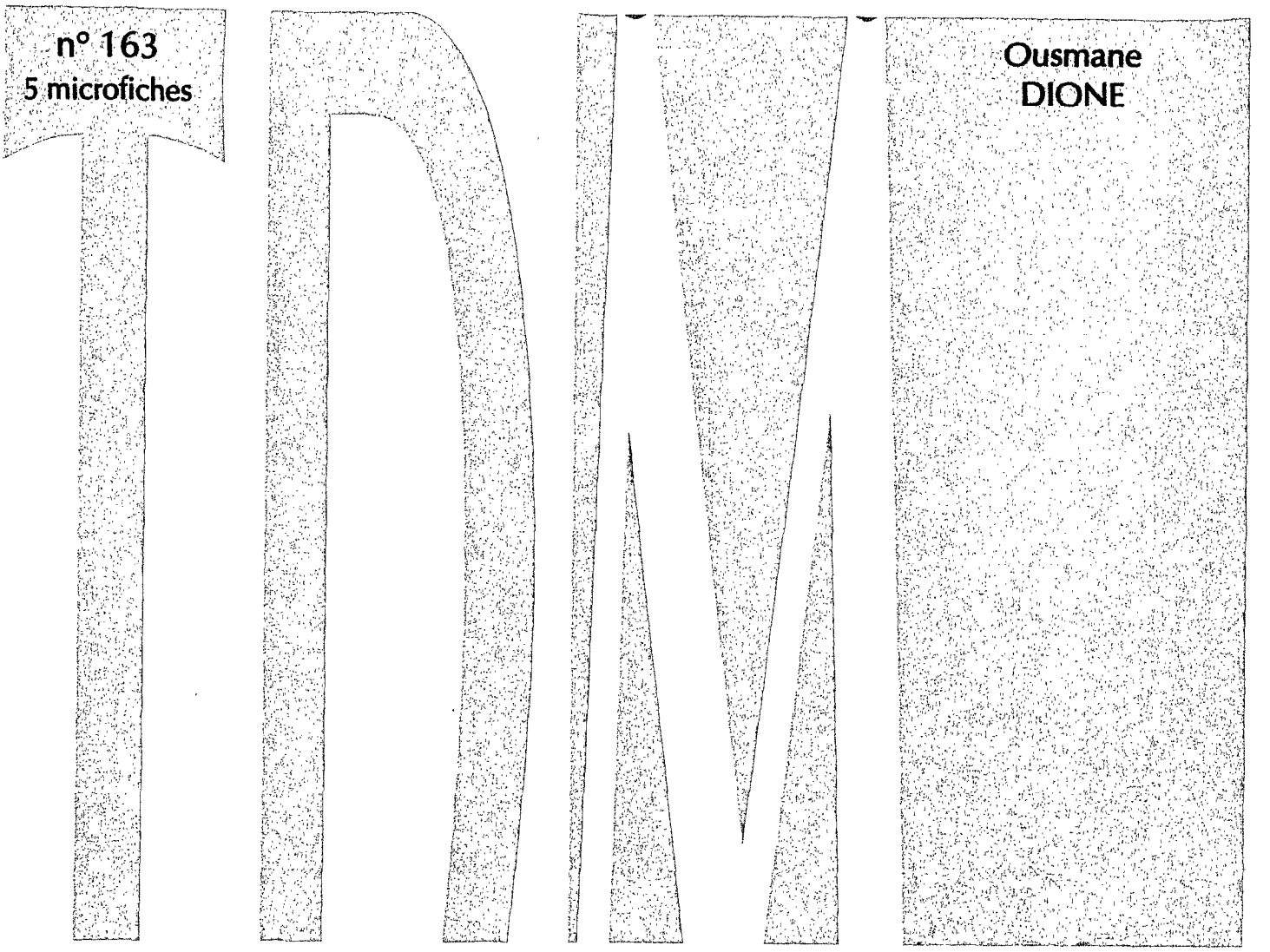
n° 163
5 microfiches

Ousmane
DIONE



Thèses et documents microfichés

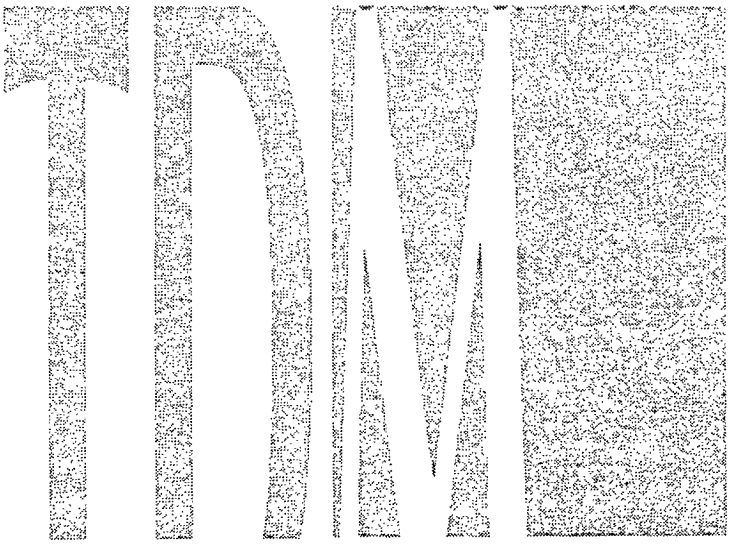
Évolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

Fonds Documentaire ORSTOM
010012552

ORSTOM
éditions

n° 163

5 microfiches



Thèses et documents microfichés

ORSTOM éditions

Orstom, l'Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération

La loi du 1er juillet 1992 (code de la propriété intellectuelle, première partie) n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1er de l'article L. 122-4).
Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon passible des peines prévues au titre III de la loi précitée.

© ORSTOM éditions 1997, Paris

ISSN : 0767-922X
ISBN : 2-7099-1339-9

UNIVERSITE LYON 3 JEAN MOULIN
Laboratoire de Géographie Physique

EVOLUTION CLIMATIQUE RECENTE ET DYNAMIQUE FLUVIALE DANS LES HAUTS BASSINS DES FLEUVES SENEGAL ET GAMBIE

Cliché : chutes du Sénégal à Gouïna

Thèse de Doctorat présentée par :

Ousmane DIONE

Sous la direction de Monsieur le Professeur :

Marcel LEROUX

Jury :

Président : **Professeur Jacques BETHEMONT**
Membres : **Professeur Charles TOUPET**
Professeur Gérard MOTTET
Docteur Jean-Claude OLIVRY
Professeur Mamadou SALL
Professeur Marcel LEROUX

Février 1996

Fonds Documentaire ORSTOM
Cote : A*12551 Ex : 2

à ma Mère

à Sœur Marie-Suzanne

SIGLES ET ABREVIATIONS

AMP : Anticyclone Mobile Polaire
ASECNA : Association pour la SECurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
CCCE : Caisse Centrale de Coopération Economique
CE : Coefficient d'Ecoulement
CILSS : Comité Permanent Inter-Etats de lutte contre la Sécheresse au Sahel
DE : Déficit d'Ecoulement
EMI : Equateur Météorologique Incliné
EMV : Equateur Météorologique Vertical
ETP : Evapo-Transpiration Potentielle
ETR : Evapo-Transpiration Réelle
FAC : Fond d'Aide et de Coopération
IFAN : Institut Fondamental d'Afrique Noire (Cheikh Anta Diop).
JEAN : Jet d'Est Africain Nord
JEAS : Jet d'Est Africain Sud
JET : Jet d'Est Tropical
OMVG : Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie
OMVS : Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal
OMVSTM : Opération Vallée du Sénégal Térécote et lac Magui.
ORSTOM : Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération
P : Pluie
PIV : Périmètre Irrigué Villageois
PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement
Q : Débits
SAED : Société d'Aménagement des terres du Delta
SONADER : Société National du Développement rural

AVANT-PROPOS

Du Professeur Marcel Leroux je ne connaissais vraiment pas grand-chose, si ce ne sont les anthologies climatiques dont "le climat de l'Afrique tropicale", devenue une œuvre de référence.

Aussi, lorsque le Professeur Mamadou Sall le sollicita pour diriger mes travaux de 3ᵉcycle, je me sentis d'abord très honoré, puis, pendant de longs moments, je fus assailli par le doute. La peur de ne pas me montrer à la hauteur de la confiance placée en moi et la difficulté de réaliser un travail original par rapport à ses écrits impressionnants sur le climat tropical m'habitèrent.

C'est exactement le jeudi 21 janvier 1993 en me recevant à Lyon que le Professeur Marcel Leroux me convia à faire une étude sur l'eau et le climat dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Trois raisons principales me poussèrent à accepter avec enthousiasme sa proposition, rehaussée par la joie de travailler avec le Professeur Jacques Bethemont et le Docteur Jean Claude Olivry, de "véritables maîtres" en hydrologie fluviale et sur les aspects relatifs à l'eau et aux hommes :

- d'abord parce que les recherches auxquelles me conviait le Professeur Leroux étaient la suite de mes premiers travaux commencés en 1991 en maîtrise et confirmés en 1992 dans le cadre de mon mémoire de D.E.A. (Diplôme d'Etudes Approfondies) sur le bassin versant de la Falémé, lui même sous-bassin de l'entité fluviale du haut bassin du fleuve Sénégal.
- du fait ensuite, que venant de l'hinterland sénégalais, ma vision d'enfant s'est souvent arrêtée à cette image cauchemardesque d'innombrables cadavres d'animaux, auxquels se rajoutaient au fil du temps ceux d'un bétail famélique, réduit à l'état de carcasses. Mon ambition de comprendre ce drame n'eut alors d'égal que le chagrin et le regard vide d'agriculteurs et d'éleveurs à la quête inespérée des moindres pluies.
- enfin, c'est parce que l'eau, puisque c'est d'elle qu'il s'agit dans ses différentes formes, est en train de réunir aujourd'hui les hommes dans une zone soudano-sahélienne, longtemps en proie à des dissensions. Non pas à cause de son abondance hélas, mais par sa pénurie, elle suscite une mobilisation qui, plus qu'étatique, embrasse une échelle sous-régionale dans le cadre du bassin-versant, conformément au vieux propos de Buache qui en partageait ainsi l'espace.

Ce travail se situe à la croisée de trois disciplines (climatologie, hydrologie et aménagement) qui par leur convergence impriment à la géographie sa rigueur scientifique.

Puisque l'occasion m'est offerte, qu'il me soit permis de remercier le Professeur Marcel Leroux. Les immenses qualités humaines que nous avons trouvées en lui, ni son temps, ni ses compétences et ses conseils dans les moments difficiles ne m'ont jamais été ménagés. Par son exigence, sa rigueur scientifique, il m'a toujours guidé à l'essentiel des problèmes dans un souci marqué sans cesse par la clarté et la simplicité. Ce travail n'aurait jamais été mené à terme sans lui.

Monsieur le Professeur Jacques Bethemont a accepté, de son œil de spécialiste, de diriger la co-direction de la partie hydrologique de ce travail. En dépit des multiples sollicitations dont il est souvent l'objet, il s'est toujours ménagé du temps pour nous orienter. Tout au long de notre travail en commun, il m'a fait bénéficier sans retenue de sa clairvoyance, de ses immenses connaissances dans le domaine de l'hydrologie fluviale avec, à chaque fois, une très bonne humeur. Qu'il soit assuré en retour de mon plus profond respect et de mon attachement sincère.

Je serais éternellement redevable au Docteur Jean-Claude Olivry. Durant mon séjour en République du Mali, j'ai pu tirer profit de ses connaissances d'homme de terrain, aguerri aux problèmes du monde tropical africain. Les longues discussions que nous tenions souvent, ses conseils et son soutien actif mais discret ne m'ont jamais manqué. Ce travail est aussi le sien. A lui et à tout le personnel de l'ORSTOM de Bamako (Messieurs Mahé Gil, Bricquet Jean-Pierre, Touré Mamane et Fatogoma Bamba), je leur dis *Nteri Fama*.

Monsieur le Professeur émérite Charles Toupet restera toujours pour nous ce sage dont on rêve tant de marcher dans le sillage. Sans doute son rôle de précurseur de la géographie africaine et soudano-sahélienne en particulier m'a-t-il amené à chaque fois que nécessaire à me réfugier sous l'ombre de son savoir. C'est avec un soutien actif, ponctué par d'incessants encouragements, qu'il a accordé un intérêt particulier à l'élaboration progressive de mes travaux. Je lui témoigne toute ma reconnaissance.

Le Professeur Gérard Mottet, Directeur du Laboratoire de Géographie Physique, a, par son sens de l'accueil et de l'hospitalité, aménagé une place spéciale aux étudiants et chercheurs africains. Nos différentes préoccupations ont toujours été les siennes et jamais il n'a ménagé ses efforts quand nous étions dans le besoin. Sa présence dans ce jury n'est que justice, tant il a prêté un regard bienveillant et empreint de critique à ce travail tout au long de sa réalisation.

C'est le Professeur Mamadou Sall qui m'a initié aux fondements de la Géographie, épaulé par ses collègues de l'Université Cheikh Anta Diop dans les différentes spécialités de cette discipline. Depuis, il n'a jamais cessé de me soutenir. A son contact, l'embryon de mon horizon intellectuel s'est progressivement élargi et jamais il n'eut de cesse qu'il s'étoffe au contact de ses autres collègues. J'aimerais, qu'à l'hommage particulier que je lui rends, qu'il sache que ma volonté de mieux faire pour ne jamais le décevoir restera mon souci. J'espère sincèrement qu'il en est ainsi de ce travail.

Durant tout notre cursus à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, nous avons bénéficié d'un enseignement sérieux, riche et rigoureux. Qu'il me soit permis de remercier l'ensemble du corps enseignant et tout le personnel de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines. Messieurs Amadou Abdoul Sow et Pascal Sagna, Maître-assistants, ont été à la fois des amis et des formateurs de grand talent. Je leur exprime ma profonde gratitude.

Ce travail a bénéficié du concours d'innombrables personnes des services universitaires et administratifs africains et français. Leur aide et la sympathie qu'ils m'ont témoignées ont été déterminantes. Aussi, je ne saurais les nommer tous, mais je prie ceux qui s'y reconnaissent de près ou de loin de croire en mes sincères remerciements.

Madame Traoré née Fanta Tandian, de la Météorologie Nationale du Mali, n'a jamais mesuré son temps dans la collecte infinie de mes données pour le territoire malien. Qu'elle soit convaincue de ma fraternité sincère.

Je témoigne une sympathie particulière à Messieurs Amadou Diadié Wélé de la Direction de l'Hydraulique du Mali, Djiby Sokona de la Brigade Ecole de Tambacounda, Toumany Barro de la Direction Nationale de l'Hydraulique de Guinée ainsi qu'à Bakari Ouattara, ingénieur des Ponts et Chaussées à l'OMVS.

Je ne saurais remercier Messieurs Alioune Ndiaye et Mohamed Sissako, ingénieurs en service à l'ASECNA. et Jean Albergel, chef du département d'hydrologie de l'ORSTOM de Dakar-Hann.

Messieurs Yann L'Hotte, ingénieur de recherche à l'ORSTOM de Montpellier, Daniel Jouve, ingénieur à la Compagnie Nationale du Rhône (C.N.R.), m'ont prêté un concours précieux dans l'analyse statistique des données pluviométriques et hydrologiques. Je les remercie de leur aimable et sincère disponibilité.

Mesdames Ayme Colette, Augerd Dominique et Dugas de la Catonnière Yvonne ont toujours été sensibles aux différentes sollicitations bibliographiques venant de ma part. Qu'elles reçoivent ici ma profonde reconnaissance.

Mes remerciements et ma reconnaissance vont aussi à l'ensemble du personnel de la Division de la Recherche de l'Université Jean Moulin-Lyon III. Ma pensée va à Mesdames Duparc Françoise, Blondelle Frédérique, Bailly Nathalie, Guenard Fabienne, David-Henriet Marie-Jo et à Monsieur Carrilho Gilles.

Tout au long de nos recherches, le Laboratoire de Géographie Physique a été un havre d'échanges et de recherches bercé dans la bonne humeur. Je ne saurais trop exprimer mes remerciements, à tout ce monde dont la quête du savoir ne s'est jamais départie des qualités humaines. Aussi, puisse-t-il que leur errance dans le monde intellectuel trouve un jour un Eldorado à leur convenance.

Monsieur Ndong Jean-Baptiste a toujours été un ami et un compagnon sincère. Notre fraternité s'est renforcée au fil des épreuves quotidiennes. Notre pensée va aussi à Messieurs Comby Jacques, Landon Norbert, Guimard David, Omar Suliman ainsi qu'à Madame Béral-Guyonnet Isabelle.

Je remercie particulièrement l'AUPELF dont le concours financier a permis la publication de cette thèse.

J'adresse enfin mes remerciements à mes parents, à Cécile et au frère Luc Brunette pour leur soutien constant, ainsi qu'à mes nombreux amis pour leurs perpétuels encouragements.

Résumé

Ce travail porte sur l'étude du climat et de l'hydrologie des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie, région de l'Afrique de l'ouest comprise entre la zone intertropicale humide guinéenne et la zone intertropicale sèche sahélienne.

Cette étude comporte trois volets principaux :

Le milieu géographique, espace dans lequel se déroulent les manifestations climatiques et hydrologiques, est d'abord présenté. Ce milieu géographique connaît une diversité géologique, pédologique et biogéographique où les variations du climat ont contribué à imprimer quatre grands ensembles de paysages.

Sont successivement étudiés :

- Le Fouta Djalon, qui occupe la partie méridionale des hauts bassins. Cet ensemble montagneux n'est pas uniforme et comprend des sommets élevés de hauts plateaux et des vallées encaissées. La lithologie est à dominante de roches métamorphiques et éruptives. Les types de sols sont surtout liés à l'évolution géomorphologique et s'apparentent à des cuirasses, et à des sols ferralitiques. La végétation est formée par une forêt dense sur les sommets, qui se dégrade sur les plateaux et se réduit à la savane dans les plaines. Le Fouta Djalon constitue la source des principaux fleuves qui drainent les hauts bassins.
- Le plateau Mandingue constitue la partie orientale des hauts bassins. Ensemble de paysages hétérogènes, le plateau Mandingue est essentiellement formé de grès. Les sols de ces différents paysages sont surtout à dominante de sols ferrugineux et de cuirasses. Sa végétation soudanienne est assez dense au sud. Le plateau Mandingue est traversé par les branches mères du fleuve Sénégal.
- Les pays de la Falémé et de la moyenne Gambie occupent la partie centrale et occidentale des hauts bassins. C'est un ensemble de paysages très contrastés où des régions déprimées côtoient des massifs subtabulaires. La géologie des pays de la Falémé et de la moyenne Gambie est dominée par les formations du socle et de sa couverture paléozoïque. La pédologie est à dominante de sols ferrugineux et de cuirasses avec une végétation soudanienne qui s'éclaircit vers le nord. Les pays de la Falémé et de la moyenne Gambie sont drainés par la Falémé, la Gambie et leurs affluents.
- Les plaines et plateaux du nord occupent la partie septentrionale et nord-orientale des hauts bassins. Les plaines sont aussi taillées sur la couverture du socle et débordent légèrement sur les bassins sédimentaires. Les plateaux sont subtabulaires et dominés par les grès. Les lithosols et sols minéraux dominent dans ces deux ensembles avec une végétation très discontinue.

Ces paysages qui forment le milieu géographique des hauts bassins ont une influence diverse sur l'écoulement des cours d'eau qui les drainent.

Le second volet de ce travail étudie de façon aussi complète et détaillée que possible le climat de la région. Cette étude est élaborée à partir des observations et des relevés des différents réseaux météorologiques nationaux qui se partagent les hauts bassins.

Les manifestations climatiques de l'Afrique boréale sont d'abord évoquées à travers les mécanismes de la circulation générale. Les flux et les discontinuités qui déterminent les saisons de l'Afrique boréale dépendent des variations des agglutinations anticycloniques, elles-mêmes commandées par les anticyclones mobiles polaires. Les hauts bassins, n'étant qu'un cadre plus restreint, intègrent la même dynamique avec néanmoins ses nuances climatiques locales.

Sont ainsi analysés :

- La pluviométrie, facteur de différenciation climatique, qui conditionne l'écoulement des cours d'eau. Ces différentes caractéristiques à travers son évolution dans le temps et dans l'espace ainsi que sa péjoration sont aussi évoquées.
- Les températures de l'air et l'évaporation qui, suivant leur évolution et leur importance saisonnière, exercent une influence sur le milieu physique et sur l'écoulement des cours d'eau.
- Les autres éléments climatiques : l'humidité relative et l'insolation, facteurs qui interfèrent sur le rythme climatique saisonnier et l'écoulement, sont aussi analysés.

Dans l'analyse climatique, certaines particularités qui peuvent être généralisées à l'Afrique de l'ouest, ressortent nettement dans les hauts bassins :

- Les pluies sont d'abord plus importantes au sud-ouest des hauts bassins qu'à l'est, du fait de l'orientation du flux de mousson et de la présence d'un relief élevé. Les pluies décroissent ensuite du sud au nord, suivant la migration de l'Equateur Météorologique et la réduction de la saison pluvieuse. Les pluies connaissent enfin une baisse généralisée dans la région depuis plus de trois décennies du fait de la sécheresse.
- Des températures et une évaporation, qui augmentent du sud au nord en fonction du gradient thermique. Ces éléments climatiques connaissent aussi une évolution à la hausse à l'échelle spatiale.

Pour la période récente, les éléments climatiques qui exercent une ponction (températures, évaporation, insolation) connaissent un regain d'importance parallèlement à la baisse de la pluviométrie. Cette situation synonyme d'une tendance à un changement climatique nous autorise à parler de sécheresse dans les hauts bassins.

Le troisième volet de ce travail étudie la dynamique hydrologique des hauts bassins par rapport aux modifications climatiques observées.

Les unités hydrologiques et leurs aspects physiques sont présentés d'abord. Les caractéristiques hydrologiques et les bilans de l'écoulement sont ensuite analysés pour mieux comprendre les caractères de l'abondance fluviale.

