Neutralisation) est déterminé par la pluie brute subissant l'évapotranspiration potentielle (ETP). Cette action se traduit mathématiquement comme suit :

- si $P \geq E$ alors $P_n = P - E$ et $E_n = 0$
- si $P < E$ alors $E_n = E - P$ et $P_n = 0$

Dans le Réservoir de production, la pluie restante après prélèvement par l'action de l'évapotranspiration potentielle se répartit entre la quantité d'eau allant dans le réservoir sol P_s et celle $P_n - P_s$ qui transite vers l'exutoire, tel que :

$$P_s = \frac{P_n \left(1 - \left(\frac{S}{X1} \right)^2 \right)}{1 + P_n \left(1 + \frac{S}{X1} \right)} \quad E_s = \frac{E_n \frac{S}{X1} \left(2 - \frac{S}{X1} \right)}{1 + \frac{E_n}{X1} \left(2 - \frac{S}{X1} \right)}$$

Le contenu du réservoir est ainsi mis à jour par : $S = S - E_s + P_s$

La percolation du réservoir de production s'écrit $Perc$, qui s'ajoute à $P_n - P_s$ tel que :

$$Perc = S - \left(S^{-4} + \left(\frac{9}{4} X1 \right)^{-4} \right)^{-\frac{1}{4}}$$

Le contenu du réservoir est alors de nouveau identifié par : $S = S - Perc$

Dans le modèle, la pluie est séparée en deux composantes de l'écoulement :

- un écoulement pseudo-direct est routé par un hydrogramme unitaire ($SH1(X4)$) représentant 10 % de la pluie efficace, soit à chaque jour j :

Pour $j = 0$, $SH1(j) = 0$

Pour $0 \leq j \leq X4$, $SH1(j) = \left(\frac{j}{X4}\right)^{\frac{5}{2}}$

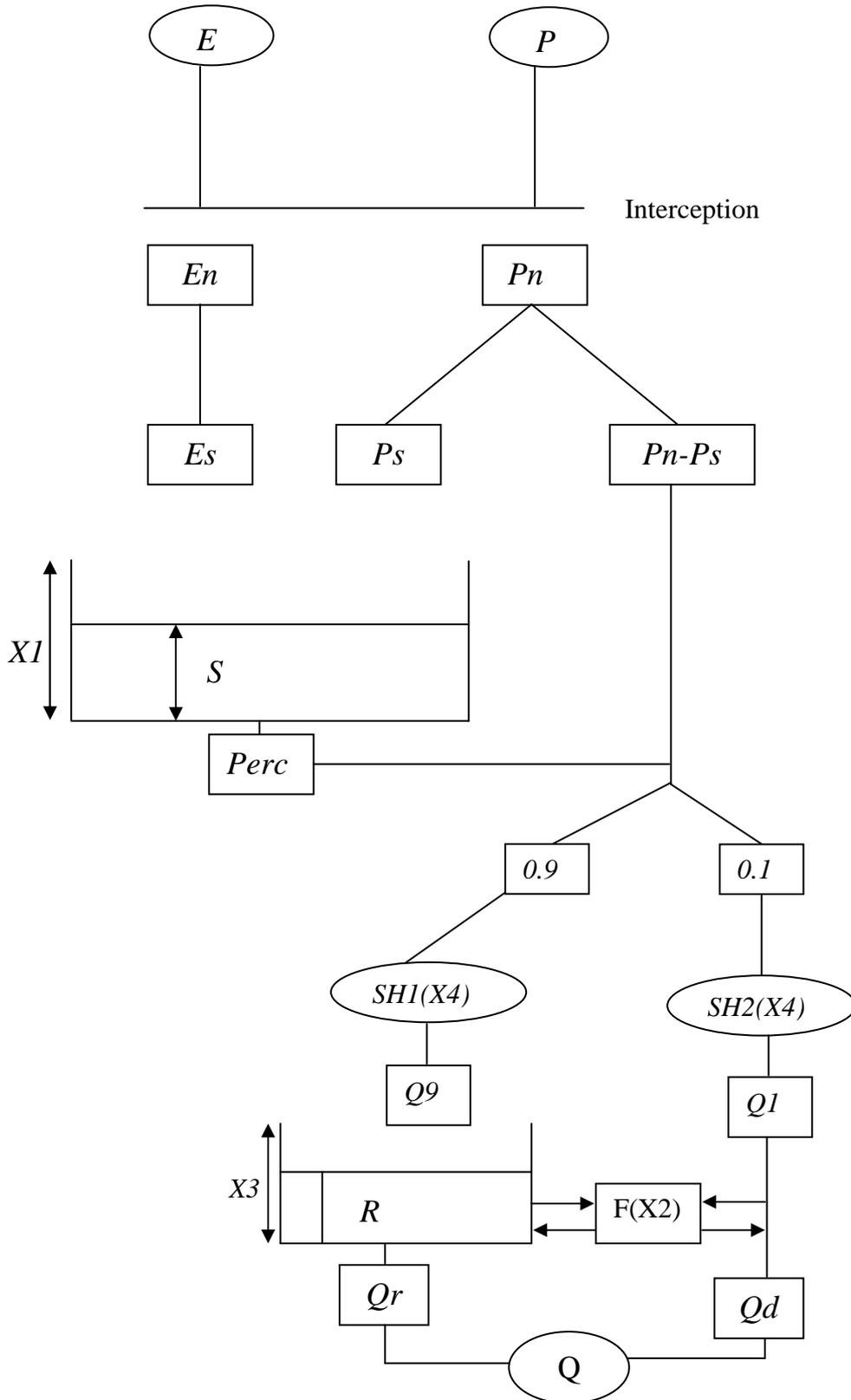


Figure 4.1: Le modèle GR4J
(d'après PERRIN, 2000)

Pour $j > X4$, $SH1(j) = 1$

➤ les 90 % de la pluie efficace restante sont routés par un hydrogramme unitaire ($SH2(X4)$) et un réservoir de routage (transfert).

Pour $j = 0$ $SH2(j) = 0$

Pour $0 \leq j \leq X4$, $SH2(j) = \frac{1}{2} \left(\frac{j}{X4} \right)^{\frac{5}{2}}$

Pour $X4 < j \leq 2X4$, $SH2(j) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{j}{X4} \right)^{\frac{5}{2}}$

Pour $j > 2X4$, $SH2(j) = 1$

NB. j : nombre de jour

Dans le réservoir souterrain, la fonction d'échange est assurée par $F(X2)$ qui peut constituer un apport souterrain ou une perte d'eau dans le sous-sol pour le bassin. Il se

formule comme suit : $F = X2 \left(\frac{R}{X3} \right)^{\frac{7}{2}}$, où R est le niveau dans le réservoir de routage (eau souterraine), X3 la capacité à un jour du réservoir de routage et X2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes pour les nappes profondes, ou bien nul.

Le niveau dans le réservoir de routage R est mis à jour en ajoutant la sortie $Q9$ de l'hydrogramme ($SH1(X4)$) et F : $R = \max (0; R + Q9 + F)$

Il se vidange ensuite en une sortie Qr donnée par : $Qr = R - (R^{-4} + X3^{-2})^{\frac{1}{4}}$

$$R = R - Qr$$

Le niveau dans le réservoir devient alors :

La sortie $Q1$ de l'hydrogramme ($SH2(X4)$) est soumise aux mêmes échanges pour donner la composante d'écoulement direct Qd : $Qd = \max (0; Q1 + F)$

L'écoulement total à l'exutoire du cours d'eau est la somme de l'écoulement direct (Qd) du cours d'eau et de l'écoulement retardé (Qr), représentant la recharge de la nappe souterraine.

Il se formule de la façon suivante : $Q = Qr + Qd$

4.3.1.3. Utilité du modèle

Le modèle GR4J nous permet ainsi d'obtenir la simulation des débits journaliers dans un bassin hydrologique, de réaliser la prévision des crues et des étiages, de reproduire le fonctionnement du bassin et enfin d'obtenir l'interpolation et l'extrapolation des conditions climatiques du bassin. Dans le cadre de cette étude, le modèle GR4J est utilisé pour la simulation des débits journaliers, la reproduction du fonctionnement et la recherche de tendance dans le comportement hydrologique du bassin béninois du fleuve Niger au Bénin.

Par ailleurs, il est complété par l'utilisation du modèle GR2M qui permet de simuler les débits des bassins-versants à l'échelle mensuelle.

4.3.2. Modèle GR2M

4.3.2.1. Présentation générale

C'est un modèle conceptuel et empirique global élaboré par MICHEL (1983) du CEMAGREF. L'application de ce second modèle teste sa capacité à simuler les débits mensuels. Il est relativement simple et exige un nombre relativement faible de paramètres (deux paramètres X_1 et X_2).

Ce modèle a déjà été appliqué sur des bassins en Afrique de l'Ouest : OUEDRAOGO (2001) sur les bassins de la Bandara à Boda (Côte d'Ivoire), de la Mouhoun à Dapola (Burkina-Faso) et du Niger à Douna (Mali) ; LE LAY (2002) sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou (Bénin) ; ARDOIN-BARDIN (2004) sur la zone soudano-sahélienne.

Il prend en compte :

- un réservoir sol qui régit la fonction de production et qui est caractérisé par sa capacité maximale X_1 , correspondant à la capacité de rétention en eau du sol.
- un réservoir d'eau gravitaire qui régit la fonction de transfert caractérisée par un coefficient d'échange souterrain X_2 .

Pour utiliser GR2M sur un bassin donné, les informations suivantes sont nécessaires pour les calculs : la superficie du bassin en kilomètres carrés, les chroniques mensuelles de pluie (P) sur le bassin (moyenne spatiale) en millimètres, les chroniques mensuelles d'évapotranspiration potentielle (E) en millimètres et les valeurs initiales des taux de remplissage du réservoir de production (XI).

La principale donnée de « sortie » du modèle est l'écoulement à l'exutoire (Q).

4.3.2.2. Description de la structure du modèle

On note qu'il existe plusieurs versions du modèle GR2M. La dernière version mise au point par MOUELHI (2003) est utilisée ici (Figure 4.2).

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol, très similaire à celui existant dans le modèle GR4J. Du fait de la pluie P , le niveau S dans le réservoir devient S_1 , défini par :

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}} \quad \text{où} \quad \varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right) \quad (1)$$

Le paramètre X_1 , capacité du réservoir, est positif et exprimé en millimètres. La pluie P_1 en excès est donnée par :

$$P_1 = P + S - S_1 \quad (2)$$

Du fait de l'évapotranspiration, le niveau S_1 devient S_2 :

$$S_2 = \frac{S_1(1-\psi)}{1 + \psi \left(1 - \frac{S_1}{X_1}\right)} \quad \text{où} \quad \psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right) \quad (3)$$

E est l'évapotranspiration potentielle. Le réservoir sol se vidange ensuite en une percolation P_2 et son niveau S , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$S = \frac{S_2}{\left[1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^{2.5}\right]^{0.4}} \quad \text{et} \quad P_2 = S_2 - S \quad (4)$$

La pluie totale P_3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par :

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (5)$$

Le niveau R dans le réservoir devient alors R_1 :

$$R_1 = R + P_1 \quad (6)$$

Un terme d'échange en eau est alors calculé par :

$$F = (X_2 - 1).R_1$$

Le paramètre X_2 est positif et adimensionnel. Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_2 = X_2 \cdot R_1 \quad (7)$$

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 mm, se vidange suivant une fonction quadratique. Le débit est donné par :

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60} \quad (8)$$

et le niveau du réservoir est enfin mis à jour par :

$$R = R_2 - Q$$

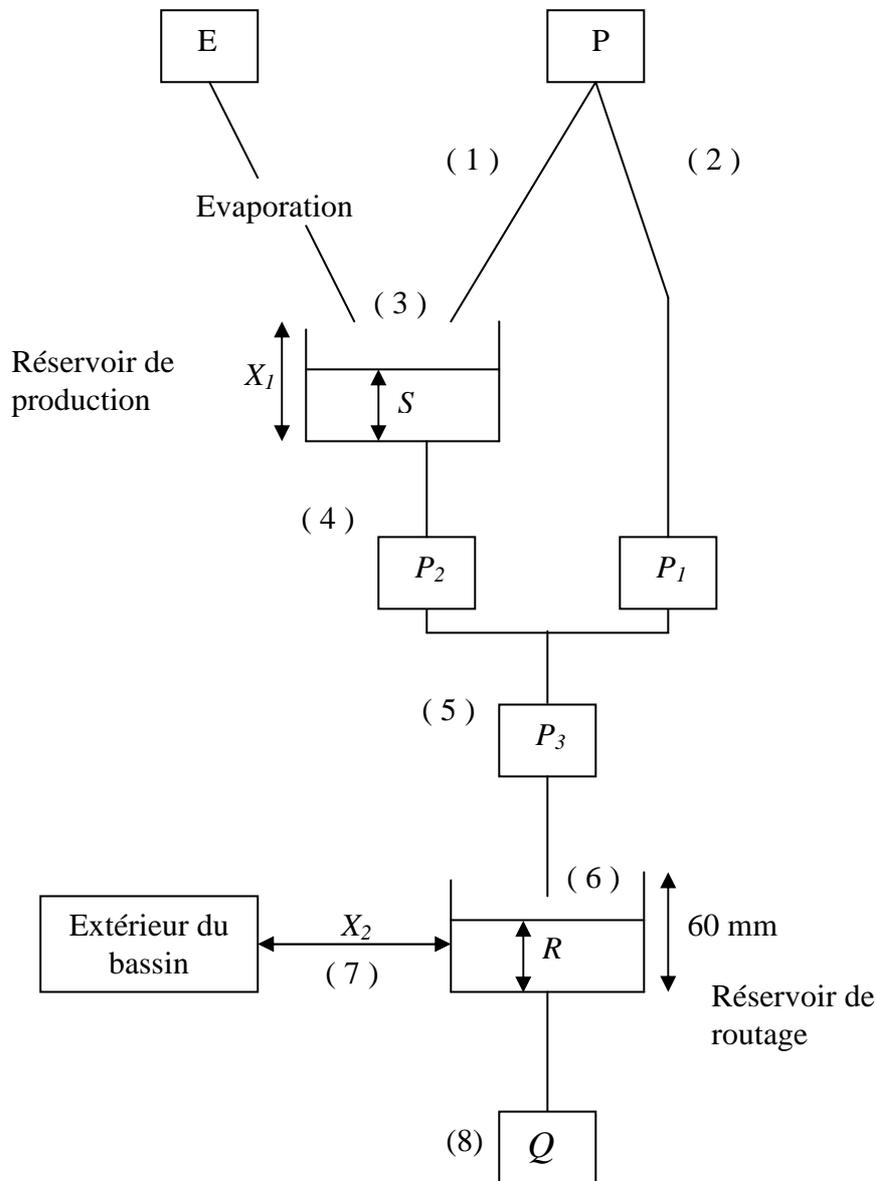


Figure 4.2 : Fonctionnement du modèle GR2M

(d'après MOUELHI, 2003)

Le modèle GR2M présente les mêmes intérêts que le GR4J. La seule différence, c'est l'échelle temporelle d'application.

4.4. Analyse de l'efficacité des modèles

4.4 .1. Méthode du test de calage/contrôle des modèles

Pour caler et valider les modèles GR4J et GR2M, nous avons choisi de retenir les tableaux croisés (Tableau 4.1) utilisés par ANDREASSIAN (2002) et ANDREASSIAN *et al.* (2003) qui donnent des valeurs de NASH (critère d'optimisation des modèles) ou des valeurs

Tableau 4.1 : Tableaux de Nash (racine carrée de l'écoulement) utilisés pour l'étude de l'efficacité des modèles GR4J et GR2M

"Modèles" "Périodes"	M1	M2	M3	M4	M5	M6
P1	Valeur du Nash calée	valeur du Nash validée par M2 en utilisant les pluies de la période P1	valeur du Nash validée par M3 en utilisant les pluies de la période P1	valeur du Nash validée par M4 en utilisant les pluies de la période P1	valeur du Nash validée par M5 en utilisant les pluies de la période P1	valeur du Nash validée par M6 en utilisant les pluies de la période P1
P2	valeur du Nash validée par M1 en utilisant les pluies de la période P2	Valeur du Nash calée	valeur du Nash validée par M3 en utilisant les pluies de la période P2	valeur du Nash validée par M4 en utilisant les pluies de la période P2	valeur du Nash validée par M5 en utilisant les pluies de la période P2	valeur du Nash validée par M6 en utilisant les pluies de la période P2
P3	valeur du Nash validée par M1 en utilisant les pluies de la période P3	valeur du Nash validée par M2 en utilisant les pluies de la période P3	Valeur du Nash calée	valeur du Nash validée par M4 en utilisant les pluies de la période P3	valeur du Nash validée par M5 en utilisant les pluies de la période P3	valeur du Nash validée par M6 en utilisant les pluies de la période P3
P4	valeur du Nash validée par M1 en utilisant les pluies de la période P4	valeur du Nash validée par M2 en utilisant les pluies de la période P4	valeur du Nash validée par M3 en utilisant les pluies de la période P4	Valeur du Nash calée	valeur du Nash validée par M5 en utilisant les pluies de la période P4	valeur du Nash validée par M6 en utilisant les pluies de la période P4
P5	valeur du Nash validée par M1 en utilisant les pluies de la période P5	valeur du Nash validée par M2 en utilisant les pluies de la période P5	valeur du Nash validée par M3 en utilisant les pluies de la période P5	valeur du Nash validée par M4 en utilisant les pluies de la période P5	Valeur du Nash calée	valeur du Nash validée par M6 en utilisant les pluies de la période P5
P6	valeur du Nash validée par M1 en utilisant les pluies de la période P6	valeur du Nash validée par M2 en utilisant les pluies de la période P6	valeur du Nash validée par M3 en utilisant les pluies de la période P6	valeur du Nash validée par M4 en utilisant les pluies de la période P6	valeur du Nash validée par M5 en utilisant les pluies de la période P6	Valeur du Nash calée

de l'écoulement, $M1$, $M2$, $M3$, $M4$, $M5$ et $M6$ pour les sous-périodes $P1$ (1955-1960), $P2$ (1960-1966), $P3$ (1966-1972), $P4$ (1972-1979), $P5$ (1979-1986) et $P6$ (1986-1992).

Rappelons que le critère de « Nash » est un critère d'optimisation des paramètres pour mesurer la performance des modèles utilisés à simuler les débits. Celui que nous utilisons dans ce travail est appliqué aux débits moyens. Dans ces conditions, une mauvaise simulation des hautes eaux ne serait pas totalement imputable au modèle. Notre choix s'explique par le fait que, dans le contexte actuel de la mise en œuvre de la GIRE (gestion intégrée des ressources en eau) au Bénin, c'est l'écoulement moyen qui est privilégié.

Le critère de « Nash » (NASH et SUTCLIFFE, 1970) se formule comme suit :

$$Nash(\sqrt{Q}) = 100 \left[1 - \frac{\sum_i \left(\sqrt{Q_{obs}^i} - \sqrt{Q_{cal}^i} \right)^2}{\sum_i \left(\sqrt{Q_{obs}^i} - \sqrt{Q_{moy}^i} \right)^2} \right] \text{ en } \%$$

avec : Q_{obs}^i débit mensuel ou journalier observé ; Q_{cal}^i débit mensuel ou journalier calculé ; Q_{moy}^i débit moyen mensuel ou journalier observé et i mois ou jours considérés.

C'est le « Nash » (racine carrée de l'écoulement).

La première étape consiste à examiner le tableau des valeurs de « Nash » en calages (dans la diagonale) et contrôles sur l'écoulement moyen de chaque sous bassin (Tableau 4.1).

A la deuxième étape, les moyennes des Nash (racine carrée de l'écoulement) en calages et contrôles (validation) suivants ont été opérées :

- calage et contrôle sur toute la grande période (1955-1992) ;
- calage et contrôle sur la période humide (1955-1972) ;
- calage et contrôle sur la période sèche (1973-1992) ;
- calage sur la période humide et contrôle sur la période sèche ;
- calage sur la période sèche et contrôle sur la période humide.

Tous ces calages et contrôles sont faits en déterminant la moyenne des « Nash calés » et des « Nash contrôles » sur la série 1955-1992 et sur chacune des sous-périodes.

4.4.2. Evolution des paramètres et calage-contrôle du modèle GR4J

4.4.2.1. Evolution des paramètres

Le modèle GR4J étant un modèle empirique et non à base physique, l'étude sur les paramètres $X1$ (capacité du réservoir de production), $X2$ (paramètre d'échange), $X3$ (capacité du réservoir de routage) et $X4$ (temps de base de l'hydrogramme unitaire) ne feront l'objet d'aucune interprétation prenant en compte des caractéristiques physiques (sol, couverture végétale....) des sous bassins versants. Nous nous contentons ici d'analyser les fluctuations temporelles et spatiales de ces paramètres en calage afin d'identifier leur intervalle de variation sur la période 1955-1992.

Les valeurs du modèle GR4J utilisées sont optimisées dans les sous bassins selon le critère d'efficacité de NASH et SUTCLIFFE (1970) appliqué au débit moyen. Lorsque le modèle GR4J est calé sous-période par sous-période, les valeurs optimisées des paramètres sont très variables d'une sous-période à l'autre et d'un sous bassin à l'autre, comme le montre la figure 4.3.

C'est particulièrement le cas du paramètre $X1$ (capacité du réservoir de production) (Figure 4.3a).

Dans le sous bassin de la Mékrou, il varie ainsi entre 300 et 900 mm, dans l'Alibori entre 100 et 1 100 mm, pour la Sota à Gbassè entre 600 et 1 300 et la Sota à Coubéri entre 200 et 1 500 mm.

On peut donc conclure qu'en calage, le paramètre $X1$ (capacité du réservoir de production) varie sur l'ensemble du bassin du Niger au Bénin entre 100 et 1 500 mm, soit une importante fluctuation temporelle de ce paramètre.

L'analyse de la figure 4.3b montre que le paramètre $X2$ (paramètre d'échange) varie en revanche dans des intervalles très peu importants dans trois sous bassins : Mékrou entre -7,5 et 2,5 ; Sota à Gbassè entre -5 et 0 ; Sota à Coubéri entre 0 et 1. A l'opposé, dans le bassin de l'Alibori, sur les sous-périodes de la série 1955-1992, le paramètre d'échange varie entre -42,5 et 0, soit une très grande dispersion de ce paramètre dans le temps. Rappelons toutefois que la plus faible fluctuation des échanges entre le bassin et le substratum géologique dans le temps a été montré plus haut pour le sous bassin de la Sota à Coubéri (cf chapitre 3).

Somme toute, dans le bassin du Niger au Bénin, le paramètre X_2 (paramètre d'échange) varie globalement entre -45 et 2,50, marquant ainsi une forte dispersion dans le temps et dans l'espace.

Le paramètre X_3 caractérisant la capacité du réservoir souterrain (Figure 4.3c) met en évidence une fluctuation spatio-temporelle très remarquable. Ainsi, dans le sous bassin de la Mékrou, il oscille entre 20 et 180 mm, avec la plus forte valeur pour la sous-période 1955-1960 (169 mm). Pour l'Alibori, il fluctue entre 10 et 280 mm, avec la plus faible valeur pour la sous-période 1986-1992 (10,2 mm) ; sur la Sota, il varie entre 10 et 50 mm à Gbassè et entre 0 et 40 mm à Coubéri.

Pour l'ensemble du bassin du Niger au Bénin, en calage, la capacité du réservoir souterrain (X_3) évolue entre 0 et 280 avec le modèle GR4J. Ces résultats confirment bien que le modèle n'intègre pas les caractères physiques du bassin. Sinon, les valeurs les plus importantes de X_3 (capacité du réservoir souterrain) devraient être enregistrées dans les sous bassins de la Sota à Gbassè (20 % de grès) et de la Sota à Coubéri (93 % de grès) qui ont les plus importants réservoirs souterrains.

L'évolution du paramètre X_4 caractérisant le temps de réponse du bassin à un événement pluvieux marque une faible fluctuation sur les deux sous-périodes entre 1955 et 1992 et cela dans trois sous bassins : Mékrou et Alibori (1 à 5 jours), Sota à Gbassè (1 à 7 jours). Dans le sous bassin de la Sota à Coubéri, la variation du temps de réponse de l'hydrogramme unitaire (X_4) sur la période 1955-1992 est plus marquée (1 et 16 jours). La valeur 16 pour le paramètre X_4 (temps de réponse de l'hydrogramme unitaire) pourrait traduire le fait que le modèle ne fonctionne pas correctement sur les sous-périodes concernées.

La durée de l'hydrogramme unitaire dans l'ensemble du bassin varie donc entre 1 et 16 jours.

Au-delà de la mise en évidence de cette variabilité des paramètres, il faut aussi analyser les liens de dépendance ou d'indépendance entre eux dans chacun des sous bassins.

L'analyse du tableau 4.2 montre une très faible interdépendance entre les différents paramètres. La plupart des valeurs des coefficients de corrélation obtenues dans chacun des sous bassins ne sont pas significatives.

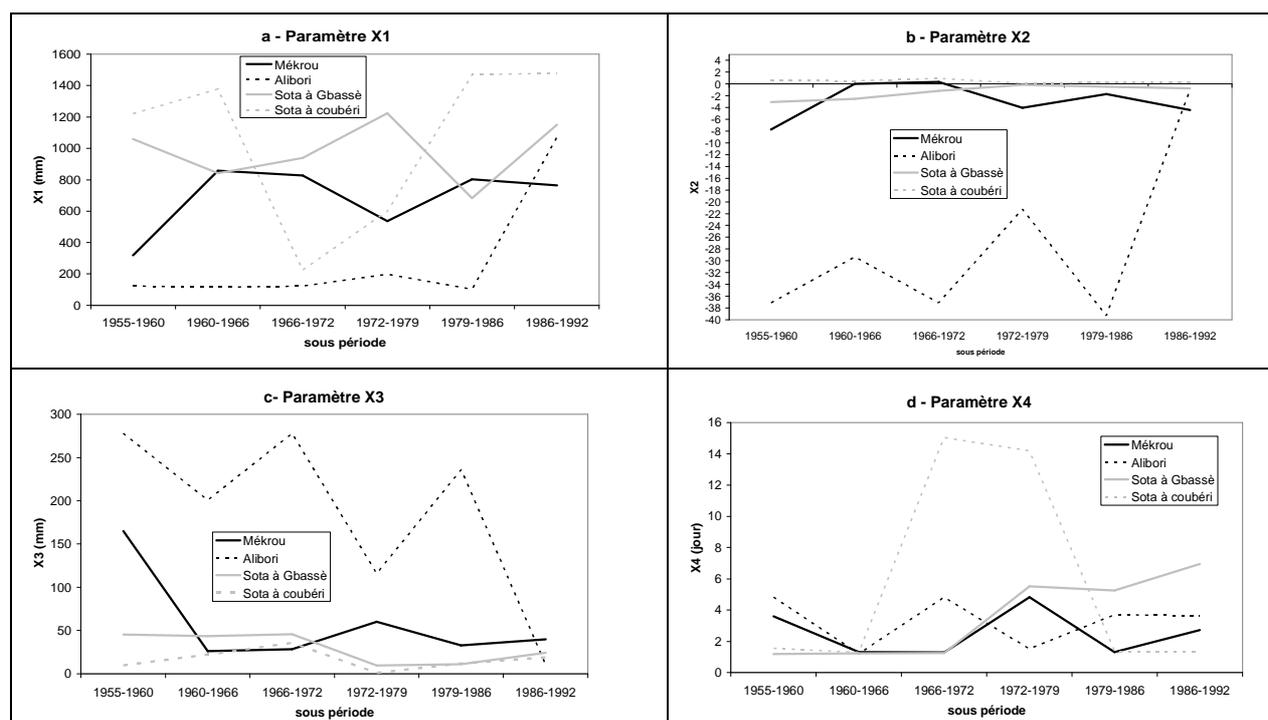


Figure 4.3 : Variabilité des valeurs des paramètres du modèle GR4J, optimisées dans le bassin selon le Nash de l'écoulement moyen sur les sous-périodes (1955-1992)

Dans le sous bassin de la Mékrou, on note une corrélation positive entre les paramètres qui n'est significative qu'entre X1/X2 et X3/X4. Toutes les autres corrélations sont négatives. Dans les sous bassins de l'Alibori, de la Sota à Gbassè et de la Sota à Coubéri, une seule des corrélations est significativement positive : X1/X2 (Alibori) ; X2/X4 (Sota à Gbassè) ; X2/X3 (Sota à Coubéri).

Tableau 4.2 : Analyse de corrélation entre les paramètres du modèles GR4J dans les sous bassins

a - Mékrou	X1	X2	X3	X4
X1	1			
X2	0,89	1		
X3	-0,94	-0,86	1	
X4	-0,79	-0,75	0,56	1

b - Alibori	X1	X2	X3	X4
X1	1			
X2	0,92	1		
X3	-0,86	-0,97	1	
X4	0,07	-0,28	0,40	1

c - Sota à Gbassè	X1	X2	X3	X4
X1	1			
X2	0,13	1		
X3	-0,09	-0,83	1	
X4	0,29	0,79	-0,87	1

d - Sota à Coubéri	X1	X2	X3	X4
X1	1			
X2	-0,46	1		
X3	-0,29	0,79	1	
X4	-0,97	0,24	0,148	1



Corrélation positive significative entre les paramètres



Corrélation négative significative entre les paramètres

Cette analyse de corrélations entre $X1$, $X2$, $X3$ et $X4$ montre une très faible dépendance entre les paramètres.

Cette approche « multi-calage » (PERRIN, 2000) sur différentes sous-périodes sans recouvrement garantit ainsi une indépendance des paramètres en passant d'une sous-période à l'autre.

De son côté, la méthode de calage-contrôle permet d'évaluer l'efficacité du modèle GR4J à simuler les écoulements journaliers sur les différents sous bassins.

4.4.2.2. Calage-contrôle du modèle GR4J

Pour évaluer l'efficacité du modèle GR4J, nous allons procéder en trois étapes : d'abord, nous analyserons les valeurs des « Nash » sur toutes les sous-périodes en calage, en calage-contrôle, et la moyenne des Nash en calage et en calage-contrôle sur les mêmes sous-périodes dans tous les sous bassins ; ensuite, nous commenterons l'évolution des écoulements observés et simulés sur les sous-périodes de calage, et enfin nous tenterons de mettre en évidence des liens entre débits observés et simulés dans les sous bassins.

Les Nash de calage-contrôle sur toutes les sous-périodes dans les sous bassins sont récapitulés dans le tableau I, en annexe . Ces résultats semblent valables pour l'ensemble du bassin du fleuve Niger au Bénin. Seul le sous bassin de la Sota à Gbassè présente des valeurs de Nash en calage inférieures à 50 % (soit 41 %) durant la période sèche (1979-1986).

De 1955 à 1992, on observe une certaine tendance à la baisse des Nash dans l'ensemble du bassin (Figure 4.4). Toutefois, cette baisse n'est sensible que dans le sous bassin de l'Alibori. Cette analyse montre une meilleure efficacité du modèle GR4J à simuler les écoulements en période humide qu'en période sèche. Les valeurs des Nash en calage comme en contrôle confirment cette réalité.

De façon générale, les valeurs des Nash en optimisation sur toutes les sous-périodes sont supérieures à 60 % (Figure 4.4) dans tous les sous bassins sauf dans celui de la Sota à Gbassè pour les sous-périodes 1955-1960 et 1979-1986, représentant la période où, nous avons constaté que le déficit en eau était le plus marqué.

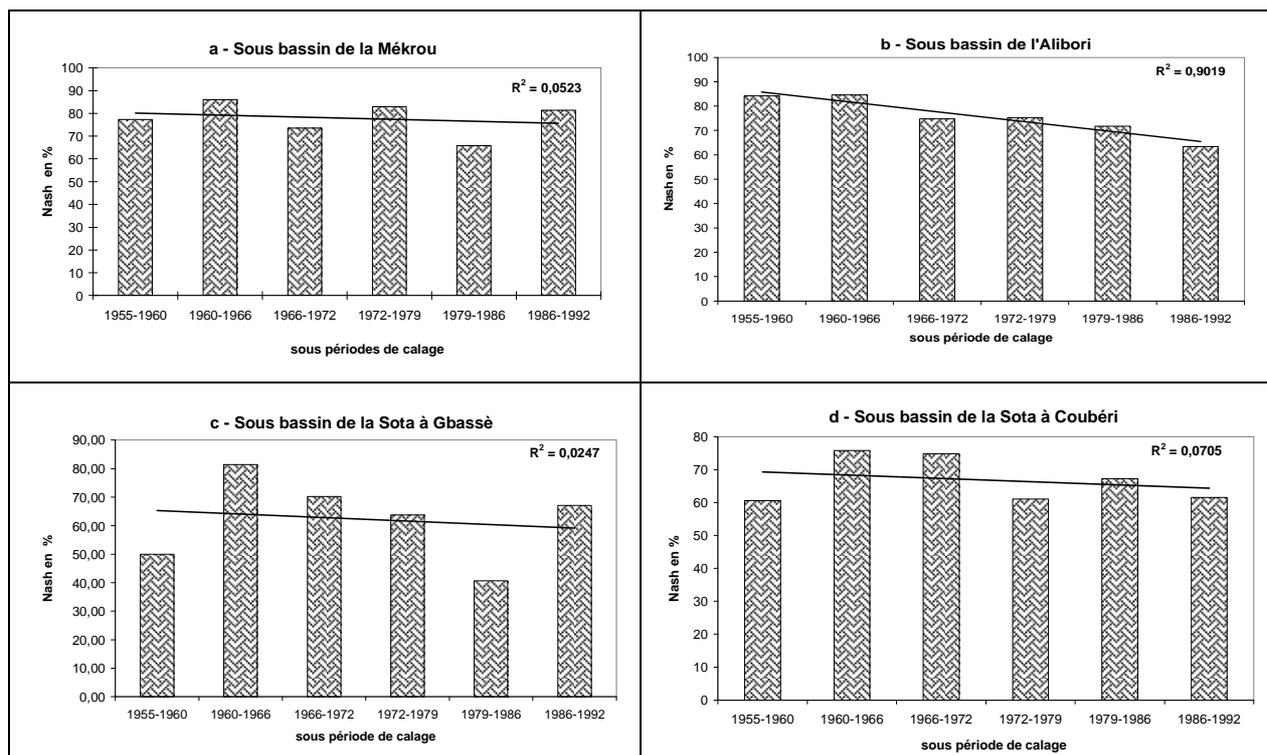


Figure 4.4 : Variabilité du Nash en optimisation (calage) sur les sous-périodes de 1955-1992 dans le bassin (GR4J)

Les différentes moyennes des Nash en calage et contrôle réalisées sur la période 1955-1992 et les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 sont présentées dans le tableau 4.3.

Son analyse rapide montre que les moyennes du Nash optimisées sur la racine carrée de l'écoulement sont généralement supérieures à 60 % pour toutes les sous-périodes de calage et dans tous les sous bassins.

Dans les sous bassins de la Mékrou et de l'Alibori, les Nash en calage dépassent tous 70 % et le Nash de contrôle est supérieur à 60 %. Le modèle GR4J présente donc une bonne robustesse à simuler les écoulements moyens dans les sous bassins de la Mékrou et de l'Alibori.

Dans les sous bassins de la Sota à Gbassè et Coubéri, les valeurs du Nash excèdent 60 % en calage et 40 % en contrôle. Ces résultats suggèrent que le modèle GR4J présente une robustesse acceptable dans ces deux sous bassins.

Comme pour les sous bassins de l'Alibori et la Mékrou, pour les deux sous bassins de la Sota, le modèle donne des résultats peu probants en validation de la sous-période humide sur la sous-période sèche. Ce résultat pourrait s'expliquer par la moins bonne qualité des données

de pluie (faible réseau pluviométrique) ou par le mauvais fonctionnement du système sur cette période.

Tableau 4.3 : Nash moyen en calage et contrôle avec le modèle GR4J sur la période 1955-1992 et les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 dans les sous bassins

Sous bassins	Global 1955-1992		Humide 1955-1972		Sèche 1973-1992		Sèche vers humide		Humide vers sèche	
	cal	cont	cal	cont	cal	cont	cal	cont	cal	cont
Mékrou	76	63	79	74	73	67	73	67	79	47
Alibori	76	65	81	76	70	64	70	69	81	53
Sota à Gbassè	62	52	67	59	57	46	57	43	67	60
Sota à Coubéri	63	46	64	50	62	47	62	49	64	33
Moyenne	69	57	73	65	66	56	63	57	73	48

Cal : calage

Cont : contrôle

4.4.3. Evolution des paramètres et Calage-contrôle du modèle GR2M

4.4.3.1. Evolution des paramètres

Le modèle GR2M utilisé comprends seulement deux paramètres $X1$ (capacité du réservoir de production) et $X2$ (coefficient d'échanges souterrains).

Le paramètre $X1$ a des intervalles de fluctuation variables suivant deux types de sous bassins (Figure 4.5) :

- le premier regroupe les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota à Gbassè où $X1$ varie entre 500 et 1 500 mm, soit une fluctuation entre les sous-périodes peu marquée ;

- le second est représenté par le sous bassin de la Sota à Coubéri. $X1$ fluctue ici entre 1 500 et 2 500 mm. Les valeurs sont plus élevées que dans le premier groupe, même si la dispersion de ce paramètre semble se réaliser dans des intervalles identiques dans tous les sous bassins. $X2$ (coefficient d'échanges souterrains) connaît une baisse sensible dans tous les sous bassins sur les sous-périodes d'optimisation de la série 1955-1992. Son intervalle de fluctuation est également très faible (entre 0,4 et 0,9) dans l'ensemble du bassin, preuve que ce paramètre connaît une faible dispersion, contrairement au premier ($X1$).

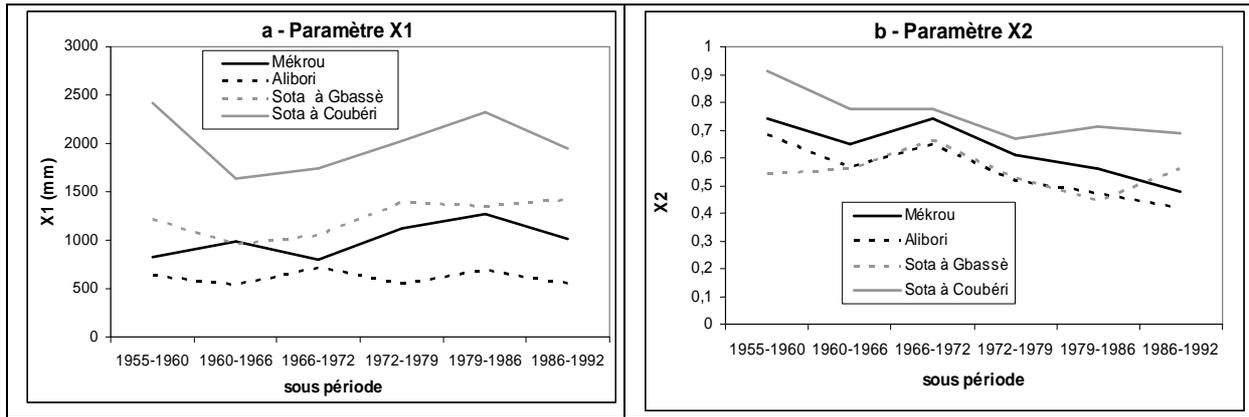


Figure 4.5 : Variabilité des valeurs des paramètres du modèle GR2M en optimisation sur la période 1955-1992

La recherche de corrélation entre $X1$ et $X2$ dans tous les sous bassins montre qu'il n'y a pas de lien significatif entre eux. L'analyse des valeurs de « Nash » permet de mettre en évidence la capacité du modèle GR2M à simuler les écoulements du bassin.

4.4.3.2. Calage et contrôle du modèle GR2M

L'étude de la variabilité des valeurs du Nash optimisées (Tableau II, annexe) sur les sous-périodes entre 1955 et 1992 souligne une très faible tendance à la baisse dans tous les sous bassins, sauf dans celui de la Sota à Gbassè où elle est marquée (Figure 4.6). Elle montre aussi que les valeurs du Nash sont plus faibles pendant la période sèche, ce qui confirme les résultats obtenus à partir du modèle GR4J.

Toutefois, ces valeurs en optimisation sont généralement comprises entre 80 et 90 % dans les sous bassins de la Mékrou et de l'Alibori, ce qui traduit une très bonne efficacité du modèle GR2M à simuler les écoulements. Dans les sous bassins de la Sota (Gbassè et Coubéri), le « Nash » demeure supérieur à 60 %, ce qui prouve que le modèle GR2M présente une bonne robustesse à simuler les écoulements de ces sous bassins.

Les résultats obtenus avec l'application du modèle GR2M (au pas de temps mensuel) ne sont pas fondamentalement différents de ceux obtenus par le GR4J au pas de temps journalier. Toutefois, on note une efficacité légèrement meilleure du modèle GR2M à simuler les débits moyens sur l'ensemble du bassin à l'échelle mensuelle, alors que le modèle GR4J présente des résultats contrastés d'un sous bassin à l'autre. Les résultats moins bons pour la simulation journalière seraient liés à la qualité des données kriggées (insuffisance de stations pluviométriques).

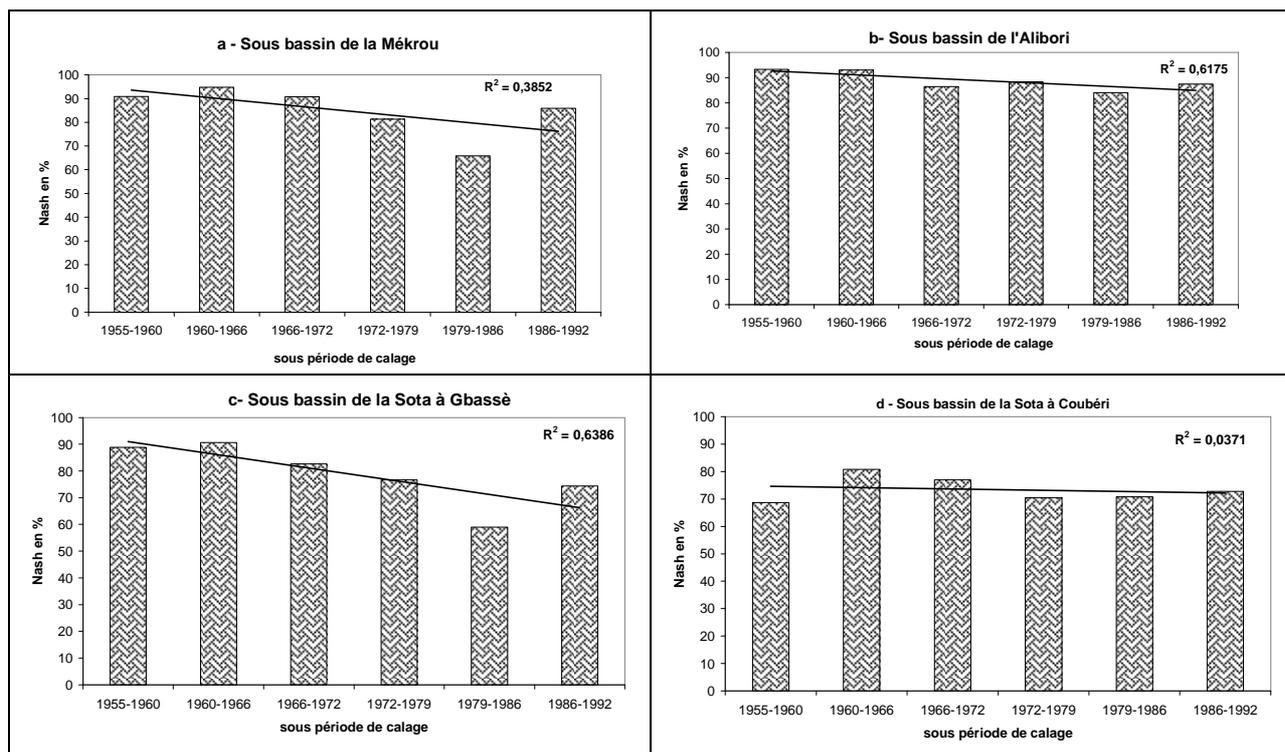


Figure 4.6 : Variabilité du Nash en optimisation sur les sous-périodes de 1955-1992 dans le bassin

Nous passons maintenant à la validation, mais d'abord humide par humide et sec par sec. Ensuite nous ferons humide sur sec et enfin sec sur humide.

L'analyse des valeurs du Nash sur les sous-périodes (Tableau 4.4) souligne une très bonne efficacité du modèle GR2M pour simuler des écoulements dans les sous bassins de la Mékrou et de l'Alibori : en optimisation, les valeurs du Nash varient ici entre 70 et 95. Dans les sous bassins de la Sota à Gbassè et Sota à Coubéri, sa robustesse à simuler les écoulements mensuels est également bonne, comme en témoignent les valeurs du Nash en optimisation comprises entre 60 et 90 %.

Toutefois, le modèle GR2M, à l'instar du modèle GR4J, est peu robuste en validation de la période humide à simuler les écoulements de la période sèche, comme en témoignent les valeurs du Nash comprises entre 40 et 70 % dans l'ensemble du bassin. La faible diminution des Nash en validation par rapport à ceux des calages montre la fiabilité des simulations.

Tableau 4.4 : Nash moyen en calage et contrôle avec le modèle GR2M sur la période 1955-1992 et les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 dans les sous bassins

	Global 1955-1992		Humide 1955-1972		Sèche 1973-1992		Sèche vers humide		Humide vers sèche	
	cal	cont	cal	cont	cal	cont	cal	cont	cal	cont
Sous bassins										
Mékrou	85	69	92	84	78	73	78	75	92	49
Alibori	89	80	91	89	87	83	87	82	91	68
Sota à Gbassè	77	59	87	70	67	58	67	68	87	44
Sota à Coubéri	68	55	72	64	64	50	64	57	72	42
moyenne	80	66	86	77	74	66	74	71	86	51

Cal : calage

Cont : contrôle

Ainsi, les deux modèles GR4J et GR2M présentent une certaine efficacité à simuler les écoulements journaliers et mensuels, même si leurs performances varient suivant les différents sous bassins. La nature de ces modèles dit globaux permet donc leur application sur de grands bassins (PERRIN, 2002 ; MOUELHI *et al.*, 2005), tel celui des affluents du fleuve Niger au Bénin.