Succédant au constat climatique, la relation pluie-écoulement détermine les ressources en eau de surface. Elle évalue comment la péjoration pluviométrique affecte le comportement hydrologique des hauts bassins à travers les débits extrêmes.

Les enseignements tirés de la corrélation entre climat et eau permettent de retracer la dynamique et l'évolution récente de la sécheresse. Cette évolution se réfère à l'histoire climatique en étudiant les manifestations des paléoclimats ouest africains. Elle compare ensuite à partir des conditions dynamiques et des facteurs aérologiques les similitudes de ces deux périodes.

Enfin, l'explication de la situation actuelle ouvre des perspectives sur les situations hydroclimatiques possibles, tout en rappelant les formes d'aménagement élaborées pour pallier au manque d'eau.

Pour les hauts bassins, ce travail apporte des connaissances scientifiques jusque-là peu poussées. Il explique à partir des paléoclimats les causes possibles de la situation climatique actuelle. Il insiste aussi sur la nécessité d'une évaluation sérieuse des ressources en eau, de sa gestion à partir d'un aménagement qui tient compte que toute mise en valeur est d'abord conditionnée par les réalités climatiques et hydrologiques. Ce travail pourrait être pour d'autres régions soumises aux mêmes indigences, une approche méthodologique dans la connaissance, l'exploitation et la gestion des ressources en eau de surface.

MOTS CLES : Incidences hydrologiques ; Sénégal ; Gambie ; Hauts bassins ; Fouta Djalon ; Plateau Mandingue ; Pays de la Falémé et de la Moyenne Gambie ; Péjoration climatique ; Paléoclimats.

Abstract

This piece of work focuses on the study of the climate and hydrology of the high basins of the Senegal and Gambia rivers, a region of West Africa located between the humid intertropical Guinean zone and the dry intertropical Sahelian zone.

The study includes three main parts :

The geographical environment, the sphere in which climatic and hydrologic occurrences take place, is presented first. This geographical environment has a geological, as well as pedological and biogeographical diversity, where the variations of the climatic variations have contributed to establishing four prominent series of landscapes.

Are successively examined :

- The Fouta Djalon, occupying the southern part of the high bassins. This mountainous rane is not uniform, and comprises high summits and enclosed valleys. The lithology is predominantly metamorphic and eruptive rocks. The three types of soil are linked especially to the geomorphological evolution, and have certain similarities to cuirasses and ferralitic soils. The vegetation is formed by a thick forest on the summits, which thins out on the plateau and is reduced to savannah on the lower solpes. The Fouta Djalon represents the source of the main rivers draining the high basins.
- The Mandinga plateau forms the eastern part of the high basins. Formed of different types of landscapes, this same plateau is essentially composed of sandstone. The soils of these different landscapes mostly feature ferruginous soils and cuirasses soils. Its soudanian vegetation is pretty dense in the south. The mother branches of the river Senegal run across the Mandinga Plateau.
- The Countries of Faleme and Middle Gambia occupy the central and western part of the high basins. It is a series of highly contrasted lansdcapes, where low-lying regions encouter subtabular massifs. The geology of these same countries are dominated by the formations of the platform and its Paleozoïc cover. The pedology is dominated by ferruginous soils and cuirasses, whith a soudanian vegetation which gets thinner towards the north. The Countries of Faleme and Middle Gambia are drained by the Faleme, the Gambia and their affluents.
- The Plains and Plateaus of the north occupy the northern and north-eastern part of the basins. The plains are also hewn on the platform top and jut out slightly into the sedimentary basins. The plateau are subtabular and primarily composed of sandstone. Lithosoils and mineral soils dominate in both cases, with a largely discontinuous vegetation.

These landscapes, which form geographical sphere of the high basins influence the flow and course of the rivers which drain them.

The second part of this study examines as accurately as possible the region's climate. This study is elaborated from observations and statements of the different meteorological networks, which cover the high basins.

The climatic signs of boreal Africa are first noticed through the mechanisms of the general circulation. The fluxes and discontinuities that determine the seasons of boreal Africa depend on anticyclonic agglutinations, themselves ruled by the mobile polar anticyclones. The high basins being only a more restricted area, are part of the same dynamic, albeit whith their slight local differences of climate.

Are thus analysed :

- The pluviometry, a climatic factor of differenciation, which conditions the river flows. These different characteristics are mentioned through its evolution in time and space, as well as its pejoration.
- The air and evaporation temperatures which, according to their seasonal importance and evolution, influence the physical milieu and river flows.
- The other climatic elements : relative humidity, and the periods of shunshine, both of which are factors that interfere with seasonal climatic rythm and the flows.

In the climatic analysis, certain particularities which can be generalized for western Africa, come out clearly in the high basisn :

The rains are heavier in the south west of the high basins than in the east, due to the orientation of the monsoon flux and the presence of high reliefs. The rains diminish then from the south to the north, following the migration of the Meteorological Equator and the decline of the rainy season. Finally, the rains have dropped generally in the area for more than three decades because of drought.

- Temperatures and evaporation which increase from the south to the north according to the thermic pressure gradient. These climatic elements are also going upwards on a world scale. In a more recent period, the climatic elements exerting a punction (temperatures, evaporation, shunshine) have gained more importance along with the drop in rainfall. This situation, indicative of a climatic change trend, enables us to talk of drought in the high basins.

The third part of this study deals with the hydrological dynamics of the high basins in relation to the climatic alterations observed. To begin with, the hydrological units and their physical aspects are presented. Next the hydrological characteristics and the rain flow assessment are analysed in order to understand the fluvial abundance better.

Following the climatic report, the rainfall/rainflow relation determines the surface water resources, and evaluates how the pluviometric pejoration affects the hydrologic behaviour of the high basins through the extreme rates of flow.

The lessons drawn from correlation between climate and water can allow us to relate the dynamics and recent evolution of the drought. This evolution refers to climatic history by studying different aspects of western African paleoclimates. Afterwards, the similarities between those two periods are compared thanks to the dynamic conditions and aerological factors.

Finally, the explanation of the current situation opens new prospects on the possible hydroclimatic situations, mentioning at the same time the types of development carried out to overcome the lack water.

Concerning the high basins, this piece of work provides scientific knowledge which up to now hadn't been very extensive. On the basis of paleoclimates, this study also explains the possible reasons for the current climatic situation. It also insists on the necessity of seriously evaluating water supplies and on water management based on development which would take into accourt that any improvement is first and foremost conditioned by climatic and hydrological facts.
This study could be a methodological approach of the knowledge, exploitation and management of surface water supplies for other areas subject to the same shortages.

KEY WORDS : Hydrological incidences ; Sénégal ; Gambia ; High basins ; Fouta Djalon ; Mandinga Plateau ; Countries of Falémé and Middle Gambia ; Climatic péjoration ; Paléoclimate.

INTRODUCTION

L'eau sous forme écoulée ou précipitée a toujours été liée à l'évolution des sociétés humaines. Au Sahel, cette importance de l'eau ne s'est jamais démentie, son abondance étant souvent corrélée à la manne divine.

Lorsque le ciel généreux apporte la pluie qui alimente les cours d'eau et rend la vie à des paysages meurtris, on y voit à la fois la bienfaisance et la puissance des dieux.

Par contre, quand le ciel est parcimonieux et que l'eau se fait rare, c'est parce que dit-on les dieux sont mécontents. La quête des pluies est alors source d'inquiétude quand à son abondance et sa durée.

Ce caractère mythique de l'eau dans les sociétés sahéliennes explique, peut-être, pourquoi dans cette zone semi-aride le paysan n'ait jamais irrigué, préférant plutôt s'adonner à l'agriculture pluviale.

En effet, la genèse des sociétés hydrauliques sahéliennes n'est qu'une ébauche récente, du fait des aléas qui corroborent la denrée eau et lui redonnent un intérêt capital.

Depuis plus de trois décennies, le Sahel est aux prises avec une sécheresse d'une intensité jamais égalée depuis le début du siècle. Les images de famines, de bétail décimé et de paysages desséchés ont alors fait la une des journaux lors des années très sèches. Mais, pour autant que le Sahel soit tristement célèbre, la crise climatique qui le frappe n'a pas entamé la volonté des hommes de s'adapter à un milieu de plus en plus hostile.

Parallèlement, la recherche des causes de la sécheresse sahélienne est devenue une priorité des études climatologiques. Les différentes voies ouvertes pour expliquer ce phénomène sont diverses mais aboutissent souvent à un constat analogue, celui des caractéristiques climatiques.

En effet, l'histoire de la sécheresse sahélienne est aujourd'hui inscrite dans son paysage, dans la morphologie de ses cours d'eau et de ses lacs. Mais cette évolution n'est pas statique et allie des pulsations humides et sèches qui rendent encore hasardeuses les projections climatiques.

Les années 1950 et 1960 ont correspondu à des périodes pluvieuses de l'optimum climatique contemporain.

Depuis 1968, la situation climatique est marquée par une sécheresse répétée qui s'est exacerbée dans les années 1970 et 1980. Les débits des cours d'eau qui traversent la zone sahélienne ont été alors fortement réduits. Les lacs enregistrent eux aussi leur plus bas niveau, certains s'étant même asséchés. Naturellement, les aménagements restent sans conteste la meilleure réponse de l'homme aux variations de l'écoulement (abondance ou raréfaction de la ressource en eau). Les nombreuses réponses apportées au Sahel et dans ses environs, pour le dernier cas cité, ont eu des résultats mitigés :

- barrages hydroélectriques qui ne produisent pas l'énergie escomptée (Sélingué au Mali),
- barrages anti-sel qui n'accomplissent plus leur rôle, faute de débits suffisants (Casamance),
- abandon des polders au lac Tchad et des ouvrages devenus non opérationnels pour le contrôle de la submersion des rizières dans le delta intérieur du Niger (Mali).

Dans les différents cas cependant, la baisse de l'écoulement est tenue pour responsable des échecs enregistrés. Comme la plupart des fleuves qui traversent le Sahel y sont des organismes fluviaux allogènes, on accuse aussi les indigences climatiques de la région en occultant que la sécheresse sévit parfois dans les régions méridionales avec une ampleur insoupçonnée.

Le bassin du fleuve Sénégal s'étend depuis les confins du Sahara au nord jusque dans la région tropicale humide guinéenne au sud. Les débits qui le drainent sont très élevés dans son bassin amont où son cours principal prend naissance. Dans son bassin aval, le fleuve Sénégal se conduit comme un élément fluvial étranger puisqu'il ne reçoit plus d'apports significatifs. Il alimente de vastes plaines inondables et de nombreux lacs, et par la bienfaisance de ses eaux, il assure la survie des régions avoisinantes. Avec l'avènement de la sécheresse, cette manne fluviale diminue considérablement. L'ampleur de la sécheresse, son intensité et surtout sa durée posent irrémédiablement le problème de la pénurie en eau dans la vallée alluviale du Sénégal, avec de graves répercussions jusque dans des régions éloignées, mais qui en sont tributaires (Dakar étant en partie alimenté en eau à partir du lac de Guiers).

Par conséquent, un tel déséquilibre au niveau des ressources en eau entre les deux parties du bassin (amont et aval) exige une maîtrise de celle-ci afin d'éviter une pénurie durable, à notre avis source de régression économique et de tensions sociales. Aussi, il a été décidé dans les années 1980, l'édification d'ouvrages hydrauliques afin de stocker l'eau là où elle abonde (cours supérieur) pour ravitailler la partie déficiente en aval en y palliant toutefois l'invasion marine susceptible de la rendre impropre à une utilisation judicieuse.

Les rôles sont ainsi répartis entre le barrage de Manantali sur le cours supérieur et celui de Diama à proximité de l'embouchure.

Seulement, ces aménagements interviennent dans un contexte climatique particulier. Les conséquences dramatiques de la sécheresse dans la vallée alluviale n'épargnent pas cependant le haut bassin du Sénégal. D'ailleurs, les mêmes projets d'aménagements entrepris sur d'autres cours d'eau ne concernant pas directement la région sahélienne (comme le fleuve Gambie) montrent l'acuité avec laquelle se pose le problème de la pénurie en eau.

Par leur situation en domaine tropical humide, les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie font figure d'entités climatiques nanties par rapport aux régions septentrionales. Sans doute, cette caractéristique explique-t-elle le peu d'intérêt géographique qui leur est porté contrairement aux régions soumises aux rigueurs de la sécheresse. Aussi, les premiers ouvrages relatifs aux hauts bassins sont récents et peu nombreux.

Pourtant, les hauts bassins sont une unité fonctionnelle et les fleuves Sénégal et Gambie qui y prennent naissance, des éléments qui intègrent à l'échelle fluviale la géographie de toute la région. Les eaux qui forment l'écoulement de ces cours d'eau proviennent de quatre ensembles géographiques bien distincts qui réagissent différemment à l'évolution du climat et au cycle de l'eau. Les hautes terres du Fouta Djalon, qui constituent le château d'eau de l'Afrique de l'Ouest, font suite à des plateaux drainés par des affluents importants. Ces deux ensembles dominent des

régions déprimées où les apports fluviaux s'amenuisent au fur et à mesure qu'on se dirige vers les plaines du nord beaucoup plus sèches.

La place faite ainsi à ces différents problèmes évoqués, aussi bien dans l'espace que dans le temps, est de nature à nous fournir des réponses sur l'évolution climatique récente et sur la dynamique hydrologique des hauts bassins.

Ainsi, s'esquisse notre thèse de doctorat qui se veut comme une approche des divers aspects de la péjoration hydroclimatique des hauts bassins. Mais loin d'élaborer une nouvelle théorie de la sécheresse, cette étude s'appuie sur des recherches déjà confirmées du phénomène. La pénurie en eau posée au départ comme une préoccupation majeure trouve ainsi sa réponse à travers le contexte climatique, hydrologique et leur résultante que sont les aménagements, car le bassin-versant est aussi un espace vécu et utilisé.

Notre démarche s'articule autour de trois grands thèmes.

La première partie étudie le cadre géographique.

Les fleuves Sénégal et Gambie sont d'abord présentés à travers la dualité de caractères entre les hauts bassins et les vallées alluviales des deux fleuves. Nous évoquons ensuite le milieu naturel des hauts bassins. Les ensembles régionaux reconnus sont définis à travers la géologie, les paysages, les sols et la végétation, paramètres géographiques qui expliquent les modalités de l'écoulement fluvial.

Dans la deuxième partie, nous étudions le contexte climatique des hauts bassins.

Les mécanismes climatiques sont d'abord rappelés. Les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie participent à la dynamique du milieu tropical en intégrant les spécificités de l'Afrique septentrionale.

Les précipitations, "facteur essentiel de différenciation en milieu tropical" (Arlery et Grissolet, 1973), sont ensuite analysées. Ces manifestations sont d'abord décrites à partir des régimes pluviométriques qui spécifient les domaines climatiques. Ensuite, nous retraçons l'évolution de la pluviométrie en accordant une importance particulière à la baisse pluviométrique.

Les facteurs thermiques, contexte unitaire en milieu tropical, sont aussi étudiés. L'analyse des températures montre que leur évolution est liée au milieu géographique et aux conditions dynamiques du climat. Son importance influence fortement les autres éléments climatiques. L'humidité relative, l'insolation et l'évaporation sont enfin analysées. Ces différents éléments climatiques réagissent de manière différente à la sécheresse actuelle. Nous évoquons leur relation pour montrer que la sécheresse n'est pas un phénomène particulier et résulte de la dynamique d'ensemble de tous les éléments du climat.

Dans la troisième partie, nous traitons des modalités de l'écoulement fluvial et des indigences de la période récente.

Le réseau hydrographique est dicté par les conditions géographiques et climatiques. Nous présentons d'abord les unités hydrologiques et les données de l'écoulement.

L'importance de la lame d'eau écoulée détermine les caractéristiques fluviales et ses possibilités d'aménagements : les régimes hydrologiques et les bilans moyens de l'écoulement sont analysés pour mieux cerner les réalités des hauts bassins.

La sécheresse climatique qui affecte les hauts bassins se répercute aussi sur l'écoulement. Nous analysons la relation entre la pluviométrie et l'écoulement car l'importance de l'eau précipitée détermine l'abondance fluviale. Les formes extrêmes de l'écoulement, manifestes par les crues et les étiages, permettent alors de saisir l'ampleur des déficits hydrologiques.

Les caractères de la sécheresse mis en évidence tant du point de vue climatique qu'hydrologique nous amènent à évoquer ses causes. Nous étudions les paléoclimats africains pour mieux comprendre comment l'histoire climatique recoupe la dynamique climatique récente. Bien sûr, au-delà des particularités, la pénurie en eau reste le problème fondamental. Les rivières et les fleuves dont l'écoulement est encore pérenne constituent la source d'eau la plus importante dans ces régions. Malgré les multiples contraintes, ceux-ci font aujourd'hui l'objet d'aménagements hydrauliques pour mieux parer les effets de la sécheresse. Ce sont ces aménagements réalisés dans les hauts bassins que nous abordons en dernier lieu.

PREMIERE PARTIE
LE CADRE GEOGRAPHIQUE DES HAUTS BASSINS

CHAPITRE 1
PRESENTATION GENERALE DES BASSINS DU SENEGAL ET DE LA GAMBIE

Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie s'étendent du sud au nord entre les latitudes 10° 30' N sur le massif du Fouta Djalon, aux environs de 17°30' N à l'embouchure du fleuve Sénégal à Saint-Louis sur l'Océan Atlantique ; en longitude d'est en ouest, de 7° 17' W aux confins sahéliens de Nara, jusqu'à 16° 42' W sur les marges océaniques de Banjul. Ils couvrent une superficie de 367 100 km² répartie entre cinq entités politiques (fig. 1) :

- La Guinée, le Mali, la Mauritanie et le Sénégal pour le bassin du fleuve Sénégal, soit 290 000 km²,
- La Gambie, la Guinée et le Sénégal, pour le bassin du fleuve Gambie qui couvre 77 100 km², avec une zone de partage incertain des eaux avec le Rio Corubal, soit 16 km² en Guinée Bissau.

Cette extension géographique sur plusieurs Etats et la notion de frontières bien vivace qui s'y greffe n'empêchent pas pour autant leur facile délimitation dans le cadre du bassin versant.

Dans la partie méridionale, le bassin de la Gambie se détache progressivement vers l'ouest. La ligne de partage des eaux avec la Casamance et le Rio Corubal à la frontière Bissau-guinéenne forme la limite sud qui prend en écharpe les Monts bassaris. Le tracé s'incurve ensuite vers le sud au contact des premiers contreforts du Fouta Djalon et longe la bordure de ce massif montagneux jusqu'à la hauteur de Mamou. De là, la limite forme une boucle et prend une direction plein nord-est. Les deux bassins de nouveau réunis englobent la majeure partie du Fouta Djalon, tout le plateau Mandingue et mordent sur le bassin de Siguiri (P. Michel, 1973). Au niveau de Bamako, le tracé est encore net, puisque formé par le partage des eaux des affluents du Sénégal avec le fleuve Niger. Puis le tracé s'infléchit vers le nord, oscillant entre les méridiens 8° W et 7° 30 W (fig. 1).

Dans la partie septentrionale, la limite du bassin devient moins précise du fait des ensembles dunaires aréiques. Mais le réseau lacustre piégé par ces dunes et alimenté par des défluents (lac Rkiz) permet d'intégrer topographiquement cet ensemble dans le bassin du fleuve Sénégal.

A l'est, la limite se situe entre les massifs du Tagant et de l'Assaba et atteint le parallèle 17° 30'. Elle est de nouveau très imprécise, et seule une partie des oueds descendus du plateau de l'Affolé et rejoignant le Karakoro et le Wadou appartient à l'ensemble fluvial du bassin du Sénégal. Selon P. Michel, (1973) le Wadou lui-même, branche supérieure de la Kolimbiné a fonctionné à certaines périodes du quaternaire comme un cours d'eau endoréïque. La limite passe ensuite au nord de Nioro du Sahel vers 15° nord et se prolonge à la "vallée du Serpent", ancien lit fossile de la Baoulé.

A l'ouest, les deux bassins hydrographiques ne restent pas contigus. Les vallées mortes du Sine et Saloum qui s'intercalent entre les deux entités fluviales forment leurs limites, méridionale pour le bassin du Sénégal et septentrionale pour celui de la Gambie.