Eu égard aux performances des deux modèles appliqués aux sous bassins béninois du fleuve Niger situés sous différents types de climat (exemple : Sota à Gbassè en climat soudanien et Sota à Coubéri en soudano-sahélien), on constate que ces modèles, initialement développés pour un type de climat particulier, obtiennent des résultats acceptables également dans le cas de contextes climatiques très différents, souvent éloignés de ceux pour lesquels ils avaient été initialement conçus (PERRIN, 2000 ; LE LAY, 2006).

Toutefois, il faut remarquer que le modèle à structure simple (GR2M) est plus robuste que celui à structure complexe (GR4J), et cela pour tous les sous bassins pris en compte dans notre étude. Ceci est sans doute lié également à la différence de pas de temps entre les modèles.

L'étude comparée de l'évolution des écoulements observés et simulés doit permettre de mettre en évidence leur degré de liaison et tester la robustesse des modèles à simuler des écoulements.

4.5. Evolution comparée débits observés/débits simulés

4.5.1. Avec utilisation du modèle GR4J

Pour plus de clarté et de lisibilité, nous avons choisi de présenter seulement deux années dans chaque sous-période d'optimisation et de contrôle. Afin de garder l'homogénéité des séries dans les sous bassins, l'étude de la variabilité des écoulements observés et simulés est réalisée en calage-contrôle sur les sous-périodes des séquences humide et sèche. Notons que la première année de chaque sous-période n'est pas prise en compte car les modèles utilisent les données de cette année pour leur « mise en route » effective.

4.5.1.1. Calage-contrôle en période humide

La variabilité des débits observé et simulé en optimisation sur la sous-période 1960-1966 (Figure 4.7) et en contrôle sur la sous-période 1966-1972 (Figure 4.8) montre une évolution assez similaire des deux sous-périodes d'écoulements dans tous les sous bassins, avec toutefois des différences prononcées, et dans les sous bassins de la Sota à Gbassè et à Coubéri en saison pluvieuse entre août et octobre (Figure 4.7 et Figure 4.8). Toutefois, ces résultats ne mettent pas en cause l'efficacité du modèle à simuler les écoulements car, comme nous l'avons déjà annoncé, nous avons privilégié dans cette étude la simulation des débits moyens.

Dans tous les sous bassins, on retrouve le retard des maxima des débits observé et simulé par rapport à ceux des pluies, et cela sur les deux sous-périodes. Cela se justifie par le temps de réponse des sous bassins aux événements pluvieux. Les figures 4.7 et 4.8 soulignent un léger décalage entre les débits maxima observés et les débits simulés dans le sous bassin de la Sota à Gbassè avec un retard pour les débits simulés.

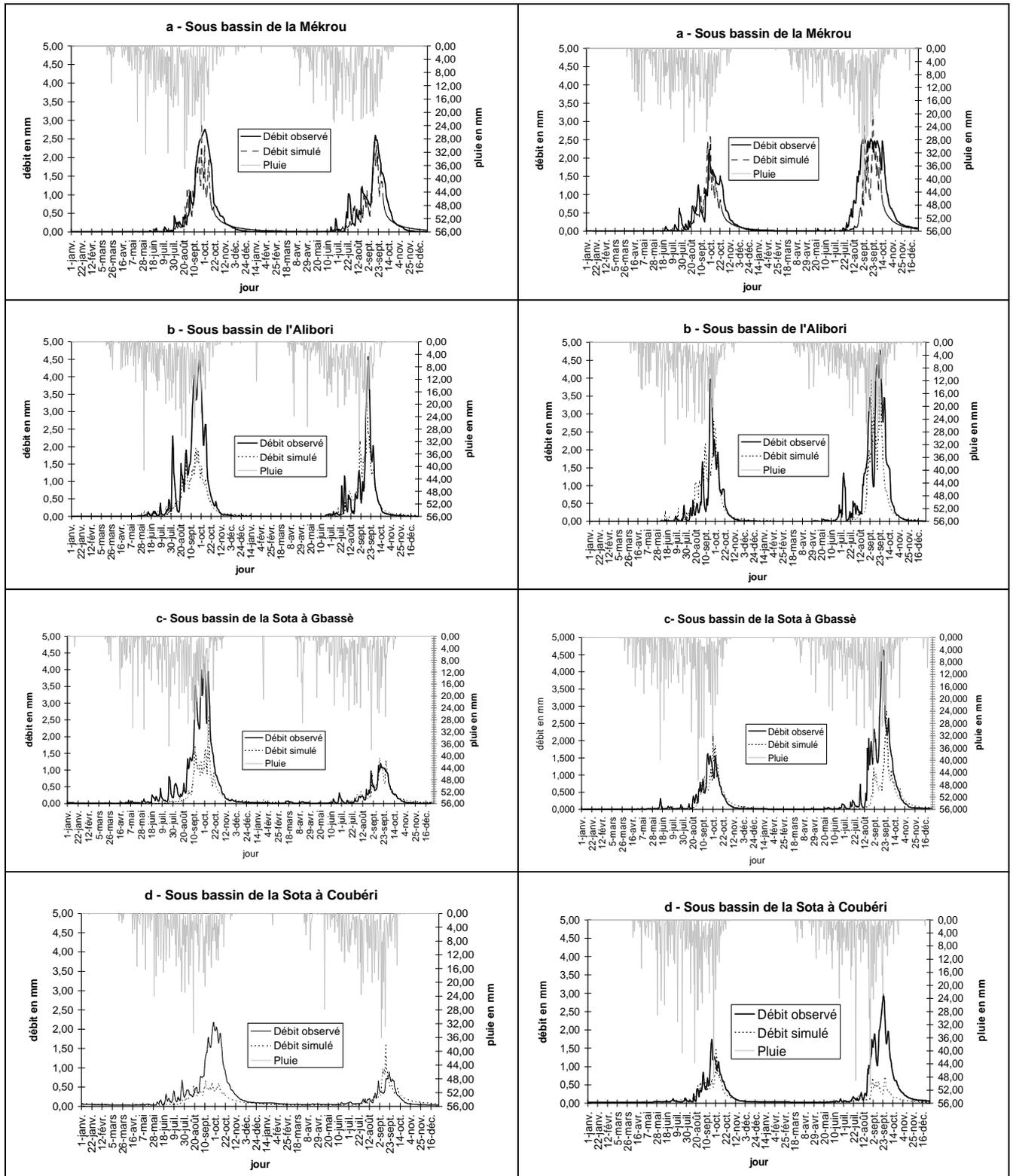


Figure 4.7 : Variabilité des pluies et des débits observé et simulé sur la période de calage 1960-1966 (GR4J)

Figure 4.8 : Variabilité des pluies et des débits observé et simulé sur la période de contrôle 1966-1972 (GR4J)

L'analyse des corrélations entre débits observé et simulé en optimisation sur la sous-période 1960-1966 donne des coefficients de détermination supérieurs à 0,60 dans tous les sous bassins (0,70 pour la Mékrou ; 0,73 pour l'Alibori et 0,62 pour la Sota à Gbassè) (Figure 4.9). En validation, sur la sous-période 1966-1972, ils ne sont que de l'ordre d'environ 0,50 (0,58 pour la Mékrou ; 0,55 pour l'Alibori et 0,52 pour la Sota à Gbassè) (Figure 4.10).

Ces résultats confirment que le modèle GR4J présente une bonne efficacité d'ensemble à simuler les écoulements en période humide (avant 1972) dans les sous bassins, même si ses performances sont moins bonnes dans le sous bassin de la Sota.

4.5.1.2. Calage–contrôle en période sèche (1972-1992)

La comparaison entre la variabilité des débits observés et des débits simulés en Calage-contrôle sur la période 1972-1992 vient confirmer les résultats obtenus pour la période humide (1960-1972). Les figures 4.11 et 4.12 montrent, en effet, une évolution comparable des paramètres, même si les lames d'eau écoulées observées et simulées pour la période 1972-1992 sont, dans tous les sous bassins, inférieures à celles de la période précédente plus humide. Comme en période humide, on note quelques pluies précoces en Janvier-février dans tous les sous bassins. Quelques écarts existent entre débits simulés et observés, surtout dans le sous bassin de la Sota (à Gbassè), ce qui peut se justifier par la qualité des données sur ce sous bassin et aussi par le fait qu'il est sur deux types de formations géologiques différentes.

On note également assez fréquemment un décalage dans la date de la crue, notamment pour l'Alibori (Figures 4.11b et 4.12b).

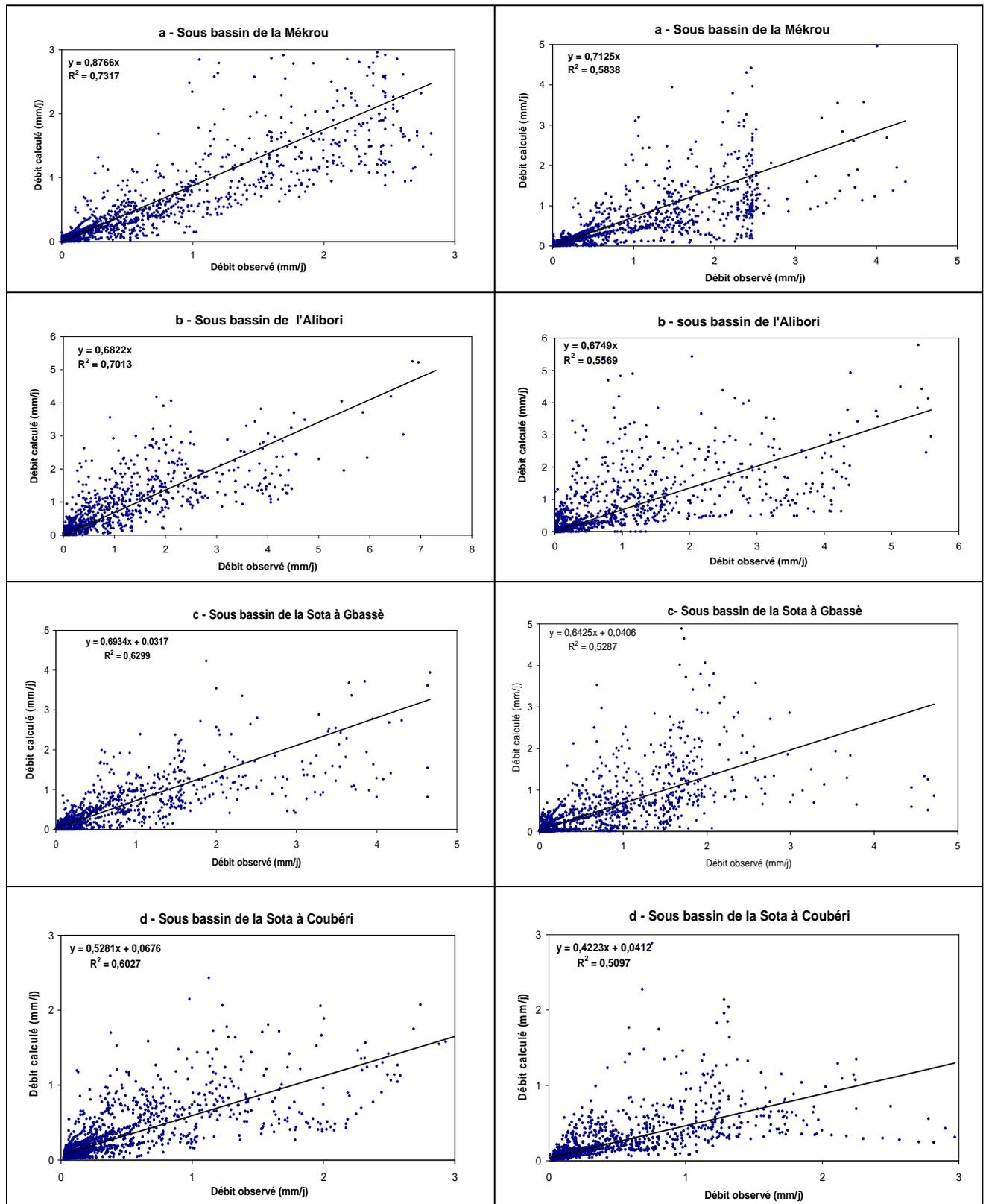


Figure 4.9 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous-période 1960-1966 dans les sous bassins (en calage avec GR4J)

Figure 4.10 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous-période 1966-1972 dans les sous bassins (en validation avec GR4J)

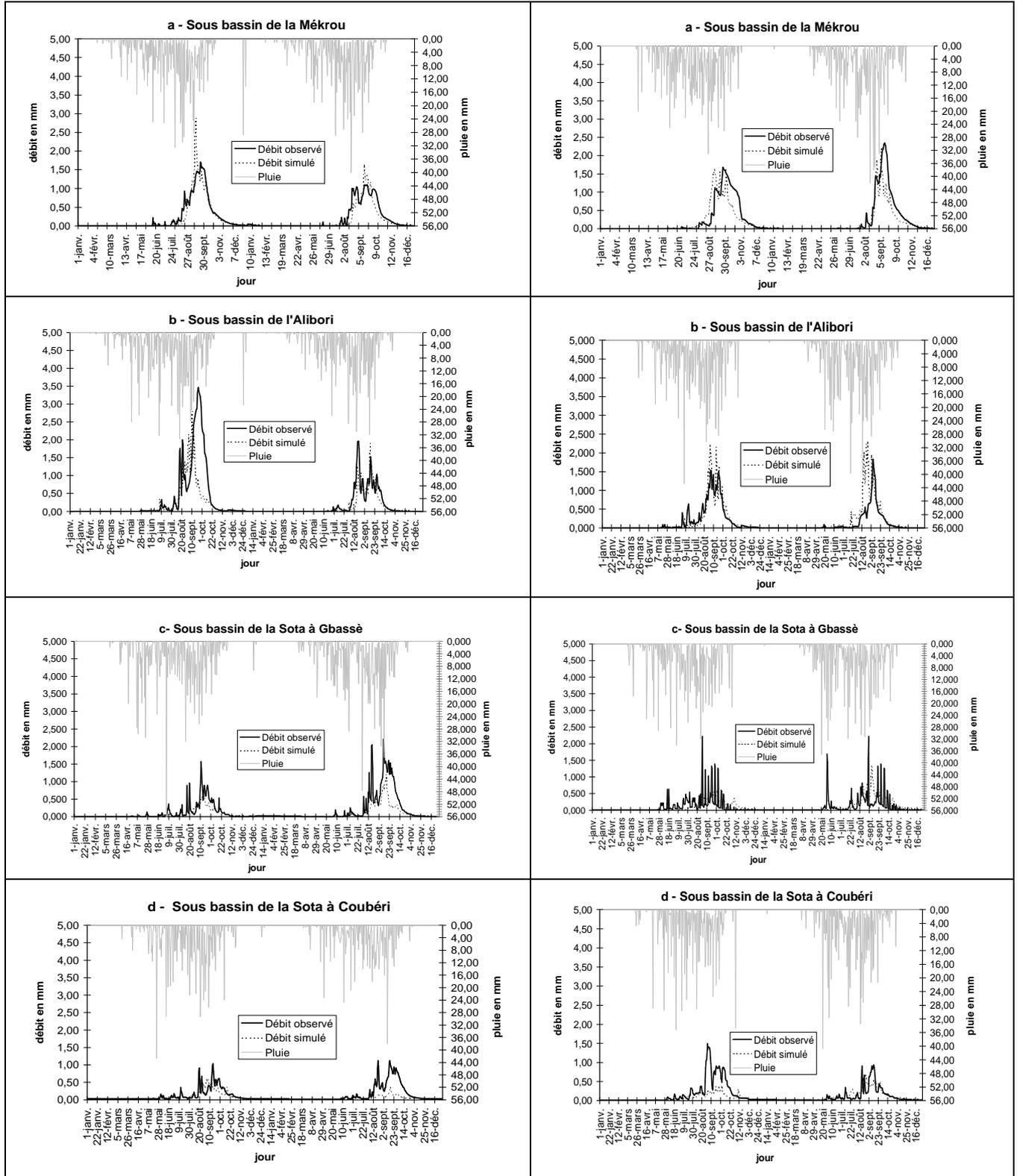


Figure 4.11 : Variabilité des pluies et des débits observé et simulé sur la période 1972-1979 dans les sous bassins (en calage GR4J)

Figure 4.12 : Variabilité des pluies et des débits observé et simulé sur la période 1979-1986 dans les sous bassins (en validation GR4J)

L'analyse des corrélations entre débits observé et simulé sur la sous-période 1972-1979, donne des coefficients de détermination supérieurs à 0,50. En cas de calage, le plus faible d'entre eux (0,5041) est enregistré dans le sous bassin de la Sota à Coubéri. (Figure 4.13). Ces valeurs confirment les bonnes performances du modèle GR4J.

C' est aussi vrai pour le mode contrôle pour la sous-période 1979-1986 (Figures 4.14a, b, d), où le coefficient de détermination dans trois sous bassins reste supérieur à 0,40 : Mékrou 0,58 correspondant à un coefficient de corrélation de 0,76 entre débit simulé et débit observé ; Alibori 0,57 correspondant à un coefficient de corrélation de 0,75 entre débit simulé et débit observé, Sota à Coubéri 0,46 correspondant à un coefficient de corrélation de 0,67 entre débit simulé et débit observé.

Une fois encore, les résultats obtenus pour le sous bassin de la Sota à Gbassè se singularisent. Ici, la corrélation entre les deux débits est faible, avec un coefficient de détermination à peine supérieur à 0,20, soit un coefficient de corrélation de 0,44 entre débit simulé et débit observé. Le modèle GR4J peine à simuler correctement les écoulements en période sèche dans ce sous bassin, comme l'avaient montré plus haut les valeurs du Nash obtenues au pas de temps journalier (Tableau 4.3).

Dans ces conditions, l'utilisation complémentaire du modèle GR2M est indispensable.

4.5.2. Avec utilisation du modèle GR2M

4.5.2.1. Calage et contrôle en période humide

En optimisation comme en contrôle sur la période humide 1955-1972, la variabilité saisonnière des débits observé et simulé est semblable dans tout le bassin béninois du fleuve Niger (exemples de la Mékrou et l'Alibori) (Figures 4.15 et 4.1

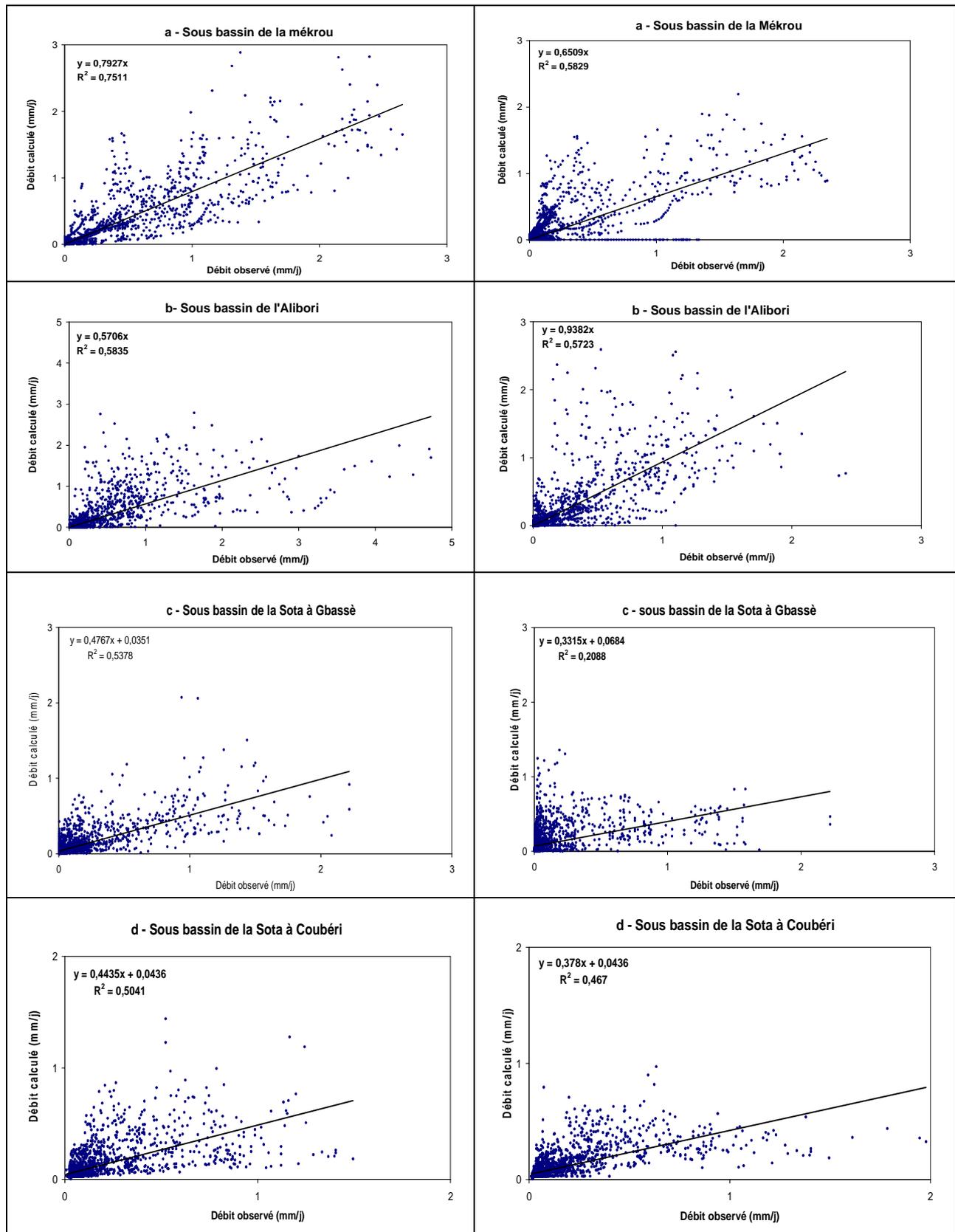


Figure 4.13 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous-période 1973-1979 dans les sous bassins (en calage GR4J)

Figure 4.14 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous-période 1979-1992 dans les sous bassins (en validation GR4J)

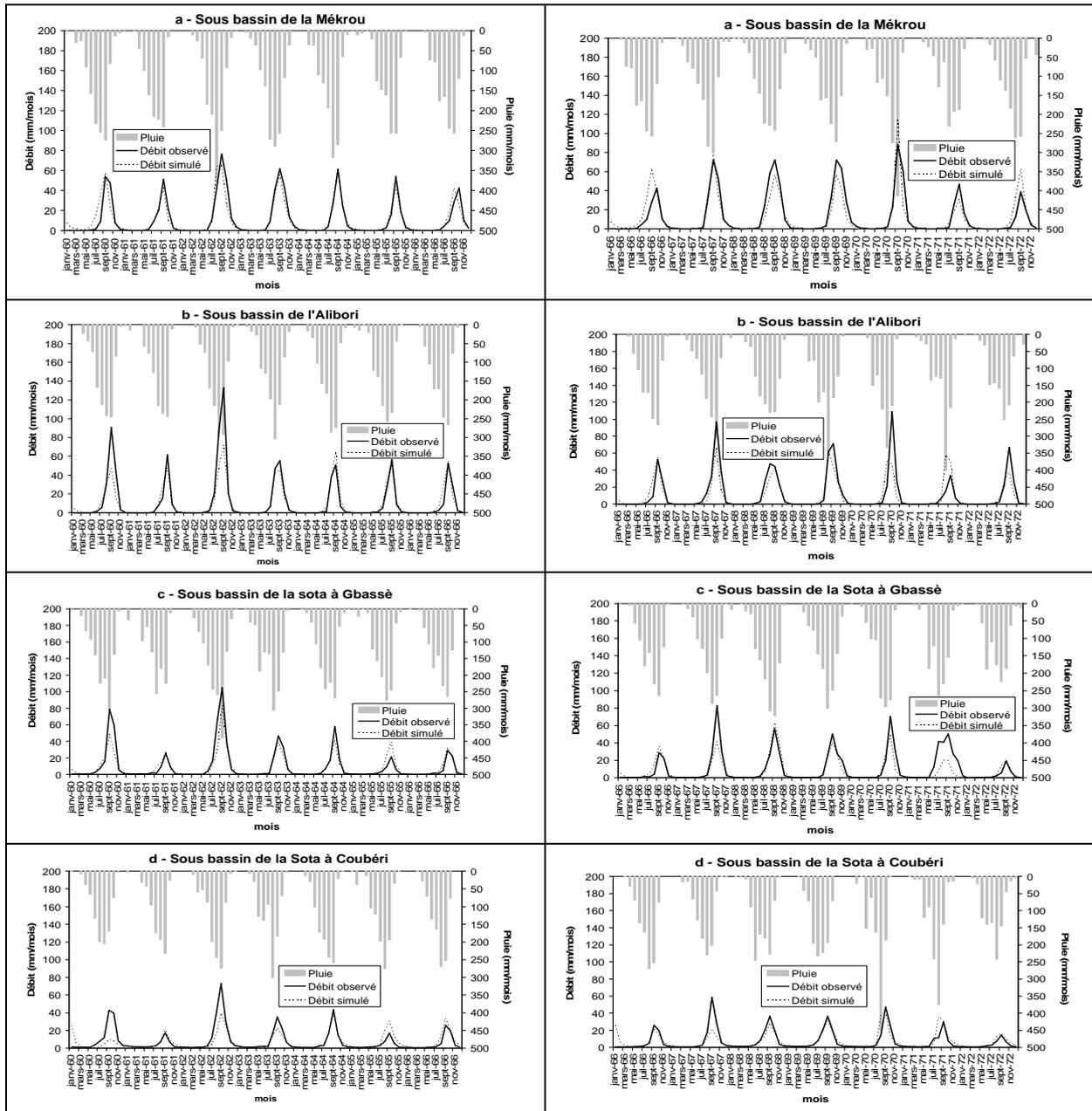


Figure 4.15 : Variabilité des pluies et des débits observé et simulé sur la sous-période de calage 1960-1966 dans les sous bassins (GR2M)

Figure 4.16 : Variabilité des pluies et des débits observé et simulé sur la sous-période de validation 1966-1972 dans les sous bassins (GR2M)

L'étude de la relation entre débits observé et simulé pour les sous-périodes 1960-1966 et 1966-1972 (Figures 4.17 et 4.18) présentent des valeurs du coefficient de détermination élevées dans tous les sous bassins (supérieures à 0,60, correspondant à un coefficient de corrélation moyen de 0,77). Par exemple, nous avons 0,86 pour la Mékrou et 0,84 pour la Sota à Gbassè.

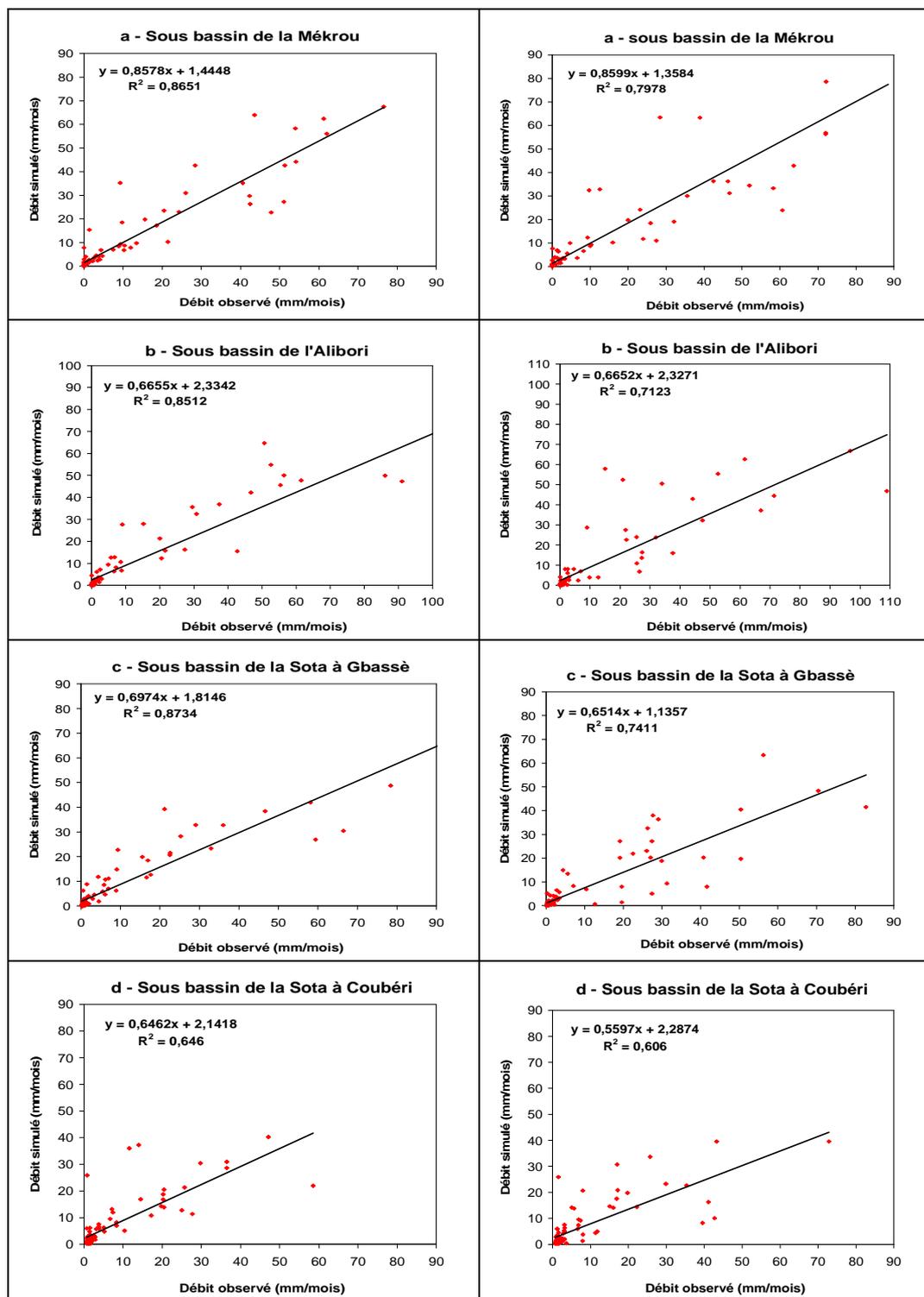


Figure 4.17 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous-période de calage 1960-1966 dans les sous bassins (GR2M)

Figure 4.18 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous-période de validation 1966-1972 dans les sous bassins (GR2M)

On note que la simulation de l'écoulement de la Sota à Gbassè par le modèle GR2M (au pas de temps mensuel) est meilleure que celle issue du modèle GR4J (au pas de temps journalier) pour les sous-périodes humides.

4.5.2.2. Calage-contrôle en période sèche

L'analyse de l'évolution des écoulements observés et simulés sur la période sèche (Figures 4.19 et 4.20) confirment les résultats obtenus sur la période humide (Figures 4.15 et 4.16). Mais, dans un contexte de déficit, le modèle GR2M donne des résultats comparables à ceux du modèle GR4J pour le sous bassin de la Sota à Gbassè (Figures 4.19 et 4.20).

L'étude des corrélations entre débit observé et débit simulé en optimisation est très bonne sur la sous-période 1972-1979 dans tous les sous bassins, sauf, dans une certaine mesure, celui de la Sota à Coubéri (Figure 4.21 et Figure 4.22). En revanche, la validation sur la sous-période 1979-1986 présente des coefficients de détermination plus faibles dans les sous bassins de la Mékrou, de la Sota à Gbassè et de la Sota à Coubéri, avec des valeurs variant entre 0,35 et 0,45, même si les coefficients de corrélation correspondant, compris entre 0,60 et 0,70, restent très significatifs et attestent de la validité du modèle. Seul le sous bassin de l'Alibori a un coefficient de détermination très élevé (0,77) avec une forte corrélation positive (0,88).

Malgré les imperfections signalées, les modèles GR4J et GR2M présentent globalement une bonne robustesse à simuler les écoulements dans les sous bassins du Niger au Bénin. On peut donc raisonnablement les utiliser pour identifier les tendances dans l'évolution hydrologique des sous bassins.

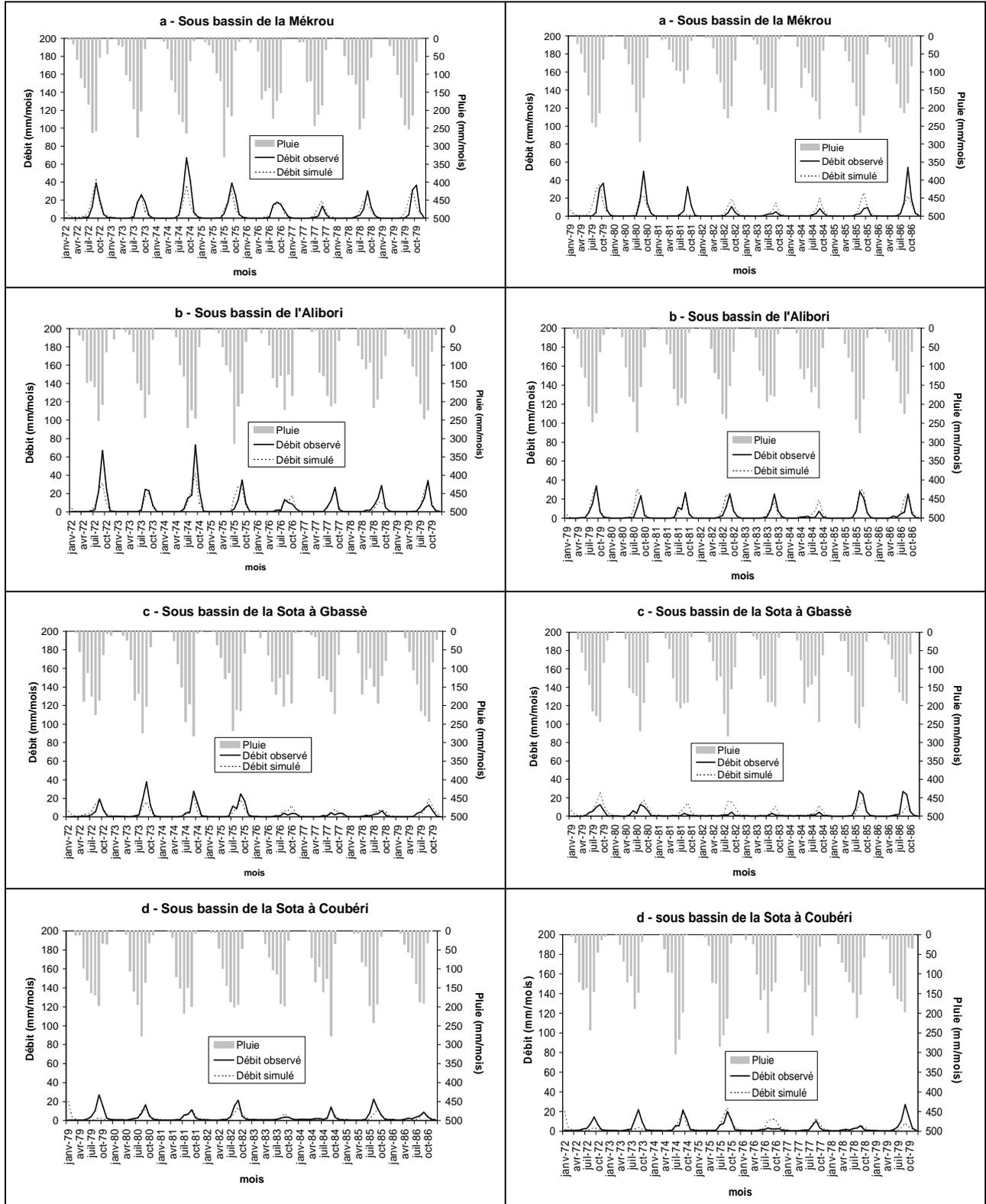


Figure 4.19 : Variabilité pluies et débits observé et simulé sur la sous-période de calage 1972-1979 dans les sous bassins (GR2M)

Figure 4.20 : Variabilité pluies et débits observé et simulé sur la sous-période de calage 1979-1986 dans les sous bassins (GR2M)

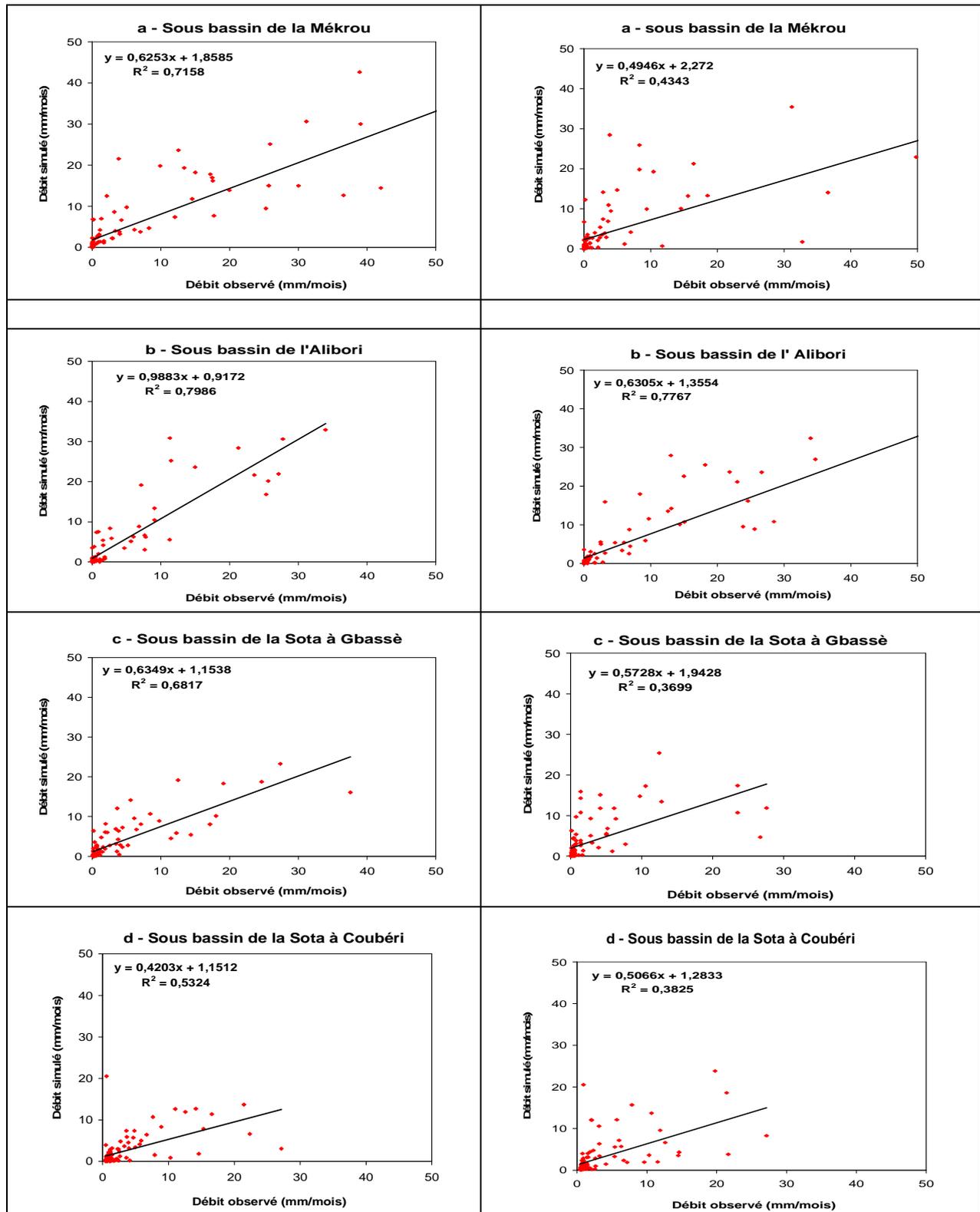


Figure 4.21 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous-période de calage 1972-1979 dans les sous bassins (GR2M)

Figure 4.22 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous-période de validation 1979-1986 dans les sous bassins (GR2M)

4.6. Identification de tendances du comportement hydrologique des sous bassins

Les méthodes présentées du 4.6.1 à 4.6.5 sont tirées des travaux de ANDREASSIAN (2002) et ANDREASSIAN *et al.* (2003).

4.6.1. Recherche de non-stationnarité dans le comportement hydrologique des sous bassins versants

L'approche choisie par ANDREASSIAN (2002) fournit un support d'interprétation original pour les séries de calages et de contrôles proposé par NASCIMENTO (1995). Elle est adaptée à la détection des changements progressifs comme à celle des changements brusques. Nous disposons de trente huit années de données pluie-débit pour chaque sous bassin versant. On peut définir, à l'aide des modèles GR4J et GR2M, un comportement moyen des sous bassins pour chaque sous-période de cinq, six et sept ans. Il suffit pour cela de caler les modèles en utilisant les chroniques observées de pluie et de débit, et l'on obtient six jeux de paramètres représentatifs du comportement du bassin au cours de chacune des sous-périodes. La combinaison des paramètres constitue bien un « modèle » du comportement du bassin pendant la sous-période qui a servi au calage. Appelons *M1*, *M2*, *M3*, *M4*, *M5* et *M6* ces six modèles et *P1*, *P2*, *P3*, *P4*, *P5* et *P6* les périodes correspondantes. ANDREASSIAN (2002) propose de faire une analogie entre ces six modèles et le schéma des sous bassins versants appariés : *M1*, *M2*, *M3*, *M4*, *M5* et *M6* sont des sous bassins de référence, restés dans l'état du bassin aux périodes *P1*, *P2*, *P3*, *P4*, *P5* et *P6* respectivement.

Cette approche peut s'appliquer à différentes variables hydrologiques. On retiendra, en particulier, le module annuel, la lame d'eau écoulee en crue, etc.). Il faut aussi comparer les valeurs réelles et simulées présentées dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Tableau des simulations croisées pour l'étude de l'évolution du comportement hydrologique d'un bassin versant

"Modèles"						
"Périodes"	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>	<i>M4</i>	<i>M5</i>	<i>M6</i>
<i>P1</i>	Valeur calée ≡valeur réelle	valeur prédite par <i>M2</i> en utilisant les pluies de la période <i>P1</i>	valeur prédite par <i>M3</i> en utilisant les pluies de la période <i>P1</i>	valeur prédite par <i>M4</i> en utilisant les pluies de la période <i>P1</i>	valeur prédite par <i>M5</i> en utilisant les pluies de la période <i>P1</i>	valeur prédite par <i>M6</i> en utilisant les pluies de la période <i>P1</i>
<i>P2</i>	valeur prédite par <i>M1</i> en utilisant les pluies de la période <i>P2</i>	Valeur calée ≡valeur réelle	valeur prédite par <i>M3</i> en utilisant les pluies de la période <i>P2</i>	valeur prédite par <i>M4</i> en utilisant les pluies de la période <i>P2</i>	valeur prédite par <i>M5</i> en utilisant les pluies de la période <i>P2</i>	valeur prédite par <i>M6</i> en utilisant les pluies de la période <i>P2</i>
<i>P3</i>	valeur prédite par <i>M1</i> en utilisant les pluies de la période <i>P3</i>	valeur prédite par <i>M2</i> en utilisant les pluies de la période <i>P3</i>	Valeur calée ≡valeur réelle	valeur prédite par <i>M4</i> en utilisant les pluies de la période <i>P3</i>	valeur prédite par <i>M5</i> en utilisant les pluies de la période <i>P3</i>	valeur prédite par <i>M6</i> en utilisant les pluies de la période <i>P3</i>
<i>P4</i>	valeur prédite par <i>M1</i> en utilisant les pluies de la période <i>P4</i>	valeur prédite par <i>M2</i> en utilisant les pluies de la période <i>P4</i>	valeur prédite par <i>M3</i> en utilisant les pluies de la période <i>P4</i>	Valeur calée ≡valeur réelle	valeur prédite par <i>M5</i> en utilisant les pluies de la période <i>P4</i>	valeur prédite par <i>M6</i> en utilisant les pluies de la période <i>P4</i>
<i>P5</i>	valeur prédite par <i>M1</i> en utilisant les pluies de la période <i>P5</i>	valeur prédite par <i>M2</i> en utilisant les pluies de la période <i>P5</i>	valeur prédite par <i>M3</i> en utilisant les pluies de la période <i>P5</i>	valeur prédite par <i>M4</i> en utilisant les pluies de la période <i>P5</i>	Valeur calée ≡valeur réelle	valeur prédite par <i>M6</i> en utilisant les pluies de la période <i>P5</i>
<i>P6</i>	valeur prédite par <i>M1</i> en utilisant les pluies de la période <i>P6</i>	valeur prédite par <i>M2</i> en utilisant les pluies de la période <i>P6</i>	valeur prédite par <i>M3</i> en utilisant les pluies de la période <i>P6</i>	valeur prédite par <i>M4</i> en utilisant les pluies de la période <i>P6</i>	valeur prédite par <i>M5</i> en utilisant les pluies de la période <i>P6</i>	Valeur calée ≡valeur réelle

Dans la case (*i,j*) de ce tableau, on trouvera la valeur prédite par le sous bassin de référence (ou modèle) *Mj*, en utilisant les pluies de la période *Pi*.

Les modèles GR2M et GR4J, comme la plupart des modèles de leur catégorie, sont généralement calés sur deux ou trois ans de données (PERRIN, 2000 ; ANDREASSIAN, 2002). Nous les calons sur cinq, six et sept ans. *P1*, *P2*, *P3*, *P4*, *P5* et *P6* sont les mêmes périodes que celles définies précédemment (*P1* = 1955-1960, *P2* = 1960-1966, *P3* = 1966-1972, *P4* = 1972-1979, *P5* = 1979-1986 et *P6* = 1986-1992).

4.6.2. Identification de tendances du comportement hydrologique

Sur la diagonale du tableau 4.6, on trouvera la valeur prédite par le modèle pour la sous-période considérée sur laquelle ont été estimés les écoulements moyens. Pour une interprétation plus facile de ce tableau, on peut ainsi nommer chaque période (chaque ligne) par la valeur située sur la diagonale, qui représente à peu de choses près la valeur réellement

observée. Si on exprime le résultat en pourcentage, on aura donc des 100 % sur la diagonale. Le tableau 4.7 présente les exemples-types qu'on peut rencontrer en appliquant cette méthode. Dans ces exemples, quatre périodes ($P1, P2, P3, P4$) et quatre modèles ($M1, M2, M3, M4$) sont choisis pour plus de simplicité et de clarté.

Tableau 4.6 : Les trois différents types de tableaux de simulations croisées théoriques en fonction des tendances hydrologiques

	M1	M2	M3	M4
P1	100	102	98	101
P2	98	100	103	96
P3	102	98	100	100
P4	99	103	100	100

Matrice 1

	M1	M2	M3	M4
P1	100	104	111	121
P2	95	100	104	118
P3	90	98	100	100
P4	81	86	100	100

Matrice 2

	M1	M2	M3	M4
P1	100	95	90	81
P2	104	100	93	85
P3	112	105	100	92
P4	121	119	100	100

Matrice 3

Dans le cas de la Matrice 1, il n'y a pas de tendance apparente (faible écart entre les valeurs du tableau par rapport à celles de la diagonale) ; la matrice 2 s'applique quand le bassin a tendance à « produire » de plus en plus et la matrice 3 quand il a tendance à « produire » de moins en moins. On notera que les cas réels peuvent être moins tranchés que ces trois exemples « types » et s'appliquer de manière différente selon les variables hydrologiques ciblées. Dans notre étude, nous avons choisi comme variable l'écoulement moyen dans chacun des sous bassins.

Pour étudier la non-stationnarité de cette variable hydrologique sur les sous bassins-versants, nous proposons dans la section suivante les résultats de deux tests statistiques non-paramétriques (ANDREANSSIAN, 2002 ; ANDREANSSIAN *et al.*, 2003) qui nous permettront d'exploiter les *tableaux de simulations croisées* construits pour caractériser l'évolution de l'écoulement moyen.

4.6.3. Mise au point préalable de l'hypothèse permettant l'évaluation des tableaux de simulations croisées

Les *tableaux de simulations croisées* présentent de façon compacte le résultat des calages et des simulations effectués sur des sous-périodes successives. Nous cherchons à présent à construire un test permettant de mettre en question l'hypothèse **H** suivante : « **Pour une même pluie fixée en entrée, les différents modèles testés en simulation donnent la même sortie hydrologique, à un bruit aléatoire près** ».

Dans les sections suivantes, nous proposons deux tests statistiques (ANDREANSSIAN, 2002) permettant d'affirmer ou d'infirmer l'hypothèse.

4.6.4. Test utilisant le signe des évolutions

Pour faciliter l'interprétation des *tableaux de simulations croisées*, ANDREANSSIAN (2002) a remplacé chaque valeur par un signe, traduisant une évolution croissante ou décroissante de la variable hydrologique considérée avec le temps. Pour expliciter la mise en œuvre du test, nous prenons l'exemple de deux matrices (1 et 2) d'écoulements moyens simulés.

- Exemple

ANDREANSSIAN (2002) s'est donné les deux matrices de simulations croisées d'écoulements moyens suivants :

2 113	1 615	1 752	1 742
1 699	1 244	1 357	1 361
1 769	1 331	1 442	1 439
1 579	1 147	1 251	1 254

Matrice 1

1 606	1 115	952	842
1 598	1 168	857	861
1 969	1 431	1 110	1 019
1 579	1 147	875	766

Matrice 2

Pour simplifier la lisibilité des matrices, nous remplaçons chaque valeur par un signe « + » ou « - », suivant que les valeurs sont supérieures ou inférieures à celle de la diagonale. Lorsqu'on se situe au-dessus de la diagonale, les valeurs supérieures à celle de la diagonale sont remplacées par le signe « + » et les valeurs inférieures par le signe « - ». En revanche, en dessous de la diagonale, c'est le contraire qui se réalise. La valeur de la diagonale représente, en effet, pour chaque ligne la meilleure référence, dans la mesure où il s'agit de la valeur la plus proche de la valeur réellement observée (car prédite par le modèle calé sur la sous-période considérée). La comparaison s'effectue ligne par ligne car il est nécessaire de se placer dans des conditions d'égale pluviométrie.

2 113	1 615	1 752	1 742
--------------	-------	-------	-------

devient

0	-	-	-
----------	---	---	---

1 699	1 244	1 357	1 361
-------	--------------	-------	-------

devient

-	0	+	+
---	----------	---	---

Les Matrices 1 et 2 peuvent être recodées en « + » et en « - ».

0	-	-	-
-	0	+	+
-	+	0	-
-	+	+	0

Matrice 1

0	-	-	-
-	0	-	-
-	-	0	-
-	-	-	0

Matrice 2

Tester l'hypothèse **H** revient à voir si la répartition des « + » et des « - » dans les matrices 1 et 2 peut ou non être l'effet du hasard. Il peut s'agir d'un problème de dénombrement : la matrice 1 compte quatre « - » et deux « + », la matrice 2 compte six « - » et aucun « + ». Clairement, la probabilité que le hasard soit le seul responsable de l'obtention d'un tableau où tous les signes sont identiques est faible (cette probabilité est inférieure à 1%). On peut donc rejeter **H** avec un faible risque de se tromper (Matrice 2).

En revanche, le nombre de « + » dans la matrice 1 ne constitue absolument pas un événement extrême, si l'hypothèse **H** est vraie. On prendrait donc un très grand risque à la rejeter.

Si l'hypothèse **H** est rejetée, le signe majoritaire donne une indication sur les possibilités d'évolution de la variable au cours du temps : si les « + » sont majoritaires, cela signifie que la variable hydrologique simulée dans le tableau à tendance à croître avec le temps ; si les « - » sont majoritaires, c'est évidemment l'inverse.

L'analyse du test de permutation permet de mieux préciser le comportement de l'écoulement dans le bassin béninois du fleuve Niger.

4.6.5. Test conditionnel fondé sur les permutations des tableaux de simulations croisées

L'objectif est ici de mieux prendre en compte l'amplitude des changements observés et non plus seulement leur sens. Il est clair qu'on exploiterait ainsi une information supplémentaire nous permettant de mieux interpréter les résultats.

Pour prendre en compte l'amplitude des variations tout en restant dans le cadre d'un test non-paramétrique, ANDREANSSIAN (2002) a choisi d'appliquer un test de permutation conditionnel aux données calculées sur les matrices. Le principe de ce test est très simple. Dans le cas de l'hypothèse **H**, les valeurs de chaque ligne devraient pouvoir être permutées librement, les lignes résultantes étant toutes équiprobables. Ainsi, à partir d'une matrice 4 x 4 réellement observée, on peut donc générer **4x3x2 ou 4 !** matrices équiprobables. On décide de calculer une statistique sur chacune des matrices. Pour cela, on propose de prendre en compte la Somme des Différences avec la valeur de la Diagonale, qu'on appellera SDD par la suite. Pour les matrices de l'exemple précédent, cela donne :

2 113	1 615	1 752	1 742
1 699	1 244	1 357	1 361
1 769	1 331	1 442	1 439
1 579	1 147	1 251	1 254

Matrice 1

	-498	-361	-371
-455		113	117
-327	111		-3
-325	107	3	

Total

-1 230
-225
-219
-215
-1 889

1 606	1 115	952	842
1 598	1 168	857	861
1 969	1 431	1 110	1019
1 579	1 147	875	766

Matrice 2

	-491	-654	-764
-430		-311	-307
-859	-321		-91
-813	-381	-109	

Total

-1 909
-1 048
-1 271
-1 303
-5 531

Il est évident que si l'on permute les valeurs au sein de chaque ligne de la matrice 2, on ne pourra pas atteindre un total inférieur à $-5\,531$. Sous l'hypothèse H , la matrice 2 est donc très rare. Pour s'en convaincre, on a présenté en figure 4.23 la distribution cumulée de la statistique SDD. On note que près de 96 % des matrices possibles ont une statistique SDD supérieure à celle de la matrice 2. Le risque pris en rejetant l'hypothèse H est donc faible. On peut en conclure ici qu'il y a tendance à la baisse de l'écoulement.

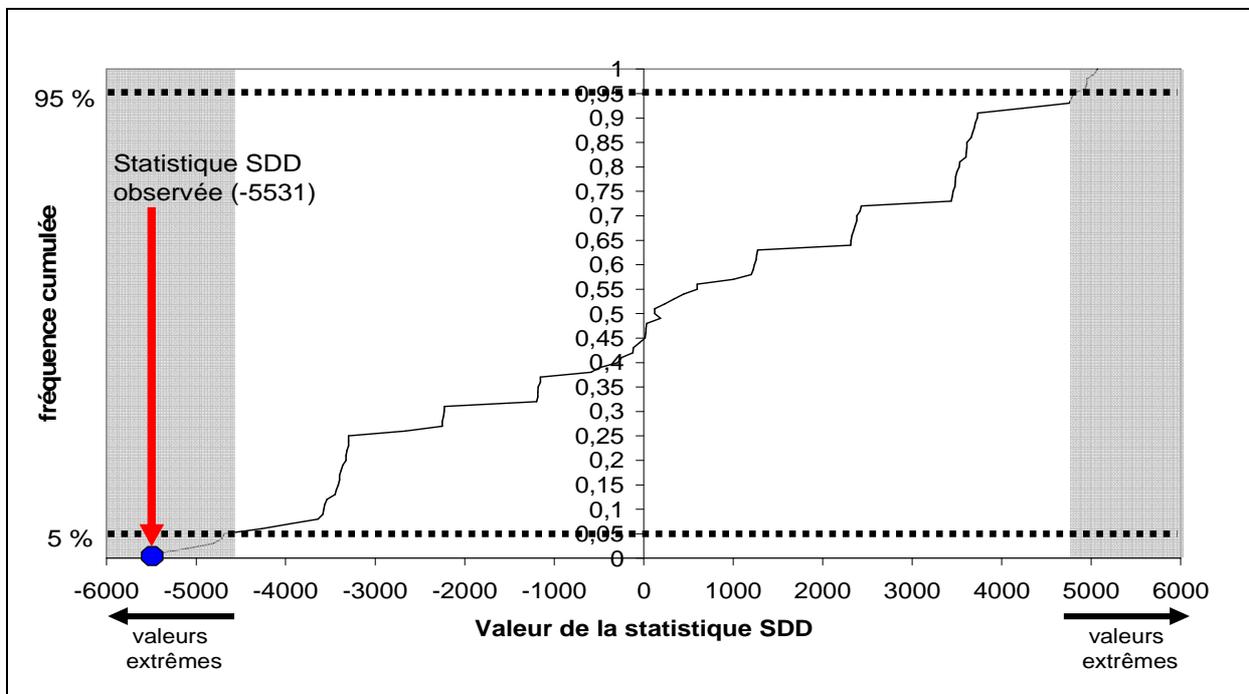


Figure 4.23 : Distribution empirique des valeurs de la statistique SDD (Somme des Différences par rapport à la Diagonale) obtenues pour la matrice 2 de notre exemple (les lignes pointillées désignent le domaine des valeurs « extrêmes », à 5 et 95 %)

4.6.6. Application de la méthode de détection de non-stationnarité dans le comportement hydrologique des sous bassins-versants

Les tests statistiques présentés précédemment pour identifier les tendances du comportement hydrologique des bassins-versants sont appliqués aux sous bassins du Niger au Bénin pour les deux modèles GR4J et GR2M.

4.6.6.1. Le modèle GR4J

Les tests nous aident à interpréter les résultats de sorties du modèle. Les résultats complets (matrices brutes) et les matrices du test *SDD* sont présentés en annexe I.

L'examen du tableau 4.7 des matrices de simulations croisées permet de rejeter l'hypothèse de stationnarité pour l'écoulement moyen sur trois sous bassins : Mékrou, Alibori et Sota à Coubéri. Dans les matrices de ces sous bassins, le signe « - » est dominant : Mékrou 28 « - » et 2 « + » ; Alibori 30 « - » et 0 « + » ; Sota à Coubéri 27 « - » et 3 « + ». Cette très forte prévalence des signes « - », souligne une baisse remarquable de l'écoulement dans ces sous bassins.

Dans le sous bassin de la Sota à Gbassè, l'hypothèse de la stationnarité ne peut être systématiquement rejetée. On observe toutefois une prédominance des signes « - » par rapport aux signes « + » : 19 « - » contre 11 « + ». La diminution de l'écoulement à partir de ce test statistique n'est donc pas très évidente. Cela pourrait s'expliquer par la qualité très moyenne des écoulements simulés obtenus plus haut dans ce sous bassin, ou par les données de pluies issues du kriggeage.

Tableau 4.7 : Interprétation de matrices de simulations croisées obtenus pour l'écoulement moyen sur les sous bassins pour différentes durées de calage.

a - Mékrou	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	0	-	-	-	-	-
1960-1966	-	0	+	-	-	-
1966-1972	-	+	0	-	-	-
1972-1979	-	-	-	0	-	-
1979-1986	-	-	-	-	0	-
1986-1992	-	-	-	-	-	0

b - Alibori	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	0	-	-	-	-	-
1960-1966	-	0	-	-	-	-
1966-1972	-	-	0	-	-	-
1972-1979	-	-	-	0	-	-
1979-1986	-	-	-	-	0	-
1986-1992	-	-	-	-	-	0

c - Sota à Gbassè	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	0	+	+	+	-	+
1960-1966	+	0	+	-	-	-
1966-1972	+	+	0	-	-	-
1972-1979	+	-	-	0	-	-
1979-1986	-	-	-	-	0	-
1986-1992	+	-	-	-	+	0

d - Sota à Coubéri	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	0	-	-	-	-	-
1960-1966	-	0	-	-	+	-
1966-1972	-	-	0	-	-	-
1972-1979	-	-	-	0	-	-
1979-1986	-	-	-	+	0	-
1986-1992	-	-	-	+	-	0

(Le « 1 » qui accompagne les modèles M1 à M6 désigne la première sous-période 1955-1960 et deviendra « 2 » sur la deuxième ligne correspondant à la sous-période 1960-1966. Il va ainsi changer avec le changement de ligne jusqu'à la 6^{ème} ligne)

Les valeurs du test statistique *SDD* (Somme des Différences par rapport à la Diagonale) (Figure 4.24) est extrêmement faible dans trois sous bassins (Mékrou, Alibori, Sota à Coubéri) et se retrouve dans les extrêmes à 5 % de fréquence. Ceci indique une tendance nette à la baisse dans leur comportement hydrologique, ce qui confirme les résultats du premier test pour ces trois sous bassins.

Le sous bassin de la Sota à Gbassè présente, en revanche, une valeur de la *SDD* située dans les 95 % de fréquence, ce qui ne permet pas de conclure à l'existence d'une tendance dans le comportement hydrologique de ce sous bassin.

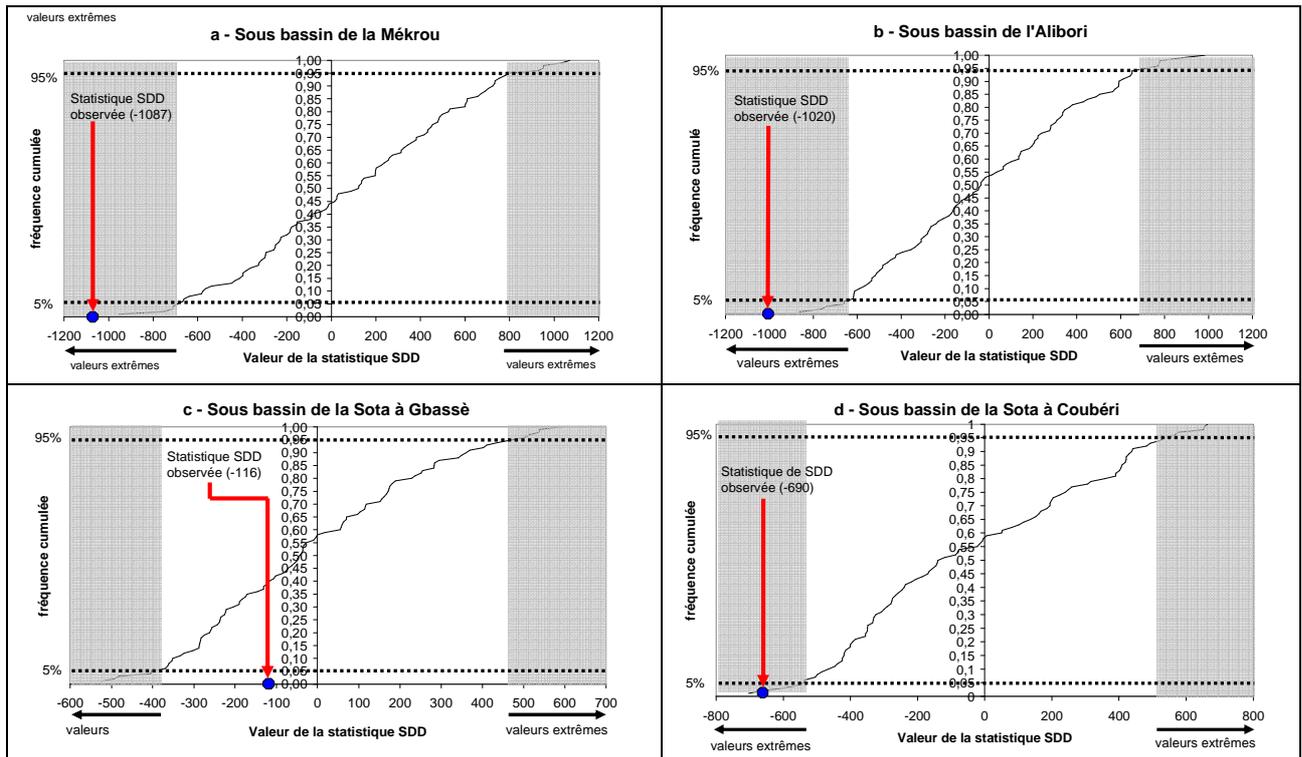


Figure 4.24 : Distribution empirique des valeurs de la statistique *SDD* (Somme des Différences par rapport à la Diagonale) obtenues pour les Matrices des sous bassins en appliquant le modèle GR4J (les lignes pointillées désignent le domaine des valeurs « extrêmes », à 5 et 95 %)

L'application de test statistique de la *SDD* aux matrices de simulation croisées obtenues pour les écoulements moyens à partie du modèle GR2M permet de confirmer la tendance enregistrée dans les sous bassins.

4.6.6.2. Le modèle GR2M

Pour le premier test, trois sous bassins présentent une prédominance de signes « - » par rapport au signes « + » : Mékrou 27 « - » pour 3 « + » ; Alibori 28 « - » pour 2 « + » ; Sota à

Coubéri 26 « - » pour 4 « + » (Tableau 4.8 a, b, d). La tendance à la baisse de l'écoulement dans ces sous bassins est bien confirmée par le modèle GR2M.

De même, le sous bassin de la Sota à Gbassè présente toujours un résultat mitigé mis en relief par une légère prédominance des signes « - » par rapport aux signes « + » (Tableau 4.8 c).

Tableau 4.8 : Interprétation de matrices de simulations croisées obtenus pour l'écoulement moyen sur les sous bassins pour différentes durées de calage (modèle GR2M).

a-Mékrou	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	0	-	+	-	-	-
1960-1966	-	0	+	-	-	-
1966-1972	-	+	0	-	-	-
1972-1979	-	-	-	0	-	-
1979-1986	-	-	-	-	0	-
1986-1992	-	-	-	-	-	0

b-Alibori	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	0	-	-	-	-	-
1960-1966	-	0	+	-	-	-
1966-1972	-	+	0	-	-	-
1972-1979	-	-	-	0	-	-
1979-1986	-	-	-	-	0	-
1986-1992	-	-	-	-	-	0

c-Sota à Gbassè	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	0	+	+	-	-	-
1960-1966	+	0	+	-	-	-
1966-1972	+	+	0	-	-	-
1972-1979	-	-	-	0	-	+
1979-1986	-	-	-	-	0	+
1986-1992	+	-	-	+	+	0

d-Sota à Coubéri	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	0	-	-	-	-	-
1960-1966	-	0	-	-	-	-
1966-1972	-	-	0	-	-	-
1972-1979	-	-	-	0	+	+
1979-1986	-	-	-	+	0	-
1986-1992	-	-	-	+	-	0

Le test statistique *SDD* appliqué au modèle GR2M met en évidence les mêmes tendances à la baisse hydrologique des trois sous bassins identifiés que celles données par le GR4J : Mékrou, Alibori et Sota à Coubéri (Figure 4.25 a, b, d). Dans le sous bassin de la Sota à Gbassè, le test est là aussi incapable de déceler de façon perceptible une tendance hydrologique affirmée (Figure 4.25 c).

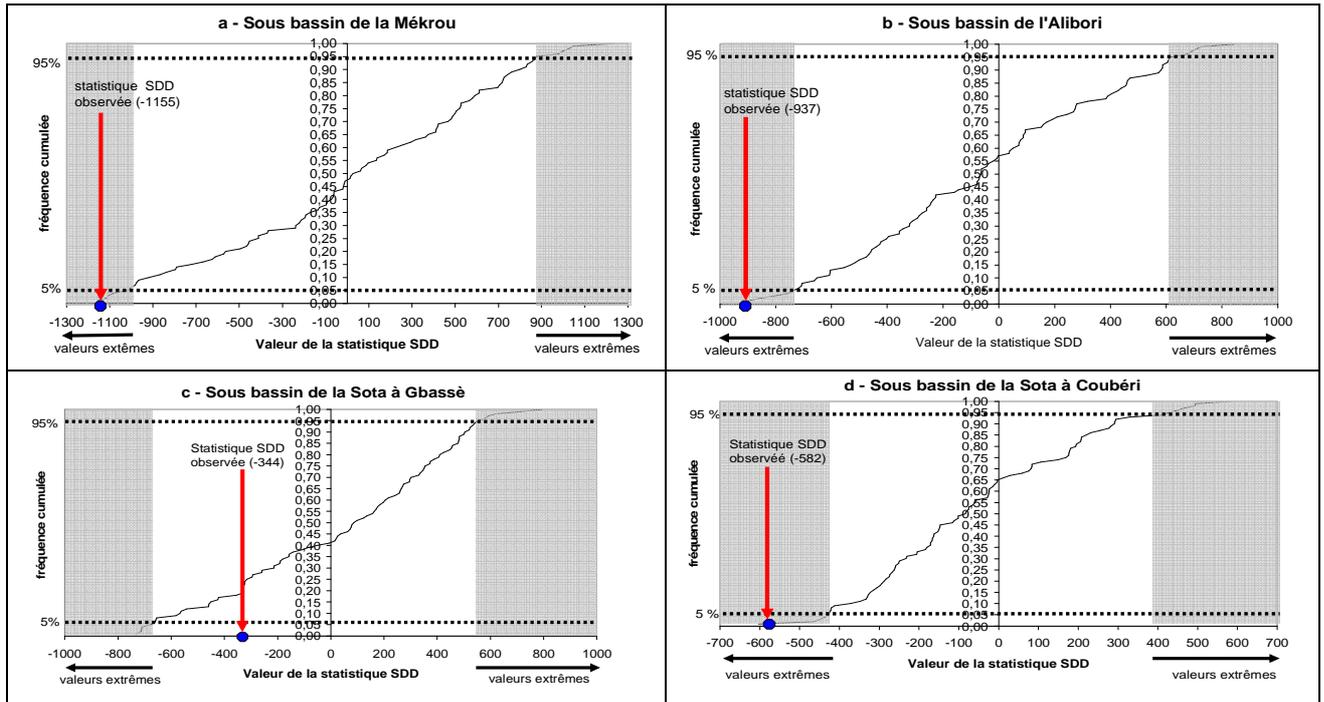


Figure 4.25 : Distribution empirique des valeurs de la statistique SDD (Somme des Différences par rapport à la Diagonale) obtenues pour la Matrice des sous bassins en appliquant de modèle GR2M (les lignes pointillées désignent le domaine des valeurs « extrêmes », à 5 et 95 %)

Ainsi, sur l'ensemble de la période prise en compte, les deux tests appliqués aux modèles GR4J et GR2M détectent clairement la non-stationnarité du comportement hydrologique de trois sous bassins (Mékrou, Alibori, Sota à Coubéri), alors que pour le quatrième sous bassin de la Sota à Gbassè, ils ne permettent pas de tirer une conclusion pertinente.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cherché à développer des méthodes permettant de simuler les écoulements et de détecter une non-stationnarité dans le comportement hydrologique des sous bassins-versants du Niger au Bénin.

L'étude de la robustesse des modèles GR4J et GR2M à travers l'analyse des critères d'optimisation de Nash appliqués aux écoulements moyens des sous bassins met en évidence des valeurs significatives. On peut donc dire que les modèles GR4J et GR2M présentent une certaine efficacité à simuler les écoulements aux pas de temps journalier et mensuel.

Toutefois, les Nash sur les écoulements moyens journaliers avec le modèle GR4J sont largement améliorés au pas de temps mensuel avec le GR2M.

La mauvaise prédiction des hautes eaux par les modèles pourrait être liée au choix du critère d'optimisation (« Nash ») et à la qualité des données d'entrées des modèles.

L'utilisation du GR4J et du GR2M pour modéliser l'écoulement moyen (indispensable à la mise en œuvre de la gestion intégrée des ressources en eau au Bénin) dans le bassin béninois du fleuve Niger a prouvé l'efficacité des modèles à mettre en évidence des tendances hydrologiques. Toutefois, on ne doit pas négliger les limites des résultats obtenus puisque les tests statistiques utilisés n'ont pas pu identifier une tendance avec les modèles dans le sous bassin de la Sota à Gbassè.

La tendance observée dans le comportement hydrologique des sous bassins peut être imputable à l'impact des changements climatiques et/ou à celui de l'évolution du couvert végétal lié aux pratiques culturales. Il convient ainsi de prendre en compte la dynamique des états de surface.

**Chapitre 5 : Impact de la dynamique des états
de surface sur les écoulements du bassin
béninois du fleuve Niger**

Introduction

Les modifications affectant la couverture végétale d'un espace donné, qu'elles soient d'origine anthropique ou naturelle, ont une influence plus ou moins directe sur la relation existant entre les précipitations et les écoulements de surface. La nature de la couverture végétale intervient, en effet, sur l'intensité de cinq processus fondamentaux dans le cycle de l'eau à la surface : interception, évaporation directe après interception, infiltration dans le sol, évapotranspiration et écoulement de surface (GREGOIRE *et al.*, 1990).

Pour un espace géographique donné, tel un bassin-versant, les caractéristiques du couvert végétal déterminent les ressources en eau réelle, c'est-à-dire l'eau stockée par le milieu, par rapport aux ressources en eau potentielles que sont les précipitations. Ainsi, toute modification des états et de la structure de la couverture végétale a des répercussions sur les ressources en eau du milieu (COSANDEY *et al.*, 2003).

Cependant, face aux résultats du chapitre 3 mettant en évidence la forte réduction de l'écoulement et des pluies entre les décennies 1960 et 1980, quelques interrogations se posent : la diminution constatée de l'écoulement est-elle entièrement imputable à l'évolution climatique dont les effets sont modulés en fonction du substratum géologique ? Plus précisément, dans la mesure où l'écoulement est, par définition, le sous-produit de la différence entre les pluies et l'évaporation, cette diminution peut-elle s'expliquer uniquement par une combinaison des précipitations en baisse et d'une demande évaporatoire supposée stable, voire en légère augmentation compte tenu de la température ? La baisse des débits est-elle nécessairement très forte dans un climat où les coefficients d'écoulement sont faibles ? Ou bien les conditions de surface continentale ont-elles modifié l'évaporation, soit dans le sens d'une augmentation des prélèvements (ce qui aurait réduit d'autant l'écoulement, donc aggravé le déficit post-1972), soit d'une diminution (ce qui aurait atténué ce même déficit) ? Y a-t-il eu modification des changements d'occupation des sols dans le bassin, et si oui, a-t-elle pu se traduire dans les écoulements ?

Dans ce chapitre, nous allons tenter de répondre à ces différentes interrogations.

- Dans un premier temps, nous présenterons la revue méthodologique qui nous a permis de mieux cerner les contours de cette étude d'impact de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin, mettant en évidence les difficultés liées à une telle analyse.
- Ensuite, nous allons suivre la dynamique des états et de la structure de la végétation entre 1979 et 1992.

- Enfin, nous allons tenter de comprendre l'impact de la dynamique des états de surface sur les écoulements à partir du NDVI (Indice de Végétation par la Différence Normalisée), faute de pouvoir modéliser cet impact, comme il sera discuté plus loin. Deux échelles seront considérées pour suivre la variabilité temporelle des états de surface : l'échelle pluriannuelle et l'échelle saisonnière (LAMACHERE, 1994).

5.1. Revue méthodologique

Dans ce chapitre, comme nous l'avons déjà précisé dans le chapitre 2, on entend par état de surface les états et la structure de la couverture végétale.

Rappelons que l'étude de l'impact de la dynamique des états de surface sur les écoulements constitue un axe de recherche embryonnaire, très peu exploré par les chercheurs. C'est également une étude très complexe qui nécessite beaucoup de moyens (LAMACHERE, 1994). Toutefois, quelques auteurs l'ont abordée entièrement ou partiellement.

5.1.1. Travaux antérieurs : méthodes et résultats

Tous les auteurs dont les travaux sont présentés dans cette section ont analysé l'influence des changements des états des surfaces sur le système hydrologique.

LAMACHERE (1994) et LAMACHERE et PUECH (1997) ont couplé la télédétection, les modèles numériques de terrain (MNT) et la cartographie des états de surface avec un Système d'Information Géographique (SIG) pour leur étude sur la variabilité spatio-temporelle des états de surface en zones sahélienne et soudanienne (Burkina-Faso) dans le petit bassin-versant de Bindé et son effet sur le ruissellement. Cette étude est menée en considérant sept états de surfaces élémentaires. Ils déterminent des fonctions de productions à l'échelle élémentaire à partir d'un modèle simple qui génère le ruissellement de chaque état de surface élémentaire. Ce modèle se présente comme suit : $Lr = a(Pu - Pi)$ avec $Pu = \sum_j I_j \Delta t_j$ pour $I_j > II$. Dans cette expression, Lr : ruissellement en mm, Pi : pluie d'imbibition en mm, Pu : pluie utile en mm, I : intensité de pluie en mm/h, Δt_j : intervalle de temps en jours entre pluies successives des jours J et $J-1$, II : intensité de pluie limite de ruissellement. Les trois paramètres a , Pi et II dépendent du type de surface élémentaire et de son état d'humectation. Leur valeur est estimée à partir du catalogue des états de surface de la zone sahélienne (FAO, 1995b). LAMACHERE (1994) et LAMACHERE et PUECH (1997) montrent que la prise en compte des variations du couvert végétal herbacé et des

modifications de la surface des sols cultivés affectent de manière significative l'estimation des lames ruisselées sur le bassin. Au terme de leur étude, les auteurs montrent qu'en zones sahélienne et soudanienne, les labours ou les sarclages modifient radicalement le comportement hydrodynamique superficiel des sols cultivés, et qu'en zone soudanienne la croissance du couvert végétal herbacé sur brûlis change de manière décisive le comportement hydrodynamique superficiel des sols de savane.

Pour la même démarche, GUILLET (1997) utilise une méthodologie comprenant trois phases : la description au sol, la typologie et la cartographie des états de surface. La description au sol est réalisée à partir d'un travail de terrain à Bidi au nord Yatenga (Burkina-Faso) qui a donné lieu à la segmentation du paysage en grandes zones géomorphologiques caractérisées par la description de leurs composantes édaphiques (sols, couvert végétal, pente, manifestations érosives) et anthropiques (travail du sol, aménagements, plantes cultivées). Pour dresser la typologie des états de surface, l'auteur a soumis ces résultats à une analyse factorielle des correspondances multiples (AFCM) suivie d'une classification par DIsances MInimum de TRI (DIMITRI) qui donne des groupes types liés aux surfaces de référence. Cette méthodologie donne une classification par adaptation dynamique permettant d'obtenir huit classes (surfaces élémentaires) : milieux cuirassés, milieux sains de haut de pente, milieux sableux sains, bas-fond à végétation dense, milieux sableux dégradés, milieux de sols sableux à sablo-limoneux peu dégradés, sols gravillonnaires et enfin sols couverts de ligneux assez denses. L'association de la carte issue du traitement numérique de l'image satellitale et de la carte des zones cultivées pour l'année 1987 a permis de dresser une carte des états de surface du petit bassin-versant de Samniwéogo, utilisable pour une modélisation hydrologique.

Ne disposant pas de données de télédétection suivies, il nous était impossible d'appliquer ces méthodes élaborées. Nous allons réaliser les cartes d'occupation du sol à partir des photographies aériennes et d'images satellitales disponibles sur la bassin béninois du fleuve Niger pour deux années (1979 et 1992).

Malheureusement pour nous, les méthodes appliquées par LAMACHERE (1994), LAMACHERE et PUECH (1997) et GUILLET (1997) utilisent des données (très précises) à des échelles très fines issues des satellites dont nous ne disposons pas sur le bassin béninois du fleuve Niger (paramètres caractéristiques du sol, de sa couverture végétale et de son organisation superficielle...). Néanmoins, nous tirons de ces travaux des pistes d'interprétation de l'influence des modifications de surface sur les écoulements.

Une étude de FOURNIER *et al.* (2000) a montré, par ailleurs, le rôle déterminant de la jachère dans les écoulements de surface en zone soudanienne du Burkina-Faso sur le site de Bondoukuy. Les auteurs ont adopté une méthode expérimentale d'observation et de suivi du terrain à l'échelle de la parcelle et des images satellitales qui ont fourni des données caractéristiques des états de surface au pas de temps horaire (taux de ruissellement après imbibition, lame d'imbibition, infiltration potentielle). Ces données ont servi à la détermination du ruissellement généré par les événements pluvieux à partir du modèle simple qui suit : $LR = a(P - PL)$ pour $P > PL$, où P = hauteur de pluie, PL = hauteur de pluie limite de ruissellement et a = taux de ruissellement après imbibition. Les paramètres PL et a sont déterminés pour une classe d'états de surface et pour une classe de régimes d'intensité à partir de hyétogrammes (courbe intensité-durée-fréquence) par l'application de la régression linéaire. Les auteurs ont montré que les jachères génèrent de faibles ruissellements à l'échelle du bassin-versant et, donc, une diminution de leur superficie peut accroître, dans des proportions importantes, des ruissellements locaux ou régionaux accompagnés de manifestations érosives.

Il s'agit une fois encore d'une méthode dont l'application a donné des résultats satisfaisants. Mais on ne peut l'utiliser parce que sa mise en œuvre nécessite des conditions (données à des pas de temps très fins (minute et heure), échelle spatiale très fine [parcelle]) impossibles à remplir dans le bassin béninois du fleuve Niger faute de moyens et de temps. Toutefois, nous exploiterons les résultats dans nos interprétations.

Dans leur article « The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso », MAHE *et al.* (2005) suivent le comportement hydrologique de la rivière Nakambé de 1955 à 1998 et examinent le rôle potentiel du changement d'utilisation du sol sur la capacité en eau du sol et sur l'écoulement. Ils associent les modèles GR2M et WBM (Water Balance Model) à la cartographie des états de surface. A chaque type d'occupation du sol est associé un coefficient d'écoulement. A l'issue de cette étude, les auteurs montrent que, depuis les années 1960, on assiste à un changement dans l'occupation des sols dans le nord du Burkina-Faso, et que la végétation naturelle est passée de 43 à 13 % de la superficie du bassin entre 1965 et 1995, alors que les champs ont augmenté de 53 à 76 % dans la même période et que les sols nus ont presque triplé, passant de 4 à 11 %. Le changement d'occupation du sol provoque un changement de coefficient d'écoulement moyen. L'augmentation de ces coefficients se traduit de façon linéaire en diminution d'infiltration et de capacité en eau des sols. Ainsi, malgré les baisses

pluviométriques et l'augmentation du nombre de barrages, l'écoulement moyen n'a cessé d'augmenter pendant la période.

On note que les résultats des études de LAMACHERE (1994), LAMACHERE et PUECH (1997), GUILLET (1997), FOURNIER *et al.* (2000) et MAHE *et al.* (2005), réalisés sous un climat sec, ne sont pas transposables sous un climat plus humide.

BARI *et al.* (2005) mettent en relief l'impact du changement d'utilisation des terres sur la production hydrologique dans le sud-ouest de l'Australie. Ils déterminent l'écoulement à partir de la formule du bilan suivant : $Q(t) = R(t) - E(t) - \Delta W(t)$, avec Q = écoulement annuel ; R = pluie annuelle ; E = évapotranspiration incluant l'interception, l'évaporation du sol et la transpiration des plantes ; ΔW = capacité en eau du sol et recharge. La capacité et la recharge de chaque type d'occupation du sol sont déterminées par télédétection. Ainsi, ces auteurs ont montré que la forêt de Jurrrah extrait l'eau pour la transpiration à partir de profondeurs considérables (20 à 30 m) dans les sols, avec une perte par évaporation importante (3 %) et un faible écoulement. La dégradation du couvert végétal due au changement d'utilisation des terres (culture et installation humaines), réduit donc la transpiration et l'infiltration, conduisant à une augmentation de l'écoulement annuel.

BRUIJNZEEL (2004) a mis en évidence l'influence de la forêt tropicale sur la production hydrologique saisonnière dans le sud-est de l'Asie. La télédétection a permis à l'auteur d'avoir les données (humidité du sol, LAI, NDVI, état d'occupation du sol, capacité en eau du sol) dont le traitement et l'analyse ont permis la réalisation de cette étude. Il montre que, quand le taux de biomasse est élevé, on assiste à une baisse de l'écoulement. La dégradation du couvert forestier et des sols entraîne donc une réduction de l'infiltration et une augmentation de l'écoulement en absence de biomasse.

Les résultats de BARI *et al.* (2005) et BRUIJNZEEL (2004) nous fournissent des arguments sur le comportement hydrodynamique des états de surface élémentaires, nous permettant de mieux apprécier l'impact de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger.

Il ressort de cette analyse méthodologique sur l'influence des changements des états de surface sur l'écoulement que, malgré les résultats satisfaisants obtenus par les différents auteurs, nous ne sommes pas en mesure de choisir une de ces méthodes pour notre étude, faute non seulement de données (détaillées et plus fines), de moyens et de la non-adaptation de certaines données à notre domaine d'étude. Cependant, à partir de ces travaux, nous avons

d'importants arguments pour mieux apprécier le caractère hydrodynamique de chaque type d'occupation du sol dans notre domaine d'étude.

Se pose à présent la question du choix d'une méthodologie adaptée au bassin béninois du fleuve Niger et aux données dont nous disposons sur cet espace géographique.

5.1.2. Contraintes et choix méthodologiques

La plupart des travaux présentés au début de ce chapitre ont été réalisés à une échelle spatiale fine (petit bassin-versant ou même parcelle). L'échelle temporelle est également fine (15 minutes, heures, jours). L'acquisition des données et l'utilisation des différentes technologies nécessitent une mise en œuvre lourde et onéreuse, inapplicable à l'échelle de bassins-versants de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres carrés.

5.1.2.1. Modélisation

Face à ces difficultés, nous avons d'abord tenté une interprétation du rôle des états de surface dans l'écoulement par l'utilisation des modèles GR4J et GR2M.

A notre sens, une interprétation des quatre paramètres du GR4J peut donner quelques indications sur les états de surface de chaque sous bassin. Ainsi, le paramètre X1, représentant la capacité du réservoir de production (de surface), peut être considéré comme fonction de l'état de surface et des sols en place. Ainsi, quand les sols sont issus de formations géologiques imperméables, le réservoir de surface est plus important que le réservoir souterrain (X3). La capacité de ce réservoir (X1) est par ailleurs influencée, non seulement par les conditions pédologiques du milieu, mais aussi par l'absence ou la faiblesse de la couverture végétale, compte tenu du fait que les sols, dans ce cas, sont très peu profonds. L'écoulement et l'évaporation ont toute chance d'être importants. En revanche, dans les sols perméables et couverts de végétation et/ou de cultures, le réservoir de surface (X1) contient moins d'eau, car il la perd par infiltration au profit du réservoir souterrain (X3) qui est plus important. La végétation et l'activité agricole ont, dans ce cas, toute chance d'être importantes car les sols sont plus profonds. Ces types de bassin connaîtront un faible écoulement et une faible évaporation, avec, toutefois, infiltration et transpiration importantes, compte tenu de la capacité du réservoir souterrain.

Le paramètre X3, représentant la capacité du réservoir souterrain, peut être également considéré comme fonctionnant sous l'influence des sols, de la couverture végétale de surface et des formations géologiques. La capacité du réservoir souterrain est plus importante dans

des sols perméables et couverts de végétations et négligeable dans des sols imperméables et nus. Nous pouvons donc dire que la capacité des deux réservoirs (X1 : superficiel et X3 : souterrain) dépend des états et de la structure du couvert végétal. X2 représentant la variable d'échange entre le réservoir souterrain et son environnement immédiat, est lié à la couverture végétale et à la nature des sols et donc à la formation géologique en place, avec des échanges marqués dans un substratum perméable et réduits dans un substratum imperméable. Enfin, le paramètre X4, temps de base de l'hydrogramme unitaire, traduit le temps de réponse du substratum en place aux événements pluvieux. De ce fait, il augmente sur un substratum perméable et/ou couvert de végétations, plus que sur un sol imperméable et/ou nu.

Cependant, cette approche, après une année de recherches, a du être abandonnée suite à une rencontre avec Charles PERRIN au CEMAGREF (Centre du Machinisme Agricole du Génie Rural et des Eaux et Forêts) d'Antony en août 2006. Concepteur du modèle GR4J, il a affirmé que ce modèle ne peut se prêter à une interprétation physique car le modèle GR4J est empirique. OUDIN *et al.* (2006) ont tenté de mettre en évidence les liens possibles entre les paramètres calibrés du modèle GR4J et des types de végétation par régression linéaire. Les rapports entre les paramètres sont améliorés par une description détaillée du processus d'évapotranspiration en tenant compte de la végétation. Les résultats de ces recherches montrent que les paramètres du modèle GR4J ne peuvent pas être déterminés à partir des caractéristiques de la végétation. Cette recherche confirme bien les mises en garde de PERRIN par rapport aux modèles empiriques qui ne peuvent faire l'objet d'aucune interprétation physique.

Ces problèmes méthodologiques ressortent bien également des conclusions de COSANDEY et ROBINSON (2000) qui, pour étudier les conséquences hydrologiques des actions anthropiques, proposent trois méthodes diffusées dans la littérature scientifique, dont deux sont présentées ici.

La première méthode consiste à transformer les paramètres du modèle hydrologique, admis au départ et susceptibles d'être modifiés par les actions humaines. Ces modifications doivent s'appuyer sur un maximum de données hydrologiques et cartographiques. Ensuite, il faudra réaliser des simulations avec des données d'entrées modifiées, en fonction de l'hypothèse retenue, et évaluer l'impact de ces modifications sur les variables de sortie. Cependant, plusieurs auteurs doutent de la fiabilité de cette méthode. Le risque pris lorsque l'on applique cette méthode est que les sorties de modèle ne reflètent que les hypothèses de départ et ne valent que par la qualité de celles-ci (COSANDEY et ROBINSON, 2000).

La deuxième méthode qu'ont proposée les auteurs consiste à découper dans le temps la série des écoulements en deux sous-séries, une précédant et l'autre suivant l'intervention dont on cherche à évaluer les conséquences. Ensuite, on cale le modèle pour chaque série, puis on le tourne sur chacune des sous-séries avec les paramètres de calage de l'autre sous-série. L'hypothèse formulée est que la différence de valeurs des débits estimés à partir de chacun des jeux de paramètres des deux sous-séries représente une estimation valable des conséquences de l'intervention. Les limites de cette méthode proviennent du fait que celle-ci ne se fonde que sur une hypothèse selon laquelle il n'existe qu'un jeu de données possibles pour un calage optimal, alors qu'on sait que cette hypothèse n'est pas réaliste (COSANDEY et ROBINSON, 2000).

Ces éléments vont dans le sens du refus de PERRIN d'utiliser les modèles empiriques pour l'interprétation physique d'un bassin-versant. Par ailleurs, le problème est d'autant plus crucial qu'on se trouve, dans la région d'étude, face à une péjoration climatique susceptible de modifier les paramètres des modèles hydrologiques (comme montré dans le chapitre 4), et donc de rendre plus difficile encore l'identification du rôle éventuel des changements d'occupation des sols. L'utilisation de GR4J a donc été écartée. Une alternative au modèle GR4J, envisagée initialement, recourrait au modèle SCS-curve Number.

Le modèle SCS-Curve Number a été initié par le Soil Conservation Service (SCS) en 1972. Il estime l'écoulement comme une fonction des précipitations cumulées, de la couverture et de l'humidité initiale du sol à partir de l'équation suivante :

$$Q_{scs} = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (1)$$

où Q_{scs} : l'écoulement ; P : le total de précipitations cumulées au temps t ;

I_a : les pertes initiales ; S : le potentiel maximum de rétention.