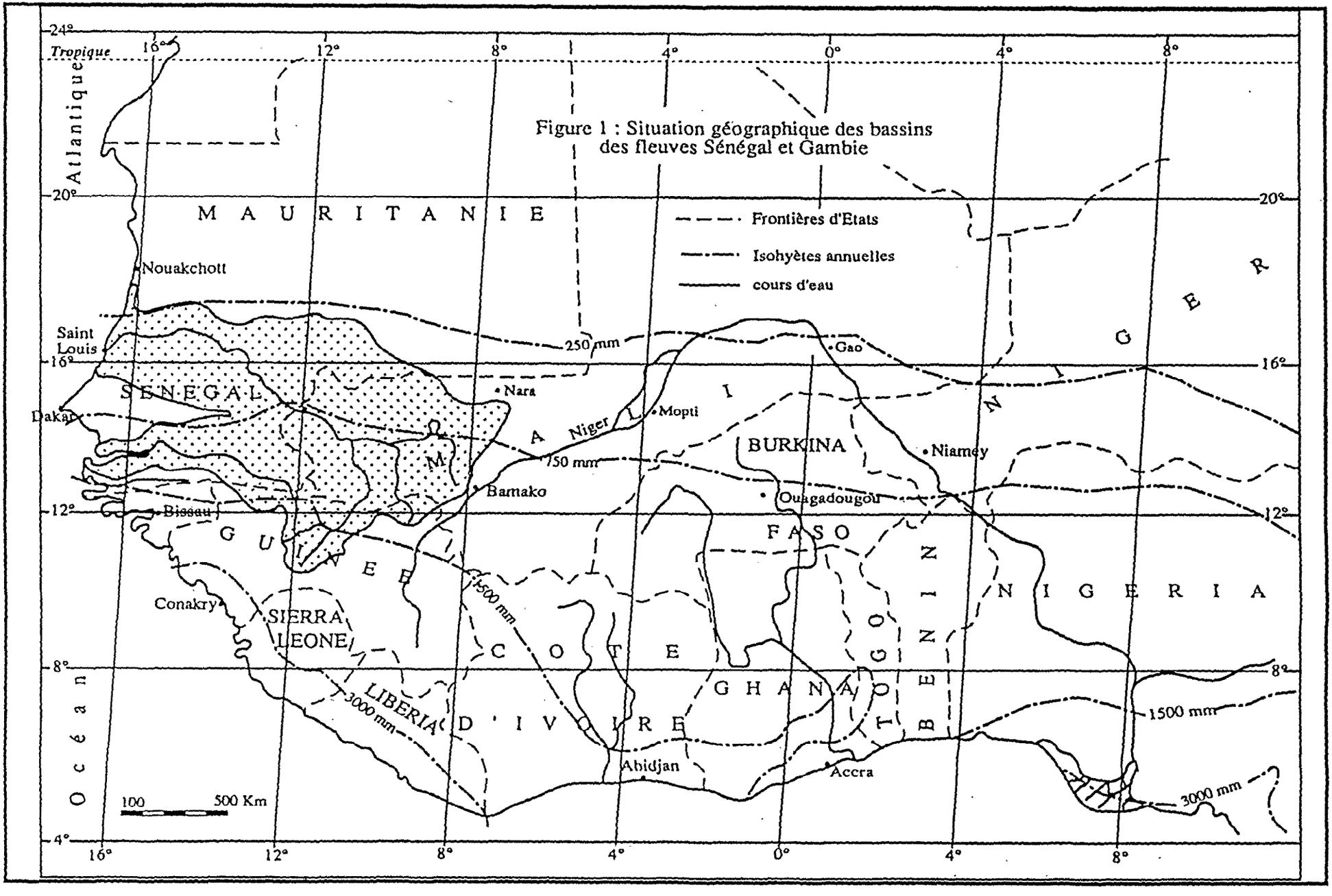


Figure 1 : Situation géographique des bassins des fleuves Sénégal et Gambie

Ces deux vallées sont formées par une zone basse, visitée par la marée avec un modelé de cordons dunaires orientés nord-sud. Un peuplement de mangrove colonise les vasières à l'arrière desquelles s'étendent des tanns (surfaces planes et parsemées d'efflorescences salines). Le Ferlo, bras mort du fleuve Sénégal, se rattache à la basse vallée du Sénégal par la vallée du Bounoum et le lac de Guiers.

Les limites, ainsi précisées, confirment les bassins du Sénégal et de la Gambie comme un vaste ensemble géographique, une entité écologique avec des écosystèmes complexes, à l'intérieur desquels se singularisent des contrastes et des similitudes :

- Contrastes du point de vue climatique, car entièrement situés dans la zone tropicale à saison sèche, les hauts bassins connaissent à la fois une variabilité de la durée de la saison des pluies et des hauteurs de pluies. Au sud, dans le cours supérieur du Sénégal et de la Gambie, les précipitations moyennes annuelles dépassent 1500 mm. Mais le gradient pluviométrique décroît considérablement vers le nord et les pluies moyennes annuelles ne dépassent guère 300 mm dans la basse vallée alluviale du Sénégal. Contraste aussi par la proportion respective des surfaces occupées (3 fois moins pour le bassin du fleuve Gambie), par la longueur des cours d'eau (1700 km pour le Sénégal contre 1150 km pour la Gambie) que par l'abondance de leur écoulement (le Sénégal étant le second fleuve de l'Afrique de l'Ouest par l'importance de son module après le Niger).
- Similitudes tant par les traits morphostructuraux et les grandes unités paysagères, que par le mode d'alimentation et d'utilisation de l'eau. En effet, si les régions de productions agricoles sont constituées par les plaines alluviales situées à l'aval, celles-ci sont sous la dépendance des hautes terres du sud qui sont leurs principales pourvoyeuses d'eau.

Cependant, ces contrastes et/ou similitudes évoqués montrent bien la diversité de l'ensemble géographique dont on peut néanmoins délimiter la mosaïque. Plusieurs divisions sont possibles ; mais ce sont les entités paysagères, elles-mêmes regroupant les ensembles régionaux et hydrographiques qui permettent de spécifier deux régions naturelles :

1. LES VALLEES ALLUVIALES

Ensembles étonnamment plans, les vallées alluviales constituent du point de vue hydrologique les cours inférieurs des bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Elles sont situées dans le bassin sédimentaire secondaire-tertiaire. On distingue la vallée alluviale du Sénégal et le bassin estuairien de la Gambie.

La vallée alluviale du Sénégal s'étend grosso modo de Bakel à Saint-Louis, où le fleuve Sénégal entaille les formations marines du Secondaire et du Tertiaire ainsi que les grès du continental terminal. En aval de Bakel, elle s'élargit considérablement et atteint 25 km en amont de Kaédi. Elle décrit un arc de cercle de 500 km de long, formant ainsi "un val à la dimension de l'Afrique" (Papy L, 1951). Le cours du Sénégal décrit beaucoup de méandres dans la vallée, favorisé en cela par la topographie. Le lit majeur s'étend jusqu'à Richard-Toll où l'on entre dans

le delta. Le modelé de la vallée alluviale du Sénégal, très cloisonné comprend trois éléments principaux :

- les bourrelets de berges ou levées, sont un assemblage de sable fin et de limon qui canalise l'écoulement. On les retrouve le long des principaux bras et même dans les vallées fossiles.
- les cuvettes de décantations ou dépressions de pentes convergentes (P. Michel, 1973) sont inondées annuellement par la crue du fleuve.
- les deltas de rupture de levée, sont des accumulations de sédiments argileux, résultant du débordement des marigots issus de la crue.

A l'intérieur du Delta, le modelé se diversifie en plusieurs éléments : des dunes continentales enclavées, cohabitent avec des cuvettes correspondant à d'anciennes vasières "Ndiael, Khant, Djoudj", des accumulations fluvio-deltaïques et des systèmes dunaires littoraux mis en place par la dérive, à partir 4000 ans BP après le maximum de la transgression du Nouakchottien.

Le bassin estuairien de la Gambie est compris entre Gouloumbou et Banjul. Comme le fleuve Sénégal, la Gambie entaille les grès du continental terminal et a façonné dans cette région à topographie monotone une vallée alluviale. Dans sa vallée alluviale, la Gambie est gainée par des levées plus basses et confinées à la seule bordure de son lit mineur. Celui-ci n'excède pas 6 km. Ce n'est qu'en aval de Kudang à 180 km de l'embouchure où les levées disparaissent progressivement, que la vallée alluviale de la Gambie s'élargit. Les cuvettes de décantation du lit majeur sont de moindre extension par rapport à celles de la vallée du Sénégal. L'estuaire est souligné par un cordon sableux sur lequel est construit Banjul.

Bien sûr, ces régions à topographie plane sont par excellence un domaine de mise en valeur agricole. Les cours d'eau qui les drainent le favorisent, aidés en cela par une implantation humaine assez dense. Mais le contexte climatique y est particulier et souvent assez défavorable. Les précipitations y sont faibles, tandis que les autres éléments climatiques (températures, évaporation) y sont largement prédominants. D'ailleurs le fleuve Sénégal qui apporte la vie dans sa vallée alluviale y est un élément allogène car, comme la Gambie, il prend naissance dans une entité plus clémente, la zone des hauts bassins.

2. LES HAUTS BASSINS

Les cours supérieurs du fleuve Sénégal et de la Gambie, communément appelés hauts bassins, constituent la seconde entité naturelle des bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Sans doute, l'opposition topographique de cette région avec le reste du bassin justifie-t-elle le qualificatif de hauts bassins. Cette opposition des hauts bassins avec les régions septentrionales des bassins des fleuves Sénégal et Gambie n'est pas seulement topographique. Certes, le Fouta Djalon, ensemble montagneux de "sa masse lourde et sombre", confère aux hauts bassins son statut de "perchoir" vis-à-vis des pays environnants. Les points culminants du bassin des fleuves

Sénégal et Gambie sont tous observés dans cette région (1500 m au mont Loura, 1428 m au mont Kavendou). C'est ici où les hauteurs de pluies enregistrées sont les plus élevées.

D'ailleurs cette symbiose entre reliefs élevés et pluviométrie abondante a valu à la région son surnom de "Château d'eau de l'Afrique occidentale". C'est dans le Fouta Djalon que partent les grands fleuves (Sénégal, Niger et Gambie), organismes fluviaux qui apportent la vie à des entités beaucoup moins favorisées, ce qui confirme du reste leurs caractères allogènes dans ces milieux. Seulement, les hauts bassins du Sénégal et de la Gambie à travers leur cadre climatique, s'opposent à tout point de vue aux régions septentrionales de leur ensemble mère.

Aussi, ce rôle de fournisseur principal d'eau qui échoit aux hauts bassins est déterminant. Sous forme précipitée ou écoulée, l'eau constitue l'élément naturel principal qui crée la liaison entre les différentes parties du bassin-versant. Elle rend ainsi solidaire à travers un immense cadre hydroclimatique les régions d'où elle descend (hauts bassins) et les parties où elle est utilisée (vallées alluviales). Malheureusement, les travaux de recherche entrepris sur les deux fleuves n'ont porté que sur les cours inférieurs. Dans bien des cas, les régions sises en amont ne font l'objet que d'un préambule en guise de délimitation. Pour combler cette lacune, notre étude a donc trait aux cours supérieurs de ces bassins où naissent les principaux cours d'eau et qui sont les régulateurs naturels des débits.

La dualité de caractères entre les cours inférieurs, principaux consommateurs d'eau, et les cours supérieurs qui en sont les pourvoyeurs appelle à une meilleure connaissance de la géographie et du cycle de l'eau à l'intérieur des hauts bassins. Car avec la persistance de la crise climatique, se pose avec acuité le problème de l'évaluation et d'une meilleure gestion des ressources en eau de surface des hauts bassins. C'est une telle approche qui est tentée dans ce travail.

CHAPITRE 2
LE MILIEU NATUREL DES HAUTS BASSINS

Les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie s'étendent des latitudes 10°20' à 14°54'N à Bakel sur la limite septentrionale du cours supérieur du Sénégal, et de 7°17' à 13°44'W de longitude à Gouloumbou, limite du haut bassin de la Gambie (fig. 2). En forme de losange, ils couvrent plus des 2/3 de l'ensemble des bassins Sénégal-Gambie, soit 260 000 km² et se répartissent sur quatre états.

- Haut bassin du fleuve Sénégal : 218 000 km² répartis entre le Mali (155 000 km²), la Guinée (31 000 km²), le Sénégal (12 500 km²) et la Mauritanie (19 500 km²).

- Haut bassin du fleuve Gambie : 42 000 km² compris entre la Guinée (6 917 km²) et le Sénégal (35 083 km²).

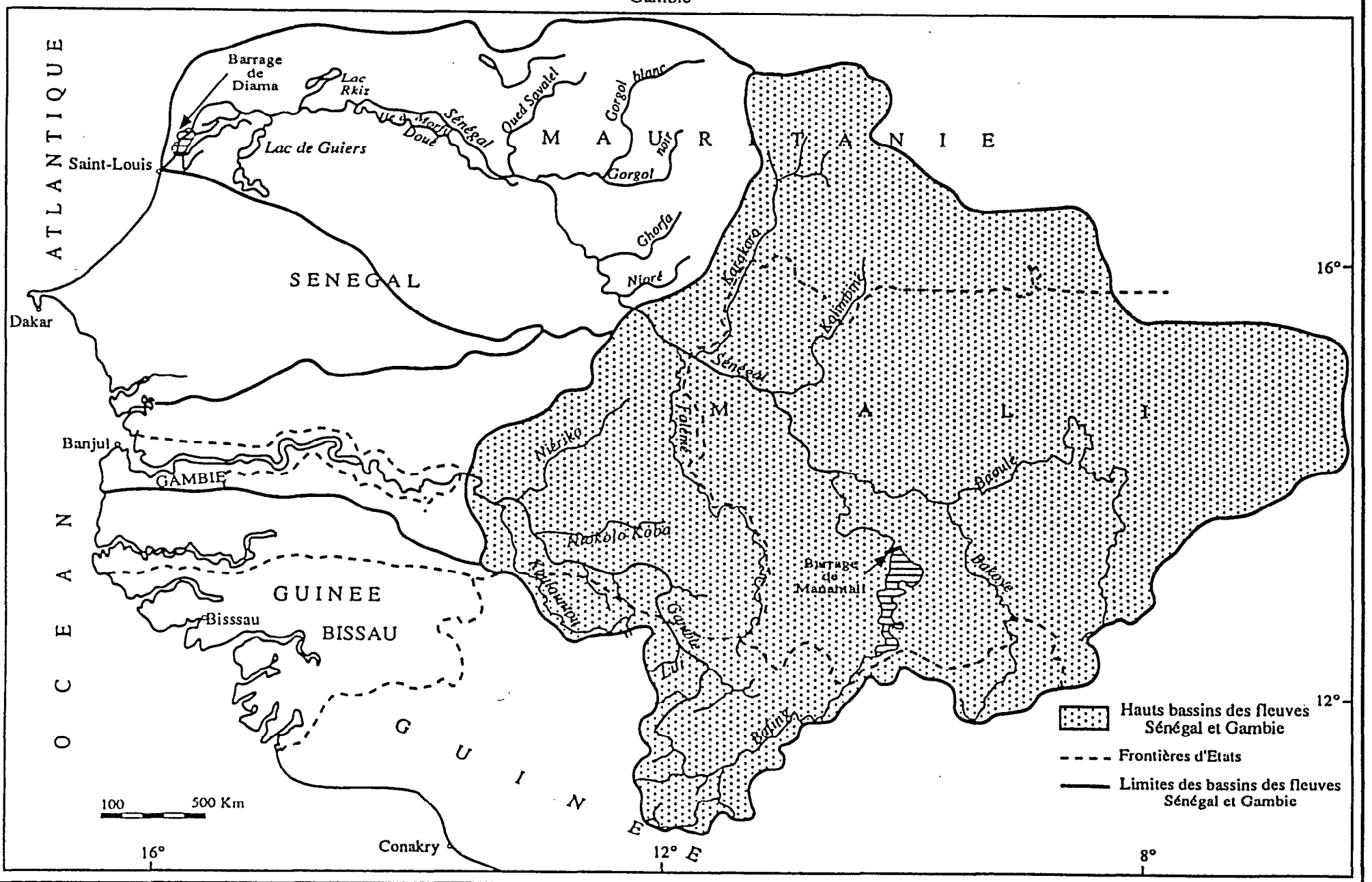
Cependant, l'originalité du terme "haut bassin", qui caractérise ou mieux spécifie cette région, revêt un aspect trompeur. Car les hauts bassins ne forment pas une entité homogène, ni par ses caractères orographiques, ni par ses structures lithologiques. De même, la généralisation du terme *cours supérieur* dans les études antérieures nous oblige à distinguer :

- Les *cours supérieurs* proprement dits, ou bassins amonts, des sources aux latitudes de Bafoulabé (13°50' N) pour le Sénégal, et Kédougou (12°33' N) pour la Gambie. Vastes de 132 250 km², ils sont caractérisés par les hautes terres du Fouta Djalon et de ses contreforts. Ainsi, sur le territoire guinéen, le massif du Fouta Djalon culmine entre 1421 m au Mont Kavendou et 1538 m dans le massif de Mali (source du Bafing-Téné et de la Gambie). En territoire malien, les cours supérieurs occupent le plateau Mandingue, et forment sur les marges méridionales gambiennes et sénégalaises un ensemble de monts (Ibel, Lankanta), de plateaux (Badiar, Kadé) et de falaises (Tambaoura), drainés par des cours d'eau bien hiérarchisés. C'est une région à forte pluviosité, à lithologie complexe avec d'importants boisements.
- Vers le nord, cet ensemble surplombe des régions beaucoup plus basses où les reliefs notables sont constitués de massifs subtabulaires (massif de l'Affolé et plateau de l'Assaba). Ce sont les *cours moyens* dont les limites sont Bakel (14°54' N) pour le fleuve Sénégal, et Gouloumbou (11°54' N) pour le fleuve Gambie.

A ces deux localités (Bakel et Gouloumbou), dernières stations de mesure du fleuve Sénégal, de la Gambie ainsi que de leurs affluents descendus du Fouta Djalon, la distinction est nette entre les cours supérieurs et moyens. Dans ce dernier domaine, le cadre litho-structural est moins accidenté, les précipitations sont moins abondantes et la végétation plus espacée.

Les hauts bassins sont ainsi un milieu d'une grande diversité. Du point de vue géologique, ils se rattachent au craton ouest-africain, pays de vieille plate-forme. Ce vaste complexe géologique précambrien se stabilise à la fin de l'orogenèse éburnéenne (1800-1600 M.a). Deux cycles orogéniques ultérieurs, les Panafricains (660 et 550 M.a) et l'Hercynien (250 M.a) y ont formé ou rajeuni tout autour une ceinture de zones mobiles.

Figure 2 : Situation des hauts bassins par rapport à l'ensemble des bassins des fleuves Sénégal et Gambie



Les ensembles géologiques identifiés dans les hauts bassins sont très divers et présentent par endroit une grande complexité qui rend difficile leur identification. Ils sont associés aux différents paysages. Huit grandes unités structurales peuvent être distinguées (fig. 3) :

- les formations du socle birrimien n'apparaissent qu'en fenêtres taillées dans la couverture (fenêtres de Kayes et de Kénieba),
- les bassins du protérozoïque supérieur constituent le bassin de Madina Kouta, le plateau de l'Affolé ainsi que le plateau Mandingue,
- la Chaîne du Panafricain I des Bassarides est formée par les séries de la Falémé et de Bakel-Mbout dans le haut bassin du Sénégal. Elle se diversifie dans le haut bassin de la Gambie et englobe les groupes de Guingan, du Niokolo Koba et de la Koulountou,
- les bassins molassiques du protérozoïque terminal et cambrien inférieur regroupent les groupes de Nioro et du Bakoye dans le haut bassin du Sénégal, et ceux de Mali et de Youkounkoun dans le bassin supérieur de la Gambie,
- les formations sédimentaires cambro-dévoniennes sont reconnues par le groupe de Pita,
- les dolérites du Permien et du Trias forment des venues à l'intérieur des formations du socle,
- le bassin méso-cénozoïque sénégalo-mauritanien occupe les franges orientale et occidentale,
- et les formations latéritiques et superficielles sont répandues ça et là, au-dessus de ces formations.

Les grès, grès-quartzites et les dolérites constituent les principales formations qui ont donné naissance aux reliefs des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Des vallées encaissées, plus ou moins étendues s'adossent à des pays de collines qui eux-mêmes se juxtaposent à de hauts plateaux aux sommets parfois élevés.

Quatre grands ensembles se détachent de ce cadre géographique :

1. LE FOUTA DJALON

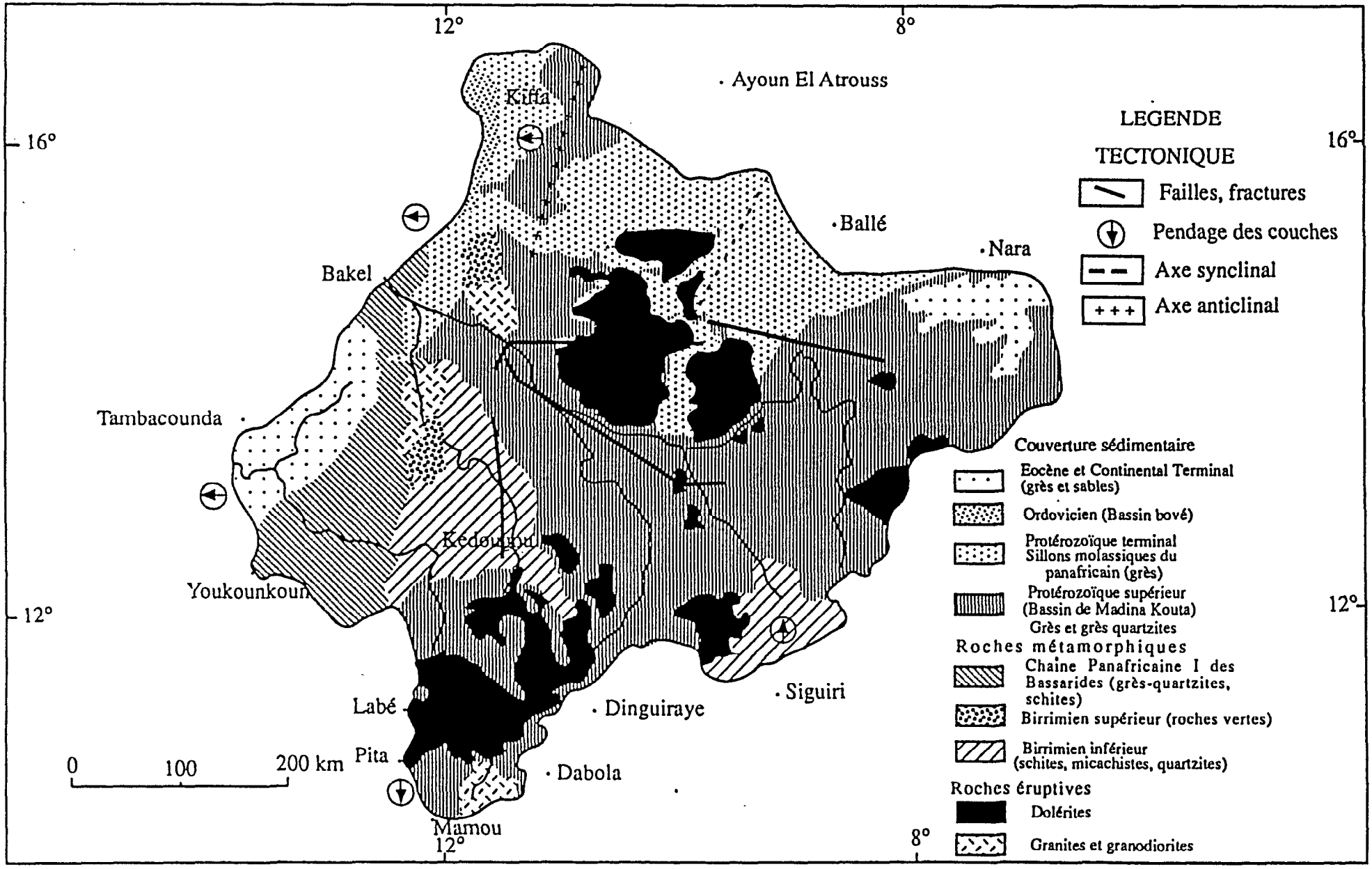
L'ensemble montagneux qui forme la partie méridionale des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie est essentiellement compris en territoire guinéen. Cependant, ces limites naturelles débordent légèrement dans les pays voisins du Sénégal au nord et de la Sierra Léone au sud.