Par ailleurs, la relation empirique ci-dessous a été développée à partir d'une analyse menée sur un ensemble de petits bassins-versants expérimentaux, qui donne I_a en fonction de S (HOCINE, 2004) :

$$I_a = 0,2S \quad (2)$$

On a donc :

$$Q_{scs} = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (3)$$

Le potentiel de rétention maximum S (en mm) et les caractéristiques du bassin versant sont reliées par l'intermédiaire du nombre de courbes CN (Curve Number) par :

$$S = \frac{25400 - 254 CN}{CN} \quad (4)$$

Le *CN* peut être estimé comme une fonction du type du sol, d'occupation du sol et des conditions hydriques précédentes du bassin versant : ce nombre peut être estimé à partir des tables de données. Le Curve Number varie entre 2 et 100. NONGUIERMA et DAUTREBANDE (1997) ont appliqué ce modèle dans les petits bassins versants de la mare d'Oursi au Burkina-Faso en l'associant à un modèle paramétrique pluie-débit (modèle SWRRB : Simulator for Water Ressources in Rural Bassins) qui est un modèle déterministe de simulation des processus hydrologiques, dans lequel la variabilité spatiale des phénomènes est prise en compte à travers des caractéristiques moyennes ou représentatives du bassin. Ce modèle est composé de trois sous-modèles : le sous-modèle climatique, le sous-modèle hydrologique et le sous-modèle érosion. A ces trois sous-modèles est associé un quatrième sous-modèle croissance des cultures. Les composantes du sous-modèle hydrologique sont le ruissellement direct (volumes de ruissellement et de débits de pointe), la percolation, l'écoulement hypodermique ou retardé et l'évapotranspiration. Le ruissellement de surface est estimé par l'équation du modèle SCS Curve-Number précédemment présentée. Cette étude a nécessité les données suivantes : les types de sol, la végétation, l'occupation du sol, la topographie des terres, les techniques d'aménagement. Tous ces éléments sont définis dans le modèle SWRRB moyennant un paramètre global : le potentiel de ruissellement (*CN*) qui est déterminé à partir de la connaissance de trois catégories d'informations : les groupes hydrologiques du sol (infiltrabilité du sol), l'occupation moyenne du sol à l'intérieur d'une rotation culturale et les pentes, intégrées et analysées contextuellement dans un système d'information géographique. L'application du modèle montre, de façon générale, l'adéquation acceptable entre les débits observés et simulés. On observe également une bonne qualité prédictive du modèle pour les volumes d'écoulement, puisque 70 à 80 % de la variation sont expliqués par le modèle. Toutefois, quelques différences proviennent soit de la sous-estimation de l'évapotranspiration réelle, soit de la non-prise en compte de la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. GINESTE (1996) associe à la télédétection des modèles empiriques (MODLAC et SCS-Curve Number) qui proposent de déterminer la réponse hydrologique d'une portion de sol ou d'une parcelle à partir des caractéristiques observables sur le terrain. Après calage des seuls paramètres de transfert, les modèles semblent simuler correctement les événements extrêmes observés sur le bassin de la mare d'Oursi au Burkina-Faso. Cependant, ces méthodes ne sont pas transposables à un domaine climatique humide car elles semblent structurellement limitées aux régions hortonniennes et ne sont donc guère applicables sous d'autres climats.

Cependant, le modèle SCS-curve Number qu'on voulait utiliser reste également empirique, comme souligné par PERRIN. Les travaux de NONGUIERMA et DAUTREBANDE (1997) et de GINESTE (1996) montrent également nos limites pour la mise en œuvre de ce modèle. Une rencontre avec Christophe PEUGEOT de l'IRD (Institut de Recherche en Développement) en poste au Bénin, qui l'a utilisé dans sa thèse sur le Sahel, ne nous a pas convaincu, car son utilisation nécessite beaucoup de données que nous ne sommes pas en mesure d'obtenir pour le bassin béninois du fleuve Niger. Dans l'incapacité où nous étions de réunir les données et face à cette réalité du modèle, nous avons été contraint d'abandonner la piste du modèle SCS-Curve Number.

5.1.2.2. Autres approches

Face l'impossibilité d'utiliser les modèles GR4J, GR2M et SCS-curve number, nous avons dû nous rabattre sur l'utilisation de données d'observation (NDVI : Normalized Difference Vegetation Index) afin d'évaluer les changements et variations des états de surface et d'en formuler des hypothèses quant aux conséquences sur l'écoulement.

Dans cette section, nous présentons, dans un premier temps, une étude sur l'évolution de l'occupation des sols et de la pluviométrie au Bénin et, dans un second temps, nous évoquerons les travaux ayant analysé la variation du NDVI et de certains paramètres climatiques (pluie et évapotranspiration réelle) en général.

BOKO *et al.* (1997) ont réalisé leur étude sur la forêt classée de Goungoun dans le bassin du Niger au Bénin en adoptant une démarche qui a consisté en l'observation, à partir de photographies aériennes diachroniques et d'images satellitaires (1975, 1990, et 1992), de l'évolution de deux unités de paysage végétal. Cette évolution est ensuite confrontée à la chronique pluviométrique des stations les plus proches. Il en ressort une déforestation (due au boom cotonnier) et une tendance à la baisse de la pluviométrie.

Les travaux de ARVOR et DUBREUIL (2006), DUBREUIL (2003) et POUCHIN (2002) ont étudié la dynamique des états de surface en relation avec les pluies par l'utilisation du NDVI.

L'étude de ARVOR et DUBREUIL (2006) est réalisée au Mato Grosso au Brésil. Voulant mettre en relation les précipitations et les rendements, les auteurs utilisent la télédétection pour déterminer des indices de végétation (NDVI : Normalized Difference Vegetation Index). Les indices utilisés ici sont ceux du satellite SPOT-végétation à une résolution spatiale de 1 km. Les résultats montrent que le soja observe un temps de réponse de un ou

deux mois par rapport aux précipitations. L'analyse de l'impact de l'intensité des précipitations sur le NDVI donne des résultats mitigés.

Dans la dépression de Transylvanie en Roumanie, DUBREUIL (2003) a tenté de mettre en évidence la sécheresse de l'année 2000. Pour réaliser son étude, il choisit d'utiliser le déficit (ou déficience) d'évaporation défini par $DE = ETP - ETR$, avec ETP : évapotranspiration potentielle et ETR : évapotranspiration réelle. Pour spatialiser de façon détaillée les régions touchées par la sécheresse de l'année 2000 en fonction de l'utilisation du sol et des paysages, l'auteur utilise les images fournies par le satellite NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) dont la résolution spatiale est de 1,1 km. L'utilisation des images, combinée à des données climatiques, a permis l'identification détaillée des régions atteintes par la sécheresse. L'utilisation du NDVI comme indicateur de l'intensité de la sécheresse a donné des résultats limités, mais la comparaison avec le déficit d'évaporation est intéressante.

POUCHIN *et al.* (2002), dans une étude sur l'Afrique de l'Ouest, ont utilisé une base de données réalisée par la FAO (Food and Agricultural Organization) d'août 1981 à juin 1991, à raison d'une image satellitale NOAA tous les dix jours, ce qui représente plus de trois cent cinquante images. L'analyse de l'indice de végétation (NDVI) en Afrique de l'Ouest révèle une correspondance étroite entre régime pluviométrique et répartition spatiale de la végétation. De mai à août, l'ensemble des régions d'extraction connaît progressivement un développement de la végétation (saison humide) suivi d'une régression de septembre à avril, du nord au sud (saison sèche).

Pour étudier la prise en compte de la dynamique des états de surface dans les modèles hydrologiques, LECONTE (2000) a mis en relation le NDVI qu'il juge d'« *utilisation répandue et de qualité reconnue* », avec l'évapotranspiration réelle (ETR) générée par les modèles de Yates et Conway. Deux méthodes d'estimation de l'ETR ont été appliquées par l'auteur.

La méthode d'estimation de l'évaporation de RITCHIE (1972) est statistique et utilise une relation empirique entre l'indice foliaire, ou LAI (Leaf Area Index), et l'ETR (évapotranspiration réelle). La mise en œuvre de cette méthode nécessite l'estimation du rayonnement solaire, de la pluviométrie, des températures (minimum, maximum) et des données de LAI (représente la surface des feuilles par unité de surface de sol ; communément estimé à partir de NDVI) déterminées par télédétection.

La méthode mécaniste (Relation Simplifiée) consiste à faire le lien entre les éléments du bilan hydrique et ceux du bilan énergétique. La détermination de l'évapotranspiration par cette approche nécessite l'estimation par télédétection de nombreux paramètres physiques, tels que le rayonnement net, la température de surface, la rugosité de la surface et la vitesse du vent. Les valeurs de l'ETR estimée par la Relation Simplifiée sont presque toujours supérieures aux valeurs d'ETR aux sorties des modèles hydrologiques, avec des écarts allant parfois jusqu'à 100 mm. Cette étude réalisée dans le bassin-versant du Nakambé à Wayen (Burkina-Faso) a révélé d'importantes différences entre l'ETR estimée des deux modèles et un manque de corrélation avec les facteurs climatiques et végétaux. Cette recherche a mis en évidence le manque de réalités physiques de ces estimations. A partir de ces résultats, l'auteur conclut qu'on peut dire que la Relation Simplifiée peut fournir sur cette région une bonne piste pour l'estimation de l'ETR, dans la mesure où ses estimations semblent bien reliées à la réalité physique de la zone d'étude.

Les deux approches utilisées par LÉCONTE (2000) ont donné des résultats d'ETR satisfaisants. Malheureusement, on ne peut les utiliser dans ce travail par manque de données de télédétection. Cette difficulté nous a contraint à calculer l'ETR de façon très approximative, ne prenant pas en compte les réalités de surface. Cependant, cette étude nous fournit des pistes d'interprétation de l'ETR par l'analyse de l'évolution de NDVI que nous pouvons exploiter dans ce chapitre.

Les résultats des différentes études mettent en évidence les relations existant entre pluie et NDVI ou pluie et couvert végétal. Aucune de ces études n'ayant souligné les relations entre le NDVI et l'écoulement, nous avons décidé, tout en examinant la relation pluie et NDVI pour le bassin du Niger au Bénin, de la compléter afin de mettre en évidence d'éventuelles relations entre les états de surface décrits par le NDVI et les écoulements de surface.

Notre approche a été confrontée à plusieurs difficultés : un problème d'échelle, une interprétation délicate de NDVI et un problème de données ne couvrant que la période 1982-1992. Ainsi, le NDVI (outil d'évaluation de l'activité photosynthétique) est limité par la sensibilité aux conditions atmosphériques et à la réflectance du sol (FOTSING, 1999). A titre d'illustration, on peut citer les effets de l'angle de visée qui sont estimés plus importants dans la bande rouge que dans la bande proche-infrarouge. La différence normalisée ($NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$) réduit cependant considérablement cette différence. La réflectance du sol influence également le NDVI car on sait que les sols clairs (grande réflectance) influencent plus que les sols sombres (HUETE *et al.*, 1985). Enfin, le dernier problème est que nous ne

pouvons travailler que sur la période 1982-1992, car les données de NVDI ne sont disponibles qu'à partir d'août 1981. Malgré ces difficultés, nous tenterons d'identifier les relations entre le NDVI et l'écoulement.

Avant que nous abordions l'étude sur les indices de végétation, l'analyse approfondie des cartes d'occupation du sol de 1979 et 1992 donne quelques indications sur la dynamique des états de surface élémentaires entre ces deux dates et sur leurs conséquences hydrologiques potentielles.

5.2. Analyse de la dynamique des états de surface : évolution à long terme de l'occupation du sol

5.2.1. Présentation des cartes des types d'occupation du sol de 1979 et 1992

Les figures 5.1 et 5.2 ont été respectivement réalisées à partir de l'interprétation des photographies aériennes de la mission Kenting de 1979 à l'échelle de 1/50 000^e et des images satellitales SPOT et LANDSAT TM de 1992 à l'échelle de 1/100 000^e. La démarche suivie pour la réalisation de ces documents comprend trois phases : la photo-interprétation, la cartographie des minutes d'interprétation et l'étude diachronique. Obtenir les photographies et les images satellites pour cette étude a été très difficile. Nous n'avons pu récupérer que les données des deux années 1979 et 1992 au Centre National de Télédétection (CENATEL). Le choix des années 1979 et 1992 ne résulte donc que de la disponibilité des photos aériennes et des images satellitales couvrant le bassin béninois du fleuve Niger.

Les figures 5.1 et 5.2 mettent en évidence les différents types d'occupation du sol du bassin du fleuve Niger au Bénin entre les deux dates concernées : 1979 et 1992. De l'analyse de ces deux figures, il ressort qu'une très forte pression humaine s'exerce sur les ressources naturelles que constituent les formations végétales du bassin. Ainsi, les forêts denses et les forêts galeries ont connu une baisse sensible de leur superficie, qui passe de 328 851 hectares en 1979 à 3 200 hectares en 1992, avec un écart de 325 651 hectares, soit 99 % de diminution par rapport à l'état forestier du bassin en 1979. Comme les forêts denses et les forêts galeries, les savanes arborées et arbustives ont vu leur superficie chuter de 844 145 hectares, passant de 2,88 millions d'hectares en 1979 à 2,04 millions d'hectares en 1992, soit une baisse de 29 % par rapport à l'état des savanes du bassin en 1979.

En revanche, on assiste à une augmentation très sensible de la superficie des mosaïques de cultures et de jachères dans le bassin béninois du fleuve Niger, passant de 945 786 hectares

en 1979 à 2,22 millions d'hectares en 1992, avec une progression de 1,27 million d'hectares, soit 134 % d'augmentation par rapport à la situation des terres en cultures et jachères de 1979.

On peut donc conclure qu'il y a un recul généralisé des forêts et des savanes sur l'ensemble du bassin avec une très forte progression des surfaces cultivée et/ou mises en jachère. Toutefois, l'évolution des types d'occupation du sol entre les deux années n'est pas totalement identique dans tous les sous bassins.

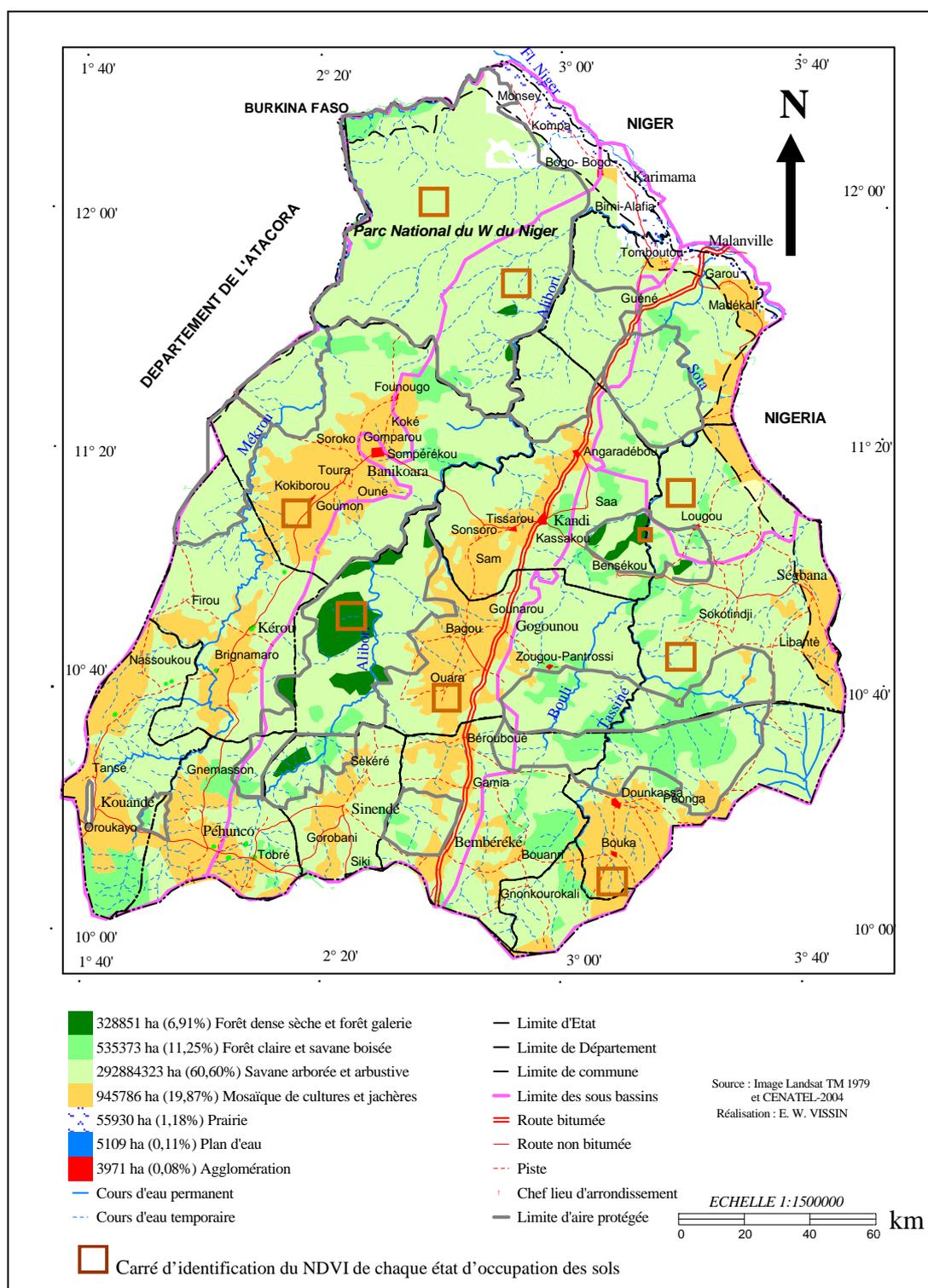


Figure 5.1 :Types d'occupation des sols du bassin béninois du fleuve Niger en 1979

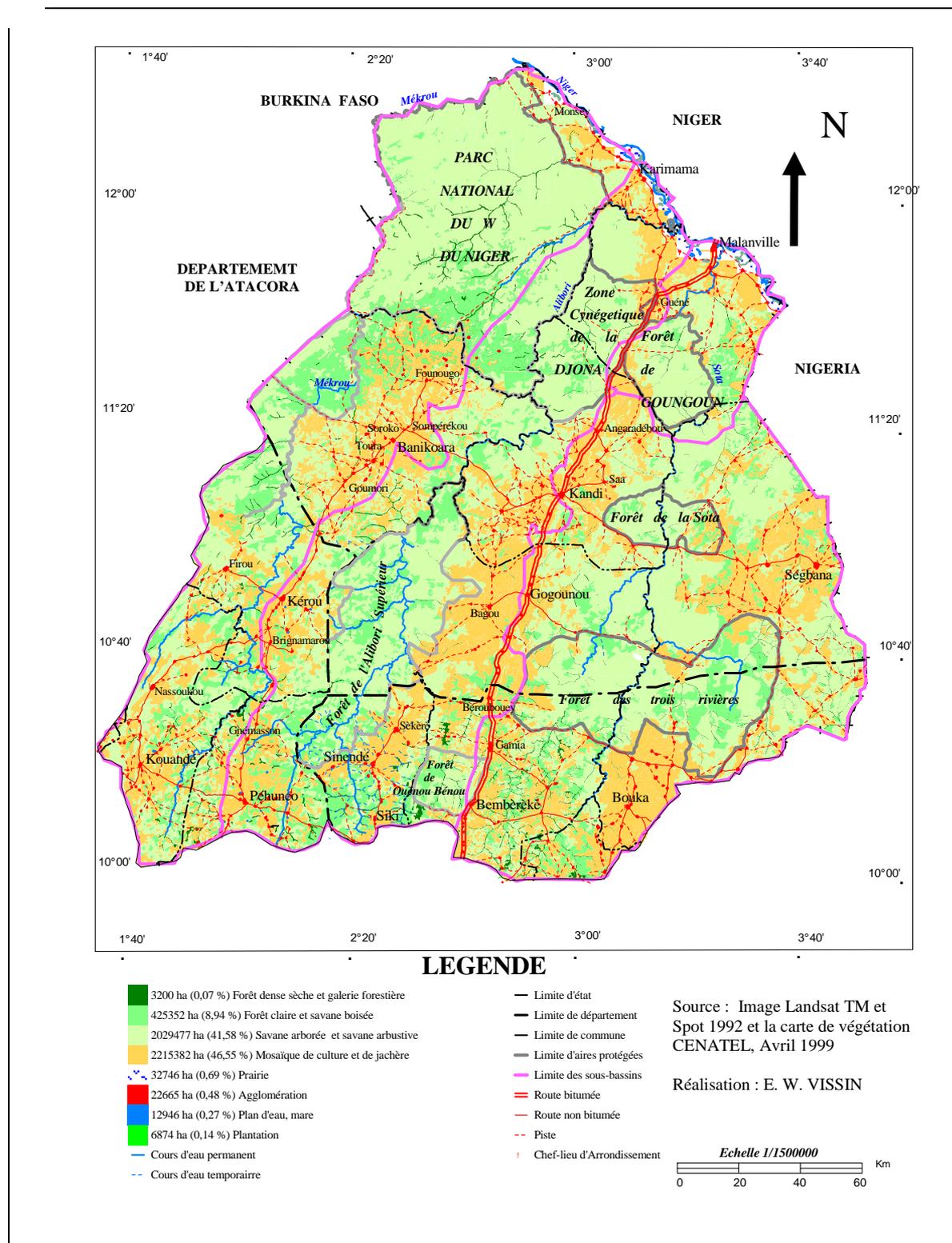


Figure 5.2 : Types d'occupation des sols du bassin béninois du fleuve Niger en 1992

5.2.2. Dynamique des types d'occupation du sol entre 1979 et 1992 par sous bassin

Dans tous les sous bassins, les formations végétales naturelles connaissent une régression sensible de leur superficie entre 1979 et 1992 (Tableau 5.1).

Par exemple, dans le sous bassin de la Mékrou, les forêts denses et forêts galeries dont la superficie était de 43 448 hectares en 1979, n'existent presque plus en 1992. Dans le sous bassin de l'Alibori, leur superficie est passée de 55 114 hectares en 1979 à 1 200 hectares en 1992, avec une baisse de 53 914 hectares, soit une régression de 97,82 % par rapport à leur état de 1979.

La superficie des savanes arborées et arbustives, dans le sous bassin de la Sota à Gbassè est passée de 722 764 hectares en 1979 à 508 783 hectares en 1992, avec une différence sensible de 213 981 hectare correspondant à 29,60 % de réduction des savanes par rapport à leur état de 1979. Elles ont également connu une baisse remarquable de 169 150 hectares dans le sous bassin de la Sota à Coubéri, en passant de 682 258 hectares en 1979 à 513 108 hectares en 1992, soit un recul de 24,74 % par rapport à 1979.

Toutes les régressions des formations végétales naturelles observées dans les sous bassins peuvent s'expliquer par les effets conjugués de la péjoration climatique de ces quatre dernières décennies et de la forte emprise des populations en quête de terres cultivables, vu la pression démographique dans le bassin béninois du fleuve Niger de 1979 à 1992 (INSAE, 1979 et 1992). Par exemple, à Kérou, dans le sous bassin de la Mékrou, la population est passée de 27 489 habitants en 1979 à 42 491 habitants en 1992, avec un taux d'accroissement inter-censitaire de 3,41 %. Dans le sous bassin de l'Alibori, la population de Banikoara est passée de 60 131 habitants en 1979 à 104 038 habitants en 1992, avec un taux d'accroissement inter-censitaire de 4,31 %. A Bembéréke, dans le sous bassin de la Sota à Gbassè, le taux d'accroissement inter-censitaire est de 3,58 %, avec un effectif de population qui passe de 37 866 habitants en 1979 à 59 809 habitants en 1992. Enfin, dans le sous bassin de la Sota à Coubéri, la population de la commune de Malanville est passée de 36 442 habitants en 1979 à 67 387 habitants en 1992, pour un taux d'accroissement inter-censitaire de 4,84 %.

L'évolution des surfaces des mosaïques de cultures et de jachères dans les sous bassins (Tableau 5.1) met en évidence cette augmentation généralisée de ce type d'occupation du sol : par exemple, dans le sous bassin de la Mékrou, la superficie des cultures et jachères passe de

243 863 hectares en 1979 à 550 890 hectares en 1992 ; pour l'Alibori de 243 759 hectares en 1979 à 551 999 hectares en 1992 ; pour la Sota à Gbassè de 241 635 hectares en 1979 à 552 902 hectares en 1992 ; pour la Sota à Coubéri de 216 529 hectares en 1979 à 569 591 hectares en 1992.

Tableau 5.1 : Récapitulatif des superficies des types d'occupation du sol de 1979 et de 1992

a - sous bassin de la Mékrou	Etat en 1979		Etat en 1992		progression (1992-1979)		régression (1992-1979)	
	en ha	en %	en ha	en %	en ha	en %	en ha	en %
Unités								
Forêt dense sèche et galerie forestière	43 448	3,63	0	0,00			-43 448	-3,63
Forêt claire et savane boisée	144 004	12,03	127 510	10,66			-16 494	-1,38
Savane arborée et arbustive	751 118	62,77	507160	42,39			-243 958	-20,39
Mosaïque de cultures et jachères	243 863	20,38	550 890	46,04	307 027	25,66		
Prairie	12 952	1,08	4 336	0,36			-8 616	-0,72
Plantation	0	0,00	4 12	0,03	412	0,03		
Plan d'eau	722	0,06	1 904	0,16	1 182	0,10		
Agglomération	440	0,05	4 335	0,36	3 895	0,31		
Total	1 196 547	100,00	1 196 547	100,00				

b - sous bassin de l'Alibori	Etat en 1979		Etat en 1992		progression (1992-1979)		régression (1992-1979)	
	en ha	en %	en ha	en %	en ha	en %	en ha	en %
Unités								
Forêt dense sèche et galerie forestière	55 114	4,68	1 200	0,10			-53 914	-4,58
Forêt claire et savane boisée	133 770	11,36	99 520	8,45			-34 250	-2,91
Savane arborée et arbustive	728 183	61,85	511 127	43,41			-217 056	-18,44
Mosaïque de cultures et jachères	243 759	20,70	551 999	46,89	308 240	26,19		
Prairie	14 142	1,20	6 970	0,59			-7 172	-0,61
Plantation	0	0,00	237	0,03	237	0,03		
Plan d'eau	1 305	0,12	1 902	0,16	597	0,04		
Agglomération	1 022	0,09	4 340	0,37	3 318	0,28		
Total	1 177 295	100,00	1 177 295	100,00				

c- sous bassin de la Sota à Gbassè	Etat en 1979		Etat en 1992		progression (1992-1979)		régression (1992-1979)	
	en ha	en %	en ha	en %	en ha	en %	en ha	en %
Unités								
Forêt dense sèche et galerie forestière	52 940	4,52	2 000	0,17			-50 940	-4,35
Forêt claire et savane boisée	136 389	11,65	97 788	8,35			-38 601	-3,30
Savane arborée et arbustive	722 764	61,74	508 783	43,50			-213 982	-
Mosaïque de cultures et jachères	241 635	20,64	552 902	47,25	311 268	26,61		18,24
Prairie	14 261	1,21	2 201	0,18			-12 060	-1,03
Plantation	0	0,00	699	0,05	699	0,05		
Plan d'eau	1 449	0,13	1 905	0,15	456	0,02		
Agglomération	1 147	0,11	4 307	0,35	3 160	0,24		
Total	1 170 585	100,00	1 170 585	100,00				

d - sous bassin de la Sota à Coubéri	Etat en 1979		Etat en 1992		progression (1992-1979)		régression (1992-1979)	
	en ha	en %	en ha	en %	en ha	en %	en ha	en %
Unités								
Forêt dense sèche et galerie forestière	177 349	14,60	0	0,00			-177 349	-
Forêt claire et savane boisée	121 210	9,98	100 534	8,27			-20 676	-1,70
Savane arborée et arbustive	682 258	56,16	513 108	42,23			-169 150	-
Mosaïque de cultures et jachères	216 529	17,82	569 591	46,88	343 062	28,24		13,92
Prairie	14 575	1,20	9 239	0,76			-5 335	-0,44
Plantation	0	0,00	5 526	0,45	5 526	0,45		
Plan d'eau	1 633	0,13	7 235	0,60	5 603	0,46		
Agglomération	1 362	0,11	9 682	0,80	8 319	0,68		
Total	1 214 915	100,00	1 214 915	100,00				

Dans le sous bassin de l'Alibori par exemple, la superficie des terres cultivables est passée de 243 759 hectares en 1979 à 551 999 hectares en 1992, connaissant ainsi une augmentation de 308 240 hectares qui correspondent à un accroissement de 126,45 % par rapport à la superficie de 1979. Dans le sous bassin de la Sota à Gbassè, cette superficie a également explosé passant de 241 635 hectares en 1979 à 552 902 hectares en 1992,

augmentant ainsi de 311 268 hectares, soit une augmentation de 128,88 % par rapport à la superficie de 1979.

On note dans tous les sous bassins que la péjoration pluviométrique mise en évidence plus haut s'est traduite par la multiplication des plans d'eau artificiels qui passent de 1 305 hectare en 1979 à 902 en 1992 dans le sous bassin de l'Alibori, et de 1 633 hectare en 1979 à 7 235 hectares en 1992 dans le sous bassin de la Sota à Coubéri. Or les pertes par évaporation sont plus importantes dans les plans d'eau que les cours d'eau. Ainsi, l'augmentation de leur superficie dans les sous bassins a entraîné l'augmentation des pertes par évaporation et l'amenuisement des ressources en eau de surface.

Au total, toutes les formations naturelles ont donc connu une régression spatiale au profit des mosaïques de culture et de jachères.

La figure 5.3 montre que dans tous les sous bassins, les superficies de forêt dense et de forêt galerie, de forêt claire, de savane boisée et de savanes arborée et arbustive ont connu une régression très marquée entre 1979 et 1992. Toutefois, le cas de régression le plus remarquable est celui des forêts denses et des forêts galeries, qui existaient en 1979 dans les sous bassins de la Mékrou et de la Sota à Coubéri, mais qui ont été quasiment éliminées en 1992 dans ces mêmes sous bassins.

Le recul de la végétation naturelle dans le bassin est dû au boum cotonnier des années 1980 et à la récession pluviométrique récurrente observée depuis les années 1970 (BOKO *et al.*, 1997).

La production du coton sur de vaste superficie nécessite le déboisement et le dessouchage systématique pour la quête de nouvelles parcelles. Ce sont là les faits qui font penser que le coton est responsable de la dégradation avancée des formations végétale naturelles du bassin du Niger au Bénin.

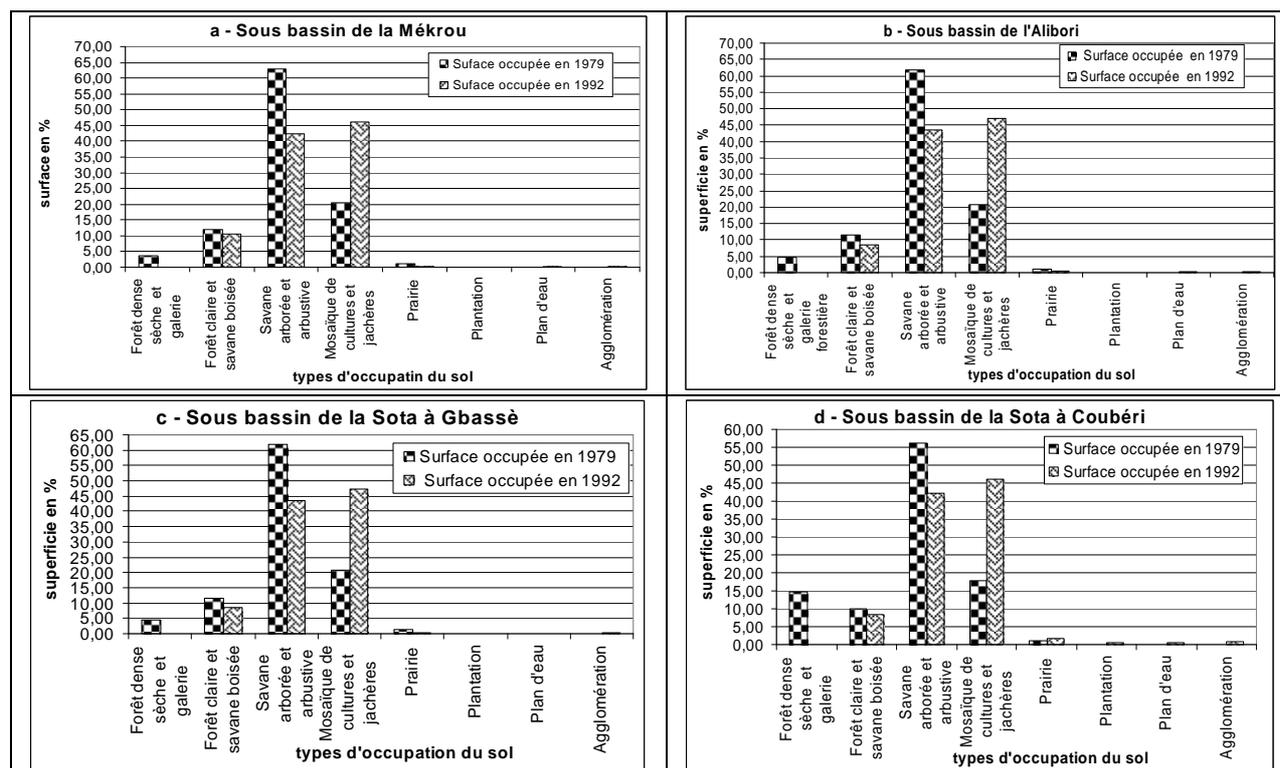


Figure 5.3 : Evolution spatiale des types d'occupation du sol en 1979 et 1992

En corollaire, l'activité érosive a été intensifiée sur l'ensemble des sous bassins du Niger au Bénin (photos 5.1 et 5.2). L'intensification de l'érosion contribue au comblement des rivières, modifiant le biotope des ressources halieutiques contraintes de migrer vers le cours principal du Niger.



Photo 5.1 : Erosion au pont de la Mékrou

Cliché : E. W. VISSIN, novembre 2006



Photo 5.2 : Erosion à la station de Coubéri

Cliché : E. W. VISSIN, novembre 2006

On peut donc conclure que l'augmentation des populations du bassin entraîne une pénurie des terres cultivables, d'où une forte emprise sur les formations végétales naturelles, suivie d'une augmentation sensible des terres arables dans tous les sous bassins.

5.2.3. Effets potentiels sur les écoulements

Cette section vise à mettre en évidence l'influence potentielle des changements d'occupation du sol sur l'écoulement. Pour cela, elle aborde d'abord l'évolution de la pluie et de l'écoulement sur la période 1982-1992 ; ensuite, elle évalue l'effet potentiel de la dégradation des formations naturelles sur l'écoulement et enfin présente l'impact potentiel de l'augmentation de la superficie des formations anthropiques (cultures et jachères) sur l'écoulement dans un bassin versant.

La figure 5.4 montre une tendance à la hausse de la pluie et de l'écoulement pour la période 1982-1992. Les anomalies négatives de pluie et d'écoulement les plus marquées sont observées entre 1982 et 1987. En revanche, les années 1988 et 1991 enregistrent les anomalies positives de pluie et d'écoulement les plus sensibles.

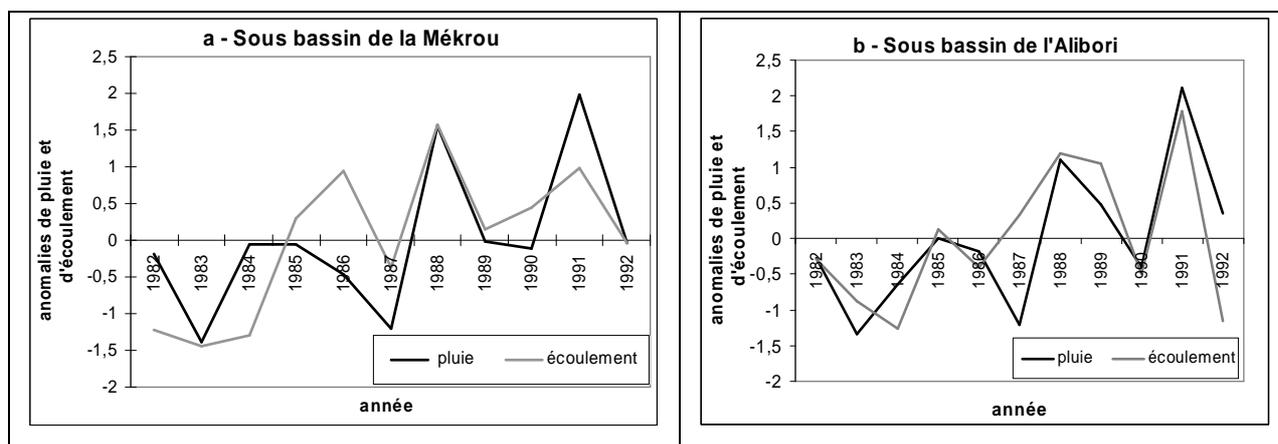


Figure 5.4 : Evolution interannuelle de la pluie et de l'écoulement dans le bassin béninois du fleuve Niger

Plusieurs auteurs ont montré que la couverture forestière se comporterait comme une « éponge » retenant l'eau de pluie qu'elle restituerait lentement, émoussant les crues et constituant un soutien véritable des étiages (BARI *et al.*, 2005 ; BRUIJNZEEL, 2004 ; COSANDEY *et al.* 2003 ; COSANDEY et ROBINSON, 2000). Elle jouerait un rôle inhibiteur de l'écoulement avec un fort pouvoir évaporatoire et facilitant l'infiltration. Ainsi, les régressions des superficie des formations forestières conduisent à une accélération de l'écoulement, voire à des crues très dangereuses, et augmentent l'activité érosive dans le bassin.

En revanche, dans tous les sous bassins, les mosaïques de cultures, et de jachères, ont sensiblement progressé avec des différences très marquées entre les superficies de 1979 et

celles de 1992. LAMACHERE (1994) et LAMACHERE et PUECH (1997) ont montré que le sarclage, le labour et l'accroissement du couvert végétal herbacé sur brûlis (culture sur brûlis) modifient radicalement le comportement hydrodynamique superficiel des sols de savanes. FOURNIER *et al.* (2000), quant à eux, ont montré que la jachère génère de faibles ruissellements à l'échelle du bassin versant et que sa réduction peut accroître le ruissellement. Dans notre domaine d'étude, on ne peut affirmer que l'augmentation de l'écoulement observée est liée à l'accroissement de la superficie des jachères, car la pluie sur la période 1982-1992 est également en hausse. Toutefois, MAHE *et al.* (2005) ont bien montré que, dans le Sahel, la régression des formations naturelles, la progression des champs et des jachères et des barrages, malgré la baisse pluviométrique, ont été accompagnées d'une augmentation de l'écoulement.

Dans tous les sous bassins, on enregistre une augmentation très sensible des mosaïques de cultures et de jachères (de plus en plus courtes) influençant les ressources en eau du bassin par une augmentation de l'infiltration.

L'analyse de l'évolution de NDVI, indice de végétation représentatif de l'activité photosynthétique (état de surface) et des termes du bilan hydrologique tente de mettre en évidence les relations pouvant exister entre les états de surface et les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger sur la période 1982-1992.

5.3. Le NDVI et les termes du bilan hydrologique

5.3.1. Analyse de la dynamique des états de surface : Evolution saisonnière de NDVI dans le bassin du fleuve Niger au Bénin

L'analyse de l'évolution saisonnière du NDVI met en évidence une courbe unimodale dans tous les sous bassins en accord avec le rythme climatique moyen. Le NDVI amorce sa véritable progression en avril pour atteindre son maximum en septembre dans trois sous bassins : Mékrou, Sota à Gbassè, Sota à Coubéri. Il atteint son maximum plus tôt en août dans le sous bassin de l'Alibori compte tenu du substratum géologique de socle qui porte des sols ferrugineux peu profonds, favorisant une réponse plus rapide du couvert végétal aux événements pluvieux (Figure 5.5).

Dans les sous bassins de la Mékrou (dans le parc « W ») et de la Sota à Coubéri (sur 93 % de grès), six mois (juin, juillet, août, septembre, octobre, novembre) connaissent des valeurs de NDVI supérieures à la moyenne mensuelle de la période 1982-1992 (Figure 5.5 a, d). Le

sous bassin de l'Alibori connaît également six mois (mai, juin, juillet, août, septembre, octobre) dont les valeurs sont excédentaires par rapport à la moyenne (Figure 5.4 b).

Seul le sous bassin de la Sota à Gbassè enregistre cinq mois (juin, juillet, août, septembre, octobre) d'activité de la photosynthèse supérieure à la moyenne de la période 1979-1992. Cela peut se justifier par le fait que c'est dans ce sous bassin que la production de coton est très développée, avec pour corollaire la destruction du couvert végétal naturel. Cette analyse atteste le suivi temporel du NDVI est un moyen utile à la compréhension d'une évolution de l'activité photosynthétique (POUCHIN *et al.*, 2002).

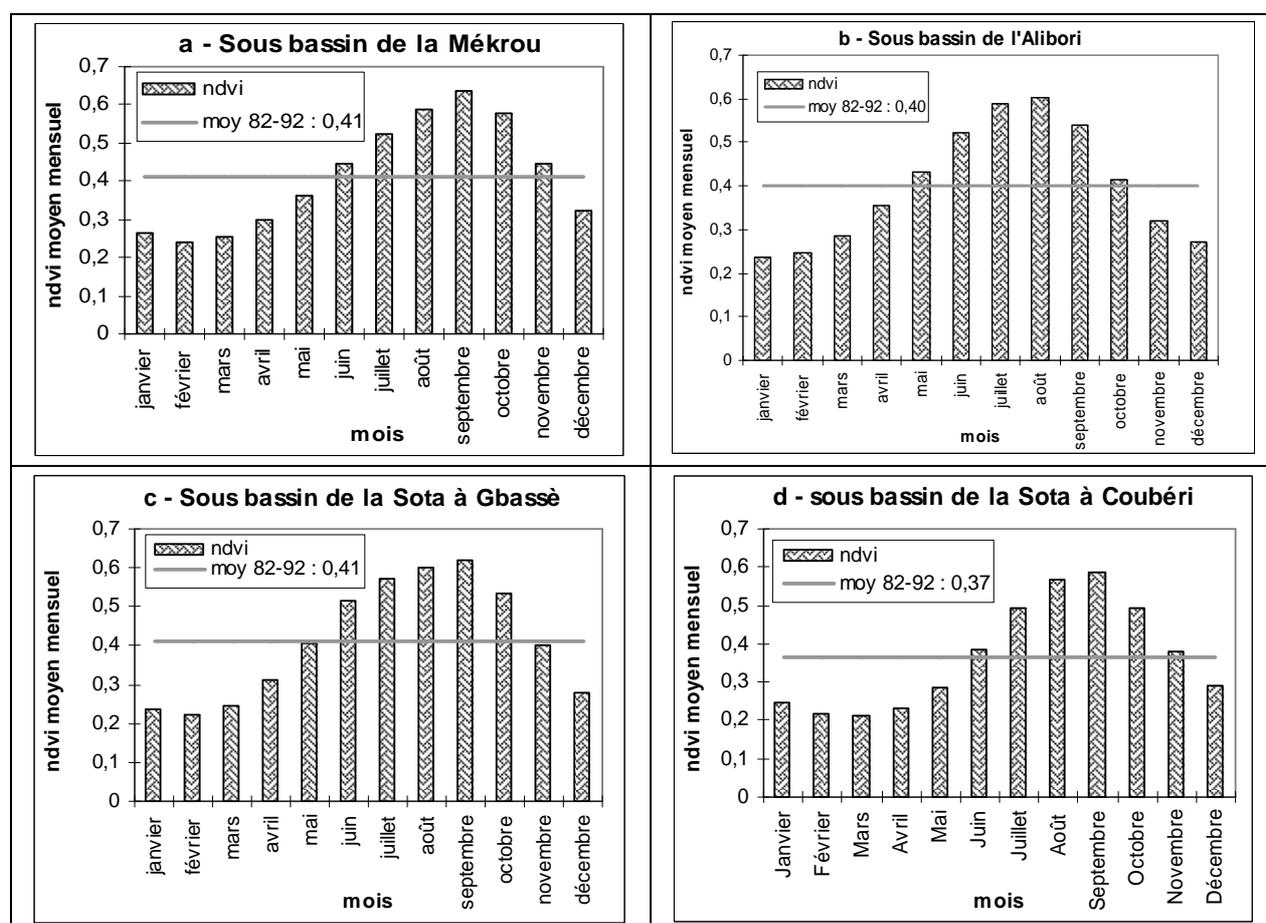


Figure 5.5: Cycle annuel du NDVI (1982-1992)

Le développement de la végétation nécessite l'établissement de certaines conditions hydroclimatiques. L'étude des corrélations entre le NDVI et certains paramètres du bilan hydrologique permettra d'identifier les relations qui existent entre eux dans chacun des sous bassins.

5.3.2. Variabilité mensuelle du NDVI et des termes du bilan hydrologique

Au pas de temps mensuel, l'indice de végétation est logiquement en relation étroite avec le volume d'eau tombé dans le bassin et sa répartition temporelle. Ainsi, le NDVI croît à un rythme semblable à celui des cumuls pluviométriques (Figure 5.6). La saison débute en mai, les pluies deviennent rapidement très importantes. L'indice de végétation augmente en fait dès les premières averses, en mars-avril, dans tous les sous bassins (Vauclair, 1995), sauf dans celui de la Sota à Coubéri. On observe un décalage d'un mois, en harmonie avec les résultats obtenus par Dubreuil (2003) et Pocard et al. (1996), entre le maximum pluviométrique et la valeur d'indice de végétation correspondante dans les sous bassins de la Mékrou, de la Sota à Gbassè et de la Sota à Coubéri (Figure 5.6 a, c, d). De même, si un déficit des précipitations survient au cours de la saison, on remarque un faible fléchissement de la courbe de l'indice de végétation (octobre à décembre). La réserve utile du sol joue alors un rôle pondérateur. En outre, le temps écoulé entre un événement pluviométrique (maxi ou mini) et la réponse du couvert végétal correspond au temps nécessaire à l'assimilation de l'eau par les plantes et à la formation des chloroplastes. Ce n'est pas le cas du sous bassin de l'Alibori qui connaît une évolution synchrone entre l'indice et la pluie sur toute la saison (Figure 5.6 b), comme l'ont montré Pouchin et al. (2002).