Le Fouta Djalon est constitué de six bassins versants (D. Orange, 1992), d'où partent de grands fleuves qui drainent l'Afrique occidentale.

Le flanc occidental se partage entre les bassins-versants côtiers de la Tominé au nord et du Konkouré au sud. Le flanc oriental est occupé par le bassin du Tinkisso, affluent de rive gauche du fleuve Niger.

Trois bassins-versants se répartissent les parties centrale et septentrionale du Fouta Djalon, celles qui intéressent les hauts bassins du Sénégal et de la Gambie que nous étudions :

Figure 3 : Esquisse géologique des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie



Le bassin supérieur du Bafing et son affluent principal la Téné, branche mère du Sénégal, occupe le cœur du Fouta Djalon. Le bassin-versant des branches supérieures de la Falémé (affluent de rive gauche du Sénégal) ainsi que celui de la Gambie et de ses affluents guinéens (Oundou, Liti, Silamé) se partagent la partie septentrionale.

Du point de vue géologique le Fouta Djalon n'échappe pas à la diversité qui caractérise les hauts bassins. Les formations du socle birrimien sont formées par le faciès schisteux et les roches du complexe volcano-sédimentaire ou roches vertes. Le faciès schisteux comprend des schistes sériciteux, des talchistes et des micaschistes associés à de la muscovite. Le complexe volcano-sédimentaire est formé de méta-andésite ou de métabasaltes. Ces formations s'étendent de part et d'autre du cours supérieur de la Falémé et de la Gambie. Elles ont subi diverses granitisations liées à l'orogenèse éburnéenne dont l'imposant complexe granito-gneissique du cours supérieur du Bafing, qui déborde dans la région de Dinguiraye.

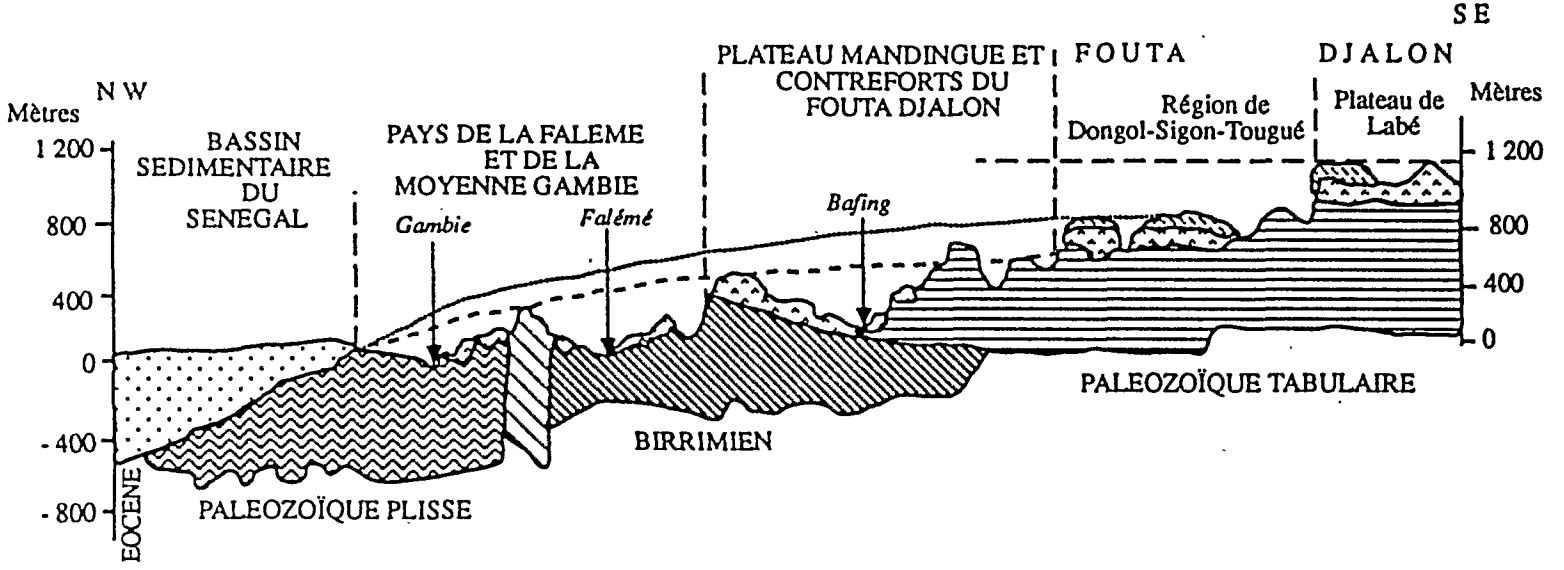
La couverture sédimentaire protérozoïque appelée bassin de Madina Kouta forme d'importantes couches en bordure du socle (fig. 3). Elle repose en discordance sur les séries métamorphiques et les intrusions de granites du nord-est du Fouta Djalon. Les sédiments paléozoïques du Cambrien supérieur et du Dévonien avec lesquels elle alterne sont connus sous le nom de *bassin bové.*

Les *bassins bové* comprennent trois subdivisions lithostratigraphiques qui permettent de distinguer de bas en haut les groupes de Pita, Télimélé et de Bafata. M. Villeneuve, (1984) attribue à ces trois formations des âges cambro-ordovicien, silurien et dévonien. Le groupe de Pita, affleure sous forme de grès dans la partie occidentale du Fouta Djalon. Il constitue les formations de Guémata, de Kindia et de Gangan. La formation de Guémata, base de la série comprend des grès feldspathiques et des conglomérats. La formation de Kindia au centre renferme essentiellement des grès blancs. Ces deux formations affleurent aux sommets des principaux reliefs des hauts bassins du Sénégal et de la Gambie. Elles occupent toutes les hauteurs comprises entre Labé, Pita et Dalaba, sur les sources du Bafing-Téné. Les grès blancs de la formation de Kindia affleurent aussi au sud de Dalaba dans le mont Kavendou (point culminant du haut bassin du Sénégal).

Les venues de dolérites du Permien et du Trias forment de minces filons de dykes à l'intérieur des séries métamorphiques et granitiques. Dans les séries sédimentaires qui opposent une faible résistance à la remontée du magma, les dolérites constituent surtout des sills. Les cornéennes qui résultent du métamorphisme développé par les dolérites dans les roches encaissantes (P. Michel, 1973) sont très répandues dans le massif de Mali.

Ces formations géologiques du Fouta Djalon ont connu une longue évolution au cours de laquelle les mouvements tectoniques, les changements climatiques ainsi que les variations du niveau marin ont façonné les principaux paysages à travers des surfaces d'aplanissements durant la période antéquaternaire et de glacis au cours du quaternaire ancien et moyen (fig. 4).

Figure 4 : Coupe schématique des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie
adapté de P. Michel, (1973), schéma simplifié.



LEGENDE

MORPHOGENESE

Extension des aplanissements

1 ère surface

2 ème surface

3 ème surface

Cuirasse latéritique

Cuirasse ferrugineuse

GEOLOGIE

Continental Terminal

Schistes, grès et pélites

Schistes et granites

Métabasites

Sills doléritiques, grès, quartzites, pélites

Le massif montagneux du Fouta Djalon est un ensemble de hauts plateaux entaillés dans les formations de grès. Il ne constitue pas un ensemble homogène.

De hautes terres à peine incisées par de petits cours d'eau, s'étendent de Pita à Labé, limitées à l'est par des plateaux latéritiques qui se terminent par des corniches impressionnantes de grès quartzites et de dolérites.

L'ensemble Fouta Djalon se subdivise en trois grandes parties séparées par des dépressions brutales qui accroissent l'impression du relief (fig. 5) :

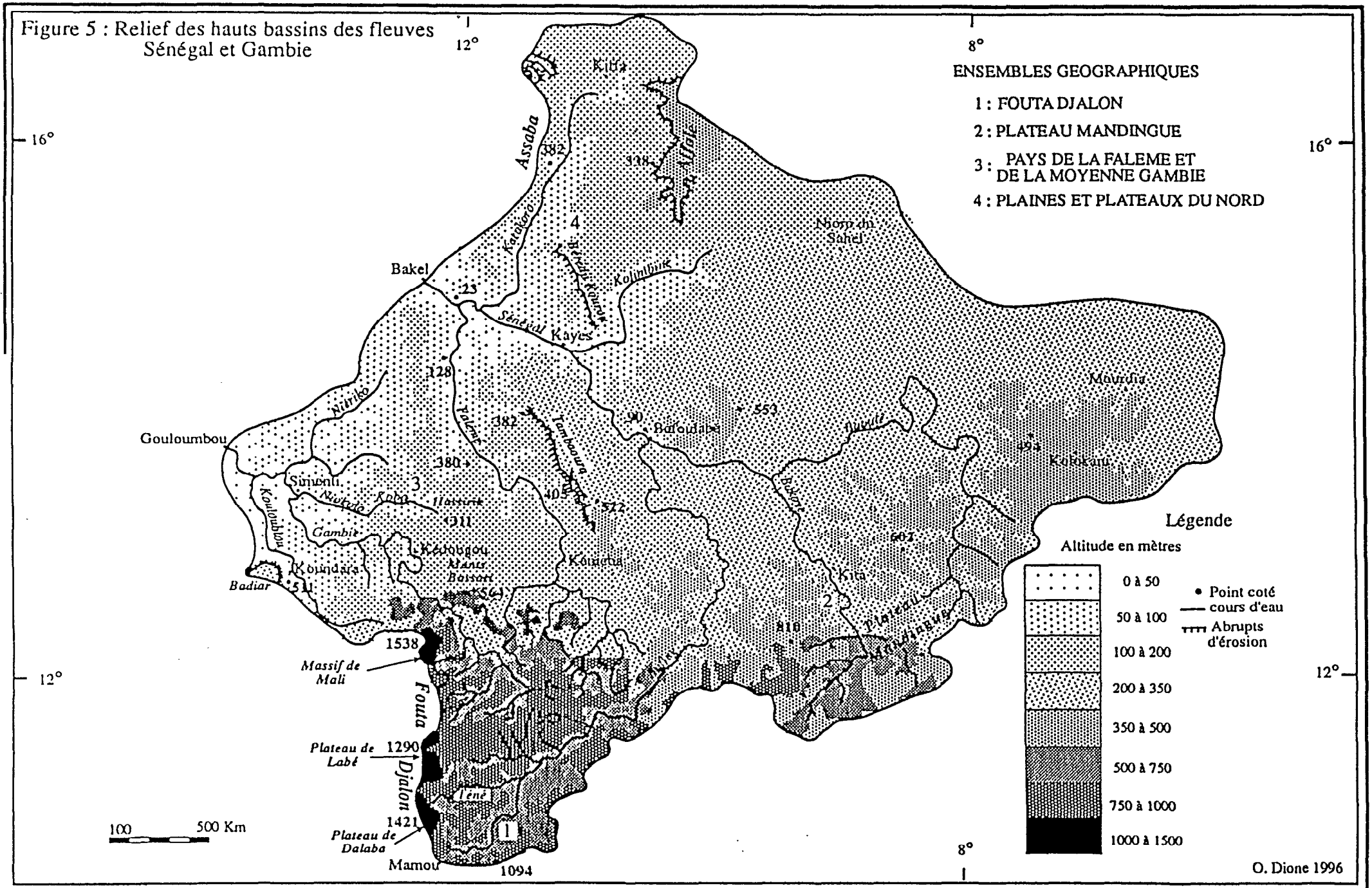
- les hauts reliefs sont formés du massif de Mali, du plateau de Labé et de Dalaba.

Le massif de Mali, véritable bastion avancé, s'élève à plus de 1000 m. Il culmine à 1538 m au mont Loura, extrémité sommitale du Fouta Djalon. Le plateau de Labé, ligne de partage des eaux de la Koumba, de la Kakrima et des hauts bassins, comprend des surfaces étagées, couvertes d'un épais manteau latéritique disposé en gradins gigantesques. De grandes crêtes qui atteignent 1300 m dans le Kokou, séparent une série de bassins à l'ouest de la Gambie. Le plateau de Dalaba au sud-est, est plus morcelé que les reliefs précédents. Il est formé d'épais sills de dolérites, dominant les granites birrimiens qui affleurent sur les versants du nord-est. Il est entaillé par la Téné, affluent principal du Bafing et culmine à 1421 m sur le mont Kavendou au nord de Mamou. Ces trois principaux hauts reliefs ont été érodés et aplanis durant la période du Jurassique. Leur surface d'aplanissement, la première reconnue par P. Michel, (1973) est appelée surface de Labé.

Les types de sols liés à ces paysages sont essentiellement formés par les lithosols et les sols squelettiques. Ceux-ci occupent de vastes surfaces dans le Fouta Djalon. Les lithosols relèvent d'un processus d'érosion qui a décapé les couches superficielles (manteau d'altération) qui les recouvraient, pour donner des cuirasses et débris de cuirasses. Leur faible évolution pédologique est liée à la puissance du ruissellement qui décape les produits d'altération de la roche mère sur les pentes fortes. Cette forte induration se traduit par un squelette rouge sombre ou brun rouge, que cimente parfois en des taches noires des gravillons ferrugineux.

Le couvert végétal, favorisé par les importantes pluies et l'abaissement des températures est constitué par une forêt de grands arbres dont l'espèce dominante est *Parinaria excelsa* (famille des rosacées). L'altitude minimale de cette forêt montagnarde ne dépasse pas 900 m sauf dans la région de Mamou où elle descend jusqu'à 700 à 750 m. Le microclimat d'altitude favorable maintient cette flore vers le nord jusque dans la partie septentrionale du massif du Mali à environ 12°05' N. Cette belle forêt montagnarde a presque disparu sur l'ensemble des massifs. Seules, des reliques subsistent dans des endroits difficiles d'accès, le long des ravins qui entaillent le rebord escarpé des plateaux. Le fait marquant de ces formations ces dernières années, reste leur dégradation croissante. Déjà, A. Chevalier, (1909), tirait la sonnette d'alarme sur la déforestation abusive du Foula qui, "à l'aide de ses troupeaux et par les incendies d'herbes, achève peu à peu un phénomène entrepris probablement depuis la haute antiquité".

Figure 5 : Relief des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie



A cela s'ajoute une péjoration climatique qui réduit la surface arborée et favorise l'extension d'un tapis herbacé qui supplante progressivement le couvert forestier. Mais le contact entre le reste de cette sylve tropicale et la savane d'altitude n'est pas brutal. Il se fait par l'intermédiaire de fourrés denses formés d'espèces forestières primitives et d'espèces savanicoles (fig. 6).

A l'est de ces hauts reliefs, s'étendent des plateaux latéritiques :

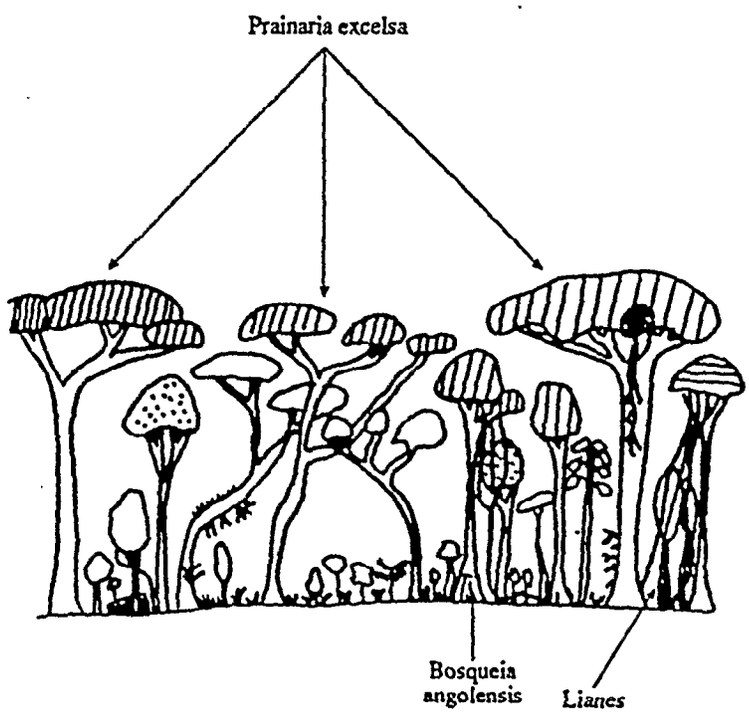
- les plateaux latéritiques sont compris sur un axe Tougué-Dabola-Dinguiraye, et s'élèvent en de vastes bowé à cuirasses localement bauxitiques. De forme ondulée, ils se situent entre 850 et 900 m et dominent tout le réseau hydrographique de la Gambie et du Bafing, bien encaissé de l'ordre de 300 m et guidé dans son organisation par la trame tectonique : tracé coudé correspondant aux grandes orientations structurales nord-ouest/sud-est. Des dômes de plus de 1000 m hérissent la région de Dabola (Oursa 1035 m, Oualla 1045 m) ainsi que dans les environs de Dongol-Sigon. Les surfaces de bowé de ces plateaux correspondent à la deuxième surface d'aplanissement dite de Dongol-Sigon. Le phénomène d'aplanissement de ces plateaux serait noté au cours du Crétacé.

L'aspect pédologique dominant est encore formé par les lithosols. Des sols d'éboulis de cuirasses occupent les pentes des versants, résultant du décapage des cuirasses, ils sont formés uniquement de sesquioxyde de fer et d'alumine. Ces sols occupent selon P. Bonfils, (1951) plus de 80 % des superficies, sur les sources du Bafing.

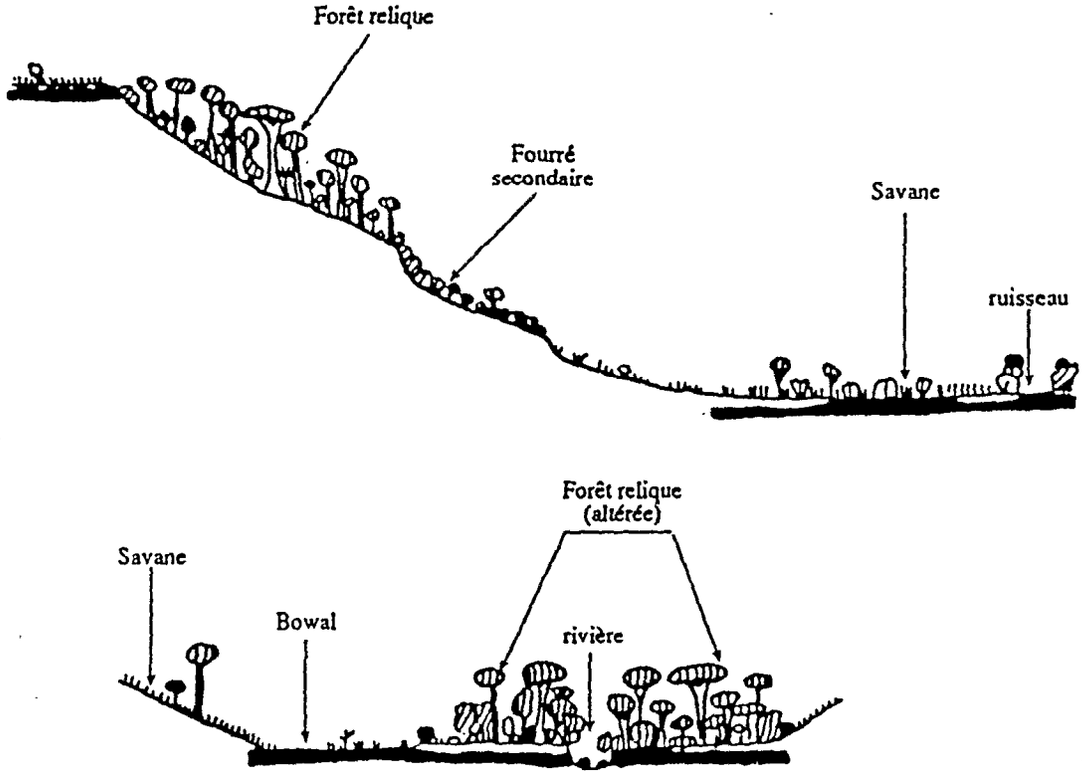
La végétation qui leur est liée comprend de nombreuses forêts. Celles-ci sont encore intactes dans la région de Dalaba et se situent à 1200 m. Elles comprennent de nombreuses strates arborescentes qui forment une forêt dégradée avec un sous-bois. Sur les pentes, plateaux et crêtes du massif de Mali, la forêt est moins dense que sur le plateau de Dalaba. Elle est formée de *Kobi* (*Carapa procera*) et de lianes et est sérieusement entamée par la sécheresse. Sur le plateau de Labé, par contre, la forêt a été entièrement déforestée. Elle est supplée par des formations herbeuses piquetées d'arbres (association de savanes à *Parinaria excelsa*, *Parkia biglobosa* et de prairies).