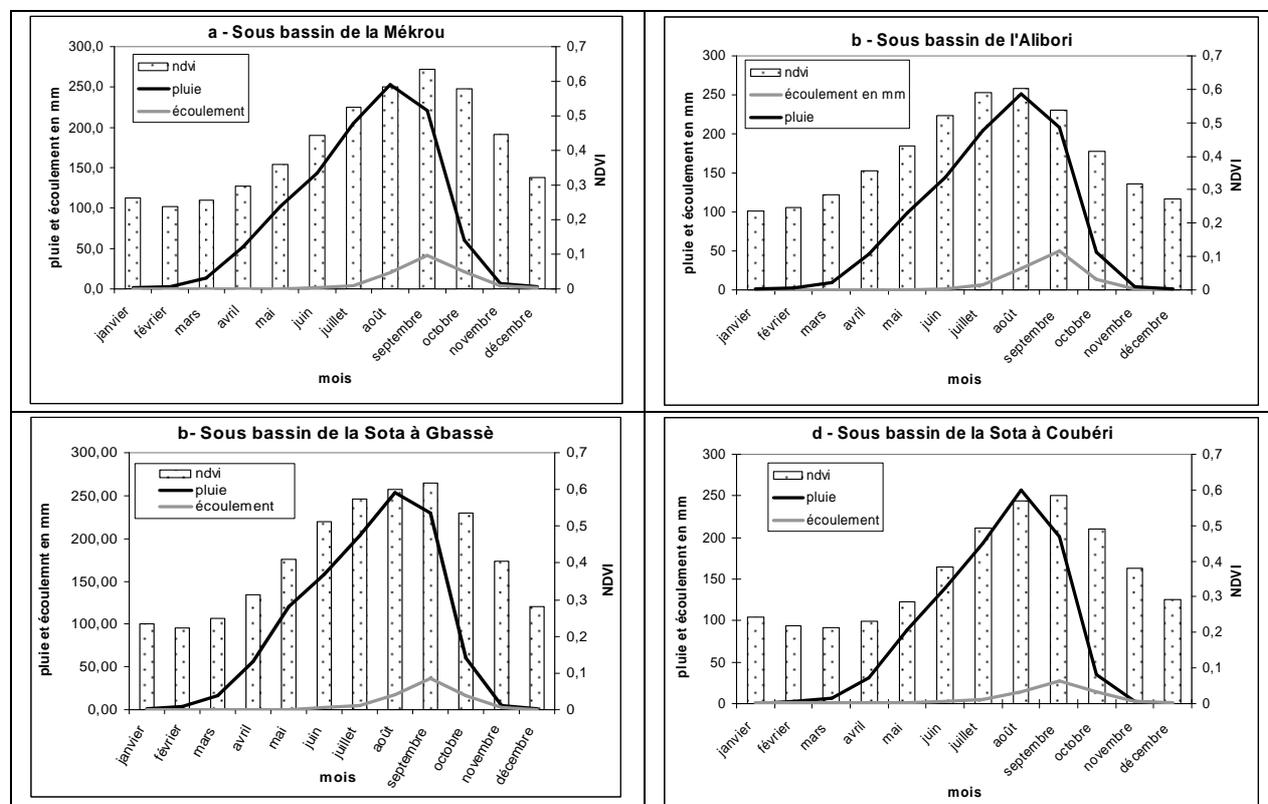


Figure 5.6 : Variabilité saisonnière NDVI, précipitations et écoulement dans le bassin (1982-1992)

Le figure 5.6 montre aussi que l'écoulement commence vraiment dans les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota à Gbassè fin mai début juin, pour atteindre son maximum en septembre, coïncidant avec le maximum de l'activité végétative. Il amorce ensuite une descente très rapide pour cesser vers la fin de l'année (décembre). Dans le sous bassin de l'Alibori, le maximum de l'écoulement est en retard par rapport au celui de l'indice de végétation. Le sous bassin de la Sota à Coubéri présente quant à lui, un écoulement pérenne qui entretient sur l'année l'activité photosynthétique (surtout des forêts galeries), y compris au cours des périodes sèches quand le déficit hydrique est élevé.

Dans tous les sous bassins, la recharge (dont le graphique n'est pas présenté) dure trois à quatre mois, et son maximum, enregistré en août au cœur de la saison pluvieuse, ne coïncide avec celui de l'indice de végétation que dans le sous bassin de l'Alibori.

5.3.3. Analyse de la dynamique des états de surface : variabilité interannuelle des NDVI sur la période 1982-1992

L'étude sur l'évolution interannuelle du est réalisée sur la dernière séquence de la période sèche, c'est-à-dire de 1982 à 1992. Le choix de cette période s'est imposé à nous car, nous l'avons déjà dit, le NDVI n'est calculé qu'à partir d'août 1981. Dans cette étude, nous travaillons sur les moyennes mensuelles et annuelles du NDVI pour la période 1982-1992.

On observe une tendance à la hausse de l'indice de végétation dans tous les sous bassins sur la période 1982-1992 (Figure 5.7). On remarque que cette tendance est plus sensible dans les sous bassins de l'Alibori ($R^2=0,59$), de la Sota à Gbassè ($R^2=0,56$) et de la Sota à Coubéri ($0,37$). Cette hausse de l'activité photosynthétique sur la période courte (1982-1992) peut se justifier par le développement des cultures et des jachères en remplacement des formations naturelles dégradées. Ce qui veut dire que les sols ne sont pas laissés à nu.

En revanche, dans le bassin de la Mékrou, les valeurs du NDVI varient entre 0,39 et 0,43, soit une faible hausse ($R^2=0,18$). Ces valeurs mettent en évidence une certaine stabilité de l'activité photosynthétique qui peut s'expliquer par la situation de ce sous bassin au coeur du parc « W » protégé. Le sous bassin de la Sota à Coubéri sous l'influence du climat soudano-sahélien enregistre les valeurs de NDVI les plus faibles. On assiste à assèchement plus rapide du couvert végétal dans ce sous bassin où la saison sèche dure sept ou huit mois.

La tendance générale à la hausse observée dans tous les sous bassins pourrait s'expliquer par l'accroissement de l'activité photosynthétique des cultures et des jachères dont la superficie a connu une augmentation sensible de 1979 à 1992 dans tous les sous bassins. On

pourrait aussi penser que c'est l'augmentation de la pluie sur cette période qui a entraîné la hausse sensible de l'activité photosynthétique dans le bassin béninois du fleuve Niger..

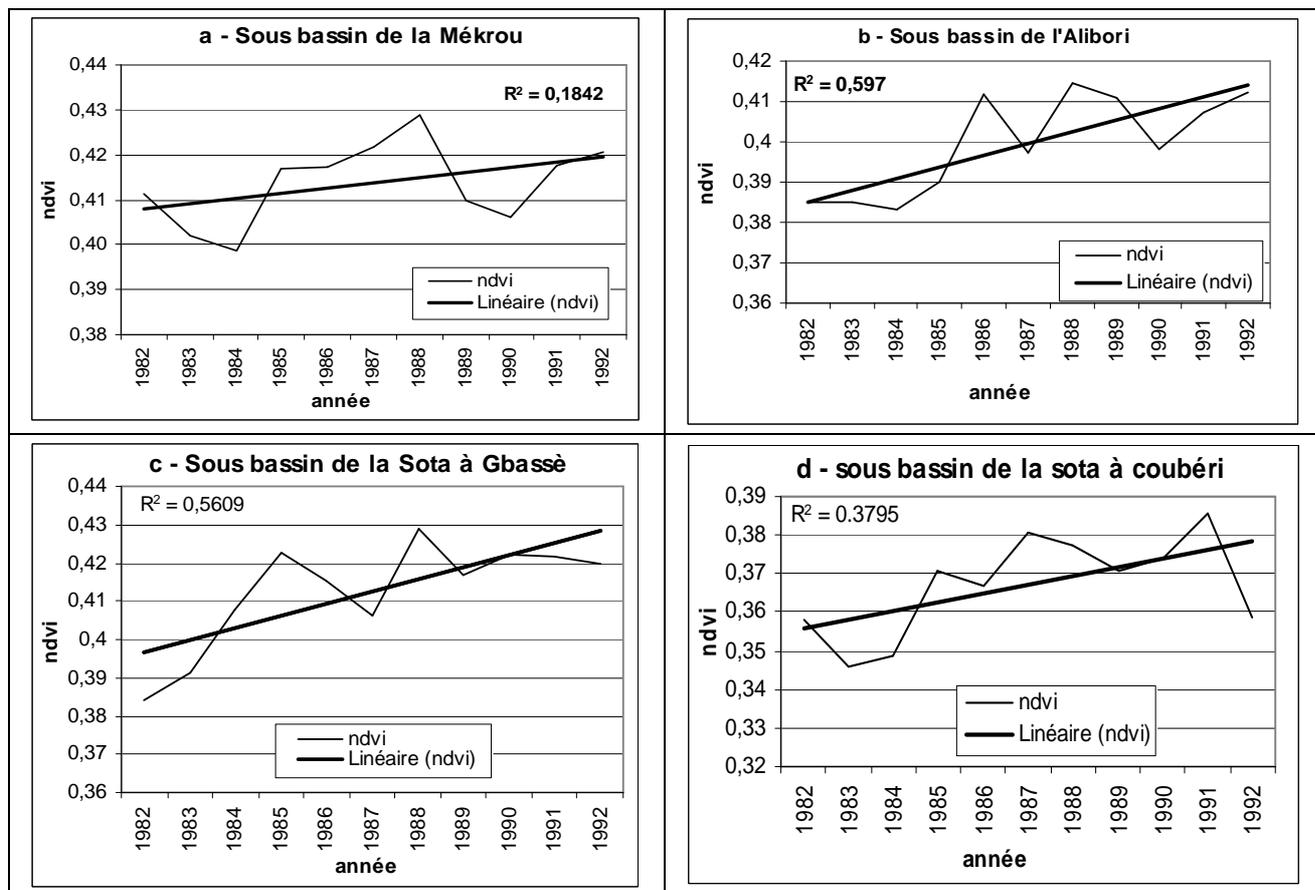


Figure 5.7 : Variabilité interannuelle du NDVI (1982-1992)

5.3.4. Evolution interannuelle de NDVI et des termes du bilan hydrologique

On tente ici de définir l'évolution des relations entre le NDVI et chacun des termes du bilan hydrologique dans chaque sous bassin

5.3.4.1. Corrélation entre NDVI et termes du bilan hydrologique sur la période 1982-1992

La recherche des relations statistiques entre l'indice de végétation et les termes du bilan hydrologique a pour objectif de nous aider à mieux appréhender l'impact des fluctuations du NDVI, représentatif de l'état de la couverture végétale à la surface du sol sur les termes du bilan hydrologique et aussi inversement, car l'état de la végétation dépend de certains paramètres du bilan hydrologique (la pluie, par exemple).

Dans chaque sous bassin, les coefficients de corrélation sont positifs mais, en général, très modestes, ne traduisant pas de lien direct significatif entre les variations interannuelles du

NDVI et celles des paramètres hydro-climatiques (Tableau 5.2). En analysant la corrélation NDVI/pluie, seul le sous bassin de l'Alibori présente un coefficient de corrélation significatif de 0,63. Ce résultat pourrait traduire l'apport en eau des premiers horizons des sols peu profonds de ce sous bassin au développement du couvert végétal. L'activité photosynthétique, au pas de temps annuel, n'est donc que modérément sensible aux variations de la pluviométrie, à la différence de ce qu'on observe dans les régions semi-arides (Sahel notamment)

L'étude de la corrélation NDVI/écoulement présente des valeurs significatives dans les sous bassins de la Mékrou et de la Sota à Gbassè, mais ces valeurs sont un peu plus faibles dans les sous bassins de l'Alibori et de la Sota à Coubéri. Cependant, dans l'ensemble du bassin, sauf dans le sous bassin de l'Alibori, cette corrélation est supérieure à celle obtenue avec la pluie. On pourrait dire qu'il existe un lien entre le couvert végétal de ces sous bassins et l'écoulement.

En ce qui concerne la corrélation NDVI/recharge, seul le sous bassin de l'Alibori a un coefficient important de 0,70, ce qui peut s'expliquer par la présence d'une réserve en eau du sol peu profonde (présence du socle) exploitable par les racines pour le développement végétatif.

En revanche, aucun des sous bassins n'a de coefficient significatif pour la corrélation NDVI/évaporation. Rien d'étonnant, car trop de paramètres environnementaux entrent dans l'évaluation de l'évapotranspiration qui est une combinaison de phénomènes physiques et biologiques.

Tableau 5.2: Corrélation NDVI et valeurs brutes des paramètres du bilan hydrologique (pas de temps annuel)

	Analyse de corrélation			
	NDVI/pluie	NDVI/évaporation	NDVI/écoulement	NDVI/recharge
Mékrou	0,42	0,31	0,71	0,13
Alibori	0,63	0,16	0,49	0,70
Sota à Gbassè	0,40	0,10	0,55	0,48
Sota à Coubéri	0,20	0,17	0,40	-0,08

 Corrélation significative (au seuil de 95 %) supérieure ou égale à 0,50

En gras : Corrélation supérieure ou égale à 0,40 mais inférieure à 0,50

L'analyse de l'évolution du NDVI et des termes du bilan permettra de mieux comprendre les valeurs des coefficients de corrélation trouvées plus haut. Dans ce qui suit, nous présenterons essentiellement les graphiques des sous bassins illustrant les corrélations les plus significatives entre le NDVI et les paramètres hydroclimatiques.

5.3.4.2. Evolution NDVI et pluie

Au pas de temps annuel, le NDVI et les hauteurs de pluie n'ont pas une évolution parfaitement semblable d'une année à l'autre dans les sous bassins sur la période 1982-1992, avec de surcroît une différence sensible entre les sous bassins (Figure 5.8). Dans les sous bassins de la Mékrou et de l'Alibori, le comportement du NDVI et des précipitations est assez semblable sur les sous-périodes 1982-1984 et 1987-1992, avec une divergence des courbes en 1992 (Figure 5.8 a, b). Toutefois, pendant la sous-période 1984-1987, NDVI et pluie sont moins en accord. Ce comportement des deux paramètres justifie la valeur du coefficient de corrélation NDVI/pluie dans les sous bassins de la Mékrou et de l'Alibori, respectivement de 0,42 et 0,63.

S'il n'y a pas de lien fort perceptible entre NDVI et pluies dans le bassin du fleuve Niger au Bénin, on enregistre toutefois une tendance commune à la hausse sur la période 1982-1992.

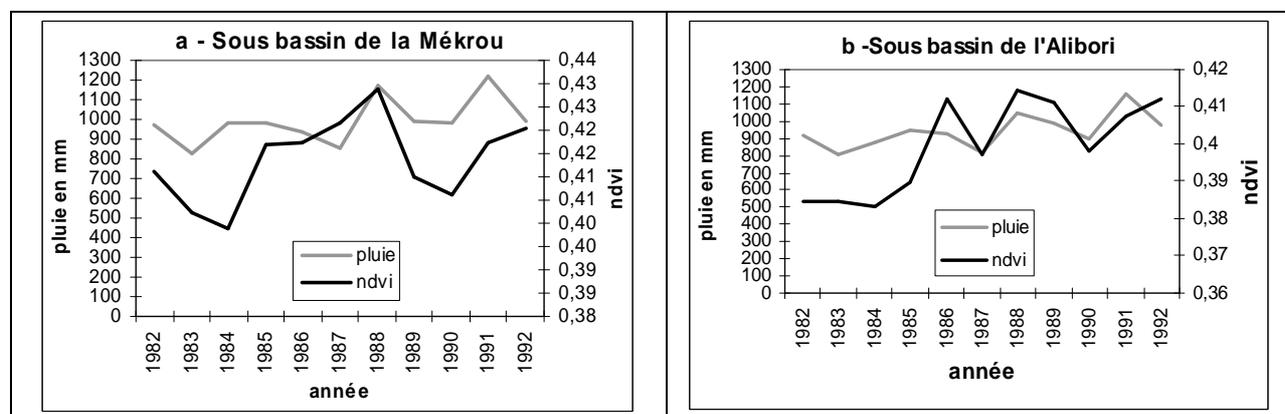


Figure 5.8 : Variabilité interannuelle NDVI et pluie dans les sous bassins de la Mékrou et de l'Alibori (1982-1992)

5.3.4.3. Evolution NDVI et évaporation

L'analyse de la figure 5.9 montre un comportement semblable du NDVI et de l'évaporation pendant les sous-périodes 1982-1984 et 1987-1992 avec, toutefois, une divergence des deux courbes en 1992 dans le sous bassin de la Mékrou. En revanche, durant la sous-période 1984-

1987, la différence entre l'évolution des deux paramètres est marquée, surtout en 1984 et 1985. Ce résultat est en accord avec la faible valeur du coefficient de corrélation (0,31) indiquée plus haut entre ces deux variables. Dans les autres sous bassins, comme celui de l'Alibori, les comportements du NDVI et de l'évaporation divergent également (cf. les très faibles valeurs de la corrélation sur le tableau 5.2) dans ces sous bassins. Il est vrai que l'évaporation estimée ne marque aucune tendance nette, alors que le NDVI est en hausse sur la période.

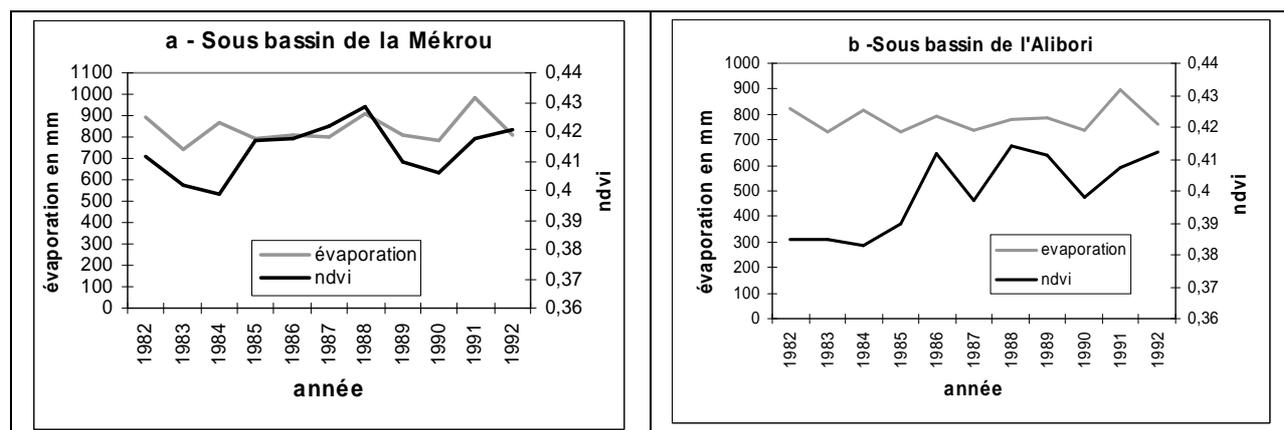


Figure 5.9 : Variabilité interannuelle NDVI et évaporation (1982-1992)

5.3.4.4. Evolution NDVI et écoulement

Dans tous les sous bassins, l'écoulement comme le NDVI connaissent la même légère tendance générale à la hausse entre 1982 et 1992 (exemples des sous bassins de la Mékrou et de la Sota à Gbassè) (Figure 5.10). Les deux variables marquent une évolution analogue sur les sous-périodes 1982-1985 et 1988-1992, avec une légère divergence en 1992 dans le sous bassin de la Mékrou. La différence entre NDVI et écoulement est marquée en 1986 et 1987. Dans le sous bassin de la Sota à Gbassè, les deux variables ont plutôt un comportement similaire sur six années (1983, 1985, 1988, 1990, 1991 et 1992), soient sur 50 % de la période d'étude. L'analyse montre globalement que les assez bonnes corrélations sont à la fois dues à des tendances communes et à des similitudes dans les variations d'une année à l'autre, au-delà de quelques exceptions.

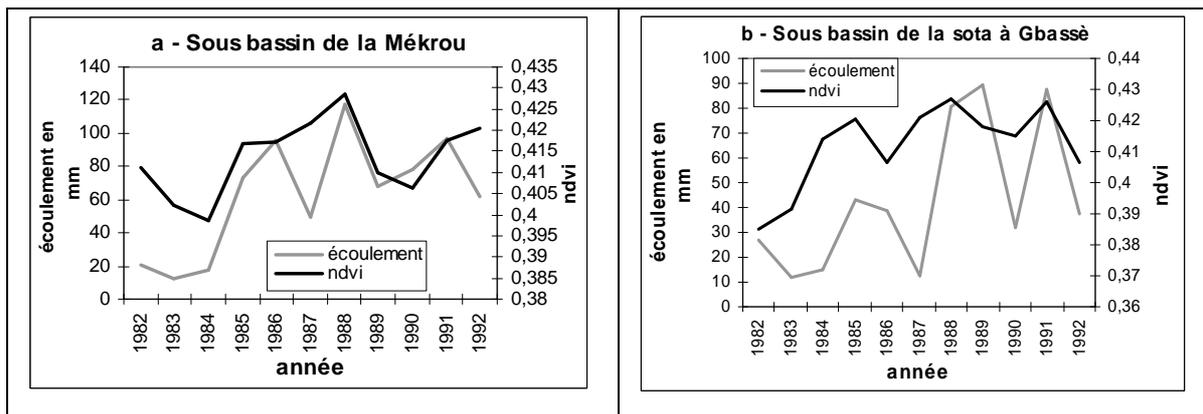


Figure 5.10 : Variabilité interannuelle NDVI et écoulement (1982-1992)

L'étude de l'évolution du NDVI et de la recharge pourra mettre en évidence l'utilisation des réserves en eau du sol par les végétaux, notamment pour la photosynthèse.

5.3.4.5. Evolution NDVI et recharge

La recharge, comme la pluie et l'écoulement, présente une tendance à la hausse sur la période 1982-1992 sur tous les sous bassins. On constate que la recharge et le NDVI ont un comportement semblable sur presque toute la période 1982-1992, sauf pour les années 1985, 1986 et 1992 dans le sous bassin de l'Alibori (Figure 5.11).

En revanche, dans les autres sous bassins, l'adéquation entre la variation du NDVI et de la recharge (hormis d'éventuelles tendances communes) est très médiocre, comme l'illustre le cas de la Sota à Gbassè.

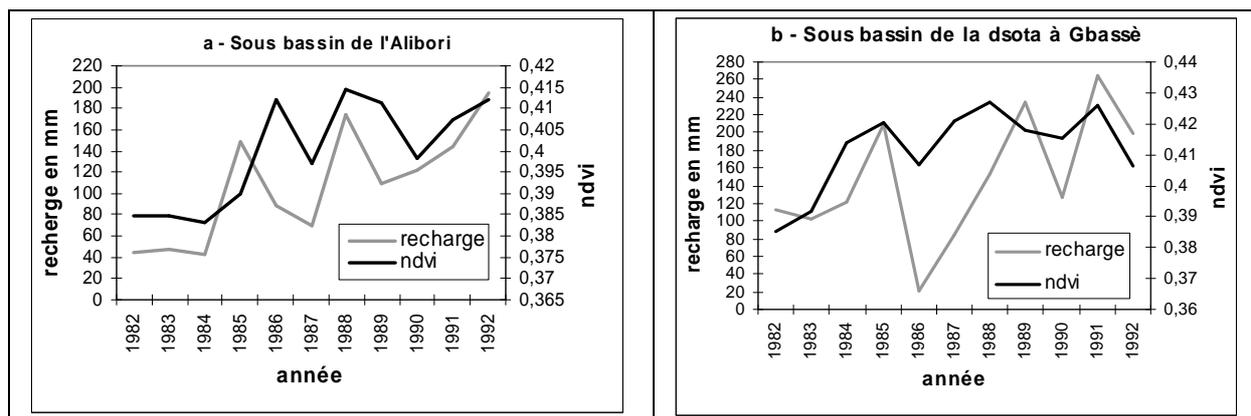


Figure 5.11 : Variabilité interannuelle NDVI et recharge dans le bassin (1982-1992)

L'évolution du NDVI et des différents termes du bilan hydrologique (pluie, écoulement, recharge) souligne que tous les paramètres connaissent une tendance à la hausse sur la période 1982-1992. L'évolution interannuelle du NDVI et des termes du bilan hydrologique n'est pas

toujours analogue sur toute la période, mais pourrait laisser penser à l'existence d'une relation entre le NDVI et ces variables. Cependant, dans la mesure où les variations des précipitations influencent directement celles des autres termes du bilan hydrologique, la relation entre le NDVI et les termes du bilan hydrologique peut être affirmée par l'étude des résidus du NDVI, de l'écoulement et de la recharge (valeur du NDVI, de l'écoulement et de la recharge indépendamment de la pluie) conduite avec une corrélation multiple partielle.

5.4. Evolution des résidus du NDVI et de quelques termes du bilan hydrologique dans le bassin du Niger au Bénin

Pour mieux comprendre le lien entre NDVI et écoulement et NDVI et recharge, nous avons appliqué la méthode de la corrélation partielle (présentée en détail dans le chapitre 2) afin d'extraire de ces trois paramètres la part de la pluie de l'année en cours. Trois étapes sont nécessaires.

D'abord, on doit appliquer une régression linéaire aux données de NDVI et de la pluie afin d'extraire les résidus du NDVI par rapport à la pluie (NDVI/p, valeur de NDVI sans l'effet de la pluie). Ensuite, le même exercice est réalisé sur l'écoulement et la pluie, dont la relation étroite a été présentée au chapitre 3, pour extraire les résidus de l'écoulement par rapport à la pluie (l'écoulement/p, valeur de l'écoulement indépendamment de la pluie). On renouvelle l'exercice en recherchant la corrélation entre les résidus NDVI/p et écoulement/p. Cette démarche est utilisée afin d'identifier le lien effectif pouvant exister entre les activités photosynthétiques (un aspect des états de surface) et les écoulements du bassin, indépendamment de la pluie. Elle revient à calculer le coefficient de corrélation partiel entre NDVI et écoulement, indépendamment de la pluie.

La connaissance de ces différentes relations nous permettra de répertorier les facteurs influençant les ressources en eau du bassin à mettre à la disposition des décideurs. Dans le contexte de la mise en œuvre de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) dans le bassin, les trois paramètres écoulement, recharge et NDVI traduisant l'activité photosynthétique sont d'une importance capitale car les ressources en eau dans ce contexte désignent les eaux (atmosphérique, de surface et souterraine), les terres et les écosystèmes associés (TOMETY *et al.*, 2006)).

5.4.1. Evolution interannuelle

L'analyse de corrélation à l'échelle annuelle entre les résidus de l'indice de végétation par rapport à la pluie et les résidus de l'écoulement/p donne un coefficient significatif dans le sous bassin de la Mékrou (0,63) et positif quoique plus faible dans les sous bassin de la Sota (Sota à Gbassè : 0,42 et Sota à Coubéri : 0,35). En revanche, ce coefficient est quasi nul dans le sous bassin de l'Alibori (0,071) (Tableau 5.4).

Par ailleurs, la corrélation résidus NDVI/résidus recharge n'est significative dans aucun des sous bassins.

Tableau 5.4 : Corrélation annuelle entre les résidus de NDVI, et les résidus d'écoulement et de recharge, indépendamment des variations des pluies (1982-1992)

Sous bassin	Géologie	Résidus NDVI/ résidus écoulement	Résidus NDVI/ résidus recharge
Mékrou	100 % socle (parc « W »)	0,63	-0,30
Alibori	100 % socle	0,071	0,49
Sota à Gbassè	80 % socle/20 % grès	0,42	0,11
Sota à Coubéri	93 % grès /7 % socle	0,35	-0,23

 Corrélation significative (au seuil de 95 %) supérieure à 0,50

En gras : Corrélation supérieure ou égale à 0,40 et inférieure à 0,50

La figure 5.12 montre que dans tous les sous bassins les résidus de NDVI/p (valeur de NDVI indépendamment de la pluie) et ceux de l'écoulement connaissent, à l'échelle annuelle, une légère hausse sur la période 1982-1992, qui correspond à une séquence de hausse pluviométrique.

Entre l'indice de végétation et l'écoulement, l'étude de l'évolution interannuelle des résidus des deux paramètres ne montre aucune relation claire. Sur seulement quelques années (1986, 1987, 1988, 1989), les deux indices présentent une similitude dans leur évolution dans les sous bassins de la Mékrou, de la Sota à Gbassè et de la Sota à Coubéri (Figure 5.12 a, b, d). Ces années-là, la réserve en eau des premiers horizons du sol a sans doute été suffisante pour l'activité photosynthétique du couvert végétal, sans avoir besoin de puiser dans l'écoulement de surface : à une augmentation d'écoulement correspond une augmentation d'indice de végétation. Ce fonctionnement semble être dominant pour le sous bassin de la

Mékrou comme l'atteste la corrélation (0,63). Il n'y a pas ici de compétition entre les végétaux et l'écoulement dans l'utilisation de la ressource en eau, tout au contraire. Ces résultats amènent une hypothèse : un changement d'occupation des sols induirait-il plus d'activité photosynthétique pouvant se traduire par une augmentation de l'écoulement ? Nous n'avons pas les éléments de réponse nécessaires pour vérifier cette hypothèse, notamment parce que la série dont nous disposons est trop courte.

Dans le sous bassin de l'Alibori qui repose sur les formations imperméables du socle, la végétation peut puiser directement dans l'écoulement de surface, ce qui peut expliquer le déphasage entre l'évolution des résidus des indices de végétation et celle des résidus d'écoulement (Figure 5.11b) : ici, certaines années de baisse d'écoulement correspondent à une augmentation de l'activité végétative, comme en 1986 et 1992. Mais la relation n'est pas systématique, comme le montre la corrélation proche de zéro, qui ne permet pas de conclure à une influence de la végétation sur l'écoulement.

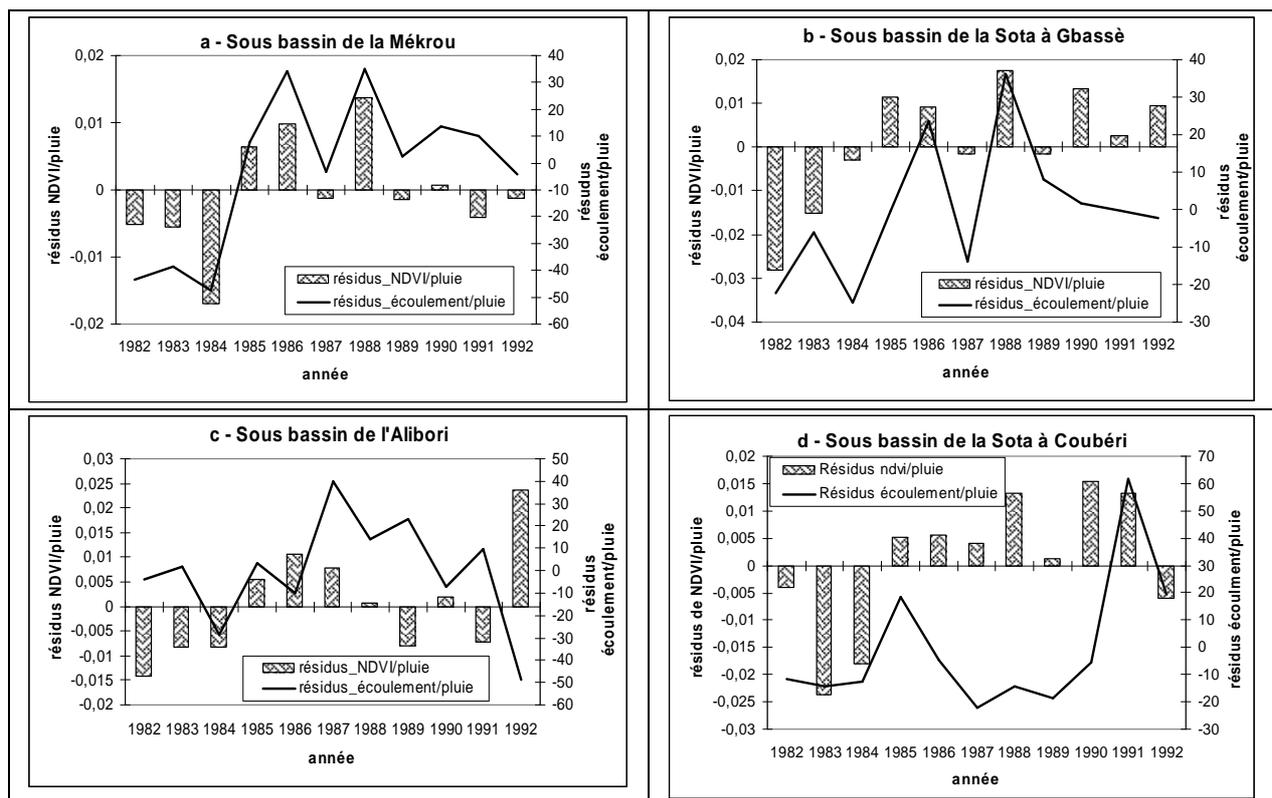


Figure 5.12 : Variabilité interannuelle des résidus NDVI/p et des résidus d'écoulement/p dans le bassin du Niger

5.4.2. Cycle saisonnier

Au pas de temps mensuel, la figure 5.13 présente l'évolution des résidus du NDVI/p et des résidus de l'écoulement/p pour tous les sous bassins. On note une première phase d'évolution en opposition des deux indices de janvier à mi-août. Cette période se caractérise par des écoulements nuls et une très faible activité photosynthétique, alors que la pluie est en hausse et que les réservoirs profonds alimentant principalement la végétation arborée ne sont pas encore remplis.

La seconde phase de mi-août à décembre est marquée par une évolution presque semblable des deux paramètres avec un décalage dans le temps entre les maxima des deux indices. Le bilan climatique est excédentaire et génère d'écoulement. Cependant, l'activité photosynthétique est plus importante car il y a un prélèvement des réserves principalement par la végétation arborée.

Au total, on voit que si l'activité photosynthétique et l'écoulement présentent une réponse retardée par rapport à la pluie, celle-ci n'est pas synchrone.

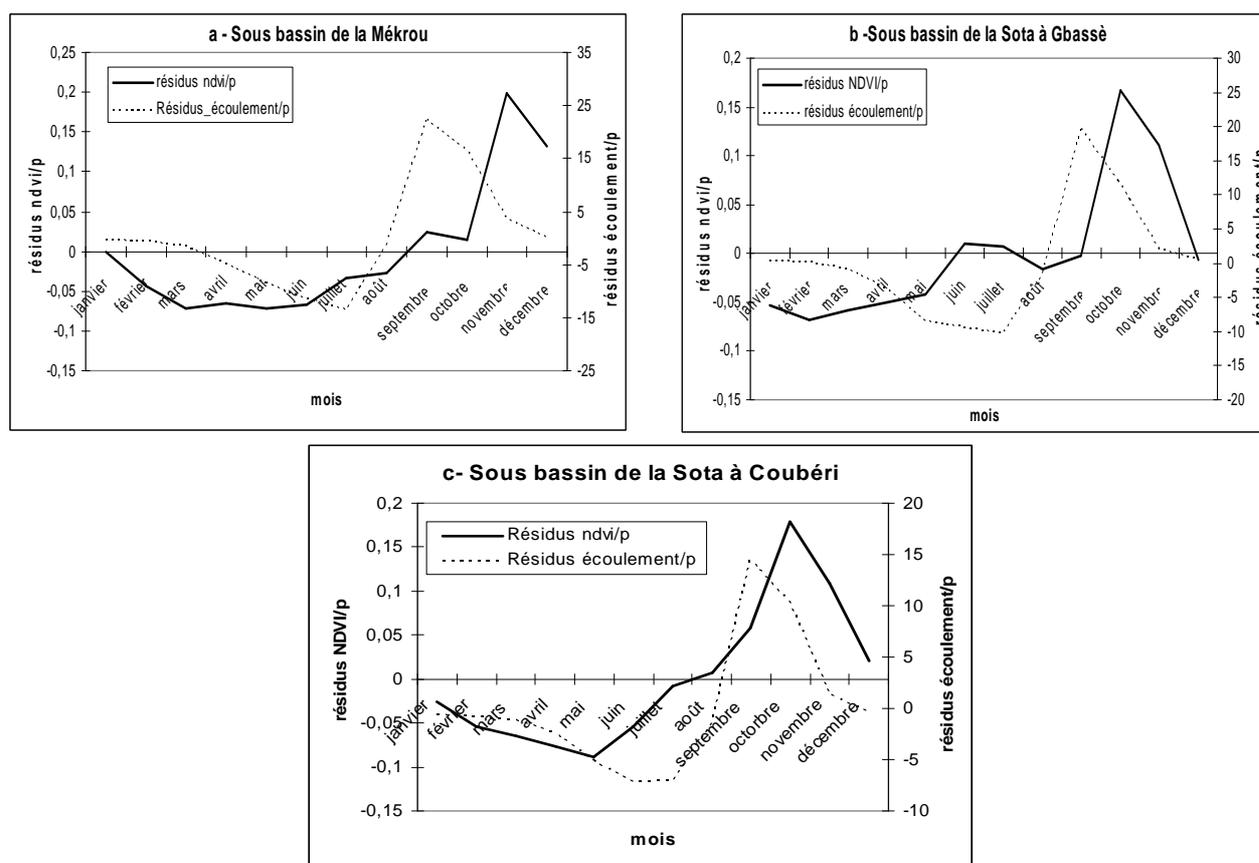


Figure 5.13 : Variabilité intermensuelle des résidus NDVI/p et des résidus d'écoulement/p dans le bassin du Niger

Compte tenu de la série limitée de données de NDVI (onze années, de 1982 à 1992), nous ne pouvons tirer de conclusions définitives de ces résultats qui montrent pourtant une influence plutôt faible de l'activité photosynthétique sur l'écoulement à quantité de pluie égale d'une année sur l'autre dans tous les sous bassins.

L'analyse du NDVI de chaque type d'occupation du sol peut fournir des informations complémentaires sur les relations entre les états de surface et les écoulements du bassin.

5.5. Variabilité du NDVI et des paramètres du bilan hydrologique, pour quelques types d'occupations du sol

Compte tenu de l'importance des états de surface dans la constitution de l'écoulement en zone tropicale (CASENAVE *et al.*, 1989), il est indispensable d'étudier les effets de l'évolution saisonnière des états de surface sur le comportement hydrodynamique des sous bassins (LAMACHERE, 1994). Cette étude nécessite la détermination du NDVI pour quelques types d'occupation du sol de chaque sous bassin. Celle-ci est réalisée par l'identification d'un carré de 6 km de côté (cf. Figure 5.1) dans chaque type d'occupation du sol de chacun des sous bassins. Il s'agit ici des portions de type d'occupation du sol n'ayant pas changé sensiblement entre 1979 et 1992. Nous avons choisi trois types d'occupation du sol représentatives : forêt dense, savane arborée et mosaïque de cultures et jachères.

Ce choix est guidé par l'importance de la superficie de ces types d'occupation du sol et leur dynamique entre 1979 et 1992 (voir plus haut Tableau 5.1).

5.5.1. Evolution comparée du NDVI des types d'occupation des sols

A l'échelle mensuelle, dans tous les sous bassins (exemple de l'Alibori en figure 5.14), le NDVI de la savane arborée et celui de la mosaïque de cultures et de jachères croissent à partir d'avril pour atteindre leurs maxima en septembre, juste avant d'amorcer une baisse rapide jusqu'en décembre. Dans le sous bassin de l'Alibori, le NDVI de la forêt dense présente une évolution différente de celle des autres types d'occupation du sol et varie très peu, entre 0,4 et 0,5. De janvier à décembre, la forêt dense présente une très faible variation saisonnière car elle est soit classée ou soit sacrée.

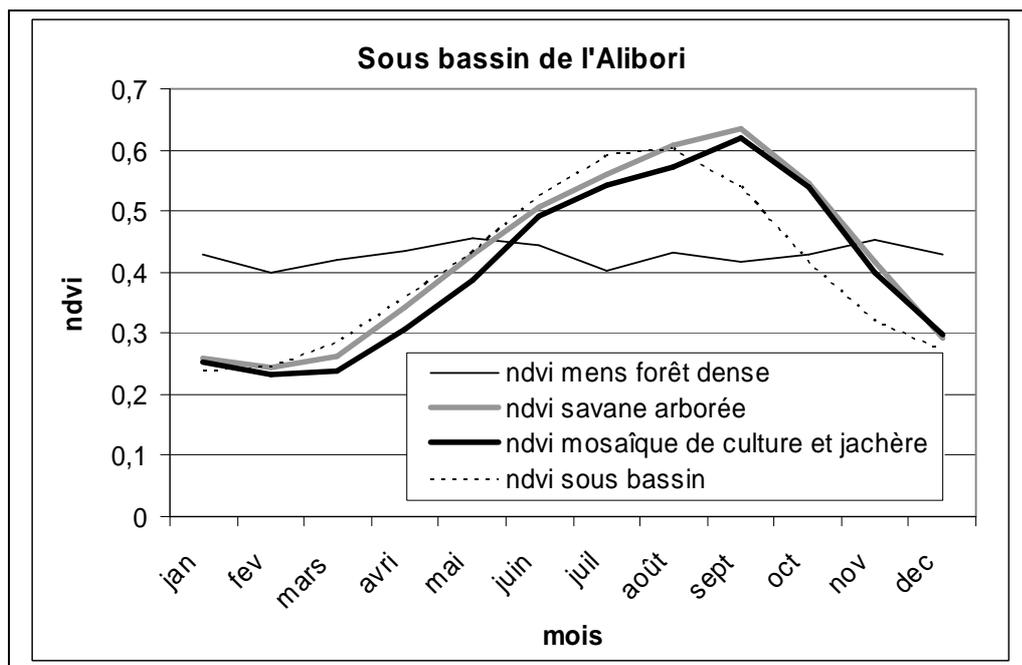


Figure 5.14 : Variabilité intermensuelle du NDVI des sous bassins et du NDVI des types d'occupation du sol choisis

Dans l'ensemble des sous bassins, le NDVI du bassin et les NDVI de tous les types d'occupations du sol choisis présentent une faible variation (0,35 à 0,45) sur la période 1982-1992 (Figure 5.15), montrant une légère hausse de 1982 à 1992, toutefois très peu perceptible. On note que le NDVI moyen de tous les types d'occupation du sol est différent de ceux des types d'occupation du sol sélectionnés qui n'ont pas sensiblement changé sur la période. Cette différence peut faire penser au fait que le NDVI de l'ensemble des types d'occupation du sol dépendrait beaucoup plus des types d'occupation du sol dégradés que de ceux n'ayant pas substantiellement changé entre 1979 et 1992.

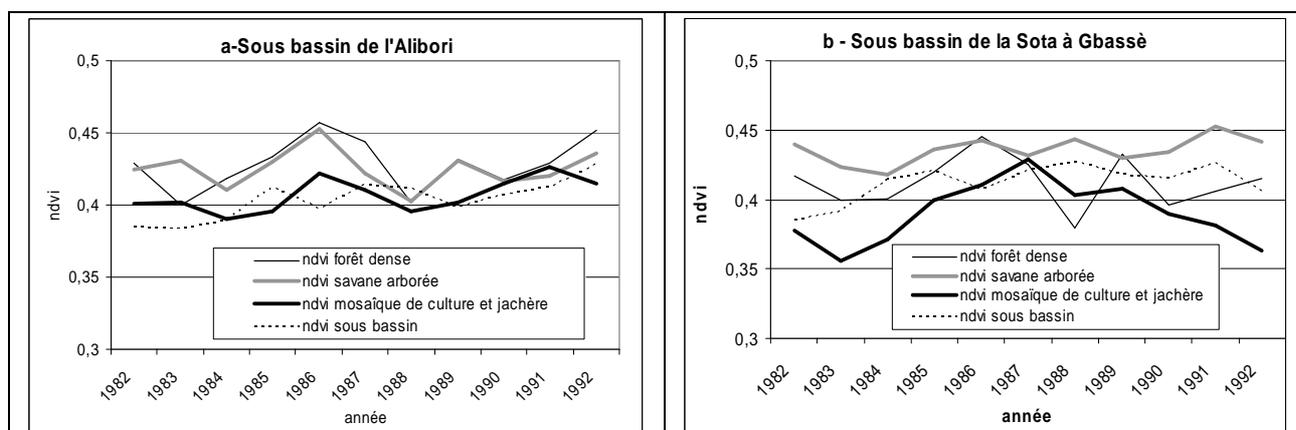


Figure 5.15 : Variabilité interannuelle du NDVI des sous bassins et du NDVI des types d'occupation des sols choisis

Nous tentons ici de comparer l'évolution du NDVI de la forêt non dégradée entre 1982 et 1992 et celui de la forêt dégradée.

L'étude saisonnière du NDVI de la forêt dense non dégradée et celui de la forêt dense dégradée entre 1982 et 1992 dans le sous bassin de l'Alibori (Figure 5.16) montre une différence nette entre l'évolution des deux types d'occupation du sol. Le NDVI de la forêt non dégradée garde une stabilité sur l'année, variant très peu de janvier à décembre. En revanche, le NDVI de la forêt dégradée amorce sa croissance en février-mars pour atteindre son maximum en septembre avant de baisser d'octobre à décembre.

L'analyse de la variabilité interannuelle confirme cette différence sensible car, de 1982 à 1992, le NDVI de forêt non dégradée reste supérieur à celui de la forêt dégradée sur la période (Figure 5.17). Toutefois, la superficie très faible des forêts en 1992 ne nous autorise pas à une analyse plus approfondie de ces résultats. On note aussi que les sous bassins de la Mékrou et la Sota à Coubéri n'ont plus de forêts en 1992, et que le sous bassin de la Sota à Gbassè ne présente plus de superficie homogène représentative cette même année. Ceci, explique l'absence de graphique.

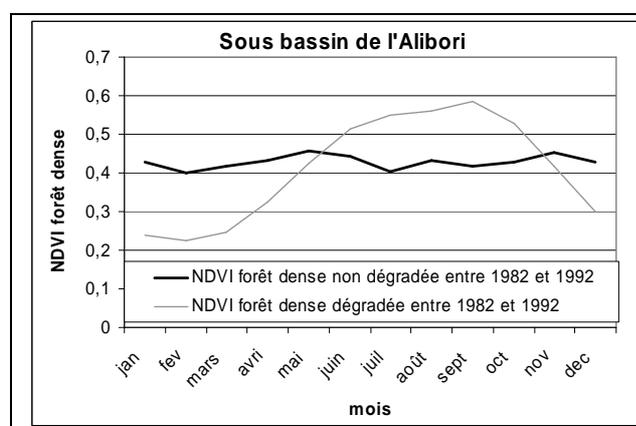


Figure 5.16 : Variabilité mensuelle du NDVI des forêts denses dans le sous bassin de l'Alibori

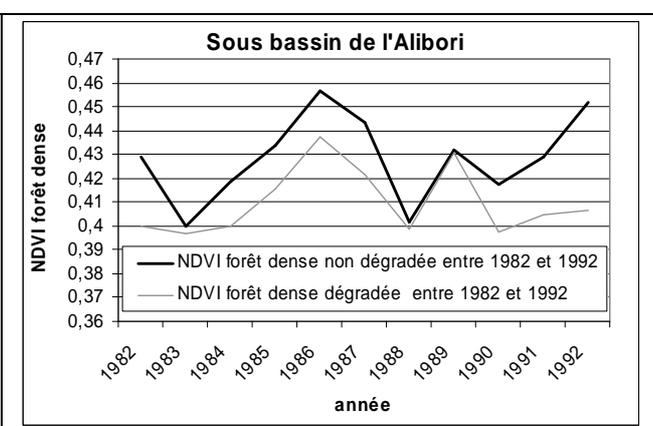


Figure 5.17 : Variabilité interannuelle du NDVI des forêts denses dans le sous bassin de l'Alibori

L'étude de l'évolution du NDVI des autres types d'occupation du sol dans l'ensemble des sous bassins ne présente pas de différence entre le NDVI des types dégradés et celui des types non dégradés.