- les contreforts septentrionaux succèdent vers le nord à ces massifs et plateaux du Fouta Djalon central. Ils sont formés par des reliefs escarpés, séparés par des plateaux et des dépressions perchées. Au nord-ouest du massif de Mali, s'élèvent de petits massifs taillés dans les sills de dolérites entre 1100 et 1200 m, dominant les bassins étagés de la Kouréniaki, du Thiokoye supérieur et de la Gambie. Des vallées profondes qui se rétrécissent par endroits dans la partie centrale sont drainées par la Gambie et ses affluents. Dans la partie orientale de ces contreforts apparaissent les plateaux latéritiques du Fantofa formés de bowé perchés entre 600 et 700 m. Cet ensemble est disséqué par les affluents du cours supérieur de la Falémé (Balin-Ko, Koundan-Ko). Sur les sommets de ces contreforts, subsistent des lambeaux de la première surface d'aplanissement. Mais c'est la troisième surface d'aplanissement dite surface du Fantofa qui prédomine sur ces reliefs. L'âge de cette surface serait Eocène.

1 : Forêt dense du Fouta Djalon (région de Dalaba)



2 : Végétation des rebords de plateaux du Fouta Djalon (région de Dalaba)



3 : Végétation des dépressions du Fouta Djalon (massif de Mali)

Figure 6 : Paysages végétaux du Fouta Djalon adapté de P. Michel, (1973), (schéma simplifié)

Les types de sols liés à cet ensemble correspondent à des débris de roche, donnant des sols ferralitiques jeunes. Le matériel d'origine de ces sols a subi une altération poussée de type latéritique. Les sols ferralitiques du domaine guinéen sont de couleur variable et contiennent en plus des oxydes de fer, des hydroxydes d'alumine. Ainsi, sur les altérations d'argiles provenant des dolérites, ils ont une couleur rouge. Ailleurs, sur les grès et les grès quartzitiques, ils prennent une couleur jaune ou beige. L'action anthropique très poussée a engendré la formation de la savane. Celle-ci est formée par un tapis herbacé continu sans arbres ni arbustes.

Cependant, des particularités existent à l'intérieur du Fouta Djalon et qui contrastent avec l'homogénéité des grands ensembles ci-dessus définis. C'est le cas des bowé qui occupent différentes altitudes du Fouta Djalon. Cuirassés et latéritiques, ils ne sont couverts que par des formations de graminées (*Andropogon gayanus, Andropogon amplectens*). Dans les vallons et les petits bassins qu'enserrent ces reliefs, on rencontre du matériau fin, argilo-limoneux. Ce sont des sols d'origine colluviale avec une légère reprise alluviale (P. Michel, 1973) donnant lieu à des sols hydromorphes. Les cours d'eau qui les drainent sont colonisés par des forêts galeries. Elles forment d'imposants rubans verdoyants de forêts reliques primitives qui contrastent avec les paysages végétaux environnants. Ces forêts galeries jouent un rôle hydrologique majeur en freinant l'érosion lors des crues.

Du point de vue hydrogéologique, les formations géologiques et les ensembles de paysages reconnus dans le Fouta Djalon ne favorisent pas l'existence de nappes importantes. Seuls les phénomènes tectoniques actifs tels les rejeux liés aux venues de dolérites hercyniennes ainsi que les phénomènes d'altération peuvent influencer la perméabilité de la structure. La tectonique et l'altération, assez fréquentes se traduisent par des réseaux de fractures, de diaclases, et de fissures susceptibles d'abriter des aquifères. Mais, ce sont surtout les manteaux d'altération qui jouent le rôle hydrologique majeur dans le Fouta Djalon. En effet, les épais manteaux d'altération qui accompagnent la 1ère et en particulier la 2e surface d'aplanissement dans le domaine guinéen des hauts bassins recèlent des nappes quelle que soit la formation tronquée par l'aplanissement (grès-quartzites de l'ordovicien, pélites du Cambrien, dolérites intrusives de l'Hercynien). Cependant, celles-ci sont en général très localisées et peu développées pour permettre une circulation des eaux souterraines à vaste échelle.

La classification hydrogéologique du Fouta Djalon comme le reste des hauts bassins est faite à partir des travaux de l'ORSTOM (P. Dubreuil, et R. Guiscafre, 1971). Cette classification reconnaît six classes de perméabilité retenues par A. A. Sow, (1984) pour l'ensemble du bassin du Sénégal, à savoir :

P_1 : Roches à perméabilité d'interstice : cette catégorie regroupe les alluvions sans argiles (sables, graviers), d'où une grande perméabilité. L'hydrogéologie des régions drainées par les rivières révèle des nappes profondes, surtout dans les vallées alluviales en aval du bassin ;

P_2 : De la même famille que P_1, avec des sables et grès, roches à perméabilité d'interstice où les nappes drainent les rivières ;

P3 : Alternance de roches perméables et imperméables, ou de roches perméables comportant des argiles (grès argileux, calcaires argileux) sur plusieurs mètres ;

P4 : Concerne les roches à circulation fissurée, genre calcaires fissurés, grès, quartzites ;

P5 : Quand il existe, est formé d'argiles et de marnes ;

P6 : Désigne le groupe des roches cristallines et cristallophylliennes, susceptibles de renfermer des niveaux aquifères. Elles se rencontrent surtout dans les régions à faciès schisteux dominant, sur les granites et granodiorites ;

P7 : Forme le groupe des roches recristallisées, totalement imperméables (quartzites, dolérites).

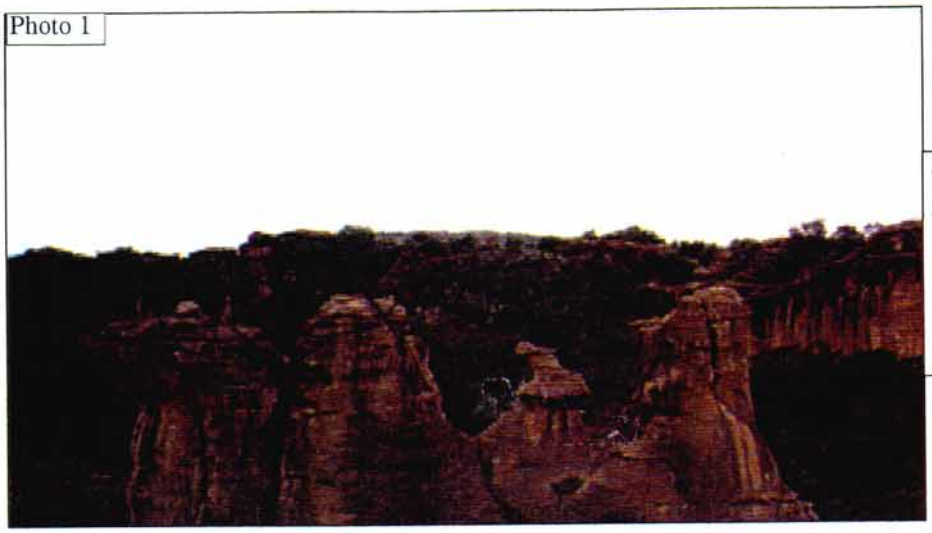
Dans le Fouta Djalon, les types de roches reconnues concernent les classes P6 et P7 considérées comme imperméables. A l'état sain, ces roches présentent une porosité négligeable voire nulle. Cependant, des modifications peuvent affecter l'état de la roche, se traduisant par des altérations de plus ou moins grande porosité et de fractures non colmatées, qui offrent une certaine capacité d'emmagasinement. Ces phénomènes sont fréquents en milieu tropical où l'alternance saison pluvieuse-saison sèche, jointe à des températures élevées, favorisent une altération météorique qui transforme le substrat rocheux en un complexe hétérogène de sédiments fins, donc capable de receler de bons réservoirs d'eau potentielle. Les hauts bowé, de la région de Dongol-Sigon et de Tougué, renferment ainsi des nappes phréatiques bien alimentées. De nombreuses sources jalonnent les rebords de ces plateaux et donnent naissance à un chevelu de marigots denses. Mais pour l'essentiel, l'existence de nappes généralisées n'est pas possible dans le Fouta Djalon puisque les volumes disponibles en eau souterraine sont liés à la fragmentation des roches (fig. 8). Ce fait est d'ailleurs attesté par le niveau piézométrique de cette région qui est nul (P. Michel, 1973 ; C. Rochette, 1974).

2. LE PLATEAU MANDINGUE

Le plateau Mandingue fait suite vers le nord-est au Fouta Djalon. Il est cependant moins élevé. Sa partie méridionale, adossée au massif guinéen atteint en quelques rares endroits 800 m. Le plateau Mandingue est limité à l'ouest par le cours de la Falémé. A l'est, sa limite est formée par la ligne de partage des eaux des affluents de rive droite du Sénégal (Bakoye et Baoulé) avec le fleuve Niger. Au nord, cette limite est moins précise, le plateau Mandingue dessine au nord-est de Bafoulabé un massif fortement disséqué dont les crêtes atteignent les environs de Nioro du Sahel.

La géologie du plateau Mandingue est relativement simple, puisque l'essentiel des formations sont dominées par les grès (fig. 3). Les formations du socle birrimien sont représentées par les grauwackes et les quartzites qui correspondent à d'anciens grès feldspathiques mal classés. Ils se localisent principalement dans la fenêtre de Kénieba. Les recouvrements gréseux de la couverture sédimentaire protérozoïque sont formés par la falaise de Tambaoura. La phase terminale de la couverture paléozoïque reconnue par les sillons molassiques est formée par la partie supérieure du groupe du Bakoye ainsi que le groupe de Nioro. Ces deux

Photo 1



Les contreforts du Fouta Djalon forment souvent des massifs granitiques érodés en bas desquels s'étend un boisement assez dense.

Photo 2

Le plateau Mandingue essentiellement formé de grès, compte de nombreuses diaclases occupées par une végétation arborée.

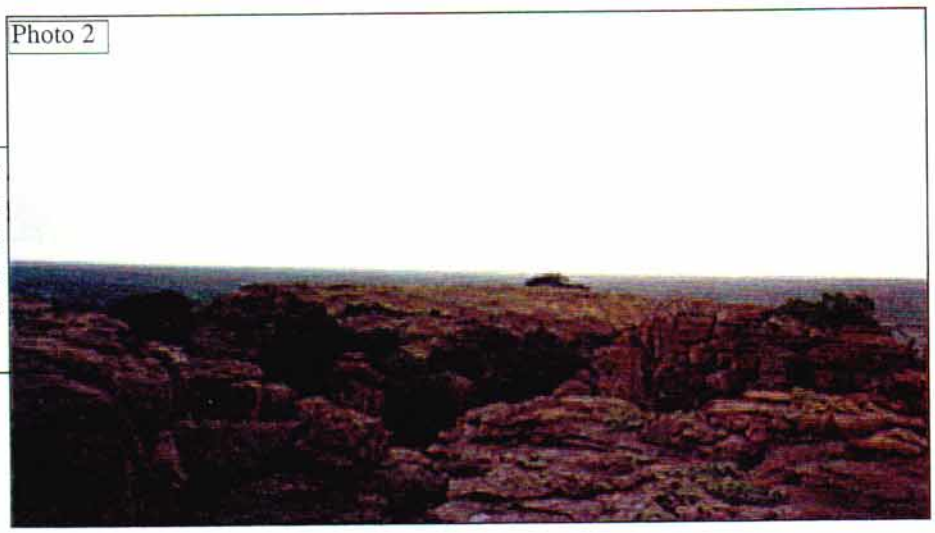
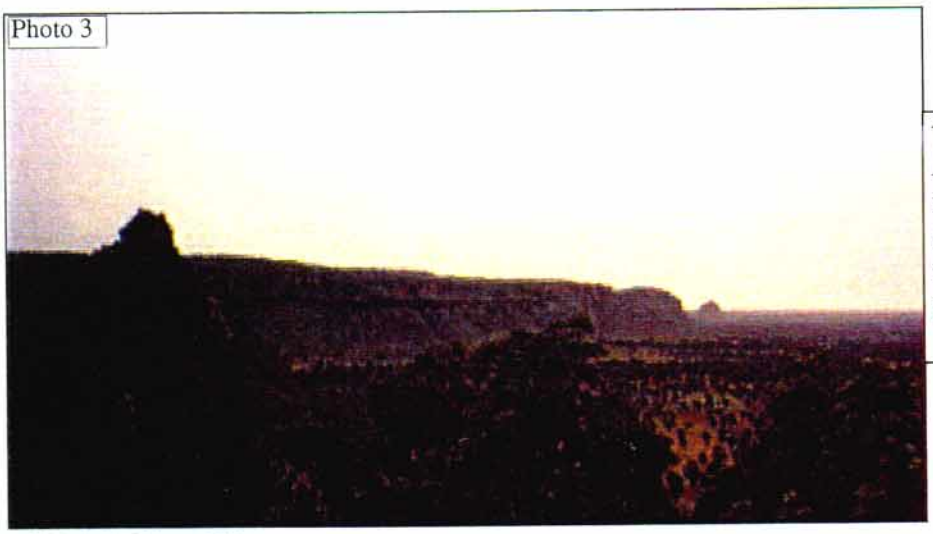


Photo 3



La falaise de Tambaoura, terminaison occidentale du plateau Mandingue, domine les pays de la Falémé.

Clichés O. Dione 1996

Planche 1 : Diversité des paysages des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

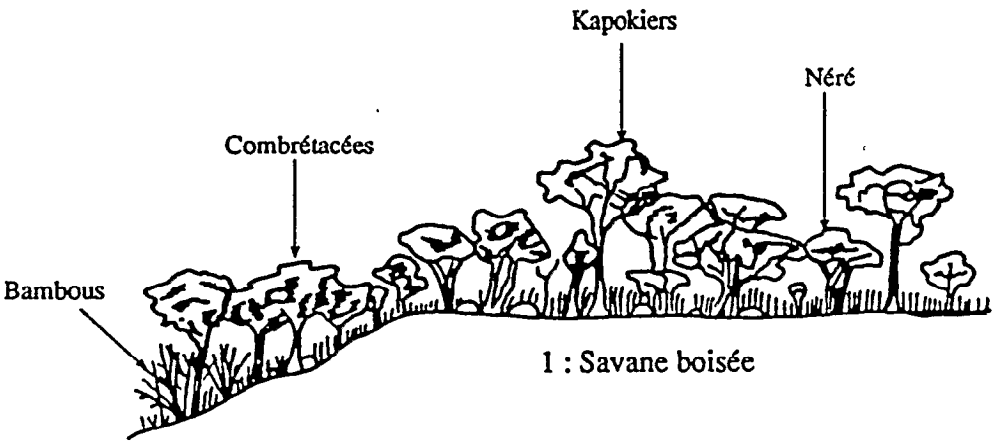
groupes sont l'équivalent du groupe de Mali dans le bassin de la Gambie. Le groupe du Bakoye, subdivisé en groupes de Wassangara et de Koniakari, apparaît dans le paysage sous forme de talus et de falaises de 200 à 300 m. Il est très localisé et formé essentiellement de grès. Le groupe de Nioro, par contre, se développe sur de vastes surfaces au nord de Bafoulabé et se prolonge jusqu'en Mauritanie. Ce sont des formations silto-argileuses dont l'épaisseur ne dépasse pas 300 m. Dans le bassin du Bakoye, ces formations sont surmontées par l'important sill de dolérite du massif du Kaarta. Des venues de dolérites permo-triasiques forment en certains endroits des corméennes comme au nord-est de Bafoulabé.

L'évolution géomorphologique de ces différentes formations est marquée par l'avènement de glaciplanations (2^{e} et 3^{e} surface) qui ont façonné les paysages hétérogènes du plateau Mandingue (fig. 4). En effet, le plateau Mandingue ne constitue pas une unité homogène comme le laisse croire son nom (pl. 1). Il est formé d'une succession de plateaux d'altitudes variables, séparés par des alvéoles, des couloirs et des plaines (fig. 5).

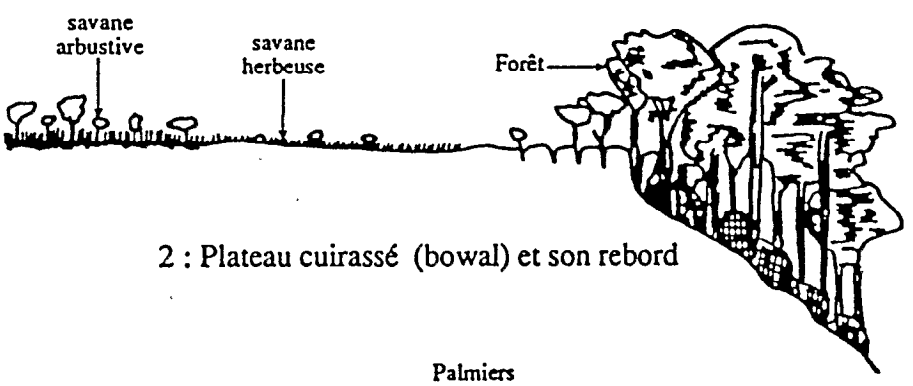
Dans sa partie méridionale, s'étendent de vastes cuirasses nivelées par la surface du Fantofa. De bas plateaux, dont les sommets varient entre 550 et 700 m, se retrouvent de part et d'autre du Bafing. Ces plateaux se terminent par des versants cuirassés à pentes douces appelés reliefs intermédiaires (J. Vogt, 1957). Les altitudes s'accroissent ensuite sur le rebord méridional en bordure du bassin de Siguiri. Des surfaces de bowé étagent leurs sommets couvert de lambeaux de la surface Eocène entre 780 à 900 m au pied des sources du Bakoye (bowal de Vermini, Didi). Les entailles du réseau hydrographique donnent alors naissance à des glacis. Ceux-ci correspondent dans ce secteur au haut glacis qui se raccorde par endroits à la base des versants du relief intermédiaire, et au moyen glacis plus étendu avec une cuirasse à texture conglomératique et gravillonnaire (P. Michel, 1973).

Les types de sols associés à ces paysages sont des sols squelettiques ferrugineux, résultant du décapage des cuirasses. La distribution de la végétation est à la fois fonction du modelé et des sols. Les milieux rocheux, taillés sur la dalle gréseuse nue sont impropres à l'implantation de formations arborées ou ligneuses continues. Ils ne sont alors peuplés que par des végétaux inférieurs (algues et lichens), tandis que les plantes supérieures sont refoulées dans les zones privilégiées par la topographie ou la microtopographie (P. Jaeger, 1959). En effet, les formations du plateau Mandingue, souvent diaclasées donnent lieu à des ravins, des crevasses sur falaises, et des éblouis dans les grottes abritées. Ces divers milieux créent des conditions stationnelles et des microclimats qui favorisent l'émergence d'espèces végétales à divers exigences écologiques. Dans la partie méridionale du plateau Mandingue, l'exposition des versants intervient dans la répartition du peuplement végétal. Les flancs sud-ouest, plus arrosés, sont aussi les plus boisés. Les parties adossées au domaine guinéen forment la transition avec les formations végétales du Fouta Djalon.

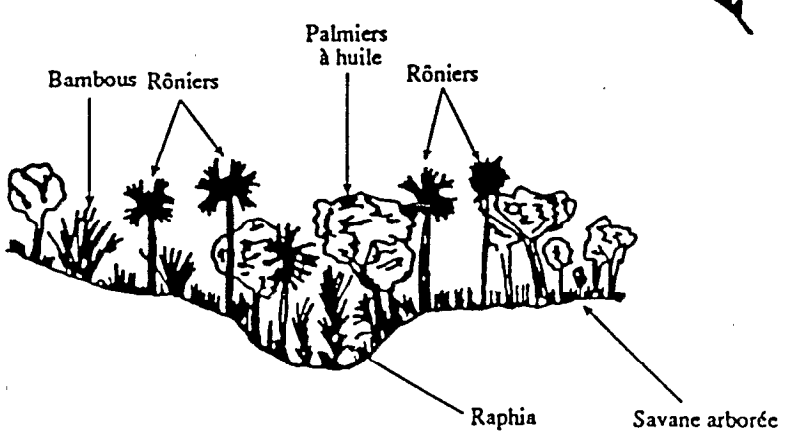
Dans sa partie nord, un paysage de buttes et de plateaux de grès escarpés domine de vastes surfaces planes, généralement sableuses. Les entailles du réseau hydrographique correspondent



1 : Savane boisée



2 : Plateau cuirassé (bowal) et son rebord



3 : Galerie forestière

Figure 7 : Paysages végétaux du plateau Mandingue, et des pays de la Falémé et de la Moyenne Gambie
adapté de P. Michel, (1973), schéma simplifié.

au bas glacis. Ce sont des terrains plats, sablonneux qui s'étalent au pieds des principaux reliefs. Ces plaines intérieures atteignent 300 à 350 m au nord-est de Kita, mais s'abaissent considérablement sur le cours inférieur du Bafing où elles varient de 120 à 170 m.

Au nord-est de Bafoulabé, s'élève un imposant massif (562 m) formé de grès infracambrien qui surplombe de 300 m les vallées du Bakoye et de la Kolimbiné. Le plateau Mandingue se termine dans la régions de Kayes par des plateaux morcelés, traversés par des escarpements de failles dont la falaise de Tambaoura (522 m) sur le flanc occidental. Ce dernier ensemble, essentiellement compris dans la zone soudanienne est formé de sols ferrugineux qui sont ici dans leur climax.

Ces sols varient selon la lithologie et les recouvrements colluvionnaires (pl. 2). Leur distribution dépend aussi des formes et de la jeunesse du modelé. Dans les parties basses des reliefs à drainage déficient, ils passent par endroits à des sols hydromorphes.

La végétation varie elle aussi avec la toposéquence. Les pentes et replats de pentes sont occupés par un tapis herbacé et ligneux qui ne diffère pas de celui des dépressions alentours. Sur les versants et les bas glacis, la savane est dominée par le vèn (*Pterocarpus erinaceus*) le caïlcédrat (*Khaya senegalensis*). Ces formations secondaires, différentes des sus-dénommées sont la réponse aux défrichements et aux feux de brousse.

Le Bafing et le Bakoye qui traversent tout le plateau Mandingue coulent parfois dans de vastes plaines intérieures, parfois entre des plateaux gréseux ou doléritiques. Leurs rives sont bordées par des forêts galeries. Au sud où elles forment la continuité du domaine guinéen, ces forêts galeries sont encore très denses avec des espèces variées. Ce peuplement s'appauvrit vers le nord avec de nombreuses espèces soudaniennes (*Raphia sudanica*). Ces forêts galeries qui longent ces cours d'eau contrastent par leur verdure avec les paysages environnants.