L'analyse de la corrélation du NDVI des types d'occupation du sol et des termes du bilan hydrologique permettra de rechercher d'éventuelles relations entre eux.

5.5.2. Corrélation de la pluie, de l'écoulement et du NDVI des différents types d'occupation du sol

Une analyse des relations existant entre les le NDVI des types d'occupation du sol, la pluie et l'écoulement à l'échelle annuelle révèle un très faible lien entre l'écoulement, les hauteurs de pluie et l'activité photosynthétique des mosaïques de cultures et celles des formations naturelles (forêt arborée et forêt dense). Seul l'écoulement présente une relation plus nette mais non significative avec l'activité photosynthétique des mosaïques de cultures et jachères dans le sous bassin de la Mékrou ($r=0,48$). Le coefficient de corrélation avec les unités de la savane arborée dans le sous bassin de la Sota à Gbassè est meilleur ($r=0,56$ significatif au seuil de 95 %) (Tableau 5.6). Dans le sous bassin de l'Alibori, il existe une relation entre la pluie et l'activité photosynthétique des cultures et jachères ($r=0,67$).

Tableau 5.6 : Corrélation des NDVI des types d'occupation du sol, de la pluie et de l'écoulement du bassin au pas de temps annuel

Sous bassins	Paramètres du bilan hydrologiques	NDVI des types d'occupation du sol		
		mosaïque de cultures et de jachère	savane arborée	forêt dense
Mékrou	pluie	0,28	0,05	
	écoulement	0,48	0,07	
Alibori	pluie	0,67	0,38	0,04
	écoulement	0,21	-0,27	-0,10
Sota à Gbassè	pluie	0,01	0,35	-0,02
	écoulement	0,24	0,56	-0,05
Sota à Coubéri	pluie	-0,17	0,22	
	écoulement	-0,31	0,29	

 corrélation significative (au seuil de 95 %) supérieure à 0,50

En gras : corrélation supérieure ou égale à 0,40 et inférieure à 0,50

L'analyse de la variabilité des NDVI des types d'occupation du sol et des différents paramètres hydroclimatiques précise ces résultats.

5.5.3 Variation du NDVI des types d'occupation du sol, de la pluie et des écoulements

Le NDVI de la mosaïque de cultures et de jachères dans le sous bassin de la Mékrou présente, sur trois années seulement (1982, 1988, 1989), une évolution analogue à celle de la pluie (Figure 5.18). Dans l'ensemble du bassin, les cultures étant saisonnières, on pourrait admettre qu'il n'y ait pas de lien annuel direct entre les activités végétatives et la pluie.

A l'échelle annuelle, les indices de mosaïques de cultures et de jachères dans les sous bassins de la Sota à Gbassè et Coubéri ne présentent aucune similitude perceptible avec l'évolution de l'écoulement des dits sous bassins. En quelques années de la période 1982-1992, seul le sous bassin de la Mékrou (Figure 5.18) présente un lien apparent entre les NDVI des mosaïques de cultures et jachères et l'écoulement.

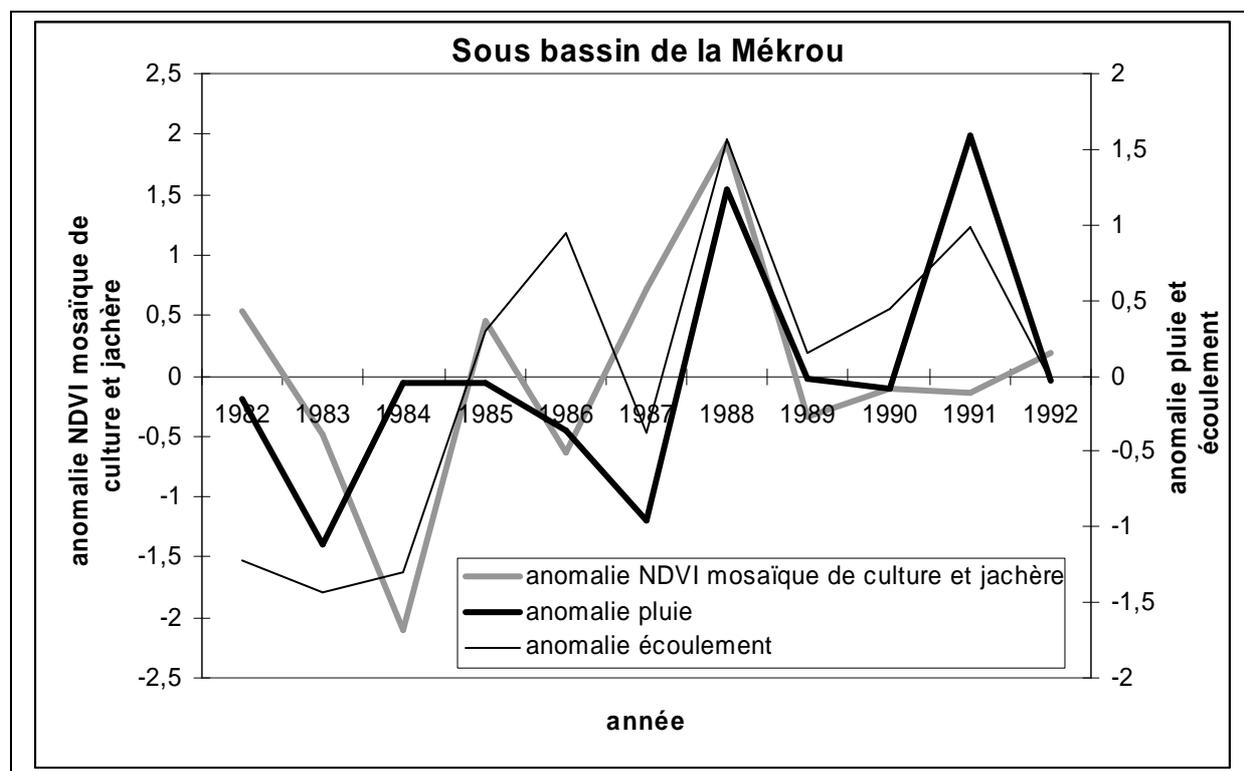


Figure 5.18 : Variabilité interannuelle du NDVI de mosaïques de cultures et jachères, de la pluie et de l'écoulement (1982-1992)

Les jachères sont la cause des faibles ruissellements à l'échelle du bassin versant. Ainsi, une diminution trop forte des superficies peut accroître, dans des proportions importantes, les ruissellements locaux ou régionaux accompagnés de manifestations érosives spectaculaires (FOURNIER *et al.*, 2000). Dans cette étude, nous n'avons pas pu séparer les cultures des surfaces de jachères ce qui aurait permis de mettre en évidence cet aspect.

Conclusion

Dans le bassin du fleuve Niger au Bénin, les conséquences hydrologiques des modifications des états de surface ont été, jusqu'ici, peu étudiées. Malgré l'insuffisance de nos données (images satellitales, photographies aériennes) et seulement deux missions effectuées sur le terrain (1979 et 1992), nous avons tenté d'analyser l'impact de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger.

Nous avons d'abord montré que les types d'occupation du sol ont beaucoup changé entre 1979 et 1992. Ainsi, l'étude a révélé une régression sensible des formations végétales naturelles (forêt et savane arborée) et une progression marquée des formations anthropiques (mosaïques de cultures et de jachères) entre 1979 et 1992. Cette dynamique des types d'occupation du sol est, en grande partie, liée à la croissance démographique qui induit des défrichements pour la recherche de terres arables.

Ensuite, l'étude des corrélations NDVI/écoulement et résidus NDVI/résidus écoulement, indépendamment de la pluie, révèle une relation significative dans les sous bassins de la Mékrou et de la Sota à Gbassè.

Les valeurs des coefficients de corrélation entre NDVI et écoulement (Sota à Gbassè : 0,55 et Mékrou : 0,70) traduisent l'existence d'une relation entre les deux paramètres. Cette relation est confirmée par l'étude des résidus (Sota à Gbassè : 0,42 et Mékrou : 0,63). Ces résultats montrent qu'il existe un lien entre l'activité photosynthétique et l'écoulement, indépendamment de la pluie. Ainsi, l'activité photosynthétique et l'écoulement ont une évolution semblable : les années où l'écoulement est important correspondent à celles où l'activité photosynthétique est supérieure à la normale.

Enfin, l'analyse du NDVI de chaque type d'occupation du sol, donné par un indice de végétation, met en lumière des relations entre les types d'occupation du sol et l'écoulement dans les sous bassins de la Mékrou et de la Sota à Gbassè. Cependant, compte tenu des données de NDVI, ne reflétant pas totalement les états de surfaces, mais seulement l'activité photosynthétique, cette étude mérite d'être approfondie grâce à des données plus précises pour confirmer ou infirmer ces résultats.

Conclusion générale

Cette thèse qui s'inscrit dans la recherche sur l'évolution des ressources en eau a pour objectif principal d'établir un diagnostic du fonctionnement hydrologique des sous bassins hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger dans le contexte de la péjoration pluviométrique qui a sévèrement touché l'Afrique subsaharienne depuis les décennies 1970 et 1980. Elle vise la caractérisation de la variabilité hydro-climatique observée sur la période 1955-1992, la modélisation des écoulements à partir des modèles hydrologiques GR4J et GR2M et l'impact de la dynamique des états de surface sur les écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger. Pour atteindre ces objectifs, cette étude s'est appuyée sur des jeux de données très variés : météorologiques (pluie, température, humidité relative, évapotranspiration potentielle, évapotranspiration réelle), hydrologiques (écoulement, recharge) et des états de surface (superficie des types d'occupation du sol, NDDVI).

L'étude de la caractérisation de la variabilité hydro-climatique montre que les déficits pluviométriques des décennies 1970 et 1980 ont été largement amplifiés dans les écoulements de toutes les rivières du bassin béninois du fleuve Niger. Par exemple, dans le sous bassin de la Mékrou, pour un déficit pluviométrique de -12 % durant la sous-période 1973-1992 par rapport à 1955-1972, on a enregistré un déficit d'écoulement de -72 %, soit six fois le déficit pluviométrique ; dans le sous bassin de la Sota à Gbassè, pour un déficit pluviométrique de -15 %, on enregistre un déficit d'écoulement de -66 %, soit plus de quatre fois celui de la pluie. Ce même déficit pluviométrique est particulièrement amplifié dans la recharge du sous bassin de la Sota à Coubéri : le déficit de la recharge entre les deux sous périodes représente près de cinq fois celui de la pluie. Les déficits de l'écoulement et de la recharge sont beaucoup plus forts que ceux des pluies, ce qui suggère une diminution importante des aquifères et de leurs niveaux piézométriques.

L'étude a aussi montré que les déficits pluviométriques de la sous période 1973-1992 par rapport à la sous période 1955-1972 se concentrent sur les quatre mois (juin, juillet, août, septembre) les plus arrosés au cœur de la saison des pluies, représentant à eux seuls plus de 70 % des totaux pluviométriques annuels (74,4 % pour la Mékrou, 79,3 % pour l'Alibori, 76 % pour la Sota à Gbassè et 83 % pour la Sota à Coubéri). Cela met en évidence le rôle déterminant de ces mois dans la péjoration pluviométrique des décennies 1970 et 1980.

Les corrélations entre les termes du bilan hydrologique présentent sur l'ensemble du bassin des valeurs élevées : la corrélation pluie/écoulement est de 0,86 dans le sous bassin de l'Alibori et de 0,77 dans le sous bassin de la Sota à Gbassè ; et enfin la corrélation pluie/recharge est de 0,80 dans le sous bassin de la Sota à Coubéri et de 0,70 dans celui de la

Sota à Gbassè ; la corrélation écoulement/recharge est de 0,60 dans le sous bassin de la Sota à Coubéri. La dépendance de l'écoulement de la pluie brute dans les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota à Gbassè est cependant beaucoup plus importante que celle observée dans le sous bassin de la Sota à Coubéri. Dans ce dernier, on note, en revanche, une forte liaison entre écoulement et recharge, ce qui n'est pas le cas des autres sous bassins situés presque entièrement sur des formations de socle.

On a montré que la sécheresse pluviométrique observée dans le bassin béninois du fleuve Niger au cours des décennies 1970 et 1980 a entraîné une sécheresse hydrologique sévère. Celle-ci s'est manifestée par une tendance à la hausse des coefficients de tarissement et par une réduction sensible de la durée de tarissement. Par exemple, la durée de tarissement du sous bassin de la Sota à Coubéri est de 105,66 jours sur la période 1955-1992, alors que LE BARBE *et al.* (1993) avaient trouvé, pour le même sous bassin, 142 jours sur la période 1951-1984.

Le fonctionnement hydrologique du bassin semble donc aussi étroitement lié aux deux types de formations géologiques drainées par ces cours d'eau : le socle et les grès.

Sur le socle, les ressources en eau superficielle montent rapidement avec la pluie puis à partir d'un seuil, elles conduisent à un écoulement élevé, mais elles s'amenuisent rapidement quand cessent les apports pluvieux. Ainsi, les débits d'étiage sont nuls et le coefficient d'écoulement enregistre une baisse sensible sur la période 1955-1992 dans tous les sous bassins coulant sur ces formations (Mékrou et Alibori). On pourrait aménager sur ces rivières des barrages hydro-électriques compte tenu du fort écoulement et de la faible infiltration qui les caractérise.

Sur les grès, les apports pluvieux s'infiltrent pour alimenter l'écoulement souterrain dans les différentes couches de grès. Cette importante réserve souterraine alimente le cours d'eau pendant la saison sèche. On note ainsi un écoulement pérenne dans ce sous bassin drainant les grès (Sota à Coubéri). De ce fait, l'écoulement est lié à la pluie et à la recharge. On ne peut pas installer sur cette rivière de barrage hydro-électrique à cause de l'importance de l'infiltration et du faible écoulement. La tendance à la baisse du coefficient d'écoulement sur la période 1955-1992 est peu perceptible dans ce sous bassin. Toutefois, on peut y aménager des barrages hydro-agricoles ou agro-pastoraux.

On a utilisé les modèles GR4J et GR2M pour la simulation des écoulements et pour la recherche de tendance dans le comportement hydrologique des sous bassins. L'étude de

l'efficacité des modèles GR4J et GR2M à simuler les écoulements moyens des sous bassins du Niger au Bénin donnée par l'analyse du critère de Nash appliqué aux écoulements donne des valeurs satisfaisantes (supérieures à 60 % pour la plupart). On peut donc dire que les modèles GR4J et GR2M présentent une certaine efficacité à simuler les écoulements aux pas de temps journalier et mensuel. Toutefois, les Nash sur les écoulements moyens journaliers avec le modèle GR4J sont largement améliorés au pas de temps mensuel avec le GR2M.

La mauvaise prédiction des hautes eaux par les modèles peut être liée au choix du critère de Nash (Nash racine carrée de l'écoulement) retenu pour l'optimisation, et à la qualité des données d'entrée des modèles, par exemple aux imperfections du réseau pluviométrique utilisé pour le krigeage.

Dans les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota à Coubéri, les modèles ont identifié une tendance nette à la baisse du système hydrologique. Toutefois, on ne doit pas toutefois négliger les limites des résultats obtenus puisque les tests statistiques n'ont pas pu identifier avec les modèles, une tendance dans le sous bassin de la Sota à Gbassè.

L'avantage des deux modèles pluie-débit (GR4J et GR2M) retenus dans ce travail réside dans leur simplicité d'utilisation. Ils ne présentent que quelques paramètres à caler et nécessitent seulement deux données d'entrée, la pluie et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Pour travailler sur des bassins versants de plusieurs milliers de kilomètres carrés, ils s'avèrent être des outils parfaitement adaptés, comme l'a montré PERRIN (2000).

Cependant, les résultats obtenus pour la simulation des écoulements réalisée sous forçage climatique ont fait ressortir les limites principales des modèles liées au calage-validation. Une voie d'amélioration des modèles pourrait être la prédétermination des valeurs des paramètres à partir des informations disponibles par télédétection.

Nous avons tenté d'établir si la tendance observée dans le comportement hydrologique des sous bassins pouvait être imputable à l'impact des changements climatiques et/ou à l'évolution du couvert végétal, liée aux pratiques culturales, ce qui nous a conduit à prendre en compte l'impact de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger.

Notre étude a montré que les types d'occupation du sol ont connu de grands changements entre 1979 et 1992, avec une régression sensible des formations végétales naturelles (forêts et savanes arborées) et une progression marquée des formations anthropiques (mosaïques de cultures et de jachères) pour la même période. Cette dynamique des types d'occupation du

sol est, en grande partie, liée à la croissance démographique qui induit des défrichements pour la recherche de nouvelles terres cultivables. S'appuyant sur les résultats des travaux antérieurs qui ont montré que les forêts jouent un rôle modérateur sur l'écoulement et facilitent l'infiltration et que, à l'opposé, leur dégradation entraîne l'augmentation de l'écoulement et de l'évaporation au détriment de l'infiltration, accroissant ainsi l'érosion, nous avons aussi tenté de trouver des relations entre écoulement et NDVI.

La recherche de corrélations NDVI/écoulement et résidus NDVI/résidus écoulement indépendamment de la pluie, souligne une relation significative dans les sous bassins de la Mékrou et de la Sota à Gbassè. Les valeurs assez élevées des coefficients de corrélation entre NDVI et écoulement (Sota à Gbassè : 0,55 et Mékrou : 0,70) sont voisines de celles obtenues entre leurs résidus (Sota à Gbassè : 0,42 et Mékrou : 0,63). Ces résultats montrent qu'il existe un lien entre l'activité photosynthétique et l'écoulement, indépendamment de la pluie dans ces sous bassins.

Nous avons aussi analysé les liens entre l'écoulement et le NDVI pour chaque type d'occupation du sol, à partir d'indices de végétation très utilisés car faciles à mettre en œuvre, et nous avons identifié l'existence de relations entre l'activité photosynthétique des mosaïques de cultures et de jachères et la pluie dans le sous bassin de l'Alibori ($r = 0,67$), et entre l'activité photosynthétique de la savane arborée et l'écoulement dans les sous bassins de la Sota à Gbassè ($r = 0,56$) et de la Mékrou ($r = 0,48$). Cependant, dans les sous bassins de l'Alibori et de la Sota à Coubéri, nous n'avons pas pu mettre en évidence de lien significatif entre l'activité photosynthétique des types d'occupation du sol et l'écoulement.

Nous constatons que nos résultats sont bien limités par les données de NDVI qui ne reflètent que l'activité photosynthétique du couvert végétal. Nos résultats ne montrent donc pas clairement l'influence de la dynamique des états de surface sur l'écoulement. Cette étude mériterait d'être approfondie avec des données d'états de surface plus précises (par télédétection) et des séries plus longues, pour des résultats sans ambiguïté.

On remarque que la dynamique des états de surface et leur comportement hydrodynamique restent encore des domaines peu explorés, et offrent donc, dans le bassin du fleuve Niger au Bénin, de riches perspectives aux chercheurs désireux d'y consacrer leurs travaux. C'est dans cette perspective que nous envisageons une collaboration avec Gil MAHE de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), spécialiste de ces questions, qui nous permettra d'acquérir des données satellitales sur notre domaine, la maîtrise de méthodes

de détermination de l'écoulement intégrant les états de surface, et nous permettra surtout de profiter de sa riche expérience sur cet axe de recherches.

Au terme de cette étude, nous retenons qu'il reste plusieurs inconnues qui limitent encore notre compréhension du système hydrologique du bassin béninois du fleuve Niger : (1) l'évapotranspiration, composante majeure du bilan hydrologique, aujourd'hui encore mal connue ; (2) une autre piste qui mérite d'être explorée dans nos futures recherches, c'est l'influence directe de la couverture végétale sur le bilan d'énergie à l'interface à travers l'albédo et, par-là, l'ETP de référence, autrement dit tous les termes du bilan hydrologique ; (3) le devenir des eaux profondes, qui ne semblent pas alimentées entièrement les rivières à l'échelle du bassin béninois du fleuve Niger ; (4) l'éventualité d'un drainage régional est, en particulier, à étudier dans l'avenir.

Nous proposons pour les deux premiers axes de recherches la détermination de l'évapotranspiration par la méthode de la relation simplifiée de LECONTE (2000) qui intègre les éléments du bilan hydrique et les paramètres du bilan énergétique, et l'évapotranspiration potentielle de référence. Pour cela, une collaboration avec Sylvie GALLE, chercheur à l'IRD et spécialiste des questions de flux dans le programme AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine), nous permettra d'acquérir de plus amples connaissances dans ce domaine.

Pour les axes 3 et 4, nous envisageons de faire une étude comparée de la partie béninoise du fleuve Niger et de celle du Niger. Une étude approfondie du bassin du Niger à Malanville nous permettra d'apprécier le comportement de ce fleuve à la frontière bénino-nigérienne et d'avoir une idée du devenir de l'eau infiltrée dans le bassin de la Sota qui n'alimente pas cette rivière. Une collaboration avec Monsieur Robert DESSOUASSI, chargé de la base de données à l'ABN (Autorité du Bassin du Niger) nous permettra d'avoir les données nécessaires pour cette étude. Aussi projetons-nous un stage de perfectionnement auprès de Monsieur Abou AMANI du Centre Régional AGRHYMET à Niamey afin d'améliorer nos connaissances de l'étude des états de surface et de leur comportement hydrodynamique.

Bibliographie

- ADAM K S., BOKO M., 1993. Le Bénin. Paris, Edicef, 2ème édition, 93 pages.
- ADJINACOU C., ONIBON H., 2004. Etude multisectorielle pour le développement durable dans la portion béninoise du bassin du fleuve Niger : analyse des opportunités et des contraintes. Autorité du Bassin du fleuve Niger (ABN)/DG-Eau, COTONOU, 176 pages.
- AFOUDA A., ADISSO P., 1997. Etude stochastique des structures de séquences sèches au Bénin. *Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty. IAHS Publ. N° 240*, pp. 153-162.
- AFOUDA F., 1990. L'eau et les cultures dans le Bénin central et méridional : étude de la variabilité des bilans de l'eau dans leur relation avec le milieu rural de la savane africaine. Thèse de Doctorat nouveau régime, Paris IV-Sorbone, 428 pages.
- AGLI H., 1995. Recherches sur la variabilité pluviométrique dans le bassin-versant du Niger au Bénin. Mémoire du DEA "climats et contraintes climatiques", Centre de Recherche de Climatologie, Dijon, 48 pages.
- AIFAN H., 1993. Climat, ressources en eau et développement agricole dans le Moyen-Bénin, Mémoire de D.E.A "Climats et Contraintes Climatiques". Centre de Recherches de Climatologie, Université de Bourgogne, Dijon, 161 pages.
- ALBERGEL J., 1987. Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface : application aux petits bassins du Burkina-Faso. *the Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrology Regime and Water Resources (Proc Vancouver Symposium). IAHS Publ n°168*, pp. 355-365.
- ALBERGEL J., DACOSTA H., 1995. Les écoulements non pérennes sur les petits bassins du Sénégal, *IAHS*, n°238, ORTOM, pp. 139-156.
- ALIDOU S., 1983. Etude sédiementologique, paléogéographique du bassin intracratonique paléozoïque mésozoïque de Kandi (Nord-Est du Bénin - Afrique de l'Ouest), *Thèse de Doctorat*, université de bourgogne, Dijon, 245 pages.
- AMANI A., 1995. Estimation des pluies au sahel. Quelques problèmes de modélisation analysés à partir des données de l'expérience EPSAT - NIGER. *PhD. Thesis Genie Civil*, Ecole Polytechnique, Université de Montréal, Canada, 253 pages.
- AMBERGEON D., DZIETARA S., JANICOT S., 1981. Comportement du champ de vent sur l'Afrique Occidentale. *La Météorologie*, Vième série. N°25, pp. 69-82.
- AMBROISE B., 1999. Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré. 2. Modélisation systémique et dynamique. *Rev. Sci. Eau* 12 1, pp. 123-153.
- ANDREASSIAN V., 2002. Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de doctorat, Université de Paris 6, 276 pages.
- ANDREASSIAN V., 2004. Couvert forestier et comportement hydrologique des bassins versants. *La Houille Blanche*, n°2, pp.31-35.
- ANDREASSIAN V., 2004. Trois énigmes de modélisation hydrologique – The riddles in hydrological modelling. Mémoire d'Habilitation à Diriger les recherches, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 253 pages.
- ANDREASSIAN V., PARENT E., MICHEL C., 2003. A distribution-free test to detect gradual changes in watershed behaviour. In *Water Resources research*, vol.39, n°. 9, 1252, doi :10.1029/2003WR002081. pp. 1-11.
- ARDOIN S., DEZETTER A., SERVAT E., BOCQUILLON C., 2001. Redéfinition des fonctions de production des modèles globaux de relation pluie-débit en milieu semi-aride africain. *C.R. Acad. Sci. Paris, Série II* 333 10, pp. 611-616.
- ARDOIN-BARDIN S., 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. *Thèse de doctorat*, Université Montpellier II, Montpellier, 240 pages.
- ARVOR D., DUBREUIL V., 2006. Apport des images NDVI du satellite SPOT-végétation à l'étude de l'impact des précipitations sur les rendements de soja au Mato Grosso. *Interactions Nature-Société, analyse et modèles*, LETG, *La Baule*, pp. 1-6.

- ASECNA, 1973. La structure continue de l'équateur météorologique sur l'Afrique tropicale. *Bur. d'étude DEM*. N° 29, 120 pages.
- ASSANI A. A., 1999. Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation austral et océanique. El Nino/Nina). *Sécheresse*, 10(4), pp. 245-252.
- AZONTONDE H A., 1991. Propriétés physiques et hydrauliques des sols du Bénin. In Soil Water Balance in the sudano-sahelian zone (proceedings of the Niamey Workshop, February. *IAHS Publ.* N° 199, pp 186-193.
- BAGLO A. M., 1992. Les écosystèmes de la région Nord Bénin. SERHAU-SEM, Cotonou, 325 pages.
- BAMBA F., MAHE 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. Patrel J.E. & Servat E. (Eds): Réseaux hydrométriques réseaux télématiques réseaux scientifiques. nouveaux visages de l'hydrologie régionale en Afrique au XII^{èmes} Journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, CD-Rom ORSTOM, 26 pages.
- BARI M. A., SMETTEM K. R. J., 2005. Understand changes in annual runoff following land use changes : a systematic data-based approach. *Hydrol. Process.* 19, pp. 2463-2479.
- BARIOU R., LE CAMUS D., LE HENAFF F., 1986. Corrections atmosphériques. Dossier de Télédétection, n°7. Costel, Presses Universitaires de Rennes 2, pages 116 pages.
- BIDOU J.E., 1981. Saison sèche et sécheresse en République Populaire du Bénin pendant la période 1970-1979. *Annales de la Flash*. Cotonou, N°2, pp. 224-237.
- BIGOT S., 1991. Téléconnexions entre les températures de surface Océaniques mondiales et la variabilité pluviométrique des aires de mousson. exemple des philippines et de l'Afrique de l'Ouest. *Mémoire de DEA*. Centre de Recherche de climatologie, Université de Bourgogne, Dijon, 88 pages
- BIGOT S., 1997. Les précipitations et les convections profondes en Afrique centrale. Cycle saisonnier, Variabilité interannuelle et impact sur la Végétation. Thèse de doctorat, CRC/CNRS, Université de Bourgogne, Dijon, 283 pages.
- BIGOT S., 2004. Variabilité climatique, interaction et modifications environnementales. l'exemple de la Côte d'ivoire, HDR, CNRS, UMR 8141, Université des sciences et technologie de Lille, 396 pages.
- BIGOT S., MALEY, J., LARAQUE A., OLIVRY J.C., MELICE J.L., 1997. Le domaine forestier africain et ses marges : les transitions hydro-climatiques majeures à l'époque actuelle et au cours des derniers millénaires. Journées du Programme Environnement, *Vie et Sociétés: Les temps de l'Environnement*, 5,7 nov. 97, pp.255-261.
- BIO BIGOU L.B., 1987. La vallée bénino-nigérienne du fleuve Niger : Population et développement économique. *Thèse de Doctorat* (nouveau régime), 2 volumes. Université de Bourgogne, Dijon, 917 pages.
- BOKO M., ADJOVI L.C., 1994. Recherche des tendances dans les séries pluviométriques du Bénin méridional. Implications agroclimatiques. In *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*. Volume 7. Thessaloniki, pp 294-304.
- BOKO M., 1987. Etude sur la variabilité pluviométrique au Bénin. In. Climat et Climatologie. Volume d'Hommage offert au Professeur Pierre PAGNEY,. Centre de Recherches de Climatologie, URA 909 du CNRS, Dijon, pp. 41-50
- BOKO M., 1988. Climats et communautés rurales du Bénin. Rythmes climatiques et rythmes de développement. Thèse d'Etat, Paris IV, 2 volumes, 608 pages.
- BOKO M., GUIWA C., et PERARD J., 1997. Recessions pluviométriques et dynamique des paysages végétaux dans le bassin du Niger au Bénin (Afrique de l'Occidentale). *Publication de l'association Internationale de Climatologie*, vol 10, pp. 297-303.
- BOKO M., GUIWA C., et PERARD J., COUREL M. F., CHAMARD P-C., LE RHUN J., TOGOLA M., et JACQUEMINET C., 1992. Evolution hydro-pluviométrique récente du delta intérieur du Niger (Mali). *Publication de l'association Internationale de Climatologie*, vol. 5, Aix-en-Provence, pp 43-52.
- BOKONON-GANTA E. B., 1987. Les climats de la région du Golfe du Bénin. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle. Institut de Géographie, Université de Paris-Sorbonne, Paris, 248 pages + annexe.

- BOKONON-GANTA E.B., 1986. Les sécheresses africaines récentes .Le cas du Bénin et du Togo. Communication aux journées climatologiques de France, Centre de Recherches de Climatologie, Université de Bourgogne ???
- BOUHLASSA S., PADE S., 2006. Evapotranspiration de référence dans la région aride de Tafilalet au sud-est du Maroc. *AJEAM-RAGEE*, vol. 11, pp. 1-16.
- BOUSNINA H., MHIRI A., 1997. Amélioration de la réserve d'eau utile des sols sableux des régions arides par un amendement argileux, *Cahiers "Sécheresse"*, Vol. 8, numéro 4, pp. 241-245.
- BOUVIER C., FUENTES MARILES G., DOMINGUEZ MORA R., 1994. MERCEDES, un modèle hydrologique d'analyse et de prévision de crues en milieu hétérogène . 23^{ème} journée de l'hydraulique-Congrès de la SHF, Nîmes, pp. 257-260.
- BRASSEUR-MARION P., 1951. Le climat de Porto-Novo et de Cotonou. D.E.S. Annexe de Géographie, Paris-Sorbonne, 92 pages.
- BRICQUET J.P., MAHE G., BAMBA F., 1995. Changements climatiques et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). In hydrologie tropicale. géoscience et outil pour le développement, Mélange à la mémoire de JEAN Rodier. Actes de conférence de Paris, *IAHS Publ.* n° 238, pp 113-124.
- BRICQUET J. P., BAMBA F., MAHE G., TOURE M., OLIVRY J. C., 1997. Water resource variations of the Atlantic river basins of Africa. the long term effects of rain shortage. *In Rev. Sci. Eau* 3, pp 321-337.
- BRICQUET J.P., BAMBA F., MAHE G., TOURE M., and OLIVRY J.C., 1997. Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Rev. Sci. l'eau* , pp. 321–337.
- BRICQUET J.P., GOURCY L., MAHE G., ORANGE D., PICOUET C., OLIVRY J.C., 1998. Dissolved matter fluxes in the inner delta of the Niger river - Proceedings of Symposium «Hydrology in the humid tropic environment».pp. 17-23.
- BRICQUET J.P., MAHE G., BAMBA F., OLIVRY J.C., 1996. Changements climatiques récents et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). *L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement. Mélanges à la Mémoire de Jean Rodier (1914-1994).*, *IAHS Publ.* 238. pp 231-243.
- BRICQUET J.P., OLIVRY J.C., PICOUET C., ORANGE D., 1998. Transferts et dépôts de matière dans le delta intérieur du fleuve Niger (Mali). *Orstom Actualités, Numéro spécial Spécial Erosion n°56*, pp.115-116.
- BRONSTER A., 2004. rainfall-runoff modelling for assessing impacts of climate and land-use change (invited commentary). *Hydrological Processes*, 18, pp. 567-570.
- BROU Y.T., 1997. Analyse et de la pluviométrie dans le sud forestier ivoirien. recherche de corrélation entre les variables climatiques et les variables liées aux activités anthropiques. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle. Université de Cocody, Abidjan, 211 pages.
- BRUIJNZEEL T., 2004. Hydrological functions of tropical forests : not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems and Environnement*, 104. pp. 185-228.
- BRUNET-MORET V., 1979. Homogénéisation des précipitations, In cahiers de l' ORSTOM, *Série Hydrologie*, 16 3/4, pp. 147-170.
- BRUNET-MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.P., MOLINIER M., 1986. Monographie hydrologique du fleuve Niger. ORSTOM, Paris, tome II, 396 pages.
- BRYAN C., WEARE and NASSTROM John S., 1982. Examples of extended Empirical Orthogonal Function Analyses. *In Monthly Weather Review*, Volume 110, pp. 481-485.
- BURPEE R. W., 1972. The origin and structure of easterly waves in the lower troposphere in Nord Africa. *J. Atmos. Sci.*, 29, pp. 77-99.
- CADET D., NIOLI N. O., 1987. Water vapour transport over West Africa and the Atlantic Ocean during summer 1979. *QJRM*, 113, pp. 581-602.

- CAMBERLIN P., 1987. Les réactions du champ pluviométrique ouest-africain aux forçages atmosphériques et océaniques d'échelles régionales et planétaires. Mémoire de Maîtrise de climatologie. Centre de Recherche de Climatologie. URA 909 du CNRS "Climatologie Tropicale". Université de Bourgogne, Dijon, 108 pages.
- CAMBERLIN P., 1991. Recherches sur la Pluviométrie de la corne de l'Afrique. Mémoire de D.E.A. "Climats et Contraintes Climatiques". U.R.A 909 du CNRS. Université de Bourgogne. Dijon, 117 pages.
- CAMBERLIN P., 1994. Les Précipitations dans la corne orientale de l'Afrique: Climatologie, variabilité et connexions avec quelques indicateurs océano-atmosphériques. *Thèse de Doctorat de Géographie*. Spécialité: Climatologie. Centre de Recherche de Climatologie. Université de Bourgogne Dijon, 379 pages.
- CAMILLO P. J., 1991. Using one-and two-layer models for evaporation estimation with remotely sensed data. Land Surface Evaporation. Measurement and parametrization (Schmugge and André, Ads), Springer-verlag, New-York, pp. 183-197.
- CANS R., 1994. La Bataille de l'eau. *Le Monde Editions*, Paris, 219 pages.
- CAPPUS P., 1960. Bassin expérimental d'Alrance – Etude des lois de l'écoulement – application au calcul et à la prévision des débits. *La Houille Blanche*, N°A, pp 493-520.
- CARBONNEL J P., 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; Editions ORSTOM, pp. 37-51.
- CASENAVE A., and VALENTIN C., 1988. Les états de surface de la zone sahélienne. CEE/Orstom, Coll. Didactiques, Paris, 202 pages.
- CASENAVE A., VALENTIN C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Ed. ORSTOM, collection Didactiques, 227 pages.
- CASENAVE A., VALENTIN C., 1996. Etude de surfaces et transposition des données hydrologiques. In l'Hydrologie Tropicale. géosciences et outil pour le développement. IAHS Publ. N° 238, pp. 225 – 233
- CASTANY G et MARGAT J., 1977. Dictionnaire français d'hydrogéologie. Union française des géologues, paris, 269 pages.
- CASTANY G., 1982. Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod, Paris, , 236 pages.
- CENSIER C., OLIVRY J.C., 1993. Grain size and heavy mineral distribution in the fluvial sandy bedload of the Ubangi basin. implications for alluvial sediment provenance and transport - In Proceedings of the 16th Colloquium of African Geology, september 1993, Mbabane, Swaziland, vol.1, pp.82.84
- CENSIER C., OLIVRY J.C., BRICQUET J.P., 1995. Les apports détritiques terrigènes dans la cuvette lacustre du Niger entre Mopti et Kona (Rép. du Mali) Ibid, pp.305.-315.
- CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE DU SENEGAL (CRSS), 1973. La pharmacie sénégalaise traditionnelle. Plantes Médicinales et Toxiques. Organisation des Nations Unis pour l'Education, la Science et la Culture (UNESCO), Paris, , Tome II, 994 pages.
- CHIEW F. H. S., STEWARDSON M. J., McMAHON, T.A., 1993. Comparison of six rainfall-runoff modelling approaches. *Journal of Hydrology*, 147, pp. 1-36.
- CISSE, 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'études hydrauliques (CIEH), *série hydrologique*, 30 pages .
- CONSEIL INTERNATIONAL DE LA LANGUE FRANÇAISE, 1978. Vocabulaire de l'hydrologie et de la météorologie. La Maison du dictionnaire – CILF, 316 pages..
- CONWAY D., MAHE G., 2004. Riverflow modelling in two large river basins: the Parana (subtropical) and the Niger (tropical). *Hydrol. Process.* . (in press).
- CONWAY D., 1997. A water balance model of the Upper Blue Nile in Ethiopia. *Hydrol. Sci. J.* 42, pp. 841–859.
- CORNEVIN R., 1975. La sécheresse en zone sahélienne. Causes et conséquences, études des mesures à prendre. Notes et études documentaires N° 4216-4217. La documentation française.

- CORNEVIN R., 1981. La république populaire du Bénin, des origines dahoméennes à nos jours. Editions Maisonneuve et Larose-Paris.
- COSANDEY C., BIGOT S., DACHARRY M., GILLE E., LAGARNIER R., SALOVADOR P-G., 2003. Les eaux courantes : Géographie et environnement. Edition Berlin, Paris, 239 pages.
- COSANDEY C., ROBINSON M., 2000. Hydrologie continentale. Armand Colin, Paris, 360 pages.
- COUREL M.F., 1988. Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. *Thèse de Doctorat d'Etat ès-lettres et Sciences Humaines*. Université de Paris I, 407 pages.
- COUREL, M. F., CHAMARD, P-C., LE RHUN, J., TOGOLA, M. et JACQUEMINET, C., 1992. Evolution hydro-pluviométrique récente du delta intérieur du Niger (Mali). *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, vol. 5, Aix-en-Provence, pp 43-52.
- DANCETTE C., 1976. Mesure d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal. In *l'Agronomie Tropicale*, 31 (4), pp 321-328.
- DANCETTE C., 1983. Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. In *l'Agronomie Tropicale*, 31 (4). pp. 281-293.
- DAVENPORT M. L., NICHOLSON S. E. 1993. On the relation between rainfall and the Normalized Difference Vegetation Index for diverse vegetation types in east Africa. *Inter. J. Remote Sensing*, 14, pp 2369-2389.
- DELCLAUX F., DEPRAETERE C., MORIN F., 2000. Approche quantitative pour la détermination de paysage hydrologiques. Journées de la recherche en SIG, CASSI, La Rochelle, France.
- 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 ,130 pages.
- DESCONNETS J.C., GALLE S., LEDUC C., et PEUGEOT C., 1996. Les processus de redistribution des eaux en région sahélienne. l'hydrologie dans l'expérience Hapex- Sahel. In "L'hydrologie tropicale, géoscience et outil pour le développement", *publ. AISH n° 238*, pp.125-137.
- DESSOUASSI R., 1997. Variabilité du niveau et de la qualité chimique des eaux souterraines dans le haut bassin du fleuve Niger au Mali. Comparaison avec la variabilité des écoulements de surface. Université de Mali, Ecole Nationale d'Ingénieur de Bamako, 88 pages.
- DEZETTER A., 1991. Modélisation globale de la relation pluie-débit. Application en zone de savanes soudanaises (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 422 pages.
- DHONNEUR G., 1971. Les lignes de grains en Afrique Occidentale et Centrale. Essai de synthèse NTI, N°38, ASECNA, Dakar, ???.
- DHONNEUR G., 1978. Nouvelles approches des réalités météorologiques de l'Afrique Occidentale et Centrale. ASECNA, Université de Dakar, pp. 385-487.
- DHONNEUR G., 1979. Traité de météorologie tropicale, application au cas particulier de l'Afrique Occidentale centrale, 151 pages.
- DHONNEUR G., 1985. Traité de météorologie tropicale. Application au cas particulier de l'Afrique occidentale ET centrale. Direction de la météorologie.151p.
- Direction de l'Hydraulique., 1998. Actes du séminaire d'internalisation des conclusions de l'étude de la stratégie nationale de gestion des ressources en eau du Bénin. *MMEH/DH*.
- DISSOU M., 1983. La palmeraie béninoise : exploitation traditionnelle et aménagement volontaire. Thèse de Doctorat d'état, Paris X, 325 pages.
- DOMROES M., 1985. "Climatological observations on subtleness in tropical Asica. its variations in avertical and Horizontal direction" in *Tropical climatology and Human Sattlements* , actes de suppression N° 23, CNRS – Dijon , pp 173-183.
- DUBREUIL V., 2003. Suivi par télédétection de la secheresse de l'année 2000 dans la depression de Transylvanie. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, vol 15, pp. 87-94.

- DUBROEUCQ D., 1978. Carte pédologique de reconnaissance du Bénin au 1/200 000. feuille de Parakou, OSTOM, 38 pages.
- DUMAS D., ATUNES C., 2003. Evolution des températures minimales dans les alpes du Nord depuis 1960. In publication AIC, vol 15, pp. 413-427.
- EDIJATNO ., 1991. Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de Doctorat, université Louis Pasteur/ENGEES, Strasbourg, 242 pages.
- EDIJATNO, NASCIMENTO N. O., YANG X., MAKHLOUF Z., MICHEL C., 1999. GR3J. a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences journal*, 44(2), pp. 363-277.
- ESCOUROU G., 1991. Le climat et la Ville, Paris Nathan, 190 pages
- FAO., 1985. FAO Watershed Management Field Manual. FAO Conservation Guide, vol. 13. UN Food and Agriculture Organization, Rome.
- FAO., 1996. Digital Soil Map of the World. Revised legend. FAO, Rome, 119 pages.
- FAO., Tropical Forestry Action plan. Committee on forest development in the tropics, UN Food and Agriculture Organization, Rome.
- FAURE P., 1977. Carte pédologique de reconnaissance du Bénin au 1/200 000. Feuille de Djougou ORSTOM, 50 pages.
- FAURES J-M., 1995. Evaluation régionale des ressources en eau au moyen d'un système d'information géographique: le cas du bassin du Niger. Télédétection et ressources en eau, Actes de l'atelier international, Montpellier, 15 pages.
- FAVREAU G., et LEDUC C., 1998. Fluctuations à long terme de la nappe phréatique du Continental Terminal près de Niamey (Niger) entre 1957 et 1997. In "Water resources variability in Africa during the XXth century", *Publ. AISH*, n° 252, pp. 253-258.
- FEIZOURE C.T., CENSIER C., LANG J., OLIVRY J.C, 1995. Evolution interannuelle de la dynamique sédimentaire d'une barre sableuse d'un fleuve de régime tropical humide. le site de Pama sur l'Oubangui (R.C.A.) - Ibid. pp. 171.180.
- FLOHN H., 1965. Studies on the meteorology of tropical Africa. *Bonner Meteor. Abhandlungen*, 5, pp. 1-33.
- FONTAINE B., 1981. Pluviométrie soudano-sahélienne et dynamique atmosphérique sur l'Afrique occidentale et l'Atlantique nord. essai sur la variabilité physionomique et génétique d'une zone limite. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle. Université de Bourgogne, Dijon, 166 pages.
- FONTAINE B., 1985. La variabilité des précipitations en domaine sahélien et ses connexions avec la circulation atmosphérique africaine atlantique. *Cahier de Centre de Recherche de Climatologie*. N°11,URA 909 CNRS. Université de Bourgogne, Dijon, pp 85-91.
- FONTAINE B., 1986. Précipitations soudano-sahélienne et circulation estivale sur l'Afrique Occidentale et l'Afrique Nord , *Etudes de climatologie Tropicale* , Masson, Paris, pp. 63-78.
- FONTAINE B., 1990a. Etude comparées de la mousson Indienne et ouest africaine. Caractéristique, variabilité et téléconnexion; volumes 1 et 2. Université de Bourgogne, Dijon - France, 511pages.
- FONTAINE B., 1990b. Etude comparée des mousson indienne et ouest africain. Caractéristiques, variabilité et téléconnexion. Thèse d'état de l'Université de Bourgogne, Dijon, 233 pages + annexes.
- FONTAINE B., BIGOT S., 1993. West African rainfall deficits and sea surface temperature. *JCLI*, 11, pp 271-286.
- FONTAINE B., PHILIPPON N., TRZASKA S., ROUCOU P., 2002. Spring to summer changes in the West African monsoon through NCEP/NCAR reanalyses (1968-1998). *Journal of Geophysical Research*, vol. 107, n° 0,010.1029/2001D000834.
- FOREST F., KONATE M., 1986. Proposals for the classification of agroclimatic situations of upland rice in terms of Water Balance. *Progress in rice research*, IRR. Los banos, pp. 93-106.