L'hydrogéologie du plateau Mandingue est assez analogue à celle du Fouta Djalon. Les formations géologiques identifiées appartiennent toutes aux classes P_4, P_6, P_7, considérées comme imperméables (fig. 8). Les rares nappes pouvant exister résultent des fragments d'altération des cuirasses et des phénomènes de diaclases assez localisés. Vers l'ouest, le plateau Mandingue débouche sur une vaste région déprimée.

3. LES PAYS DE LA FALEME ET DE LA MOYENNE GAMBIE

Les pays de la Falémé et de la Moyenne Gambie succèdent au nord aux contreforts septentrionaux du Fouta Djalon. A l'est, la falaise de Tambaoura forme leur limite avec le plateau Mandingue. Leur limite occidentale peut être fixée à environ 13°44' W de longitude, tandis qu'au nord, cette limite atteint Kidira à 12°13' N de latitude. Les pays de la Falémé et de la Moyenne Gambie comprennent ainsi tout le cours moyen de la Gambie et ses affluents, et englobent les cours moyens et inférieurs de la Falémé. Ils forment une vaste région déprimée, parcourue par de nombreux cours d'eau.

Les pays de la Falémé et de la Moyenne Gambie forment une entité géologique assez variée (fig. 3). Les formations du socle paléozoïque sont représentées par un faciès schisteux qui s'étend de part et d'autre du cours supérieur de la Falémé ; il comprend des schistes sériciteux, des talchistes et des micaschistes associés à de la muscovite. Les grauwackes et les quartzites correspondent à d'anciens grès feldspathiques mal classés. Ils se localisent principalement au sud-ouest de Kédougou, sur la Falémé. Les roches volcaniques du birrimien supérieur, ou complexe volcano-sédimentaire, affleurent sur le cours moyen de la Falémé, en contrebas des grès infracambrien de la falaise de Tambaoura, et au nord-est de Kédougou. Elles sont faiblement métamorphisées et comprennent des tufs, des métabasites, et des méta-andésites. Leur granitisation à l'orogenèse éburnéenne a abouti à la formation du granite de Saraya au nord-est de Kédougou, et des petits massifs au sud-est de Kidira.

La Chaîne panafricaine I des Bassarides forme l'ensemble des formations plissées de cette région. M. Villeneuve, (1984) y a identifié trois unités structurales étirées en bandes de direction nord-sud et représentées d'est en ouest par :

- l'unité A ou groupe de Termesse correspond à la série de la Falémé ou falémien (J. P. Bassot, 1966). Elle affleure sur le flanc nord-ouest du haut bassin du Sénégal, le long du cours inférieur de la Falémé. Les formations du falémien s'allongent en une écharpe d'une vingtaine de kilomètres entre Gaoual et Bakel. Elles sont constituées de quartzites et de schistes faiblement métamorphisées.
- l'unité B ou groupe de Guingan (M. Villeneuve, 1984) correspond à la série Bassari (J. P. Bassot, 1966). Elle prolonge l'unité A et prend en écharpe le cours moyen de la Gambie. Elle est plus métamorphisée que la précédente et suit un étroit couloir orienté nord-nord-est à sud-sud-ouest.
- l'unité C ou groupe de Niokolo Koba et de la Koulountou n'affleure que dans le haut bassin de la Gambie. Elle se prolonge au sud par le groupe de Forécariah dans la chaîne des Rokélides.

Les sillons molassiques, associés au protérozoïque terminal et à l'infracambrien inférieur englobent toutes les formations reposant en discordance sur la chaîne des bassaris. La couverture molassique est reconnue dans le haut bassin de la Gambie par le groupe de Mali et de Youkounkoun. Le groupe de Mali est essentiellement argileux et argilo-gréseux de type flysch. Le groupe de Youkounkoun, plus récent est formé de grès et conglomérats à dominante rouge ou brun-rouge.

Les formations sédimentaires paléozoïques débutent par des épandages gréseux, mis en place par un réseau fluviatile en "tresse", succédant aux dépôts de comblement des sillons molassiques. Elles s'échelonnent du Cambrien supérieur au Dévonien.

A ces différentes formations, s'ajoutent celles du bassin méso-cénozoïque qui correspondent aux formations sédimentaires. Elles s'étalent depuis le nord de la Mauritanie jusqu'au nord de la Guinée Bissau. Elles se sont mises en place du Trias au Tertiaire. Les formations de L'Eocène ainsi que celles du Continental Terminal sont les seules qui affleurent

Photo 1

Les buttes témoins aplanies par la surface Eocène sont souvent grèseuses et dépourvues de végétation. Le couvert végétal est plus dense dans les régions déprimées en contrebas.

Les buttes et plateaux forment d'imposants paysages dans les pays de la Falémé et de la Moyenne Gambie.
(environ de Kossanto)

Photo 2

Photo 3

Sur les paysages d'éblouis de cuirasses, les graviers forment l'essentiel de la couverture superficielle, la végétation s'y adapte alors difficilement.
(environ de Bamako)

clichés : O. Dione 1996

Planche 2 : Quelques aspects de l'aplanissement et de la latérisation des hauts bassins

Dans les pays de la Falémé et de la Moyenne Gambie, seules les formations du Continental Terminal sont représentées. Formées de sables et grès tendres, elles affleurent en contact discordant avec les terrains paléozoïques.

L'évolution géomorphologique de ces formations est marquée par l'édification de glacis et de terrasses graveleuses sur les lits de la Gambie et de la Falémé (pl. 2). L'altitude diminue au fur et à mesure que l'on se dirige vers le nord. Des reliefs résiduels, petits massifs, ou inselbergs se dressent au-dessus du paysage de glacis. Le haut et moyen glacis s'étendent dans les régions méridionales et sont couverts d'une cuirasse ferrugineuse. Le bas glacis est plus répandu au nord. Cette région comprend un ensemble de paysages très variés (fig. 5).

Les massifs et inselbergs n'occupent que 9 % des surfaces de cette région (P. Michel, 1973). Ils s'élèvent entre 400 et 500 m au sud de la Gambie, mais n'atteignent plus que 300 à 350 mm vers le nord-ouest. Ces hauteurs sont formées de métabasites de la série volcano-sédimentaire et de dolérites. Elles portent des lambeaux de la troisième surface Eocène et du relief intermédiaire. Ces reliefs résiduels s'égrènent en chapelet suivant la direction de la tectonique birrimienne.

Les reliefs de la boucle de Gambie se subdivisent en trois ensembles : les massifs de Ndébou et de Bandafassi au sud, le plateau tabulaire de Lakanta au centre et vers le nord de la boucle, se dresse le massif de Bafoundou. Les deux premiers ensembles sont formés d'épais sills de dolérites tandis que le dernier massif comprend des métabasites birrimiens. Ils sont tous recouverts en leur sommet par des revêtements latéritiques de la surface Eocène. Ces massifs de la boucle de Gambie juxtaposent ceux de la rive gauche de la Falémé, dominés par le massif de Sabadola et les buttes de Finba. Au sud-ouest, s'élèvent les monts Bassari, ensemble de buttes et de petits plateaux taillés dans les schistes paléozoïques et qui culminent à 417 m. Ils se prolongent en des reliefs isolés par les monts Hassirik (311 m) et le plateau de Badiar, ensemble de grès et grès-quartzites ordoviciens qui atteint 500 m à l'ouest de la Koulountou (fig. 5).

Les types de sols liés à ces reliefs sont essentiellement ferrugineux. Entre la boucle de la Gambie et la Falémé, s'étendent des sols ferrugineux tropicaux à taches et concrétions. Les vastes glacis de la moyenne Falémé, sont occupés par des sols ferrugineux très lessivés à carapace ferrugineuse de profondeur. Sur les roches basiques et leur pourtour, des sols squelettiques se distribuent sur les surfaces cuirassées latéritiques en voie de démantèlement dans la boucle de la Gambie et au nord-est du fleuve. Des sols peu évolués d'érosion ou d'apport occupent les versants. La végétation se distribue aussi en fonction du modelé (fig. 6). Dans la partie méridionale qui jouxte le domaine guinéen, les formations soudaniennes sont formées des savanes à tapis continu de hautes herbes avec généralement des strates arborées et arbustives.

Les plateaux cuirassés sont occupés par une végétation ligneuse très réduite et composée de combrétacées. Le couvert végétal se diversifie et devient plus dense sur le rebord des cuirasses en voie de démantèlement. Le santan (*Daniella oliveri*) est l'espèce de prédilection de ces milieux. Sur les versants à pentes moyennes et fortes, la diversité des espèces est marquée par de belles

venues d'arbres. Mais la forte densité des peuplements diminue du haut vers le bas des versants. Les versants à pentes faibles portent une végétation ligneuse, toujours assez claire et dominée par *Combretum glutinosum* et *Maytenus senegalensis*. Sur les versants des collines et des plateaux, poussent des bambous (*Oxythenantera abyssinica*).

Ces reliefs surplombent des paysages de glacis qui occupent environ 70 % de la superficie de la région (P. Michel, 1973). L'aspect de ces glacis est très variable. Des surfaces planes, dénudées et couvertes de cuirasses ferrugineuses alternent avec des buttes tabulaires cuirassées qui dominent les dépressions. Les hauts et moyens glacis occupent de vastes surfaces. Le haut glacis entaillé par le chevelu hydrographique se retrouve près de la Falémé aux environs de Gourbassi. Le moyen glacis, plus étendu occupe les surfaces comprises entre le massif de Ndébou et Kédougou, et se prolonge à l'ouest des monts bassaris. Le bas glacis occupe des dépressions souvent élargies. Ces terrains sableux ou argileux avec des débris de cuirasses et de gravillons recoupent les schistes birrimiens aux environs de Kossanto. Ils s'élargissent vers le nord, de part et d'autre de la basse Falémé. Ils sont traversés par de nombreuses rivières bien hiérarchisées qui aboutissent aux grands collecteurs de la Gambie, de la Falémé et leurs affluents.

Les types de sols associés à ces paysages varient en fonction de la lithologie et de la topographie :

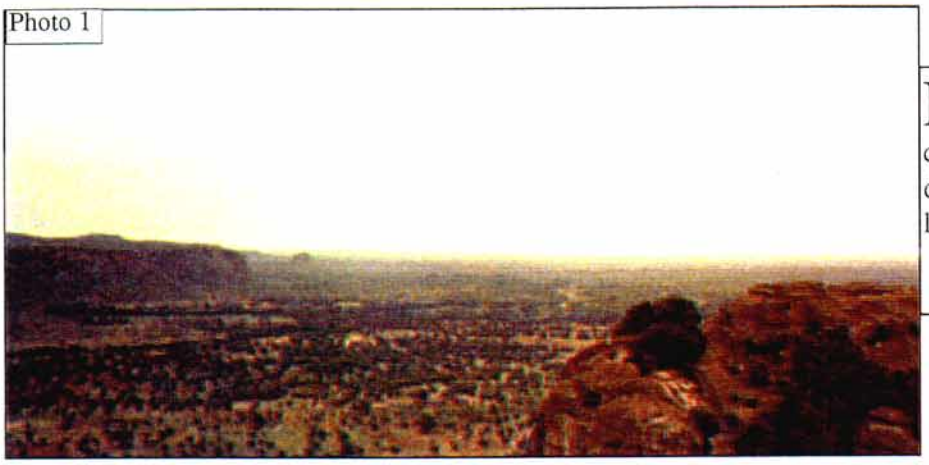
- Sur les formations paléozoïques constituées de grès et de pélites, les colluvions qui couvrent de vastes surfaces portent aussi des sols ferrugineux à taches. On les rencontre dans la partie occidentale.
- Les vertisols et sols hydromorphes s'étendent sur les basses pentes et les dépressions. Des sols hydromorphes sur colluvions sablo-argileux se développent dans les bas-fonds. De part et d'autre de la basse Falémé, apparaissent des sols halomorphes (P.S. Barreto, 1963). Ils alternent avec les vertisols des surfaces planes des glacis non cuirassés qui se raccordent à la pente du lit majeur de la Falémé.

Dans cette toposéquence, des sols peu évolués se juxtaposent aux vieilles cuirasses des surfaces planes. Le long de la vallée de la Gambie s'étalent des sols hydromorphes et des sols à pseudo-gley.

La savane soudanienne qui prospère dans ces milieux s'étage en trois strates :

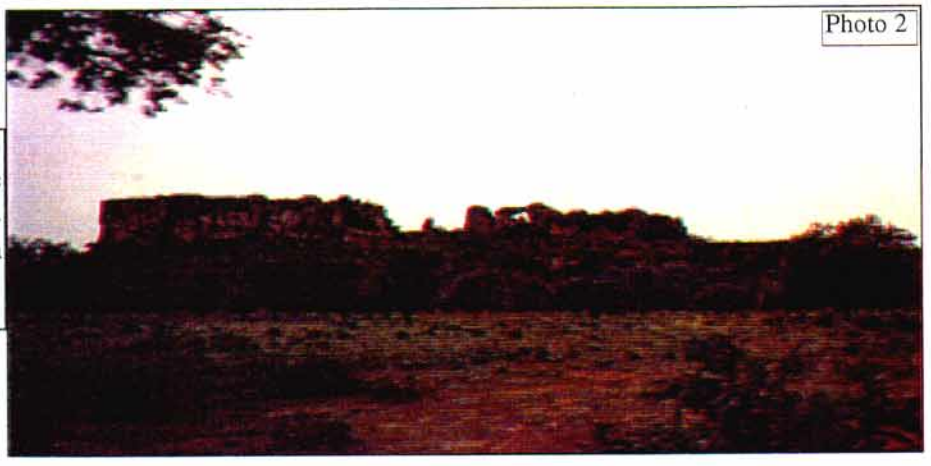
Le boisement touffu comprend de nombreuses espèces dont les plus répandues sont *Gadennia eurubescens*, *Lonchocarpus laxiflorus*. Au dessus de ce peuplement monotone, s'élèvent quelques grands arbres comme le vèn (*Pterocapus erinaceus*), le Kapokier (*Bombax costatum*), le tamarinier (*Tamarindus indica*), le santan (*Daniella oliveri*). Sur les terrains défrichés, prospèrent le caïlcédrat (*Khaya senegalensis*) le baobab (*Adansonia digitata*), et le fromager (*Ceiba pentandra*). Ces peuplements arborés sont souvent les victimes des termites arboricoles qui causent de graves dégâts.

Photo 1



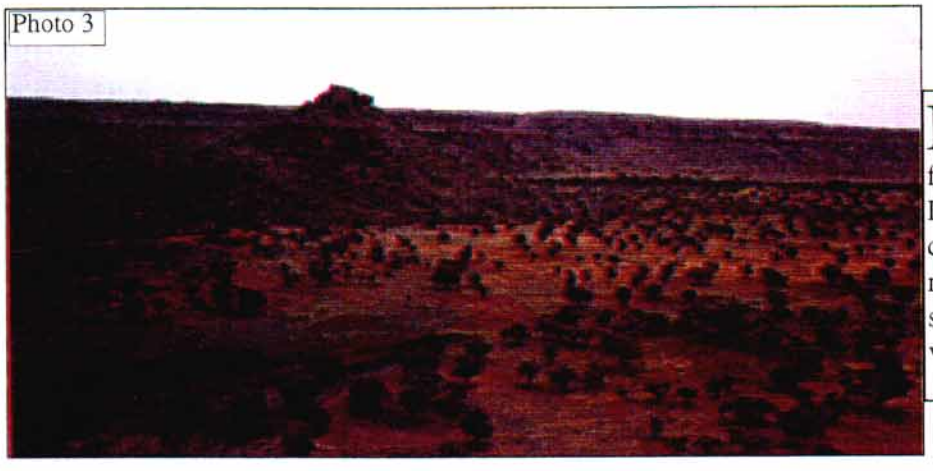
Les Paysages arborés des régions déprimées contrastent avec la nudité des massifs alentours qui les surplombent.
(environ de Kénieba)

Photo 2



Le déboisement des surfaces arborées se traduit par de vastes clairières parsemées d'un maigre tapis herbacé.

Photo 3



La répartition de la végétation est aussi fonction de la topographie. Le tapis herbacé qui colonise les versants des massifs est relayé par une strate arborée dans les vallées.

Clichés O. Dione 1996

Planche 3 : Paysages végétaux des pays de la Falémé et de la Moyenne Gambie

La strate arbustive est dominée par *Combretum glutinosum*, "espèce étonnamment grégaire et conquérante, résistante à la sécheresse" P. Michel, (1973). Elle se rencontre sous forme de buissons de taillis arbustifs de 4 à 5 m de haut.

La strate herbacée comprend deux étages bien distincts. De grandes herbes qui atteignent 2,5 m et dominées par *Andropogon gayanus* s'élèvent au-dessus de petites graminées qui atteignent à peine 0,8 m. Ce tapis herbacé plus ou moins dense se dessèche en saison sèche.

Dans les bas-fonds, la végétation ligneuse est plus dispersée en fonction des conditions d'engorgement. Le couvert arboré est absent sauf sur les marges des dépressions, lorsque le milieu est asphyxique. Par contre, si celui-ci est bien drainé, la dissémination des végétaux se fait suivant "la tolérance écologique respective" des espèces (G. Fotius, 1967).

Les forêts galeries représentent des peuplements azonaux qui contrastent avec les paysages végétaux des pays de la Falémé et de la moyenne Gambie. Elles bordent les rives des principaux cours d'eau de la Gambie et de la Falémé. Des rideaux d'arbres serrés ourlent les berges, colonisent les moindres lopins de terres des seuils rocheux. Ils forment des paysages touffus et enchevêtrés au sud, où ils ont encore une connotation guinéenne. De nombreuses espèces comme le tir (*Elais guineensis*) se mélangent à des espèces soudaniennes dans un univers de raphia (*Raphia sudanica*) qui s'étend sur les terrains constamment inondés. Les terrains temporairement inondés des lits majeurs sont peuplés par plusieurs espèces de rôniers (*Borassus flabellifer*). Vers le nord, ces forêts galeries sont encore très vivaces le long de la Gambie et de ses affluents avec des peuplements de rôniers et de prairies. Sur les rives de la moyenne Falémé, des saulaies cohabitent avec un tapis de graminées, dans une verdure qui rompt avec les paysages desséchés qui les entourent.

Ces paysages contrastés qui composent les pays de la Falémé et de la Moyenne Gambie (pl. 3) ont fait dire à H. Boucau, (1937) : " ces hautes plaines ou ces plateaux n'ont pas une surface absolument monotone ; très souvent surgissent, au hasard, de petits reliefs isolés, aux formes arrondies ou aux flancs abrupts, comme ennoyés dans les formations superficielles..."

Du point de vue hydrogéologique, la lithologie des pays de la Falémé et de la Moyenne Gambie est formée pour la majeure partie des classes P3 et P4. Les caractères hydrogéologiques de ces roches (fig. 8) sont marqués par une imperméabilité. Seuls des interstices permettent de déceler des arènes localisées. Le long des vallées alluviales de la Falémé et de la Gambie, des aquifères existent sur les couches du Continental Terminal. Mais celles-ci s'épuisent au fur et à mesure que se prolonge la période d'étiage.

4. LES PLAINES ET PLATEAUX DU NORD

Les plaines et plateaux du nord occupent la partie nord-est des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Les plateaux du nord se composent du massif de l'Affolé et du plateau de l'Assaba qui forment la bordure septentrionale des hauts bassins. Les plaines du nord s'étalent

dans la région de Kayes au pied des derniers reliefs du plateau Mandingue. Elles se prolongent vers le nord jusqu'aux flancs des massifs septentrionaux. Les plaines du nord débouchent à l'est et au nord-est sur la cuvette moyenne du Niger orientale et dans le bassin de Taoudenni. A l'ouest, ces basses terres rejoignent le bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien.

La géologie de cet ensemble comme le reste des hauts bassins est assez variée (fig. 3).

La couverture sédimentaire du protérozoïque est présente sur une grande partie du plateau de l'Affolé au nord de Kayes. Les sillons molassiques du panafricain I des bassarides sont formés par le groupe de Nioro qui se développe sur de vastes surfaces au nord de Bafoulabé et se prolonge jusqu'en Mauritanie. Ce sont des formations silto-argileuses dont l'épaisseur ne dépasse pas 300 m.

La couverture sédimentaire paléozoïque, formée par le groupe de Pita et liée à l'érosion de la chaîne des bassarides, affleure sous forme de grès à scolithes dans le plateau de l'Assaba. Les venues de dolérites du Permien et du Trias se rencontrent en des corméennes aux environs de Nioro du Sahel où elles prennent en écharpe la partie méridionale du bassin de la Kolimbiné. Les formations du bassin méso-cénozoïque, mises en place du Trias au Tertiaire sont représentées par la série du continental terminal. Formées de sables et de grès, elle affleurent dans la partie nord-est (fig. 3). En aval de Bakel, les couches grèso-argileuses de la série marine de l'Eocène (P. Elouard, 1962) affleurent le long du lit majeur du Sénégal. Des formations superficielles à base d'alluvions et des lœss se signalent le long du fleuve Sénégal. Dans le nord-est, des bancs de dunes s'échelonnent au-delà de Nioro du Sahel.

L'évolution géomorphologique de ces formations s'est traduite dans le paysage par des glacis non cuirassés et des terrasses que surplombent des plateaux (fig. 4).

Les plaines forment un immense bas glacis de terrains argileux et non cuirassés, entaillé en terrasses par le cours d'eau (fig. 5). Elles descendent vers les rives du Sénégal par une pente insensible de 80 m, jusqu'à 35 m au-delà de Bakel. Ces alluvions sablo-argileuses atteignent une largeur de 8 à 10 km dans les environs de Kayes, avec un intense ruissellement concentré qui aboutit localement à la formation de "bad-lands" (M. Sall, 1991).