- FOTSING E., 1999. Contribution de la morphologie mathématique à la cartographie de l'occupation du sol à partir d'images SPOT, région de l'extrême nord Caméroun. Mémoire de DEA, Université de Yaoundé, IRD, 90 pages.
- FOURNIER J., SERPENTI, G., DELHOMME J.P., GATHELIER R., 2000. Rôle des jachères sur les écoulements de surface et l'érosion en zone soudanienne du Burkina: application à la gestion des terres cultivées. *Sud Sci. Technol.*, EIER/ETSHER 5, pp. 4–14.
- FRANQUIN P., 1969. Analyse agroclimatique en régions tropicales : saison pluvieuse et saison humide. Application. *Cahiers ORSTOM, série biologie*, Paris, N° 9, pp.65-95.
- FRECAUT R., PAGNET P., 1983. Dynamique des climats et de l'écoulement fluvial. Masson, Paris, 239 pages.
- GALLE S., EHRMANN M., et PEUGOT C., 1999. Water balance in a banded vegetation pattern. A case study of tiger bush in western Niger. *Catena* (sous presse).
- GBATCHO A.,M., 1992. Contribution à l'étude des rythmes pluviométriques et hydrologiques du bassin de l'Ouémé au pont de Savè. Mémoire de maîtrise, Université Nationale du Bénin. FLASH/DGAT, 68 pages.
- GEORGE P., 1984. Dictionnaire de la géographie. Puf, 485 pages.
- GEORGES P., VERGER A., 2006. Dictionnaire de la Géographie, paris, *Quadrige*, 521 pages.
- GINESTE P., 2006 . Télédétection spatiale et modélisation du fonctionnement hydrologique des petits bassins versants. Télédétection et ressources en eau, actes de l'atelier international, Montpellier, 19 pages.
- GIRARD, G., 1982. Modélisation des écoulements de surface sur des bassins hydrologiques équipés de réservoir . Modèle MODLAC. Cahier ORSTOM, *série hydrol.*, 19(2), pp. 55-72.
- GIRARD, G., LEDOUX, VILLENEUVE J. P., 1981. Le modèle couplé. Simulation conjointe des écoulements et des écoulements souterrains dans un système hydrologique. Cah ORSTOM, *série hydro*, n°4 –1981, pp :151-278.
- GIRAUD J.M., GREGOIRE P., 1976. Le climat soudano-sahélien ; années sèches, années pluvieuses. *MET IV série*, n°6, pp. 69-81.
- GIRET A., 1996. Contribution à l'analyse des décrues et des tarissements dans la connaissance des réserves hydrologiques. exemple de l'Envigne entre 1968 et 1994, *Sécheresse*, n°4.7, pp. 253 – 268.
- GLEIVCK P.H., 1986. Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes *Journal of hydrology*, 88, pp. 97-116.
- GNAMIEN B., 1990. Etude des Lignes de Grains Africains par imagerie satellitaire. Thèse de l'Université de Paris 7, Paris, 217 pages.
- GOND V., HUBSCHMAN J., MESTE C., 1992. Suivi par télédétection spatiale des rythmes bioclimatologiques et du comportement phénologique de la végétation dans le Nordeste du Brésil, *Science et Changements planétaires, Sécheresse*, 3, pp. 97-102.
- GONNI C., 1986. 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'études hydrauliques (CIEH), *série hydrologique*, 10 pages..
- GRAYSON R. B., MOORE I. A., Mc MAHON T. .A., 1992. Physically based hydrologic modelling. The concept realistic? *Water Res Res.*, vol 128, n°10, pp. 2659-2666.
- GREGOIRE J-M., FERRARI G., 1990. Suivi par télédétection des changements d'état de surface sur les bassins versants du Haut-Sénégal, de la Gambie et du Rio Corubal (novembre 1987 – décembre 1988). *Télédétection et sécheresse*, paris, pp 81-93.
- GREGOIRE J-M., GIOVANI F., 1990. Suivi par télédétection des changements d'état de surface sur les bassins du Haut-Sénégal, de la gambie et du Rio Corubal (novembre 1987- décembre 1988). *Télédétection et sécheresse*, ed AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext, Paris, pp. 81-93.
- GROUPE CHADULE., 1994. Initiation aux pratiques statistiques eb géographie, Masson, Paris, 203 pages.
- GROUPEMENT TURKPA – International/SCET-Tunisie. Volume 1. 160 pages.

- GUILBOT A., 1971. Processus d'optimisation en quatre étapes appliquée à la recherche des paramètres des modèles déterministes. Laboratoire d'hydrologie et de la modélisation. Université Montpellier II, LHM, n° 146, 71 pages.
- GUILLET F., 1997. Description et cartographie des états de surface d'un petit bassin versant soudano-sahélien. région de Bidi, Nord Yatenga, Burkina Faso. Télédétection et ressources en eau, Actes de l'atelier international, Montpellier, 16 pages.
- GUILLOT B., CARN M., DAGORNE D., 1988. "Remarque à propos de l'effet des facteurs locaux sur l'activité convective en Afrique de L'ouest et dans l'Atlantique intertropicale". *Veille Climatique satellitaire*, N°21, pp 33-48.
- HALLEY E. 1692. An Account of the Cause of the Change of the Variation of the Magnetical Needle; with an Hypothesis of the Structure of the Internal Parts of the Earth, *Philosophical Transactions* 16, pp. 563-78.
- HALLEY E., 1691. An Account of the Circulation of the Watry Vapours of the Sea, and of the Causes of Springs, *Philosophical Transactions* 16, pp. 468-73.
- HENINE H., 2005. Interface entre un modèle hydrologique/modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG. Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 102 pages.
- HOUNDENOU C., 1992. Variabilité pluviométrique et conséquences socio-économiques dans les plateaux du bas-Bénin (Afrique de l'Ouest). Mémoire de DEA "Climats et contraintes climatiques". URA 909 du CNRS "Climatologie Tropicale". Université de Bourgogne. 2 volumes, Dijon, 90 pages.
- HOUNDENOU C., 1999. Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide. l'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation. *Thèse de Doctorat* de l'Université de Bourgogne Dijon. 390 pages.
- HOUNDENOU C., HOUSSOU C. S., VISSIN E.W., BOKO M., PERARD J., 2004. Recherches de tendance dans les séries pluviométriques du bassin béninois du fleuve Niger, (Afrique de l'Ouest) : *Actes du XVIIème Colloque International de Climatologie*, Caen, . pp. 171-175.
- HOUNDENOU C., HERNANDEZ K., 1998. Modification de la saison pluvieuse dans l'Atacora (1961-1990) : un exemple de sécheresse au nord-ouest du Bénin (Afrique Occidentale). *Sécheresse*, 9, pp. 23-34.
- HOUNDENOU C., PERARD J., BOKO M., HERNANDEZ K., 2002. Mise en évidence du rôle des précipitations tardives dans la variabilité pluviométrique du bassin béninois du Niger (Afrique de l'Ouest). *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, vol 14, pp.127-133.
- HOUNDENOU C., VISSIN E.W., PERARD J., 2005. Mise en évidence du poids des "mois humides" dans la péjoration pluviométrique du bassin de la Sota (Bénin, Afrique de l'Ouest)», *Actes du XVIIIème Colloque International de Climatologie*, Gênes (Italie), pp. 333-336.
- HOUNKANNOUNON J., 1979. les précipitations en République Populaire du Bénin (d'après la normale 1961-1970). Mémoire de Maîtrise de géographie. Université Nationale du Bénin, Cotonou, 51 pages + annexes.
- HOUSSOU C. S., 1994. Réflexions sur les sensations des populations et sur le choix des indicis bioclimatiques en zone Tropical pluvieuse. L'exemple de Natitingou (Atacora / Bénin) in climat et Santé N°11 Dijon pp 41-53
- HOUSSOU C. S., 1998. Les bioclimats humains de l'Atacora (Nord-Ouest Du Bénin) et leurs implications socio-économiques, thèse de doctorat, CRC, Université de Bourgogne, Dijon, 328 pages.
- HUBERT P., CARBONNEL J.P., 1987. Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'ouest. *Journal of hydrology* ,95 :1654-183.
- HUBERT P., CARBONNEL J.P., and CHAOUACHE A., 1989. Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits d'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.* 110, pp. 349-367.
- HUETE A. R., JACKSON R. D., POST D. F., 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote sensing of environment*, 17, n°1, pp. 37-53.
- HUFTY A., 1976. Introduction à la climatologie. P.U.F. Collection Magellan, Paris. 264 pages.
- Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE)., 2002 : Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH3). Direction des Etudes Démographiques, 490 pages.

- IPCC., 2007. Observed changes in climate and their effects. Fourth Assessment report. Synthesis report. 21 pages.
- JANEAU J-L., RUZ DE ESPERARZA VILLARREAL R., 1992. Cartographie des états de surface d'une toposéquence représentative du bassin versant de San Ignacio. Cah. ORSTOM, *sér. Hydrol.*, (4), pp. 161-175.
- JANICOT S., 1985. Analyse spatio-temporelle du champ de précipitations annuelles sur l'Afrique Occidentale et l'Afrique Centrale. *Veille climatique Satellitaire.*, 10, pp 32-44.
- JANICOT S., 1988. Facteur Naturels impliqués dans la sécheresse au Sahel. *Climat et Climatologie*. Volume d'hommage offert au Professeur Pierre PAGNEY. Université de Bourgogne. Centre de Recherche de Climatologie, pp 269-280.
- JANICOT S., 1989. Variabilité des précipitations en Afrique de l'Ouest et circulations quasi-stationnaires durant une phase de transition climatique. Thèse de Doctorat. Université de Paris VI, 600 pages.
- JANICOT S., 1990 a. Deux facteurs impliqués dans la sécheresse au Sahel. In *Veille climatique satellitaire*, n°32, pp 24-33.
- JANICOT S., 1990 b. Variabilité des précipitations en Afrique de l'Ouest et circulation quasi stationnaire durant une phase de transition climatique. Thèse de doctorat de l'Université de paris VI, 178 pages +annexes.
- JANICOT S., FONTAINE B., 1993. L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique occidentale. *Météorologie 8è série*, n°1. pp 28-53.
- JARLAN L., TOURRE Y. M., MOUGIN E., PHILIPPON ., MAZZEGA P., 2005. Dominant patterns of AVHRR NDVI interannual variability over the Sahel and linkages with key climate signals (1982-2003). *Geophysical Research Letters*, vol. 32.
- KARAMBIRI, H., RIBOLZI O., DELHOUME J.P., DUCLOUX J., COUDRAIN-RIBSTEIN A., and CASENAVE A., 2003. Importance of soil surface characteristics on water erosion in a small grazed Sahelian catchment. *Hydrol. Process.* 17 8, pp. 1495–1507.
- KAUARK-LEITE L. A., NASCIMENTO N. O., 1993. Développement, utilisation et incertitudes des modèles conceptuels en hydrologie. Séminaire Eaux-Environnement , n°3, Modélisation du comportement des polluants dans les hydrosphères, Paris, 191-219.
- KHODJA H., LUBES-NIEL H., SABATIER R., MASSON J.M., SERVAT E., et PATUREL J.E., 1998. Analyse spatio-temporelle de données pluviométriques en Afrique de l'Ouest. Recherche d'une rupture en moyenne. Une alternative intéressante. les tests de permutation. *Revue de Statistique Appliquée*, XLVI(1), pp. 95-110.
- KHODJA, LUBES-NIEL H., SABATIER R., MASSON J.M., SERVAT E., et PATUREL J.E., 1998. Analyse spatio-temporelle de données pluviométriques en Afrique de l'Ouest. Recherche d'une rupture en moyenne. Une alternative intéressante. les tests de permutation. *Revue de Statistique Appliquée*, XLVI(1), pp. 95-110.
- KONATE M., 1996. Evolution tectono-sédimentaire du Bassin Paléozoïque de Kandi (nord Bénin, sud Niger). Un témoin de l'extension post - orogénique de la chaîne panafricaine. Université de Bourgogne., Premier volume 301 pages ; deuxième volume 188 pages.
- KRIGE D. G., 1957. A statistical approaches to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand's. of Chem, Metal. And Mining Soc. of South Africa, 52, pp. 119-139.
- LAMACHERE J. M., 1994. Variabilité spatio-temporelle des états de surface en zone sahélienne et soudanienne (Burkina-Faso). effet sur les ruissellements . Xe journée hydrologique, ORSTOM, Montpellier, pp. 91-103.
- LAMACHERE J.M., et SEGUIS L., 1997. Nouvelles techniques de mesure des pluies, des débits liquides et solides sur parcelles agronomiques. In "Erosion en montagnes semi-arides et méditerranéennes", Réseau Erosion Bulletin, n° 17, pp. 255-271.
- LAMACHERE J.M., PUECH C., 1997. Cartographie des états de surface. *Téledétection et ressources en eau*. Montpellier, France.
- LAMACHERE J.M., PUECH C., 2001. Modélisation hydrologique. *Téledétection et ressources en eau*. Montpellier, France.

- LAMB P., 1985. Rainfall in subsaharian West Africa during 1941-83. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 21, pp 131-139.
- LAMBERGEON D., 1977. Relation entre les pluies et les dépressions en Afrique Occidentale. *Publication DEM*, n°57, ASECNA, Dakar, 57 pages.
- LAMBERGEON D., DZIETARA S., JANICOT S., 1981. Comportement du champ de vent sur l'Afrique Occidentale. *La Météorologie*, Vième série. N°25, pp. 69-82.
- LARAQUE A., MIETTON M., OLIVRY J.C., PANDIA., 1998. Influence de la lithologie sur les régimes hydrologiques et la qualité des eaux des affluents congolais du fleuve Congo-Zaire. *Revue des Sciences de l'Eau* 11(2) , pp. 209-224.
- LARAQUE A., BRICQUE J.P., OLIVRY J.C., BERTHELOT M., 1995. Transports solides et dissous du fleuve Congo (Bilan de six années d'observation) - Ibid. pp. 133-145.
- LARAQUE A., OLIVRY J.C., ORANGE D., MARIEU B., 1997. Variations spatio-temporelles des régimes pluviométriques et hydrologiques en Afrique Centrale du début du siècle à nos jours.. 3 rd International Conference on Flows Regims from International Network Data: Postojna, Slovenie, *Publ. IAHS*, n°246, pp.257-263.
- LARAQUE A., PANDI A., 1996. Rôle des données physiographiques dans la classification hydrologique des affluents congolais du fleuve Congo-Zaire, *Acad. Sci. Paris, série II a*, pp. 855-858.
- LAROUSSE F., 1970. Grand Larousse encyclopédique. Librairie Larousse.
- LATE V., 1995. Ressources en eau et développement agricole sur le bassin de Kandi. Mémoire de maîtrise, Université Nationale du Bénin, FLASH/DGAT, 93 pages.
- LAURENT F., DELCLAUX F., et GRAILLOT D., 1998. Perte d'information lors de l'agrégation spatiale en hydrologie : application à un modèle hydrologique (TopModel). *Revue Internationale de Géomatique*, Vol. 8, N° 1-2, pp. 99-119.
- LE BARBE L., ALE G., MILLET B., TEXIER H., BOREL Y., 1993. Monographie des ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. Paris, ORSTOM, 540 pages.
- LE BARBE L., BOREL Y., 1987. Historique, description et étalonnage des stations hydrométriques de la République du Bénin. Montpellier, ORSTOM, 148 pages.
- LE BORGNE J., 1990. La dégradation actuelle du climat en Afrique, entre Sahara et équateur In la dégradation des paysages en Afrique ce l'ouest. Points de vue des perspectives de recherches. Université Cheick Anta Diop Dakar pp.17-36.
- LE LAY M., 2006. Modélisation hydrologie dans un contexte de variabilité hydro-climatique. Une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso-échelle au Bénin. Thèse de l'INPG, Grenoble, 251 pages.
- LECONTE J., 2000. Prise en compte de la dynamique de la végétation dans deux modèles hydrologiques utilisés en Afrique de l'Ouest à l'aide des données NAOO-AVHRR, .Mémoire, UMR Hydrosiences, Montpellier, 71 pages.
- LEDUC C., BROMLEY J., and SCHROETER P., 2000. Water-table fluctuation and recharge in semi-arid climate: some results of the HAPEX-Sahel hydrodynamic survey (Niger). *J. Hydrol.* 188/189, pp. 123–138.
- LEDUC C., TAUPIN J.D., LE GAL LA SALLE C., 1996. Estimation de la recharge de la nappe phréatique du Continental Terminal (Niamey, Niger) à partir des teneurs en tritium. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, t. 323, série IIa, pp. 599-605.
- LEROUX M., 1980. Le climat de l'Afrique tropicale. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Dijon 4T, 427 pages.
- LEROUX M., 1988. Variabilité des précipitations en Afrique Occidentale. Les composantes aérologiques du problème. *Veille Climatique Satellitaire*, n°22, pp. 26-45.
- LEROUX M.,1970). La dynamique des précipitations en Afrique Occidentale. Thèse de Doctorat de 3è cycle, Dakar, FLASH, 282 pages.

- LESSARD L., 1964. Hydrogéologie du bassin sédimentaire de Kandi. Cotonou, ONU/PNUD, 84 pages.
- LITYNSKI J., 1994. Changement climatique au Canada et l'évolution générale du climat. *Publication AIC*, vol 7, pp. 287-293.
- LOUVET S., 2002. Etude de la première saison des pluies guinéennes et rôle de JET subtropical de l'hémisphère Nord. Mémoire de DEA, Centre de Recherches de Climatologie, Université de Bourgogne, 45 pages.
- LUBES H., MASSON J-M., RAOUS P., TAPIAYU M., 1994. Logiciel de calculs statistiques et d'analyse fréquentielles adapté à l'évaluation du risque en hydrologie. manuel de calcul. ORSTOM, Paris, 140 pages.
- LUSSAULT M., LEVY J., 2003. Dictionnaire de la géographie. Berlin, 1033 pages.
- LYON S. W., WALTER M. T., GERARD-MARCHAND P., STEENHUIS T. S., 2004. Using a topographic index to distribute variable source area runoff predicted with the SCS curve-number equation. *Hydrological Processes*, Vol. 18, pp. 2757-2771.
- MAHE G., 1992. Les écoulements fluviaux sur la façade Atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Thèse de doctorat, université Paris XI ORSAY, Paris, 384 pages.
- MAHÉ G., LEDUC C., AMANI A., PATUREL J.E., GIRARD S., SERVAT E., and DEZETTER A., 2003. Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau. *Hydrology of the Mediterranean and Semi-arid Regions, IAHS Pub. 278*, pp. 215–222.
- MAHÉ G., L'HOTE Y., OLIVRY J.C., and WOTLING G., 2001. Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa, 1951–1989. *Hydrol. Sci. J.* 46 2, pp. 211–226.
- MAHE G., OLIVRY J.C., 1995. Variation des précipitations et des écoulements en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, . 6(1), Paris, pp. 109 - 117.
- MAHÉ G., OLIVRY J.C., 1999. Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa. *C.R. Acad. Sci. Paris, Serie IIa* 328, pp. 621–626.
- MAHE G., OLIVRY J.C., DESSOUASSI R., ORANGE D., BAMBA F., and SERVAT E., 2000. Relations eaux de surface-eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *C.R. Acad. Sci. Paris, Serie IIa* 330, pp. 689–692.
- MAHE G., PATUREL J-E, SERVATB E., CONWAYC D., DEZETTERB A., 2005. The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso. *Journal of Hydrology*, vol 300, PP 33-43.
- MAKHLouF Z., 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 pages.
- MALEY J., 1981. Dust, clouds, rain types, and climatic variations in tropical North Africa. *Quaternary research*, n°18, pp. 1-16.
- MANE L., BOIVIN P., et SEGUI S L., 1995. États de surface des sols non cultivés dans la cuvette de Nianga. description, radiométrie de terrain et imagerie Spot . " *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*", ORSTOM, Paris, pp 23-35.
- MATHERON G., 1963. Principles of geostatistics. *Economic geol.*, 58, pp. 1246-1268.
- MAYLAN P., 1986. Régionalisation des données entachées d'erreurs de mesure par krigeage. Application à la pluviométrie. *Hydrol. Continental.*, Vol. 1, n°1, pp. 25 – 34.
- McDONNELL J. J., 2003 . Were does water go when it train? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff reponse, *Hydrological processes*, Vol. 17, pp 1869-1875.
- MICHEL C., 1983. Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? *La Houille Blanche*. 1, pp. 39-44.
- MINISTERE DE L'INTERIEUR, DE LA SECURITE ET DE L'ADMINISTRATION TERRITORIALE., 1997. Atlas monographique des circonscriptions administratives du Bénin, Projet trilatéral Bénino-Franco-Allemand

d'appui à la déconcentration/décentralisation, Direction de l'Administration Territoriale et des Collectivités, Cotonou, Bénin.

MINISTERE DES MINES, DE L'ENERGIE ET DE L'HYDRAULIQUE., 2005. Document de Politique nationale de l'eau : La gouvernance de l'eau au service du développement du Bénin, Cotonou, 19 pages.

MINISTERE DU DEVELOPPEMENT RURAL, 1993. Rapport de zonage et sondage-diagnostic du département du Borgou. FIDA, Direction de la Recherche Agronomique, Cotonou, Bénin, 111 pages.

MONIOD F., POUYAUD B., SECHET P., 1977. Le bassin du fleuve Volta. Coll. Monographies Hydrologiques, ORSTOM, Paris, 230 pages.

MOREL M., 1986. Les problèmes posés par les normes pluviométriques dans la région sahéenne. In colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse, Ouagadougou 20-24 mai 1986 Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH), *série hydrologique*, pp.1- 15.

MORON V., 1990. Contribution à l'étude de la variabilité climatique mensuelle en Europe (1979-1988). Mémoire de DEA, CRC, université de Bourgogne, Dijon, 74 pages.

MORON V., 1992. Variabilité spatio-temporelle des précipitations en Afrique sahéenne et guinéenne (1933-1990). *La Météorologie VII* ° série, Paris, pp. 24-30.

MORON V., 1993. Variabilité des précipitations en Afrique tropicale au nord de l'Equateur (1933-1990) et relation avec les températures de surface océaniques et de la dynamique de l'atmosphère. Thèse de doctorat, Centre de Recherche de Climatologie, université de Bourgogne, Dijon, tome 1, 225 pages.

MOUELHI S., 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. *Thèse de Doctorat*, ENGREF/CEMAGREF, Paris, 312 pages.

MOUELHI S., MICHEL C., PERRIN C., ANDREASSIAN V., 2005. Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*. ELSEVIER, pp. 200-214.

MOUKOLO N., LARAQUE A., OLIVRY J.C., BRICQUET J.P., 1993. Transports en solution et en suspension par le fleuve Congo (Zaire) et ses principaux affluents de la rive droite. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 38,2,4, pp. 133 145.

MOUKOLO N., OLIVRY J.C., BRICQUET J.P., LARAQUE A., 1992. Transports de matières solides et en suspension dans les rivières du bassin du fleuve Congo - Bulletin de liaison du CIEH n°90, Ouagadougou BF pp. .3.10.

MOULIN S., 1995. Assimilation d'observations satellitaires courtes longueur d'onde dans un modèle de fonctionnement de culture. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 235 pages.

MPOUNZA M., BOUKA BIONA C., MASSOUANGUI-KIFOUALA M., 2003. L'évolution des températures dans le Sud du Congo –Brazaville (1950-1998). *Publication de l' Association Internationale de Climatologie*, vol 15, pp 428-433.

NASA., 2004: Temporal Assessment of NDVI. Time Series from AVHRR Sensors

NASCIMENTO N.O., 1995. Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de doctorat, CERGRENE/ENPC, Paris, 550 pages.

NASH J. E., SUTCLIFFE J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10, pp. 282-290.

NDONG J.B., 2003. Caractérisation de la saison des pluies dans le centre-Ouest du Sénégal., *Publication de l' Association Internationale de Climatologie*, vol 15, pp. 326-332.

NELDER J. A., MEAD R., 1964. A Simplex method for function minimisation. *The computer Journal*, 7(4), pp. 308-313.

NEW M.G., HULME M., JONES P.D, 2000. Representing 20th century space-time climate variability. II. Development of 1901–1996 monthly terrestrial climate fields. *J. Climate* 13, pp. 2217–2238.

NICHOLSON S. E., 1979. Revised rainfall series for the West African subtropics, *MWR*, 107 ,620-623.

- NICHOLSON S.E., 1985. Sub-Saharan Rainfall 1981-1984 .Journal of climatic and Applied Meteorology , vol 24 n°12.
- NICHOLSON S.E., 1986. The spatial coherence of african rainfall anomalies, interhemispheric teleconnexions. Journal of Climate and applied Meteo. 25, pp. 1365-1381.
- NICHOLSON S.E., 1994. Recent rainfall fluctuation in Africa and their relationships to past condition over the continent. *The Holocene*, pp. 121-131.
- NONGUIERMA A., DAUTREBANDE S., 2006. Modélisation hydrologique de petits bassins versants ruraux sahalien. apport de la télédétection et des systèmes d'information géographique pour la détermination des paramètres. *Télédétection et ressources en eau*, Actes de l'atelier international, Montpellier, 9 pages.
- OLIOSO A., 1992. Simulation des échanges d'énergie et de masse d'un couvert végétal, dans le but de relier la transpiration et la photosynthèse aux mesures de réflectance et de température de surface. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 225 pages.
- OLIVRY J.C., 1996. Editorial. Revue des Sciences de l'Eau vol 9;1; 2 pages
- OLIVRY J.C., 1997. Long term effects of rain shortage: the ill rivers of Western and Central Africa. "FRIEND General Report/UNESCO IHP V". UNESCO, Paris, pp. 158-162.
- OLIVRY J.C., GOURCY L., TOURE M., 1995. Premiers résultats sur la mesure des flux de matière des apports du Niger au Sahel - Ibid. pp. 281.292.
- OLIVRY J.C., 1994. Le contexte hydrologique de la cuvette lacustre - «*La pêche dans le Delta Central du Niger : Approche pluridisciplinaire d'un système de production halieutique*», Orstom-IER-Karthala, Paris, pp.39.58.
- OLIVRY J.C., BRICQUET J.P., LARAQUE A., GUYOT J.L., BOURGES J., ROCHE M.A., 1995. Flux liquides , dissous et particuliers de deux grands bassins intertropicaux. le Congo à Brazzaville et le Rio Madeira à Villabella - Ibid. pp. 345.355 .
- OLIVRY J.C., BRICQUET J.P., MAHE G., 1994. De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies ; Dossier de la revue de Géographie Alpine, n°12.
- OLIVRY , J.C., BRICQUET , J.P., MAHE , 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.- Abidjan, nov.1998 , *IAHS Pub.* n° 252, pp. 189-198.
- OLIVRY J. C., 1993. Evolution récente des régimes hydrologiques en Afrique intertropicale. In *l'eau, la terre et les hommes*, hommage à René Frécaut Ed. Presses Universitaires de Nancy, pp 181-190.
- OLIVRY J. C., BRICQUET J. P., MAHE G., 1993. Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ? Hydrology of warm humid regions, *Proc. IAHS Symp Yokohama* , 216, pp. 67-78.
- OLIVRY J. C., SIRCOULON J., TOURE M., 1992. The ill rivers of Africa. In Colloque ICID Impactos de variacoes climaticas e desenvolvimento sustentavel em regioes semi-aridos. Fortaleza (Brazil).
- OLIVRY J.C., 1995. Fonctionnement hydrologique de la cuvette lacustre du Niger et essai de modélisation de l'inondation du delta intérieur - Ibid. pp.267.280.
- OLIVRY J.C., 1997. Etudes régionales sur les basses eaux: les effets durables du déficit des précipitations sur les étiages et les tarissements en Afrique de l'Ouest et du Centre. Actes des journées hydrologiques de Montpellier, CD-Rom..
- OLIVRY J.C., BRICQUET J.P., BAMBA, F., DIARRA M., 1995. Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit des deux dernières décennies - Ibid. pp. 251.265.
- OLIVRY J.C., 1994. De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies - in. Potamologie d'hier et d'aujourd'hui, aménagements et cours d'eau . Actes des Journées hydrologiques - Centenaire Maurice Pardé, Grenoble. Les dossiers de la revue de Géographie Alpine n° 12, pp. 101.112.

- OLIVRY J.C., 1998. Hydrologie et géochimie du bassin soudano-sahélien du fleuve Niger. *Actes du Colloque International Hydrologie et Géochimie Isotopiques* en hommage à J.Ch. Fontes, Paris, *Académie des Sciences, Orstom*, pp. 73-95.
- OLIVRY J.C., BOULEGUE J., 1995. Grands bassins fluviaux périatlantiques. Congo, Niger, Amazone . *Actes du Colloque PEGI* (INSU/CNRS et Orstom) , Orstom, Paris, 505 pages .
- OLIVRY J.C., BRICQUET J.P., MAZIEZOULA B., LARAQUE A., 1998. Bilans d'érosions à l'échelle sous-continentale : les exportations de matière sur le bassin du fleuve Congo-Zaïre. Orstom Actualités, Numéro Spécial Erosion n°56, 14 pages.
- OLIVRY J.C., CHOURET A., VUILLAUME G., LEMOALLE J., BRICQUET J.P., 1996. Hydrologie du lac Tchad. Monographie Hydrologique n° 12. ORSTOM, Paris. 266 pages.
- OLIVRY J.C., HOORELBECK J., 1998. Erosion des Terres noires de Haute Provence. Orstom, Numéro spécial *Erosion* n°56, 13 pages.
- OLIVRY J.C., LARAQUE, A., BRICQUET J.P., 1996. Baisse récente d'hydraulicité du Congo-Zaïre et origine. International Conference on Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology, the Royal Academy of Overseas Sciences and the Royal Meteorological Institute of Belgium Brussels.
- OLIVRY J.C., SIRCOULON J., 1998. Evolution des recherches hydrologiques en partenariat en Afrique subsaharienne. L'ensemble des pays francophones. *Revue des Sciences de l'Eau*, pp. 61-75.
- OMM., 1992. Guide des pratiques hydrologiques, Organisation météorologique mondiale, *Publication n° 168*, Genève, 793 pages.
- ORANGE D., WESSELINK A., MAHÉ G., FREIROURE C., 1997. The effects of climate changes on river base flow and storage in centrale Africa. Proceedings of rabat Symposium, 5th, *IAHS Publ.* 240, pp.113-123.
- LOUDIN L., ANDREASSIAN V., LOUMAGNE C., MICHEL C., 2006. Large sample basin experiments for hydrological Model parameterization. Results of the model parameter experiment-MOPEX, *IAHS Publication*, 307, pp. 246-255.
- OUEDRAOGO M., 2001. 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. Thèse de doctorat. Université de Montpellier II, 257 pages.
- OUEDRAOGO M., LUBÈS-H., MASSON SERVAT E., PATUREL J.E., 1998. Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit aux alentours de 1970 en Côte-d'Ivoire Water resources Variability in Africa during the XXth century. *IAHS Publ*, n° 2521, pp.315-321.
- OUEDRAOGO M., PATUREL J.E., MAHÉ G., SERVAT E., DEZETTER, A., CONWAY D., 2001. Influence de la nature et de l'origine des données sur la modélisation hydrologique de grands bassins versants en Afrique de l'Ouest. *Pub. AIHS*, No. 270, pp. 209–214.
- OZER P., ERPICUM M., 1995. Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905. *Science et changements planétaires / Sécheresse*. Volume 6, Numéro 1, pp. 103-128.
- PAGNEY P., 1989. La dynamique de la végétation en milieu sec et humide. L'exemple de l'Archipel Guadeloupéen, In *Géo-physo*. Travaux du laboratoire de Géographie physique. N°19, UA 0141 CNRS.
- PATUREL J. E., KOUKPONOU P., OUATTARA F., L'AOUR A., MAHE J., et CRES, F. N., 2002. Variabilité du climat du Burkina Faso au cours de la seconde moitié du XX^{ème} siècle. In revue *Sud Sciences et Technologies*, n°8, pp. 41-49.
- PATUREL J.E., SERVAT E., KOUAME B., LUBES-H., OUEDRAOGO M., MASSON J.M., 1997a. Climatic variability in humid Africa along the gulf of Guinea. Part two An intergrated regional approach. *Journal of hydrology*, 191:16-36.
- PATUREL J.E., OUEDRAOGO M., MAHE G., SERVAT E., and DEZETTER E., 2003. Utilisation de Modèles Hydrologiques pour évaluer les Ressources en eau de Surface et leur évolution Spatio-temporelle— Application à l'Afrique de l'ouest. In: *Water Resources Systems, Water Availability and Global Change*, Proc. Conf. Sapporo, Japan, 2003, IAHS Pub. 280 , pp. 117–123.

- PATUREL J.E., SERVAT E., 1996. Procédure d'identification de ruptures dans les séries hydrologiques; modification du régime pluviométrique en Afrique de l'ouest non sahélienne. *Hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement* ". IAHS Publ, n° 238. pp. 251-268.
- PATUREL J.E., SERVAT E., KOUAME B., LUBES-H FRITSCH J.M., MASSON,J.M., 1997c. Manifestation d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'ouest et centrale . *Publ IAHS*, n°240, pp. 152-172.
- PATUREL J.E., SERVAT E., KOUAME B., BOYER J.F., LUBES-H., MASSON J.M., 1995a. Manifestation 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, pp. 95-102.
- PATUREL J.E., SERVAT E., LUBES-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 compte rendu de l'Académie des sciences, Institut de France.
- PATUREL J.E., SERVAT E., VASSILIDIAS A., 1995b. Sensitivity of conceptual rainfall runoff algorithms to errors in input data, case of the GR2M model. *Journal of hydrology*, 168, pp. 111-125.
- PATUREL, J. E ., KOUKPONOU, P., OUATTARA, F., L'AOUR, A., MAHE, J. et CRES, F. N., 2002. Variabilité du climat du Burkina Faso au cours de la seconde moitié du XX^{ème} siècle. *In revue Sud Sciences et Technologies*, n°8, pp 41-49.
- PEANT A-M., 1992. Variabilité pluviométrique sur la côte-ouest africaine et migration de la zone de convergence intertropicale. Mémoire de maîtrise, CRC/université de Bourgogne, Dijon, tome 1+2, 50pages.
- PELISSIER P., 1963. Les pays du Bas-Ouémé. une région témoin du Dahomey méridional. Travaux du Département de Géographie , N° 10, FAC des Lettres et Science Humaines, Dakar, 173 pages.
- PERARD J., 1992. Orages au Bénin. Modèle scientifique, modèle traditionnel. *Cahier du Centre de recherche de Climatologie*, n°14. URA 909 du CNRS. Université de Bourgogne, Dijon. Pp 33-40.
- PERARD J., BOKONON-GANTA E. B., 1993. Variabilité pluvieuse et mutations socio-économiques dans le Haut-Borgou (Nord-Bénin). *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, Lannion, pp 163-171.
- PERARD, J., 1992. Estimation des contraintes climatiques en Afrique Tropicale. Approche méthodologique. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, vol. 5, Aix-en-Proence, pp. 99-104.
- Perrault P., 1674. De l'origine des fontaines. Paris.
- PERRIN C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 276 page + annexe.
- PERRIN C., 2002. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Towards an improved version of a lumped rainfall-runoff model through a comparative approach. *la Houille Blanche*, n°6/7, pp 1-8.
- PERRIN C., MICHEL C., ANDREASSIAN V., 2001. Does a large number of parameters enhances model performance ? Comparative assesment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology* , 242, pp. 275-301.
- PERRIN C., MICHEL C., ANDREASSIAN V., 2001. Does a large number of parameters enhances model performance ? Comparative assesment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology* , 242, pp. 275-301.
- PERRIN C., Michel C., ANDREASSIAN V., 2003 . Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. In *Journal of Hydrology* 279, pp 275-289.
- PERRONE J. T., 1997. Hydrologic modeling of an agricultural watershed in Quebec AGNPS. *Marter of science*, University Ste- Anne-de-Bellevue, Quebec, Canada, 98 pages.
- PETTITT A. N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.*, 28,2. 126-135.
- PEUGEOT C., 1995. Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un bassin-versant sahélien (Niger). Expérimentation in situ et modélisation. Thèse Université de Grenoble 1, 305 p + annexes.

- PEUGEOT C., CAPPELAERE B., CHEVALLIER P., ESTEVES M., GALLE S., RAJOT J.L., VANDERVAERE J.P., 1996. Modélisation hydrologique sur le Supersite Central Est d'Hapex Sahel. Première étape. des parcelles expérimentales aux micro-bassins versants. "Interactions surface continentale/atmosphère. l'expérience Hapex-Sahel", ORSTOM; Paris, pp. 241-254.
- PEUGEOT C., ESTEVES M., GALLE S., RAJOT J.L. et VANDERVAERE J.P., 1997. Runoff generation processes: results and analysis of field data collected at the East Central Supersite of the HAPEX-Sahel experiment. *J. Hydrol.*, 188-189(1-4), pp. 179-202.
- POCCARD I., RICHARD Y., 1996. Sensibilité du NDVI aux variations pluviométriques en Afrique tropical. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie.*, vol 9, pp. 41-47.
- POCCARD I., RICHARD Y., 1996. Sensibilité du NDVI aux variations pluviométriques en Tropicale. In *Publication AIC*, vol 9, pp. 41-47.
- POFAGI M., TONOUEWA A., 2001. Renversement de la tendance à la dégradation des terres et des eaux dans le bassin béninois du fleuve Niger. PNUD, ABN., 115 pages
- POPPEL, J.W., LEKKERKERKER C.L., 1991. Le suivi de la dégradation de l'environnement par des observations hydro. L'métriques et piézométriques. Bulletin de liaison du CIEH, Ouagadougou No. 83.
- POUCHIN T., DEBRIE A., BOURCIER A., 2002. L'observation de la végétation de l'Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale. l'apport de l'indice de la végétation normalisé. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, vol 13, Numéro 3, pp. 187-194.
- POUYARD B., 1986. Estimation des rapports annuels et des étiages avant et après la récente période de la 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, CIEH, série hydrologique, 16 pages.
- PROBST J. L., TARDY Y., 1987. Long range streamflow and world continental runoff fluctuations since the beginning of this century. *J Hydrol*, 94, pp. 289-311.
- PROBST J.L., NKOUNKOU R., KREMP G., BRICQUET J.P., THIÉBAUX J.P., OLIVRY J.C., 1992. Dissolved major elements exported by the Congo and Ubangi rivers during the period 1987-1989 -*Journal of Hydrology* 135, pp.237-257.
- PUECH C., 1995 . Télédétection et modélisation hydrologique. quelle vision, quelle échelle, quels processus ?. *Télédétection et ressources en eau*, Actes de l'atelier international, Montpellier, 16 pages.
- RAHARIJAONA Raharison Léa-Jacqueline., 1997. Effets et conséquences sur le régime des aquifères des anomalies climatiques dans l'extrême sud de Madagascar: cas du bassin endoréique d'Ambovombe , *Cahiers "Sécheresse"*, Vol. 8, numéro 2, pages 129-137.
- REDELSPERGER J.L., 1992. Les Lignes de Grains Tropicales. Les climats subtropicaux et leur évolution. CNES, pp. 233-259.
- REMENIERAS, G., 1960. L'hydrologie de l'Ingénieur. Coll. Lab. Nat. Hydraul. Eyrolles, 413 pages.
- RICHARD Y., POCCARD I., 1998. A statistical study of NDVI sensibility to seasonal and interannual rainfall variation in Southern Africa. *INT, J. Remote, Sensing*, Vol 15, pp. 2907-2920.
- RIOU C., 1975. La détermination pratique de l'évaporation. Orstom Paris. In "L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement". *IAHS Publ*, n° 238.
- RIOU C., 1980. Aspects climatiques de la sécheresse de part et d'autre du Sahara (de l'Afrique centrale sèche à la tunisie). *Cah, ORSTOM, sér.Biol.* 42, pp. 43-51.
- RITCHIE T J, 1972. Model J., 1972. Model for predicting Evaporation from a row crop with Incomplete Cover *Water Resources Research*, vol. 8, n°5, pp. 1204-1213.
- ROCHE M., 1963. Hydrologie de surface. Paris, Gauthier - Villars 430 pages.
- ROCHE P.A., 1986. Les modèles. Gestion des Eau : Automation, Information et Télégestion, F. Valiron (Ed), Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, III, pp. 138-166.

- RODIER, J., 1964. Régime hydrologique de l'Afrique noire à l'ouest du Congo. Paris, ORSTOM, 137 pages.
- ROEL H. Bosma., 1997. Ressources en eau de surface pour l'aménagement hydraulique dans le bassin de l'Oued el-Kebir (nord-est algérien), Cahiers "Sécheresse", Vol. 8, numéro 1, pp. 13-17.
- ROOSE E., 1977. Erosion et Ruissellement en Afrique de l'Ouest Vingt Années de Mesures en Petites Parcelles Expérimentales. ORSTOM, Travaux et Documents No. 78, Paris.
- ROSENBROCK H. H., 1960. An automatic method for finding the greatest or least value of a function. The Computer Journal, 3, pp. 175-184.
- ROUX F., 1987. Les Lignes de Grains de COPT 81. Environnement, précipitations, cinématique et thermodynamique, Thèse d'Etat, Université de Paris 7, 368pages.
- SAVANE I., GOZEB., BIEMI J., 1995. Evaluation des ressources en eau dans le socle par l'étude des fractures à l'aide des données Landsat (bassin d'Odienné, Côte d'Ivoire). Télédétection et ressources en eau, Actes de l'atelier international, Montpellier, 13 pages.
- SEGUIS L., 1995. Hydrologie d'une cuvette du lit majeur du Sénégal. exemple de la cuvette de Nianga. In "Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal", ORSTOM, Paris, pp. 49-66.
- SEGUIS L., BOSCHER C., et ALBERGEL J., 1996. Discrimination de différentes couvertures végétales par radiométrie de terrain en savane soudano-sahélienne. In- "Interactions surface continentale/atmosphère. l'expérience HAPEX-Sahel". ORSTOM, Paris, pp. 671-684.
- SEGUIS L., et BADER J.-C., 1997. Modélisation du ruissellement en relation avec l'évolution saisonnière de la végétation (mil, arachide, jachère) au centre Sénégal. Revue des Sciences de l'Eau, Vol. 10, No 4, pp.419-438.
- SEGUIS L., et PUECH C., 1997. Méthode de détermination des invariants radiométriques adaptée au paysage semi-aride de l'Afrique de l'Ouest. International Journal of Remote Sensing, Vol. 18, No 2, pp. 255-271.
- SELLERS P. J., LOS S. O., TUCKER C. J., JUSTICE C. O., DAZLICH D. A., COLLATZ G. J., RANDALL D. A., 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric Global Climate Models. Part I. Model formulation. Journal of climate, 9.
- SERVAT E., 1993. Evaluation régionale des ressources en eau. application à la Côte d'Ivoire. Rapport du synthèse du programme ERREAU Antenne hydrologique ORS d'Abidjan, 154 pages ;
- SERVAT E., DEZETTER A., 1991. Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modelling in a sudanese savannah area. Hydrological Sciences Journal, 36(4), pp. 307-331.
- SERVAT E., SAKHO M., 1995. Instability of water resources management of a planned water system in non-sahélien West Africa. Hydrological sciences journal, 40, pp. 2,217-230.
- SEYLER P., ETCHEBER H., ORANGE D., LARAQUE A., SIGHA-NKAMDJOU L., OLIVRY J.C., 1995. Concentrations, fluctuations saisonnières et flux de carbone dans le bassin du Congo - Ibid. pp. 217-228.
- SEYLER P., OLIVRY J.C., SIGHA-NKAMDJOU L., 1993. Hydrogeochemistry of the Ngoko River, Cameroun. Chemical balances in a rainforest equatorial basin - Ibid., publ. IAHS, n° 216, pp. 87-105.
- SIRCOULON J., 1976. Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses 1913 et 1940. Cha ORSTOM série hydrologique vol XIII n°2, pp. 75-174 ;
- SIRCOULON J., 1974. les données climatiques et hydrologiques de la sécheresse en Afrique de l'ouest Sahélienne-SIES RAPPORT n°2, 44 pages..
- SIRCOULON J., 1990. Aspects hydrologiques des fluctuations climatiques en Afrique de l'Ouest et centrale. Bull OMM ; 380, pp. 1-8.
- Site web CEMAGREF 2005 . WWW.cemagref.fr
- Site Web IRD, 1999. WWW.ird.fr/inst/ist/editions/siteFish/image/tchad.html
- Site Web IRD. 2001. WWW.ird.fr
- SOUZA (de) S., 1988. Noms des plantes dans les langues nationales béninoise. Cotonou (RP du Bénin), tome I et II, 393 + 417 pages.