Les types de sols s'ordonnent à la fois en fonction des conditions climatiques et des reliefs. Des gammes de sols variés s'étendent sur de faibles distances, favorisées par l'évolution de certains reliefs qui connaissent encore des retouches. On recense des sols minéraux bruts, des sols jeunes d'apport, des sols subarides et quelques rares indurations de sols ferrugineux tropicaux non lessivés. Sur le lit majeur du Sénégal et du Karakoro, des sols jeunes d'apport caractérisent les alluvions récents, sableux ou sablo-argileux. Ils alternent avec les rares sols ferrugineux, repérables dans les dépressions et les épais remblais alluviaux qui bordent le lit majeur du Karakoro. Dans les parties basses des vallées au terrain plus argileux du lit majeur du Sénégal, on rencontre des sols hydromorphes. Ceux-ci sont moins étendus sur les rives du Karakoro.

Les formations végétales sont plus ouvertes, dominées par des plantes ligneuses dont les épineux et des formations herbacées. Toutefois, la composition, la densité et la physionomie des formations sahéliennes présentent des variantes régionales et locales. Les graminées, très répandues, souffrent des rigueurs de la saison sèche et n'atteignent guère 0,80 m. Des paysages verdoyants apparaissent durant la saison des pluies, mais cet éphémère tapis herbacé jaunit dès le mois d'octobre pour laisser la place à un sol nu pendant les longs mois de saison sèche. Seuls, des îlots de verdures perdurent dans les bas-fonds et disparaissent progressivement au fil de la saison sèche.

Dans le nord-est, des sols bruns rouge forment le matériau sableux des dunes rouges qui occupent la bordure orientale de l'Assaba. Ces formations dunaires qui s'étendent à l'est ne sont piquetées que par une steppe arborée qui résiste à la force du vent. Les flancs des dunes et des interdunes abritent quelques peuplements d'acacia radiana. La partie méridionale, moins sèche, est occupée par les combrétacées (*Combretum glutinosum*).

Ces paysages, de vallées et de plaines, sont dominés au nord-ouest par le plateau de l'Assaba et vers le nord-est par le massif de l'Affolé.

L'Assaba, plateau de grès ordovicien est encadré d'escarpements rigides et rectilignes. Allongé nord-sud sur environ 180 km, l'Assaba apparaît comme la barrière septentrionale des hauts bassins. De forme tabulaire, il forme un étagement de plateaux qui correspond aux différents niveaux de grès durs et de grès-quartzites (C. Toupet, 1966).

Il est fortement disséqué par les branches supérieures du Gorgol noir et de l'Oued Gharfa qui ont exploité le réseau de fracture orienté est-nord-est à ouest-sud-ouest.

Le massif de l'Affolé est un épais sill de dolérites, lanièré par les affluents de la Kolimbiné. Il s'élève entre 250 et 400 m. Il est séparé du plateau de l'Assaba par des dépressions subséquentes, entaillées par les cours du Karakoro et de la Kolimbiné dans les formations de grès tendres. Ces dépressions sont partiellement ensablées surtout dans leur partie nord où elles s'achèvent par des dunes de direction nord-nord-est à sud-sud-ouest.

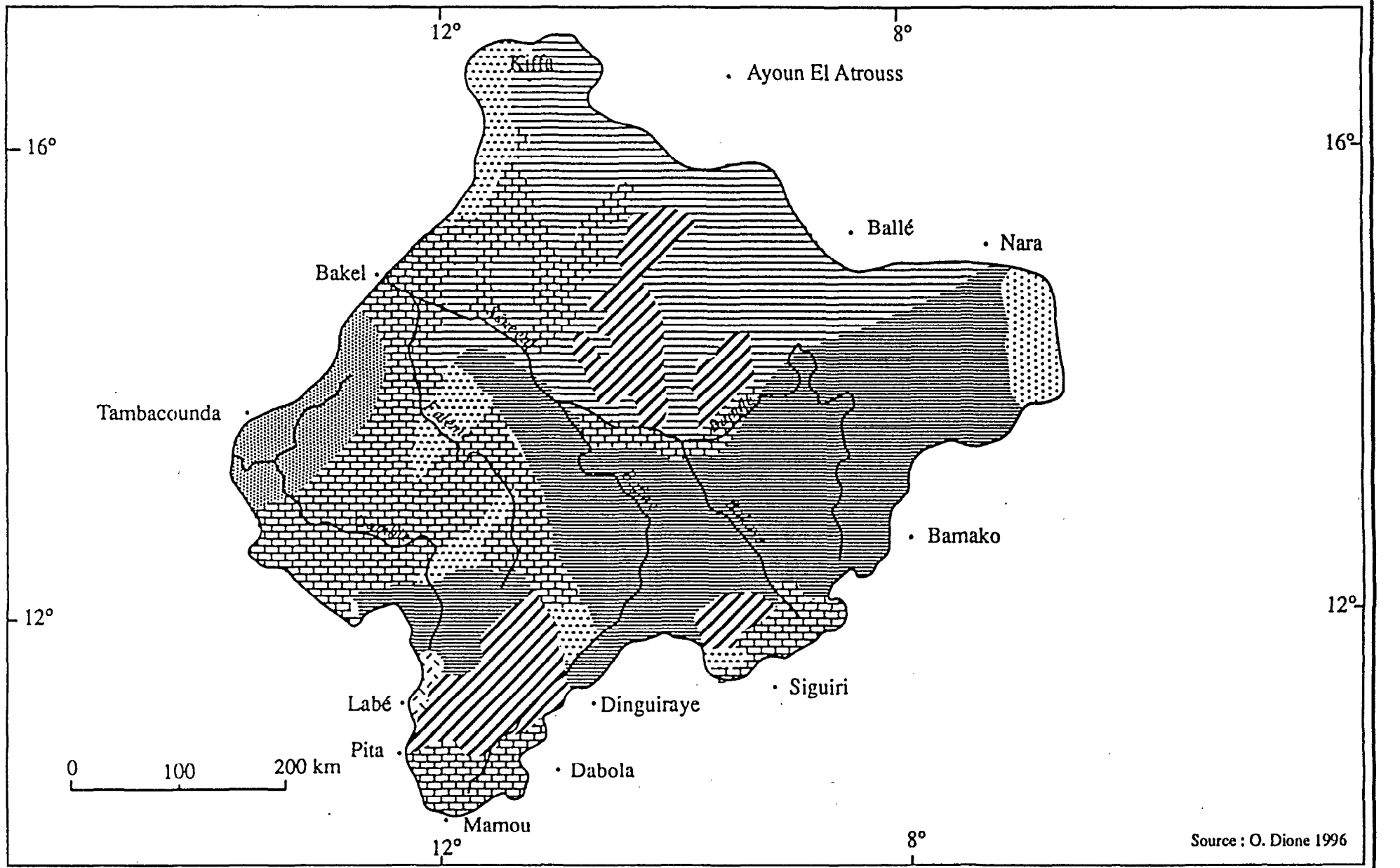
Les sols bruts d'érosion (lithosols) prédominent dans ces deux ensembles. La végétation très discontinue est commandée par les conditions édaphiques.

Les entailles du réseau hydrographique (oueds), la variété du substrat rocheux (éboulis et alluvions sableuses) capable d'abriter des nappes d'eau accroissent la diversité des sites et imposent des modifications considérables dans la composition floristique et la densité du peuplement. La topographie accidentée favorise alors des microclimats propices à la survivance de certaines espèces contre les rigueurs du climat sahélien.

Ainsi, la partie nord du massif de l'Assaba, rocheuse et aride est occupée par la steppe à épineux dont l'espèce dominante est *Acacia flava*. Sur les sols sablonneux, prospère *Acacia radiana*. (C. Toupet, 1966). En descendant vers les rives du Sénégal, les formations dominantes sont représentées par une steppe à *Combretum* et des espèces ligneuses.

Le long du Sénégal et de ses principaux affluents, les berges s'élargissent.

Figure 8 : Esquisse hydrogéologique des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie



Légende : Hydrogéologie des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie
d'aprés L. Marvier, (1952) ; P. Dubreuil et R. Guiscafre, (1971) et A .A. Sow, (1984)

Bassin sédimentaire	Faciès	Classes	Caractères hydrogéologiques
Recouvrements récents	Dunes, alluvions	P1	Nappes dunaires, alluviales
Continental terminal	Grès argileux, sables	P2	
Formations paléozoïques			
Infracambrien	Schistes	P3	Normalement imperméables, pas de nappes interstratifiées sauf rares exceptions
Ordovicien	Grès quartzites et roches diverses	P4	
Cambrien	Schistes, grès calcaires	P4	
Formations du socle			
Roches métamorphiques	Schistes quartzites et calcaires	P6	Imperméables, sauf dans les franges d'altération
Roches éruptives	Gneiss, granites et mécachistes	P7	
Roches basiques	Dolérites et gabbro	P7	

Les forêts galeries toujours présentes deviennent discontinues du fait de la sécheresse. Sur la Kolimbiné et le pourtour de la mare Magui survivent encore des rôneraies. En aval de Bakel, on rentre dans la vallée alluviale. Des forêts de Goniakés s'échelonnent le long du fleuve, contrastant avec la nudité des paysages environnants.

Les plaines et plateaux du nord des hauts bassins appartiennent du point de vue hydrogéologique aux classes de roches P_1, P_2, P_3 et dans une moindre mesure P_4. Le niveau piézométrique des formations qui composent ces trois premières classes varient entre -50 et 0 m I.G.N. Leur caractère hydrogéologique permet la présence de nappes dunaires ou alluviales (fig. 8). Le plateau de l'Assaba et le massif de l'Affolé sont formés par la classe P_4. Dans les couches de dolomies et de grès quartzitiques de ces deux ensembles, les eaux s'infiltrent dans les cuirasses et circulent à faible profondeur. Mais en règle générale, ces nappes, relativement faibles et localisées se vident dès le début de la saison sèche.

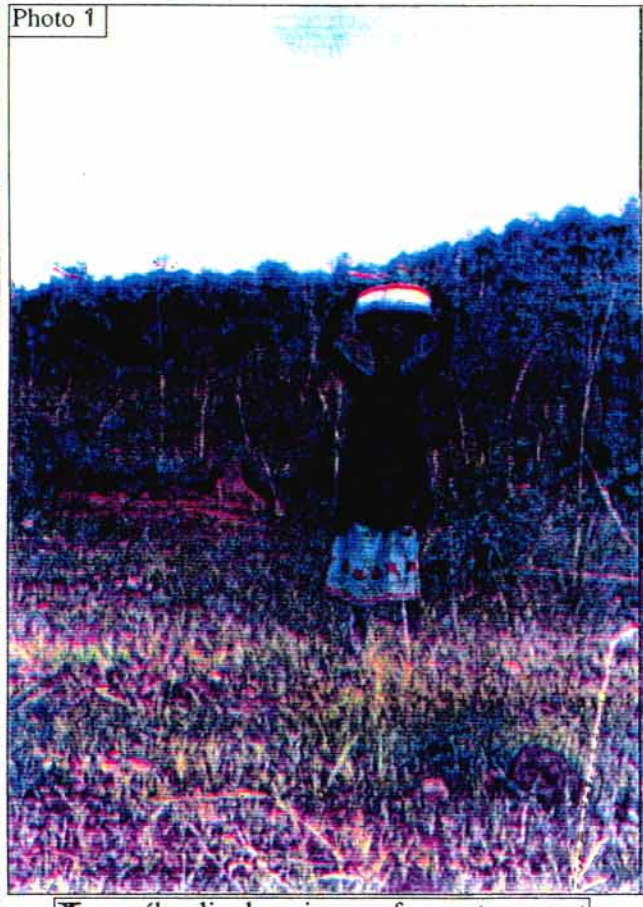
Les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie se caractérisent donc par une hétérogénéité de son milieu naturel. Cette hétérogénéité spatiale se traduit une répartition éparse des formations géologiques. Celles-ci sont très diverses et se rencontrent dans toutes les parties du bassin.

Des ensembles morphologiques fortement influencés par la structure géologique contrastent dans le paysage. Des sommets élevés et des hauts plateaux au sud s'abaissent vers le nord, en des bas plateaux qui surplombent des régions déprimées. A ces dernières, succèdent vers le nord des ensembles de plaines monotones, limités par des massifs bordiers. Les variations bioclimatiques de ces paysages ont abouti à des modelés spécifiques repérables en des surfaces d'aplanissement, des glacis et des terrasses traduisant, de fait, une hétérogénéité temporelle.

La formation des sols des hauts bassins dépend de l'évolution des conditions climatiques et des ensembles de reliefs. Dans les régions méridionales ou le climat est humide et pluvieux, prédominent des sols ferralitiques. Ceux-ci sont soumis à des variations diverses au fur et à mesure qu'on descend des hauts plateaux vers les petites vallées encaissées. Des sols ferrugineux passant à des sols hydromorphes le long des vallées alluviales leur succèdent vers le nord dans le plateau Mandingue et les pays de la Falémé et la Moyenne Gambie. Dans les plaines et plateaux septentrionaux à climat sahélien, des lithosols dominent les plateaux gréseux. Les plaines du nord-est sont dominées par des sols bruns subarides tandis que des sols hydromorphes colonisent les lits majeurs des cours d'eau. L'évolution morphoclimatique de ces différents sols s'est traduite par la formation d'une épaisse cuirasse ferrugineuse ou bauxitique (pl. 4).

Le cuirassement, essentiellement physico-chimique, concerne surtout des composés d'hydroxydes de fer et de manganèse qui "s'incrustent en un ou plusieurs horizons, se cristallisent et se durcissent sous l'effet de températures élevées" (R. Maignien, 1958). Ces cuirasses se rencontrent dans toutes les positions topographiques où elles forment de vastes plateaux dénudés de toute végétation arbustive (bowé).

Photo 1



Les éboulis de cuirasses forment souvent d'énormes blocs de graviers qui rendent difficiles toutes possibilités d'agriculture.

Photo 2

Les sols latéritiques forment des paysages désolants, couverts par un maigre tapis herbacé.

Photo 3

L'agriculture des sols latéritiques est souvent très difficile et peu rentable. (champ de mil dans la région de Kénieba).

clichés O. Dione 1996

Planche 4 : Quelques aspects des types de sols des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

Très répandus dans les régions méridionales (Fouta Djalon, plateau Mandingue) les phénomènes de cuirassement sont moins intenses dans les régions septentrionales des hauts bassins à cause du manque d'humidité qui ralentit la libération des oxydes de fer.

Les formations végétales résultent de l'interaction des facteurs lithologiques, orographiques, pédologiques et climatiques. Celles-ci, hormis l'extrémité méridionale (guinéo-congolaise), appartiennent presque entièrement à la grande région soudano-angolane de P. Michel, (1973), que J. Trochain, (1940), avait déjà surnommée soudano-déçanienne. La végétation se répartit par zones à l'intérieur desquelles interviennent des facteurs régionaux, locaux, édaphiques et topographiques, qui déterminent à la fois la composition floristique et la densité du couvert végétal. Mais de manière générale, la physionomie des formations végétales se modifie du sud au nord, conformément à la baisse des précipitations et aux effets de l'action anthropique (feux de brousse, cultures). Cependant, le passage d'une formation à une autre ne se fait pas de manière brutale, mais par une transition qui implique le mélange des essences des différentes zones (guinéenne, soudano-guinéenne et soudano-sahélienne).

Dans le Fouta Djalon, des forêts denses à l'état de reliques parsèment les hauts reliefs. Elles font suite à des savanes forestières dans les hauts plateaux et les contreforts. Des forêts galeries verdoyantes bordent les petites vallées tracées par les cours d'eau. Des formations soudaniennes succèdent vers le nord aux peuplements végétaux du Fouta Djalon et de ses bordures.

Dans le plateau Mandingue, les pays de la Falémé et de la Moyenne Gambie, les formations soudaniennes sont formées de savanes à tapis continu de hautes herbes avec généralement des strates arborées et arbustives. Les peuplements, assez denses dans la partie méridionale du domaine soudanien, s'éclaircissent vers le nord où l'on entre dans le domaine sahélien. Des forêts galeries enserrent encore les berges des cours d'eau, avec de nombreuses espèces soudaniennes.

Dans les plaines et plateaux du nord des hauts bassins, les formations végétales sont formées par des plantes ligneuses avec une forte dominante des épineux. Ces formations dominent un tapis herbacé de graminées. Verdoyantes durant la saison des pluies, ces formations s'assèchent rapidement durant la saison sèche et ne forment plus que des paysages rabougris. Seules les forêts galeries colonisent les rives du Sénégal et de la Kolimbiné et maintiennent une relative verdure. Leur peuplement est cependant moins dense et beaucoup plus lâche que dans les régions méridionales.

Ces différents caractères géographiques du milieu naturel des hauts bassins sont résumés dans le tableau 1. Cette esquisse géographique, tout en reconnaissant des entités régionales spécifiques, traduit aussi leurs interférences dans le cadre hydroclimatique du bassin-versant. Le réseau hydrographique s'y est adapté de manières diverses, suivant les caractéristiques de chaque ensemble. Des unités lithologiques et morphométriques bien tranchées se dégagent entre le sud et le nord des hauts bassins.

Ensembles Géographiques	Sous-Ensembles	Lithologie	Géomorphologie	Pédologie	Végétation	Appartenance Hydrologique	Hydrogéologie
FOUTA DJALON	Hauts reliefs	Dolérites et granites	1ère surface (Jurassique)	Lithosols et sols squelettiques	Forêts reliques	COURS SUPERIEURS	Ensemble formé des classes P6 et P7, pas de nappes sauf dans les franges d'altération
	Hauts plateaux	Dolérites et gabbro	2 ème surface (Crétacé)	Lithosols et éblouis de cuirasse	Forêts et savanes guinéennes		
	Contreforts septentrionaux	Sills de dolérites	3 ème surface (Eocène)	Sols ferrallitiques latérisés	Savane guinéenne		
PLATEAU MANDINGUE	Bordure sud	Grès divers	2 e et 3 e surface Haut glacis	Sols ferrugineux et ferrugineux cuirassés	Savane guinéenne	COURS SUPERIEURS	Région formée des classes P4, P6 et P7, Imperméables sauf exception
	Plateau central		Reliefs intermédiaires, 2 ème surface		Savane soudanienne	COURS MOYENS	
	Bordure nord		Bas glacis	Sols ferrugineux	Savane soudano-sahélienne		
PAYS DE LA FALEME ET DE LA MOYENNE GAMBIE	Massifs d'inselbergs	Métabasites, dolérites, grès et grès quartzites	3 ème surface (Eocène) et reliefs intermédiaires	Sols ferrugineux	Plantes ligneuses et arborées	COURS SUPERIEUR SUR 2/3	Ensemble formé des classes P3 et P4. Imperméables avec présence d'interstices donnant lieu à des arènes localisées
	Régions Déprimées	Schistes, pélites et sables	Haut, moyen et bas glacis	Sols ferrugineux, vertisols, sols hydromorphes et sols à pseudo-gley	Savane soudanienne à 3 strates (arborée, arbustive et herbacée)	COURS MOYENS	
PLAINES ET PLATEAUX DU NORD	Plateaux (Assaba,Affolé)	Grès (Assaba), Dolérites (Affolé)	Grès, témoins de différentes surfaces	Sols bruts d'érosion (lithosols)	Steppe à combretum et espèces ligneuses	COURS MOYENS	Région composée des classes P1, P2 et P3 avec présence de nappes dunaires et alluviales
	Plaines du Nord	Sables et grès du Continental Terminal	Bas glacis (non cuirassé)	Alluvions sableux ou sablo-argileux, dunes	Steppe à épineux et graminées		

Tableau 1 : Essai de classification des ensembles géographiques des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie.

Elles déterminent des possibilités d'infiltration très nuancées, et des caractères morphométriques à influence variable. Des types de sols variables d'un milieu à un autre, mais avec des caractères hydrogéologiques proches, une végétation qui se dégrade aussi bien dans l'espace que dans le temps... Ainsi s'apparentent les principaux facteurs géographiques, considérés comme stabilisants de l'écoulement des hauts bassins. A la lumière des développements précédents, nous retenons quatre facteurs dont l'influence peut être déterminante sur le processus hydroclimatique :

Ce sont la géologie, le relief, les types de sols et le couvert végétal. La prédominance de chaque facteur est reconnue par un signe emprunté à A. A. Sow, (1984), et que nous identifions :

+ +: Très importante ; + : importante ; + - : moyenne ; - : faible ; - - : Très faible.

Tableau 2 : Influences des facteurs stabilisants de l'écoulement des hauts bassins

Caractères	Cours supérieur du Sénégal	Cours supérieur de la Gambie	Cours moyen du Sénégal	Cours moyen de la Gambie
Sous-bassins	Bafing, Bakoye Baoulé, Falémé	Diarha, Diaguiry Thiokoye, Oundou	Kolimbiné, Karakoro	Niaoulé, Niériko Koulountou, Niokolo Koba
Superficie	124 700	7 550	93 300	34 500
Géologie	++	++	+	+
Relief	++	++	+	+
Pédologie	--	--	-	-
Végétation	++	++	--	+ -

Cependant, prise dans sa globalité, l'analyse des facteurs stabilisants se résume à une opposition entre le sud (*cours supérieur*) et le nord (*cours moyen*) des hauts bassins (tab. 2).

La géologie constitue le facteur le plus uniforme à l'ensemble des hauts bassins. Toutes les formations évoquées ci-dessus sont taillées dans la couverture du socle. Cette uniformité revêt néanmoins des nuances entre les cours supérieur et moyen, quant à l'influence de la lithologie sur l'écoulement.

Sur le cours supérieur, les formations dominantes sont à base de granites, dolérites et gabbros. Elles ont une influence très importante (++) puisqu'elles sont toutes considérées comme imperméables. Elles favorisent ainsi un écoulement rapide des eaux de ruissellement. Ce caractère d'imperméabilité est toutefois limitant dans le processus hydrologique du cours supérieur puisqu'il consacre l'inexistence de nappes capables de soutenir l'écoulement en période d'étiage.

Par contre, sur le cours moyen, formé de schistes, grès, et de sables, cette influence est seulement importante (+). La diversité de la structure, jointe à l'existence conditionnée de nappes font que la lithologie du cours moyen n'a qu'une importance relative sur le processus

hydrologique. Que certaines unités géologiques s'apparentent à celles du cours supérieur, et cette influence revêt localement les mêmes caractères que le sud du bassin ; que d'autres unités propres à la région (Continental Terminal) réagissent en fonction de leur caractère (perméabilité et possibilité d'aquifères), et cette influence s'en trouve inversée.