- SPENDLEY W., HEXT G. R., HIMSWORTH F. R., 1962. Sequential application of simplex designs in optimization and evolutionary operation. *Technometrics (USA)* 4, 441 pages.
- SULTAN B., 2002. Etude de la mise en place de la mousson en Afrique de l'ouest et de la variabilité intra-saisonnière de la convection. Application à la sensibilité des rendements agricoles. Thèse de doctorat, Université Paris 7 – Denis Diderot, Paris, 283 pages.
- SULTAN B., JANICOT S., 2004. La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles intra-saisonnières. 1^{ère} partie. Analyse diagnostique de la mise en place de la mousson et de la variabilité intra-saisonnière de la convection, *Sécheresse*, 15(4), pp. 1-10.
- SUTCLIFFE V.J., PIPER B.S., 1986. Bilan hydrologique en Guinée et au Togo - Bénin. In *hydrol. Continent.*, vol I, n° 1, pp. 51 - 61.
- SUTOUR F., 1995. "La relativité des indices en bioclimatologie humaine" in *climat, pollution santé hommage à Gisèle ESCOUROU* Dijon GIR climat et santé , pp 97 – 114.
- TAPSOBAT D., 1997. Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques ouest - africains et de leur récent changement. Thèse de Doctorat, Université Paris XI (ORSAY), 300 pages.
- TODOROV A. V., 1985. Sahel, the changing rainfall and the norlas used for its assesment., *JCAM*, 24, pp. 97-107.
- TOMETY S-N., SEKLOKA F., TOSSOU J. B., HOUENOU-TOMETY A., ODJO D., 2006. Etude des systèmes de gestion/utilisation de l'eau et définition des actions prioritaires de valorisation locale des ressources en eau dans une approche GIRE au Bénin., LIFAD, Ministère des mines, de l'énergie et de l'eau, DG-Eau, ABN. 121 pages.
- TOMSON H.R., 1985. Hydroélectric resource studies in Togo and Bénin. *Proc. Instn. Civ. Engrs. Part 1*, 78. 1403-1420.
- UNESCO , 1992. *Glossaire international d'hydrologie*. Paris
- VANDERVAERE J.-P., VAUCLIN M., HAVERKAMP R., PEUGEOT C., THONY J.L., et GILFEDDER M., 1998. Prediction of crust-induced surface runoff with disk infiltrometer data. *Soil Science* 163 (1), pp. 9-21.
- VANNITSEM S., DEMAREE G., 1991. Détection et modélisation des sécheresses au sahel. In *Hydrol. Continent.*, vol. 6, n°2. pp 155-171.
- VAUCLAIR F., 1995. Etude sur les relations existant entre pluie et indice de végétation sur 4 zones test du domaine sahélo-soudanien, mémoire de DEA, CRC, université de Bourgogne, Dijon, 26 pages.
- VIENNOT M., 1978. Carte pédologique de reconnaissance du Bénin au 1/200 000. Feuille de Bembéréké, ORSTOM, 46 pages.
- VIENNOT M., 1978. Carte pédologique de reconnaissance du Bénin au 1/200 000. Feuille de Kandi, ORSTOM, 48 pages.
- VIERS G., 1968. *Elément de climatologie*. Collection Géographie. F. NATHAN, Paris, France, 224 pages.
- VIEUX B., LOOPER P., CAPPELAERE B., PEUGEOT C., et MAIA A., 1998a. Exploring climatic impacts on water resources in West Niger (Africa). In "Water resources variability in Africa during the Xxth century", publ. AISH n° 252, pp. 347-354.
- VIEUX B.E, CAPPELAERE B., et PEUGEOT C., 1998b. Influence of channel losses on spatially distributed rainfall-runoff simulation in a small endoreic catchment in the Sahel region, Niger, Africa. *European Geophysical Society Meeting*, Nice.
- VISSIN E. W., HOUSSOU C. S., 2006. Etude du fonctionnement hydrologique du bassin de la Sota. *Climat et Développement*, Vol.1, LECREDE, Université d'Abomey-Calavi, pp. 1-12. Cotonou.
- VISSIN E. W., 1998. Contribution à l'étude du fonctionnement hydrologique du bassin de la Sota. Mémoire de maîtrise 123 p. Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, 123 pages.
- VISSIN E. W., 2001. Contribution à l'étude de la variabilité des précipitations et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger. Mémoire de DEA 53 p. Université de Bourgogne, Dijon, France.

- VISSIN E. W., AMOUSSOU E., HOUSSOU C.S., 2007. Variabilité de la pluviométrie et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger. *Climat et Développement*, vol 3, LECREDE, Université d'Abomey-Calavi, pp. 22-32.
- VISSIN E. W., BOKO, M., PERARD J., HOUNDENOU C., 2003. Recherche de ruptures dans les séries pluviométriques et hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger (Bénin, Afrique de l'Ouest). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, Besançon. VOL 15, pp 368-376.
- VISSIN E. W., HOUNDENOU C., PERARD J., 2007. Sécheresse pluviométrique et tarissement dans le bassin de la Mékrou (Bénin, Afrique de l'Ouest). *Actes du XXe Colloque de AIC*, Carthage-Tunis, pp 568-573.
- VISSIN E. W., HOUSSOU C. S., HOUNDENOU C., 2006. Péjoration pluviométrique et vulnérabilité des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger. " *Sciences de l'Environnement*", LaRBE, pp. 75-92, Lomé.
- VISSIN E.W., HOUSSOU C.S., 2004., Étude de la variabilité du bilan hydrologique dans le bassin de la Sota (Bénin, Afrique de l'Ouest), *Actes des 2èmes Journées Scientifiques des Universités nationales du Bénin*, Abomey-Calavi, pp. 51-61.
- VISSIN E.W., HOUSSOU C.S., BOKO M., HOUNDENOU C., 2004. Impact des fluctuations pluviométriques sur les écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger (Bénin, Afrique de l'Ouest) », *Actes du XVIIe colloque de l'AIC*, Caen (France), 17, pp. 385-388.
- WAHL L., 2003. Analyse du réchauffement climatique contemporain et des type de temps observés dans le nord-est de la France et le Sud-Ouest de l'Allemagne de 1981 à 2000. *Publication AIC*, vol 15, pp. 441-448.
- YACOUBA H., Da DAPOLA E., YONKEU S., ZOMBRE P., SOULE M., BAGAYOKO F., 2002. Etude du Processus de Dégradation du Bassin Supérieur du Nakambe (Burkina-Faso) écoulement de Surface et Pertes de Terres liées à l'eau. *J. Sci. EIER/ETSHER*, Ouagadougou, Burkina-Faso, pp. 28-31.
- YANG X. 1993. Mise au point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie-débit conceptuel pour la prévision des crues en temps réel. Thèse de Doctorat, ENP/CERGRENE, 350 pages.
- YANG X., MICHEL C., 2000. Flood forecasting with a watershed model : a new method of parameter updating. *Hydrological Sciences Journal*, 45 (4), pp.537-546.
- YAYA B., 1980. Utilisation de l'information climatique par l'agriculture, la forêt et l'élevage en Guinée. Plan d'action de l'agrométéorologie en Guinée (FAO), pp.106-118.
- ZUR B., JONES J. W., 1981. A model for the water relations, photosynthesis, and expansive growth of crops. *Water Resour. Res.*, 17. pp 142-158.

Tables des matières

	Avant-propos et remerciement	
	Résumé	
	Abstract	
	Introduction générale	1
	Chapitre 1 : Cadre géographique du domaine d'étude	9
	Introduction	10
1.1.	Présentation du milieu physique	10
1.1.1.	Situation et justification du choix de la zone d'étude	10
1.1.2.	Traits topographiques majeurs	11
1.1.3.	Contexte hydrogéologique	13
1.1.4.	Principaux types de sol	16
1.1.5.	Types de végétation	18
1.1.6.	Caractéristiques climatiques du bassin béninois du fleuve Niger	19
1.1.6.1.	Fondements de la dynamique atmosphérique	19
1.1.6.2.	La Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) ou Equateur Météorologique (EM) et ses migrations saisonnières	20
1.1.6.3.	Les mécanismes de la pluviogenèse et les perturbations atmosphériques dans le bassin du Niger au Bénin	21
1.1.6.4.	Champs pluviométriques moyens annuels	23
1.1.6.5.	Champs pluviométriques moyens saisonniers	26
1.1.6.6.	Rythmes moyens des autres paramètres climatiques du bassin	31
1.1.6.6.1.	Rythme saisonnier moyen des températures minimales et maximales	31
1.1.6.6.2.	Rythme saisonnier moyen de l'insolation au Bénin	32
1.1.6.6.3.	Rythme saisonnier de la tension de vapeur	33
1.1.6.6.4.	Rythme saisonnier moyen de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	34
1.1.7.	Contexte hydrologique	35
1.1.7.1.	Réseau hydrographique	35
1.1.7.2.	Régimes hydrologiques	37
1.1.7.3.	Normes hydrologiques	39
1.2.	Description du milieu humain et économique	41
1.2.1.	Population	42
1.2.2.	Les groupes socioculturels du bassin béninois du fleuve Niger	43
1.2.3	Les principales activités économiques	43
1.2.3.1.	Agriculture	44
1.2.3.2.	Elevage	49
1.2.3.3.	Autres activités	50
1.2.4.	L'eau et les populations du bassin	51
1.2.4.1.	Les ressources en eau disponibles dans le bassin béninois du fleuve Niger	51
1.2.4.2.	La disponibilité de eau dans les localités du bassin	53
1.2.4.3.	Place de l'eau dans chaque ethnie du bassin	55
1.2.4.4.	Sacralisation des cours et plans d'eau dans le bassin	55
	Conclusion	58
	Chapitre 2 : Point des connaissances, données et méthodes	59
	Introduction	60
2.1.	Clarification des concepts	60
2.2.	Point des connaissances	67

2.2.1.	Variabilité climatique	67
2.2.2.	Caractérisation de la variabilité hydroclimatique et étude du fonctionnement hydrologique	68
2.2.3.	L'utilisation des modèles hydrologiques dans l'étude de la dynamique hydroclimatique	70
2.2.4.	La dynamique des états de surface et les écoulements d'un bassin	72
2.3.	Les données : présentation et analyse critique	74
2.3.1.	Méthode de collecte de données	74
2.3.2.	Historique et présentation du réseau d'observations climatologiques	75
2.3.3.	Données brutes	76
2.3.3.1.	Choix de l'échelle spatio-temporelle	76
2.3.3.2.	Données climatologiques	76
2.3.3.3.	Données hydrométriques	79
2.3.3.4.	Elimination des données douteuses	81
2.3.3.5.	Données des états de surface	81
2.3.4.	Données élaborées	82
2.3.4.1.	Données hydro-climatologiques	82
2.3.4.2.	Données caractérisant les états de surface	82
2.4.	Méthodes et outils de travail	83
2.4.1.	Bilan climatique : un indicateur des disponibilités en eau	83
2.4.2.	Etude de la variabilité pluviométrique et hydrologique	84
2.4.2.1.	Le paramètre de tendance centrale, la moyenne arithmétique	84
2.4.2.2.	Les paramètres de dispersion	84
2.4.2.2.1.	Ecart type	84
2.4.2.2.2.	Anomalies centrée réduite	85
2.4.2.3.	Mise en évidences des tendances	85
2.4.2.4.	La recherche de ruptures	86
2.4.2.5.	Comparaison de deux échantillons temporels	87
2.4.3.	Etude du bilan hydrologique	88
2.4.3.1.	Evaluation de la hauteur de pluies régionalisée	89
2.4.3.2.	Estimation de l'Evaporation (E)	94
2.4.3.3.	Evaluation de l'écoulement ($L=L_{éc_i}$)	95
2.4.3.4.	Estimation de la recharge (I)	97
2.4.3.5.	Etude du tarissement par la loi de Maillet	97
2.4.3.6.	Le coefficient d'écoulement	98
2.4.4.	Les modèles hydrologique retenus dans l'étude	98
2.4.4.1.	Justification du choix du type de modélisation proposée	99
2.4.4.2.	Présentation des modèles choisis	100
2.4.4.3.	Protocole d'identification et d'analyse des paramètres	100
2.4.4.3.1.	Identification des paramètres	100
2.4.4.3.2.	Critères d'optimisation et de qualité de l'ajustement des modèles	101
2.4.4.3.3.	Méthode numérique d'optimisation	102
2.4.5.	La cartographie des états de surface	104
2.4.5.1.	Réalisation des cartes des états de surface de 1979 et 1992	105
2.4.5.1.1.	Documents planimétriques, photographies et images satellitales exploités	105
2.4.5.1.2.	Démarche suivie pour l'établissement des cartes d'états de surface 1979 et 1992	106
2.4.5.2.	Recherche de liaison ou de dépendance statistique entre pluie et lame	109

	écoulée et NDVI et lame écoulée	
2.4.5.2.1.	Coefficient de corrélation linéaire	109
2.4.5.2.2.	Corrélation partielle	110
2.5.	Les quelques outils informatiques utilisés	111
	Conclusion	112
	Chapitre 3 : Caractérisation de la variabilité hydro-pluviométrique	113
	Introduction	114
3.1.	Validation des indices régionaux	114
3.2.	Variabilité de la pluviométrie	116
3.2.1.	Variabilité pluviométrique interannuelle	116
3.2.1.1.	Evolution de hauteurs de pluie dans le bassin béninois du fleuve Niger	116
3.2.1.2.	Evolution des indices pluviométriques régionaux des différents sous bassins	116
3.2.1.3.	Variabilité pluvieuse à l'échelle stationnelle dans le bassin béninois du fleuve Niger	118
3.2.2.	Recherche de rupture de stationnarité dans les séries pluviométriques	120
3.2.2.1.	Détection de rupture de stationnarité dans la série pluviométrique du bassin du Niger au Bénin	120
3.2.2.2.	Détection de rupture de stationnarité dans les indices pluviométriques régionaux des différents sous bassins	121
3.2.2.3.	Détection de ruptures de stationnarité dans les séries pluviométriques stationnelles du bassin béninois du fleuve Niger	124
3.2.3.	Répartition intra-saisonnière comparée des précipitations des sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992	125
3.2.3.1	. Evolution dans l'ensemble du bassin du Niger au Bénin	125
3.2.3.2.	Evolution dans les sous bassins	126
3.2.3.3.	Etude de la variabilité interannuelle des lames précipitées des mois humides et des mois secs dans les sous bassins pour la période 1955-1992	130
3.2.3.	Comparaison des régimes pluviométriques des sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 à partir des hauteurs journalières	132
3.2.4.	Evolution interannuelle des maxima journaliers dans les sous bassins pour la période 1955-1992	133
3.3.	Bilan climatique ou pluie utile	134
3.3.1.	Bilan climatique annuel dans les sous bassins	134
3.3.2.	Bilan climatique mensuel dans les sous bassins	134
3.3.3.	Evolution du bilan climatique journalier	136
3.4.	Caractéristiques des apports pluviométriques dans les sous bassins pour la période 1955-1992	138
3.4.1.	Apports pluvieux annuels dans les sous bassins	138
3.4.2.	Apports mensuels moyens dans les sous bassins	141
3.5.	Evolution de l'écoulement dans les sous bassins pour la période 1955-1992	142
3.5.1.	Variabilité interannuelle de l'écoulement annuel	142
3.5.2.	Détection des ruptures de stationnarité dans les séries hydrométriques annuelles des sous bassins	143
3.5.3.	Etude de la variabilité interannuelle des lames écoulées dans les sous bassins pour les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992	144
3.5.4.	Répartition intra-saisonnière comparée des écoulements des sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992	145

3.5.5.	Fluctuation journalière de l'écoulement	147
3.5.6.	Analyse des maxima et minima hydrologiques dans les sous bassins (1955-1992)	148
3.5.7.	Etude du tarissement	150
3.6.	Etude du bilan hydrologique dans les sous bassins pour la période 1955-1992	155
3.6.1.	Incidence des fluctuations pluviométriques sur les termes du bilan	155
3.6.1.1	Au pas de temps annuel	155
3.6.1.2.	Au pas de temps mensuel	161
3.6.1.3.	Bilan hydrologique au pas de temps journalier pendant les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992	166
3.6.2.	Fonctionnement hydrologique des sous bassins en fonction de leur substratum	167
3.6.2.1.	Variabilité des coefficients d'écoulements sur les formations de socle et de grès	167
3.6.2.2.	Modèle conceptuel du fonctionnement hydrologique des formations de socle et de grès	170
	Conclusion	174
	Chapitre 4 : Contribution des modèles GR4J et GR2M à l'étude du comportement hydrologique du bassin	175
	Introduction	176
4.1.	Objectifs de la modélisation par GR4J et GR2M	176
4.2.	Problèmes de la modélisation hydrologique dans un contexte non stationnaire	177
4.3.	Présentation des modèles GR4j et GR2M	178
4.3.1.	Modèle GR4J	178
4.3.1.1.	Présentation générale	178
4.3.1.2.	Description de la structure du modèle	179
4.3.1.3.	Utilité du modèle	182
4.3.2.	Modèle GR2M	182
4.3.2.1.	Présentation générale	182
4.3.2.2.	Description de la structure du modèle	183
4.4.	Analyse de l'efficacité des modèles	185
4.4.1.	Méthode du test de calage/contrôle des modèles	185
4.4.2.	Evolution des paramètres et calage-contrôle du modèle GR4J	187
4.4.2.1.	Evolution des paramètres	187
4.4.2.2.	Calage-contrôle du modèle GR4J	190
4.4.3.	Evolution des paramètres et Calage-contrôle du modèle GR2M	192
4.4.3.1.	Evolution des paramètres	192
4.4.3.2.	Calage et contrôle du modèle GR2M	193
4.5.	Evolution comparée débits observés/débits simulés	196
4.5.1.	Avec utilisation du modèle GR4J	196
4.5.1.1.	Calage-contrôle en période humide	196
4.5.1.2.	Calage-contrôle en période sèche (1972-1992)	198
4.5.2.	Avec utilisation du modèle GR2M	201
4.5.2.1.	Calage et contrôle en période humide	201
4.5.2.2.	Calage-contrôle en période sèche	205
4.6.	Identification de tendances du comportement hydrologique des sous bassins	208

4.6.1.	Recherche de non-stationnarité dans le comportement hydrologique des sous bassins versants	208
4.6.2.	Identification de tendances du comportement hydrologique	209
4.6.3.	Mise au point préalable de l'hypothèse permettant l'évaluation des tableaux de simulations croisées	210
4.6.4.	Test utilisant le signe des évolutions	211
4.6.5.	Test conditionnel fondé sur les permutations des tableaux de simulations croisées	212
4.6.6.	Application de la méthode de détection de non-stationnarité dans le comportement hydrologique des sous bassins-versants	214
4.6.6.1.	Le modèle GR4J	214
4.6.6.2.	Le modèle GR2M	215
	Conclusion	217
	Chapitre 5 : Impact de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger	219
	Introduction	220
5.1.	Revue méthodologique	221
5.1.1.	Travaux antérieurs : méthodes et résultats	221
5.1.2.	Contraintes et choix méthodologiques	225
5.1.2.1.	Modélisation	225
5.1.2.2.	Autres approches	229
5.2.	Analyse de la dynamique des états de surface : évolution à long terme de l'occupation du sol	232
5.2.1.	Présentation des cartes des types d'occupation du sol de 1979 et 1992	232
5.2.2.	Dynamique des états d'occupation des sols entre 1979 et 1992 par sous bassin	236
5.2.3.	Effets potentiels sur les écoulements	241
5.3.	Le NDVI et les termes du bilan hydrologique	242
5.3.1.	Analyse de la dynamique des états de surface : Evolution saisonnière de NDVI dans le bassin du fleuve Niger au Bénin	242
5.3.2.	Variabilité mensuelle du NDVI et des termes du bilan hydrologique	244
5.3.3.	Analyse de la dynamique des états de surface : variabilité interannuelle des NDVI sur la période 1982-1992	245
5.3.4.	Evolution interannuelle de NDVI et des termes du bilan hydrologique	246
5.3.4.1.	Corrélation entre NDVI et termes du bilan hydrologique sur la période 1982-1992	246
5.3.4.2.	Evolution NDVI et pluie	248
5.3.4.3.	Evolution NDVI et évaporation	248
5.3.4.4.	Evolution NDVI et écoulement	249
5.3.4.5.	Evolution NDVI et recharge	250
5.4.	Evolution des résidus du NDVI et de quelques termes du bilan hydrologique dans le bassin du Niger au Bénin	251
5.4.1.	Evolution interannuelle	251
5.4.2.	Cycle saisonnier	254
5.5.	Variabilité du NDVI et des paramètres du bilan hydrologique, pour quelques types d'occupations du sol	255
5.5.1.	Evolution comparée du NDVI des types d'occupation des sols	255
5.5.2.	Corrélation de la pluie, de l'écoulement et du NDVI des différents types d'occupation du sol	258

5.5.3	Variation du NDVI des types d'occupation du sol, de la pluie et des écoulements	258
	Conclusion	260
	Conclusion générale	261
	Bibliographie	267
	Tables des matières	
	Tables des figures	
	Table des tableaux	
	Annexes	

Table des figures et des photos

Figure 1 : Cadre conceptuel de l'impact de la variation climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger	6
Figure 1.1 : Localisation du bassin béninois du fleuve Niger	11
Figure 1.2 : Relief du bassin béninois du fleuve Niger	12
Figure 1.3 : Lithologie du bassin béninois du fleuve Niger	15
Figure 1.4 : Coupe géologique dans le bassin de la Sota	16
Figure 1.5 : Circulation en surface en janvier et juillet	21
Figure 1.6 : Coupe schématique nord-sud en août de la troposphère au-dessus de l'Atlantique vers le méridien origine	22
Figure 1.7 : Pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin béninois du fleuve Niger	24
Figure 1.8 : Relation pluie latitude dans le bassin du Niger au Bénin (1955-1992)	25
Figure 1.9 : Relation pluie altitude dans la bassin du Niger au Bénin (1955-1992)	26
Figure 1.10: Régime pluviométrique des stations du bassin béninois du fleuve Niger (1955-1992)	28
Figure 1.11 : Pluviométrie moyenne mensuelle dans le bassin du Niger au Bénin (1955 - 1992)	30
Figure 1.12 : Rythme des températures moyennes maximales dans le bassin (1955-1992)	31
Figure 1.13 : Rythme des températures moyennes minimales dans le bassin (1955-1992)	31
Figure 1.14: Rythme moyen de la radiation solaire en surface à Kandi (1955-1992)	33
Figure 1.15 : Rythme annuel moyen de la tension de vapeur à la station de Kandi dans le bassin (1955-1992)	34
Figure 1.16 : Rythme moyen décadaire de l'évapotranspiration potentielle (ETP) à la station de Kandi (1955-1992)	35
Figure 1.17 : Réseau hydrographique du bassin béninois du fleuve Niger	36
Figure 1.18 : Régime hydrologique moyen des affluents béninois du fleuve Niger (1955-1992)	39
Photo 1 : Quelques cultures du bassin béninois du fleuve Niger	46
Photo 2 : Transhumance peul dans le bassin béninois du fleuve Niger	50
Figure 2.1 : Réseau pluviométrique du bassin béninois du fleuve Niger	77
Figure 2.2 : Réseau hydrométrique du bassin béninois du fleuve Niger	80
Figure 2.3 : Interpolation des données pluviométriques du mois de juillet 1955	90
Figure 2.4 : Interpolation des données pluviométriques mensuelles de 1955	91
Figure 2.5 : Modèle du variogramme climatologique : exemple des pluies journalières du sous bassin de la Mékrou	93
Figure 2.6 : Corrélation pluie journalière interpolée par krigeage et pluie journalière par interpolation simple dans le bassin (1955-1992)	94
Figure 3.1 : Validation des indices régionaux des sous bassins du bassin béninois du fleuve Niger par corrélation des pluies journalières d'une station des sous bassins et les pluies journalières krigées.	115
Figure 3.2 : Variabilité interannuelle des hauteurs de pluies dans le bassin béninois du fleuve Niger (1955-1992)	116
Figure 3.3 : Evolution de la pluviométrie dans les sous bassins hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger pour la période 1995-1992	117
Figure 3.4 : Variabilité interannuelle de la pluie aux stations du bassin béninois du fleuve Niger (1955-1992)	119
Figure 3.5 : Variation annuelle du nombre de jours de pluies aux stations du bassin béninois du fleuve Niger (1955-1992)	120
Figure 3.6 : Recherche de rupture de stationnarité par le test de Pettitt dans les dans la série pluviométrique du bassin béninois du Niger (ensemble des sous bassins)	121
Figure 3.7 : Mise en évidence de rupture de stationnarité par le test de Mann-Kendall dans la	

série pluviométrique du bassin béninois du Niger (ensemble des sous bassins)	121
Figure 3.8 : Mise en évidence de rupture de stationnarité par le test de Pettitt dans les séries pluviométriques des sous bassins hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger	122
Figure 3.9 : Mise en évidence de ruptures de stationnarité par le test de Mann-Kendall dans les séries pluviométriques des sous bassins du bassin béninois du Niger	123
Figure 3.10 : Recherche de ruptures de stationnarité par le test de Pettitt dans les sous-séries pluviométriques du bassin béninois du Niger	123
Figure 3.11 : Mise en évidence de rupture de stationnarité dans les séries pluviométriques des stations par le test de Pettitt	124
Figure 3.12 : Régime pluviométrique des périodes 1955-1972 et 1973-1992 dans le bassin béninois du fleuve Niger	125
Figure 3.13 : Régime pluviométrique des périodes 1955-1972 et 1973-1992 dans les sous bassins du bassin béninois du fleuve Niger	126
Figure 3.14 : Evolution interannuelle des précipitations des mois humides et des mois sec (1955-1992)	131
Figure 3.15 : Variabilité pluviométrique journalière sur les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992	132
Figure 3.16 : Maxima journaliers dans le bassin béninois du fleuve Niger	133
Figure 3.17 : Evolution saisonnière du bilan climatique dans les sous bassins (1955-1992)	135
Figure 3.18 : Variation du bilan climatique mensuel sur les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992	136
Figure 3.19 : Variation journalière du bilan climatique sur la période 1955-1992	137
Figure 3.20 : Evolution journalière du bilan climatique dans les sous bassins pour les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992	137
Figure 3.21 : Variabilité des apports pluvieux saisonniers dans le bassin du fleuve Niger au Bénin (1955-1992)	139
Figure 3.22 : Evolution de la disponibilité en eau des premiers horizons du sol (rapport P/ETP) dans les sous bassins (1955-1992)	140
Figure 3.23 : variabilité intra-saisonnière des apports pluvieux dans le bassin béninois du fleuve Niger (1955-1992)	141
Figure 3.24 : Evolution des écoulements dans les sous bassins (1955-1992)	142
Figure 3.25 : Mise en évidence de rupture de stationnarité dans les séries hydrologiques annuelles par le test de Pettitt dans les sous bassins pour la période 1955-1992	143
Figure 3.26 : Variation saisonnière de l'écoulement rapporté à la surface des sous bassins sur les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992	145
Figure 3.27 : Variation de l'écoulement journalier lissé sur vingt jours sur les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992	147
Figure 3.28 : Variation des débits minima journaliers dans les sous bassins (1955-1992)	148
Figure 3.29 : Variation des débits maxima journaliers dans le bassin (1955-1992)	149
Figure 3.30 : Courbes de tarissement dans le bassin (1955-1992)	151
Figure 3.31 : Mise en évidence de ruptures de stationnarité dans les séries des coefficients de tarissement par le test de Mann-Kendall dans les sous bassins	153
Figure 3.32: Variation des coefficients de tarissement dans les sous bassins (1955-1992)	154
Figure 3.33 : Variation inter-annuelle des températures moyennes minimales dans le bassin béninois du fleuve Niger (1955-1992)	157
Figure 3.34 : Variation des températures moyennes maximales sur la période 1955-1992 dans le bassin	157
Figure 3.35 : Bilan hydrologique du Bassin béninois du fleuve Niger en %	158
Figure 3.36 : Bilan hydrologique du bassin béninois du fleuve Niger en mm	160
Figure 3.37 : Evolution inter mensuelle des termes du bilan (1955-1992)	162
Figure 3.38 : Evolution intra-saisonnière de l'évaporation dans le bassin (1955-1992)	163
Figure 3.39 : Variabilité intra saisonnière de la recharge dans le bassin (1955-1992)	164
Figure 3.40 : Variabilité des termes du bilan pendant la sous-période 1955-1972	167

Figure 3.41 : Variabilité des termes du bilan pendant la sous-période 1973-1992	167
Figure 3.42 : Variation interannuelle des coefficients d'écoulement dans les sous bassins (1955-1992)	168
Figure 3.43 : Relation entre coefficient d'écoulement annuel et précipitations dans les sous bassins (1955-1992)	170
Figure 3.44 : Fonctionnement hydrologique des formations du socle dans les sous bassins de la Mékrou et de l'Alibori	171
Figure 3.45 : Fonctionnement hydrologique des grès	172
Figure 3.46 : Conceptualisation du fonctionnement hydrologique du socle et des grès	173
Figure 4.1: Le modèle GR4J	180
Figure 4.2 : Fonctionnement du modèle GR2M	184
Figure 4.3 : Variabilité des valeurs des paramètres du modèle GR4J, optimisées dans le bassin selon le Nash de l'écoulement moyen sur les sous-périodes (1955-1992)	189
Figure 4.4 : Variabilité du Nash en optimisation (calage) sur les sous-périodes de 1955-1992 dans le bassin (GR4J)	191
Figure 4.5 : Variabilité des valeurs des paramètres du modèle GR2M en optimisation sur la période 1955-1992	193
Figure 4.6 : Variabilité du Nash en optimisation sur les sous-périodes de 1955-1992 dans le bassin	194
Figure 4.7 : Variabilité des pluies et des débits observé et simulé sur la période de calage 1960-1966 (GR4J)	197
Figure 4.8 : Variabilité des pluies et des débits observé et simulé sur la période de contrôle 1966-1972 (GR4J)	197
Figure 4.9 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous-période 1960-1966 dans les sous bassins (en calage avec GR4J)	199
Figure 4.10 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous-période 1966-1972 dans les sous bassins (en validation avec GR4J)	199
Figure 4.11 : Variabilité des pluies et des débits observé et simulé sur la période 1972-1979 dans les sous bassins (en calage GR4J)	200
Figure 4.12 : Variabilité des pluies et des débits observé et simulé sur la période 1979-1986 dans les sous bassins (en validation GR4J)	200
Figure 4.13 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous-période 1973-1979 dans les sous bassins (en calage GR4J)	202
Figure 4.14 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous-période 1979-1992 dans les sous bassins (en validation GR4J)	202
Figure 4.15 : Variabilité des pluies et des débits observé et simulé sur la sous-période de calage 1960-1966 dans les sous bassins (GR2M)	203
Figure 4.16 : Variabilité des pluies et des débits observé et simulé sur la sous-période de validation 1966-1972 dans les sous bassins (GR2M)	203
Figure 4.17 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous-période de calage 1960-1966 dans les sous bassins (GR2M)	204
Figure 4.18 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous-période de validation 1966-1972 dans les sous bassins (GR2M)	204
Figure 4.19 : Variabilité pluies et débits observé et simulé sur la sous-période de calage 1972-1979 dans les sous bassins (GR2M)	206
Figure 4.20 : Variabilité pluies et débits observé et simulé sur la sous-période de calage 1979-1986 dans les sous bassins (GR2M)	206
Figure 4.21 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous-période de calage 1972-1979 dans les sous bassins (GR2M)	207
Figure 4.22 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous-période de validation 1979-1986 dans les sous bassins (GR2M)	207
Figure 4.23 : Distribution empirique des valeurs de la statistique SDD (Somme des Différences par rapport à la Diagonale) obtenues pour la matrice 2 de notre exemple (les lignes pointillées désignent le domaine des valeurs « extrêmes », à 5 et 95 %)	213
Figure 4.24 : Distribution empirique des valeurs de la statistique SDD (Somme des Différences	

par rapport à la Diagonale) obtenues pour les Matrices des sous bassins en appliquant le modèle GR4J (les lignes pointillées désignent le domaine des valeurs « extrêmes », à 5 et 95 %)	215
Figure 4.25 : Distribution empirique des valeurs de la statistique SDD (Somme des Différences par rapport à la Diagonale) obtenues pour la Matrice des sous bassins en appliquant de modèle GR2M (les lignes pointillées désignent le domaine des valeurs « extrêmes », à 5 et 95 %)	217
Figure 5.1 : Etat d'occupation des sols du bassin béninois du fleuve Niger en 1979	234
Figure 5.2 : Etat d'occupation des sols du bassin béninois du fleuve Niger en 1992	235
Figure 5.3 : Evolution spatiale des unité d'occupation du sol en 1979 et 1992	240
Photo 5.1 : Erosion au pont de la Mékrou	240
Photo 5.2 : Erosion à la station de Coubéri	240
Figure 5.4 : Evolution interannuelle de la pluie et de l'écoulement dans le bassin béninois du fleuve Niger	241
Figure 5.5: Cycle annuel du NDVI (1982-1992)	243
Figure 5.6 : Variabilité saisonnière NDVI, précipitations et écoulement dans le bassin (1982-1992)	244
Figure 5.7 : Variabilité interannuelle du NDVI (1982-1992)	246
Figure 5.8 : Variabilité interannuelle NDVI et pluie dans les sous bassins de la Mékrou et de l'Alibori (1982-1992)	248
Figure 5.9 : Variabilité interannuelle NDVI et évaporation (1982-1992)	249
Figure 5.10 : Variabilité interannuelle NDVI et écoulement (1982-1992)	250
Figure 5.11 : Variabilité interannuelle NDVI et recharge dans le bassin (1982-1992)	250
Figure 5.12 : Variabilité interannuelle des résidus NDVI/p et des résidus d'écoulement/p dans le bassin du Niger	253
Figure 5.13 : Variabilité intermensuelle des résidus NDVI/p et des résidus d'écoulement/p dans le bassin du Niger	254
Figure 5.14 : Variabilité intermensuelle du NDVI des sous bassins et du NDVI des types d'occupation du sol choisis	256
Figure 5.15 : Variabilité interannuelle du NDVI des sous bassins et du NDVI des types d'occupation des sols choisis	256
Figure 5.16 : Variabilité mensuelle du NDVI des forêts denses dans le sous bassin de l'Alibori	257
Figure 5.17 : Variabilité interannuelle du NDVI des forêts denses dans le sous bassin de l'Alibori	
Figure 5.18 : Variabilité interannuelle du NDVI de mosaïques de cultures et jachères, de la pluie et de l'écoulement (1982-1992)	259

Table des tableaux

Tableau 1.1 : Pluies moyennes annuelles (1955-1992), latitude et altitude des stations	26
Tableau 1.2 : Valeurs moyennes mensuelles de l'insolation (H/J) (1955-1992) à la station de Kandi	32
Tableau 1.3 : Répartition de l'énergie solaire reçue sur le sol horizontal pour la station de Kandi	33
Tableau 1.4 : Superficies des communes du bassin béninois du fleuve Niger	42
Tableau 1.5: Estimation des ressources en eaux superficielles sur le bassin du Niger au Bénin	52
Tableau 1.6 : Ressources en eaux souterraines de la portion nationale	53
Tableau 1.7 : Ouvrages hydrauliques dominant dans le bassin béninois du fleuve Niger	54
Tableau 2.1.a : Stations météorologiques du bassin béninois du fleuve Niger	78
Tableau 2.1.b : Stations météorologiques béninoises complémentaires	78
Tableau 2.1.c : Stations météorologiques étrangères complémentaires	78
Tableau 2.2 : Clé d'interprétation des photographies aériennes	107
Tableau 2.3 : Clé d'interprétation des images satellites	107
Tableau 3.1 : Pluviométrie moyenne décennale en mm	118
Tableau 3.2 : Déficit entre les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 des mois les plus humides dans le bassin béninois du fleuve Niger	126
Tableau 3.3 : Poids de chacun des mois les plus arrosés dans la moyenne annuelle de la période 1955-1992 dans les sous bassins du bassin béninois du fleuve Niger	127
Tableau 3.4 : Déficit pluviométrique des mois les plus humides entre les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 dans les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori, de la Sota à Gbassè et de Sota à Coubéri	128
Tableau 3.5 : Récapitulation de l'impact du déficit des mois humides sur le déficit global entre les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 dans les sous bassins	129
Tableau 3.6 : Déficit d'écoulement entre les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 dans les sous bassins	144
Tableau 3.7 : Déficit d'écoulement entre les périodes 1955-1972 et 1973-1992 des mois à débits importants dans les sous bassins du bassin béninois du fleuve Niger	146
Tableau 3.8 : Déficit des maxima d'écoulement dans le bassin entre 1955-1972 et 1973-1992	150
Tableau 3.9 : Coefficients et durées de tarissement dans les sous bassins pour la période 1955-1992	152
Tableau 3.10 : Coefficients de tarissements moyens dans les sous bassins pour les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 en j-1	155
Tableau 3.11 : Evolution comparée des fluctuations pluviométriques et des autres termes du bilan hydrologique en mm dans les sous bassins de la Mékrou, de l'Alibori et de la Sota sur la période 1955-1992	156
Tableau 1.2 : Température moyenne minimale par décennie sur la période 1955-1992 en °C	157
Tableau 3.13 : Proportion de chaque terme du bilan hydrologique dans 100 % de pluie dans les sous bassins pour la période 1955-1992 et les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992	159
Tableau 3.14 : Corrélations entre les moyennes interannuelles des termes du bilan hydrologique (1955-1992)	160
Tableau 3.15 : Récapitulatif de l'impact de la fluctuation de quatre mois humides sur les autres termes du bilan hydrologique	165
Tableau 4.1 : Tableaux de Nash (racine carrée de l'écoulement) utilisés pour l'étude de l'efficacité des modèles GR4J et GR2M	185
Tableau 4.2 : Analyse de corrélation entre les paramètres du modèles GR4J dans les sous bassins	189
Tableau 4.3 : Nash moyen en calage et contrôle avec le modèle GR4J sur la période 1955-	

1992 et les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 dans les sous bassins	192
Tableau 4.4 : Nash moyen en calage et contrôle avec le modèle GR2M sur la période 1955-1992 et les sous-périodes 1955-1972 et 1973-1992 dans les sous bassins	195
Tableau 4.5 : Tableau des simulations croisées pour l'étude de l'évolution du comportement hydrologique d'un bassin versant	209
Tableau 4.6 : Les trois différents types de tableaux de simulations croisées théoriques en fonction des tendances hydrologiques	210
Tableau 4.7 : Interprétation de matrices de simulations croisées obtenus pour l'écoulement moyen sur les sous bassins pour différentes durées de calage.	214
Tableau 4.8 : Interprétation de matrices de simulations croisées obtenus pour l'écoulement moyen sur les sous bassins pour différentes durées de calage (modèle GR2M).	216
Tableau 5.1 : Récapitulatif des superficies des unités d'occupation du sol de 1979 et de 1992	237
Tableau 5.2: Corrélation NDVI et valeurs brutes des paramètres du bilan hydrologique (pas de temps annuel)	247
Tableau 5.4 : Corrélation annuelle entre les résidus de NDVI, et les résidus d'écoulement et de recharge, indépendamment des variations des pluies (1982-1992)	252
Tableau 5.6 : Corrélation des NDVI des états de surface élémentaires, de la pluie et de l'écoulement du bassin au pas de temps annuel	258

ANNEXE

Tableau I : Les valeurs du Nash en calage-contrôle sur les sous périodes dans les sous bassins avec le GR4J (1955-1992)

Mékrou	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	77	68	70	71	61	53
1960-1966	80	86	73	85	82	73
1966-1972	72	72	84	68	63	52
1972-1979	70	76	68	83	78	72
1979-1986	25	49	35	54	66	53
1986-1992	34	47	22	71	74	81

Alibori	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	84	81	81	78	69	60
1960-1966	80	85	82	83	77	64
1966-1972	66	69	75	67	66	57
1972-1979	64	73	70	75	73	60
1979-1986	41	57	60	66	72	61
1986-1992	18	46	46	56	69	63

Gbassè	M1,1	M1,2	M1,3	M1,4	M1,5	M1,6
1955-1960	50	79	65	55	27	61
1960-1966	48	81	69	58	15	58
1966-1972	15	79	70	55	2	57
1972-1979	47	77	69	64	22	63
1979-1986	44	60	48	47	39	56
1986-1992	50	76	66	58	28	67

Coubéri	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	61	30	34	23	21	18
1960-1966	41	76	73	64	66	69
1966-1972	43	60	75	63	56	60
1972-1979	45	34	34	61	49	47
1979-1986	57	50	36	67	67	65
1986-1992	27	55	52	57	60	62

Tableau II : Les valeurs du Nash en calage-contrôle sur les sous périodes dans les sous bassins avec le GR2M (1955-1992)

Mékrou	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	91	76	80	71	64	59
1960-1966	89	95	88	93	89	83
1966-1972	80	91	91	80	72	65
1972-1979	63	79	61	81	79	75
1979-1986	29	57	26	64	66	64
1986-1992	30	65	27	76	82	86

Alibori	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	93	91	92	87	80	77
1960-1966	90	93	92	92	86	84
1966-1972	85	85	87	83	77	74
1972-1979	77	87	83	88	85	83
1979-1986	49	70	64	79	84	83
1986-1992	48	72	62	81	87	88

Gbassè	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	89	62	55	63	53	62
1960-1966	63	91	86	86	70	87
1966-1972	75	79	83	71	51	74
1972-1979	76	69	48	77	66	76
1979-1986	48	48	40	74	49	40
1986-1992	74	71	64	37	65	74

Coubéri	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	59	50	50	31	38	39
1960-1966	65	81	81	70	70	74
1966-1972	60	77	77	47	68	71
1972-1979	46	28	31	47	44	47
1979-1986	53	53	56	68	71	68
1986-1992	28	65	66	72	70	73

Tableau III : Les valeurs du l'écoulement en calage-validation sur les sous périodes dans les sous bassins avec le GR4J (1955-1992)

Mékrou	M1,1	M1,2	M1,3	M1,4	M1,5	M1,6
1955-1960	156	135	157	114	104	84
1960-1966	170	150	173	128	117	96
1966-1972	161	139	161	119	108	88
1972-1979	146	124	146	106	95	76
1979-1986	113	93	113	78	69	54
1986-1992	158	148	170	119	114	91

Alibori	M1,1	M1,2	M1,3	M1,4	M1,5	M1,6
1955-1960	131	103	97	87	60	44
1960-1966	147	116	109	98	67	47
1966-1972	165	126	118	108	73	66
1972-1979	85	69	64	55	40	24
1979-1986	75	63	58	49	36	19
1986-1992	115	90	84	75	51	43

Gbassè	M1,1	M1,2	M1,3	M1,4	M1,5	M1,6
1955-1960	132	112	114	69	72	102
1960-1966	145	125	127	80	83	112
1966-1972	163	142	144	93	96	129
1972-1979	162	138	137	84	88	128
1979-1986	133	112	112	65	69	101
1986-1992	148	125	125	76	80	116

Coubéri	M1,1	M1,2	M1,3	M1,4	M1,5	M1,6
1955-1960	146	113	120	93	95	93
1960-1966	169	137	136	107	116	115
1966-1972	181	148	140	111	128	126
1972-1979	146	114	114	96	94	93
1979-1986	146	113	119	94	95	93
1986-1992	170	134	125	100	116	114

Tableau IV : Les valeurs de l'écoulement en calage-validation sur les sous périodes dans les sous bassins avec le GR2M (1955-1992)

Mékrou	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	143	101	146	83	67	56
1960-1966	173	124	177	103	83	69
1966-1972	146	141	145	81	64	55
1972-1979	114	79	117	64	50	41
1979-1986	81	54	83	43	33	27
1986-1992	137	99	140	83	67	53

Alibori	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	135	108	115	90	68	63
1960-1966	150	119	128	99	74	69
1966-1972	147	117	125	97	73	68
1972-1979	93	73	78	59	43	40
1979-1986	87	68	72	55	39	37
1986-1992	120	94	103	77	58	53

Gbassè	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	108	127	164	96	62	105
1960-1966	80	95	125	71	45	78
1966-1972	75	91	119	66	40	72
1972-1979	41	51	69	35	21	40
1979-1986	41	50	69	62	21	40
1986-1992	69	81	108	73	41	70

Coubéri	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1
1955-1960	78	60	58	37	39	41
1960-1966	103	80	78	51	54	56
1966-1972	111	86	83	34	59	60
1972-1979	36	58	57	36	39	39
1979-1986	70	50	49	30	33	33
1986-1992	108	77	75	51	57	55

Tableau V: Les valeurs de la statistique SDD sur les sous périodes dans les sous bassins avec le GR4J (1955-1992)

Mékrou	M11	M1,2	M1,3	M1,4	M1,5	M1,6	Total	Alibori	M1,1	M1,2	M1,3	M1,4	M1,5	M1,6	Total
1955-1960		-22	0	-43	-52	-72	-188	1955-1960		-28	-34	-44	-71	-87	-265
1960-1966	-20		23	-22	-33	-55	-106	1960-1966	-31		-7	-18	-49	-68	-174
1966-1972	0	23		-42	-53	-73	-146	1966-1972	-47	-8		-10	-45	-52	-162
1972-1979	-41	-18	-41		-11	-30	-141	1972-1979	-30	-14	-8		-16	-32	-100
1979-1986	-45	-24	-44	-9		-15	-137	1979-1986	-40	-27	-22	-14		-16	-119
1986-1992	-67	-56	-79	-28	-22		-252	1986-1992	-72	-47	-41	-32	-8		-201
SDD							-1087	SDD							-1020

Gbassè	M11	M1,2	M1,3	M1,4	M1,5	M1,6	Total	Coubéri	M11	M1,2	M1,3	M1,4	M1,5	M1,6	Total
--------	-----	------	------	------	------	------	-------	---------	-----	------	------	------	------	------	-------

Tableau VI : Les valeurs de la statistique SDD sur les sous périodes dans les sous bassins avec le GR2M (1955-1992)

Mékrou	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1	Total	Alibori	M1,1	M1,2	M1,3	M1,4	M1,5	M1,6	Total
1955-1960		-41	4	-59	-76	-87	-260	1955-1960		-27	-20	-45	-68	-72	-232
1960-1966	-48		53	-22	-42	-55	-114	1960-1966	-30		9	-20	-45	-50	-137
1966-1972	-1	4		-64	-81	-91	-233	1966-1972	-22	8		-28	-52	-57	-151
1972-1979	-50	-15	-54		-14	-23	-156	1972-1979	-34	-14	-18		-17	-20	-102
1979-1986	-48	-21	-50	-10		-5	-134	1979-1986	-48	-29	-33	-16		-2	-128
1986-1992	-84	-46	-87	-29	-14		-259	1986-1992	-67	-41	-50	-24	-5		-187
SDD							-1155	SDD							-937

Gbassè	M1,1	M1,2	M1,3	M1,4	M1,5	M1,6	Total	Coubéri	M1,1	M2,1	M3,1	M4,1	M5,1	M6,1	Total
1955-1960		20	57	-12	-46	-3	16	1955-1960		-18	-20	-41	-39	-37	-155
1960-1966	16		30	-25	-51	-17	-47	1960-1966	-23		-2	-30	-26	-25	-105
1966-1972	44	28		-53	-79	-47	-107	1966-1972	-28	-2		-49	-24	-23	-126
1972-1979	-5	-15	-34		-15	4	-65	1972-1979	0	-22	-21		4	4	-36
1979-1986	-19	-29	-47	-51		18	-129	1979-1986	-37	-17	-15	3		0	-65
1986-1992	0	-11	-39	7	29		-13	1986-1992	-53	-22	-21	4	-2		-94
SDD							-334	SDD							-582