Le relief est sans doute le facteur qui traduit le mieux la partition des hauts bassins entre le cours supérieur aux hautes terres et le cours moyen aux régions de plaines. Il va de soi que les influences du relief varient d'une région à l'autre :

Sur le cours supérieur, la présence de hauts reliefs (Fouta Djalon et ses contreforts, plateau Mandingue) se manifeste par une très forte influence sur l'écoulement. Ainsi, les différences d'altitudes et les fortes pentes qui en résultent, les différentes formes topographiques contribuent à accélérer la vitesse des drains, et à modifier les profils en long des cours d'eau. Ces caractères qui confèrent parfois aux rivières du cours supérieur un aspect torrentiel seront évoqués plus en détail dans l'analyse hydrologique.

En revanche sur le cours moyen, les faibles altitudes notées, et la tendance à la platitude générale ne favorisent pas une influence majeure. Les rivières retrouvent alors leur "calme" et seules quelques rares irrégularités du profil (seuils et chutes) perturbent leur cours.

Curieusement, le facteur pédologique dont le rôle est fondamental pour l'écoulement exerce une influence moindre sur l'écoulement des hauts bassins. Ce fait est assez paradoxal eu égard au rôle des formations superficielles pour la constitution de nappes qui réalimentent l'écoulement.

Cependant, à partir des analyses précédentes sur les caractères pédologiques, il s'avère que les types de sols des hauts bassins, par leur texture ne peuvent avoir une influence significative. Les lithosols et cuirasses qui forment les principaux sols du cours supérieur sont en général peu favorables à la présence d'aquifères. Ils n'assurent qu'un ruissellement rapide, d'où leur très faible influence sur les possibilités d'infiltration.

Sur le cours moyen, le phénomène pédologique le plus marquant est la latérisation. Les différents sols qui subissent ce phénomène ont alors une texture qui ne favorise pas une forte infiltration en raison des indurations. Les rares entités capables d'en offrir des possibilités sont souvent très localisées. Ces multiples critères traduisent la faible influence pédologique du cours moyen.

Le couvert végétal, par sa densité, apparaît souvent comme un facteur limitant au processus hydrologique. Dans les hauts bassins ce critère n'est pas d'exception, même si par sa répartition, le couvert végétal intègre la subdivision du cadre géographique des hauts bassins.

Le cours supérieur, avec ses forêts et savanes guinéennes réduites à des reliques exercent une très forte influence sur l'écoulement. Certes, la densité du couvert végétal est fonction du site et de la lithologie, mais la végétation répertoriée intercepte bien encore les fortes pluies et réduit l'évaporation. Les forêts galeries par leur densité diminuent fortement l'érosion lors des périodes de crues. Le couvert végétal canalise les drains et facilite leur écoulement. Son rôle est aussi contradictoire car, par le prélèvement de ses racines, la végétation favorise l'évapotranspiration.

Mais ce couvert végétal se modifie du sud au nord, devenant de plus en plus lâche. Ceci se traduit sur le cours moyen par une influence variable de la végétation sur l'écoulement. Des zones encore propices (végétation soudanienne du cours moyen de la Gambie et du Sénégal) se distinguent de celles très affectées par la dégradation végétale (végétation sahélienne du cours moyen du Sénégal). Cette influence est ainsi moyenne dans la première zone citée. Les forêts galeries jouent le rôle majeur contre le sapement latéral des berges par la crue et diminue le rôle de l'érosion très intense en domaine soudanien. Cependant, le vaste déboisement entrepris dans le cadre du barrage de Manantali a sérieusement entamé une partie du couvert végétal. Nous reviendrons sur les conséquences de ce processus notamment sur l'alluvionnement de ce barrage-réservoir.

Sur le cours moyen du Sénégal, la lâcheté du couvert végétal se traduit par une très faible influence sur l'écoulement. La végétation arbustive, buissonnante et steppique, caractéristique de la zone, ne réalise pas une interception efficace des violentes averses qui caractérisent cette zone. La transpiration végétale est très limitée, tandis que l'érosion atteint des conditions extrêmes. Faute de réserves en eau dans le sol, "le mécanisme d'évaporation par les plantes est parfois bloqué" (R. Frécaut, 1982).

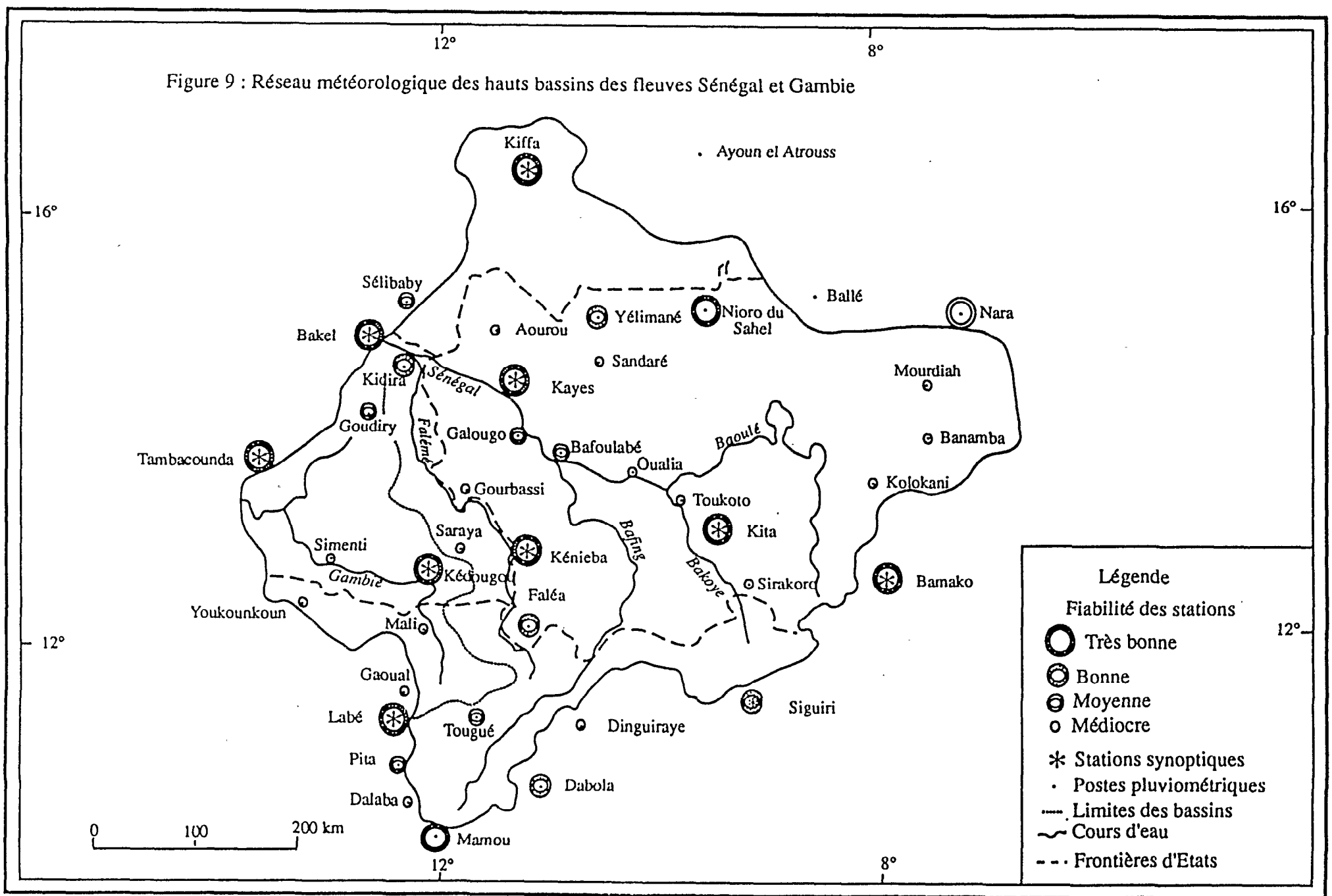
Jusqu'à présent, notre démarche, purement géographique a permis à travers la géologie, le relief, la pédologie, et la biogéographie, d'entrevoir les caractéristiques du milieu naturel des hauts bassins. Certes, ces différents ensembles, par leur nature et leur évolution, sont très liés et concordent tous du point de vue hydrologique une partition des hauts bassins en deux ensembles distincts : les *cours supérieurs* et les *cours moyens*.. Mais, par leurs nuances qui peuvent être locales ou régionales, tout en agissant de façon simultanée, ils peuvent aussi se particulariser. La synthèse ci-dessus présente à l'échelle individuelle le rôle de chaque ensemble et la nature de son influence sur l'écoulement.

Cependant, le cadre géographique n'est qu'une vision d'un milieu où se déroule une connexion de facteurs, qui peuvent être aléatoires, normaux, ou saisonniers. Ces différents facteurs, dits climatiques forment un maillon essentiel du cadre hydroclimatique. Ce sont ces facteurs qui déterminent l'écoulement et exercent à des degrés divers leurs influences que nous étudions.

DEUXIEME PARTIE

LE MILIEU CLIMATIQUE DES HAUTS BASSINS

Figure 9 : Réseau météorologique des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie



Cette situation qui devait insuffler un meilleur dynamisme aux réseaux mis en place connaît des fortunes diverses. Ainsi, à la diversité des sources, sont venues s'ajouter les difficultés de maintien, d'exploitation et de renforcement de l'équipement existant. De nombreuses stations de mesures sont passées ainsi, de la suspension des relevés à la simple fermeture. Aussi, l'extension des hauts bassins sur plusieurs pays souffre de ce handicap. La figure 9 présente les différentes stations qui forment le réseau météorologique des hauts bassins. On recense ainsi 60 postes et stations pluviométriques. Ce chiffre est cependant dérisoire au rapport de la superficie de la zone d'étude et de l'inégalité du nombre de postes et de stations entre les différents réseaux de mesures.

Le réseau malien est le mieux pourvu avec 27 stations et postes pluviométriques. Il est suivi du réseau sénégalais qui compte 16 stations. Les réseaux guinéen et mauritanien ne totalisent respectivement que 14 et 3 stations ou postes pluviométriques.

Deux sources d'informations sur la pluviométrie des hauts bassins sont retenues dans le souci d'harmoniser les données disponibles. Les données des différentes stations proviennent soit des annuaires de l'ASECNA, soit des services météorologiques nationaux respectifs.

Malheureusement, la non adhésion de la Guinée à l'ASECNA et les difficultés de fonctionnement de l'OMVG[4] limitent considérablement les possibilités d'accès aux données de ce pays. A ces différents obstacles s'ajoutent des lacunes dans les séries de mesures des différentes stations. Cette hétérogénéité de l'information pluviométrique, et le problème de fiabilité qui en résulte, seront critiqués à partir de trois méthodes statistiques. Nous retiendrons ensuite les stations de base nécessaires à l'étude de la pluviométrie.

1. 2. Les autres éléments climatiques

Les autres éléments qui intègrent l'étude climatique des hauts bassins concernent le vent, les températures, l'humidité relative, l'insolation et l'évaporation. Ces différents éléments sont aussi mesurés dans les stations synoptiques qui constituent les stations de base pour l'étude de la pluviométrie. D'ailleurs comme ce paramètre, les autres éléments climatiques connaissent une hétérogénéité spatiale et temporelle à travers les réseaux de mesures. Tout au long de leur analyse, nous opérerons ainsi des découpages afin de mieux comparer l'évolution récente avec la période historique. Cependant, les informations relatives au réseau guinéen sont encore assez fragmentées et limitent une exploitation optimale des informations de ce domaine.

[4] OMVG : Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie.

CHAPITRE 1

LES MECANISMES CLIMATIQUES ET LE DECOUPAGE DE L'AFRIQUE OCCIDENTALE

L'Afrique occidentale est comprise entre le Sahara au nord et le golfe de Guinée au sud. Elle est bordée sur sa façade ouest par l'Océan Atlantique. Sa limite orientale est difficile à cerner et suivrait une ligne de crête qui va du massif du Tibesti, au Cameroun, en passant par le Darfour. Au nord, s'étendent d'ouest en est des massifs sahariens d'altitude très inégale : Adrar de Mauritanie, Adrar des Ifoghas, le massif de l'Aïr, le Hoggar et le Tibesti. L'intérieur se présente comme un relief plat, constitué par plusieurs dépressions qui forment des cuvettes : ce sont la cuvette sénégalo-mauritanienne, les cuvettes du Niger occidental et du moyen Niger oriental, et la cuvette du Tchad. Au sud, s'allongent selon un axe nord-ouest à sud-est plusieurs massifs qui isolent parfois la côte de l'intérieur. Ce sont l'ensemble du Fouta Djalon et la dorsale guinéenne, le massif de l'Atakora, les hauts plateaux du Nigéria (plateau de Jos, plateau Bauchi), la dorsale camerounaise et l'Adamaoua. Ainsi, par sa position géographique, l'Afrique occidentale apparaît comme un milieu ouvert aux diverses influences liées à la circulation générale (fig. 10).

1. LES COMPOSANTES DE LA CIRCULATION GENERALE

La circulation dans les basses couches est commandée par les Anticyclones Mobiles Polaires (AMP) qui réalisent le transport en "masse" de l'air polaire vers les tropiques. Ils constituent le premier facteur d'explication de la circulation en zone tempérée avant d'atteindre les marges tropicales (M. Leroux, 1986, 1993).

1.1. Les AMP : moteur de la circulation générale

Les AMP prennent naissance au-dessus des zones arctiques et antarctiques par le tassement de l'air refroidi. Ils constituent de vastes lentilles (2 à 3000 Km de diamètre), pelliculaires (1 500 m d'épaisseur) d'air froid. Ils se déplacent d'ouest en est avec une composante méridienne variable. Leur cohérence, relative tout au long de leur trajet, leur permet de soulever et de dévier autour d'eux l'air environnant. Ils forment ainsi un vortex dipôle, d'abord anticyclonique dans l'AMP lui-même, et dépressionnaire ensuite par le couloir périphérique et le "cyclone". C'est dans ce couloir périphérique que se concentrent les formations nuageuses et les précipitations.

En cours de déplacement, les AMP soumis à leur propre divergence, s'étalent et perdent de leur épaisseur qui est de l'ordre de 1000 mètres en arrivant sur les marges du Maghreb.

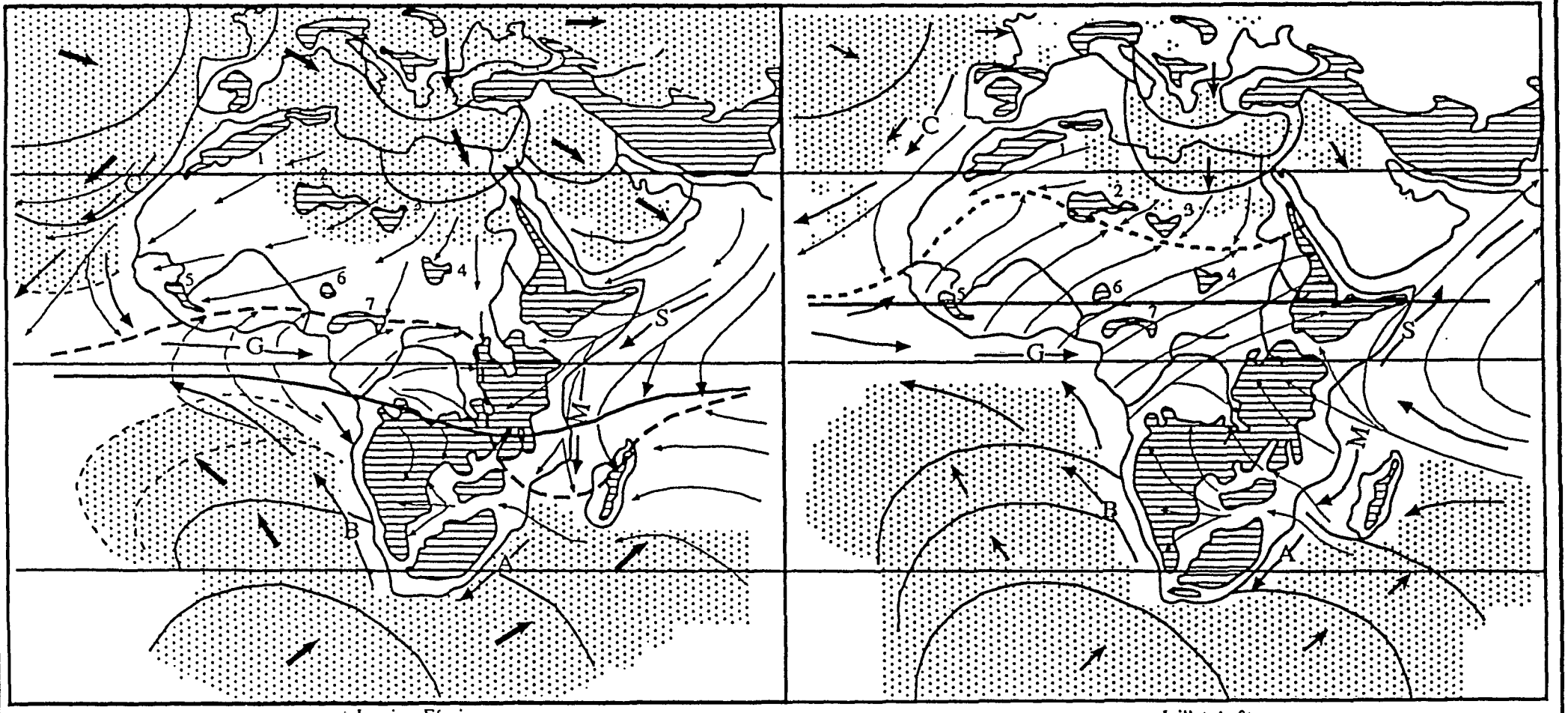


Figure 10 : Dynamique de la circulation atmosphérique en Afrique
(M. Leroux, 1980, 1981,1992, 1993).

Ils se heurtent alors à la barrière orographique (fig. 10) formée par la chaîne de l'Atlas (haut Atlas, moyen Atlas, Atlas Tellien). La rencontre de cet air froid, dense et peu apte à s'élever avec un haut relief (4165 m dans le Djebel Toubkal), se traduit par une canalisation des AMP et la formation de cellules anticycloniques.

1.2. Les agglutinations anticycloniques

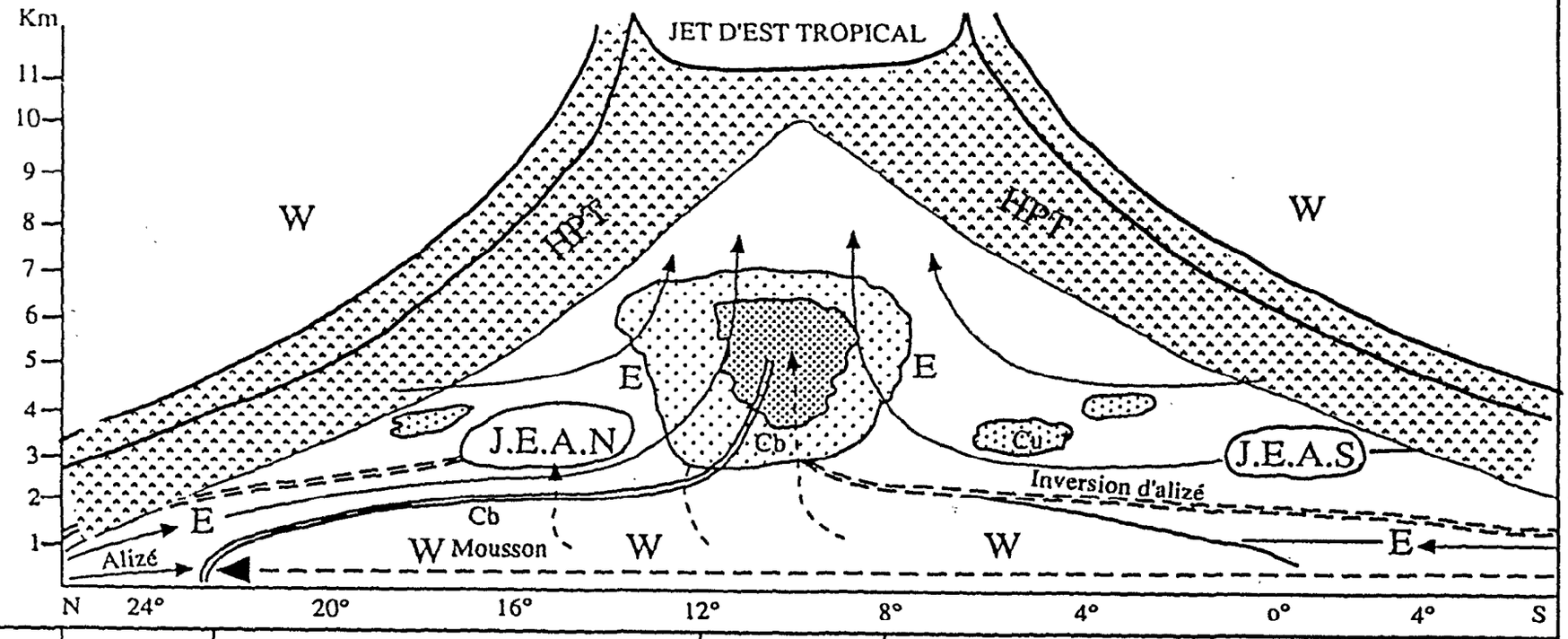
Les agglutinations anticycloniques qui intéressent l'Afrique septentrionale sont la conséquence de la rencontre des AMP avec les reliefs bordiers du continent européen puis africain. Les barrières montagneuses qui s'opposent ainsi à la pénétration de l'air froid sur le continent provoquent la formation d'agglutinations synoptiques constamment alimentées par de nouvelles venues d'air froid (fig. 10).

Elles sont souvent localisées sur la façade orientale des océans mais, leur existence étant liée à la puissance des écoulements d'AMP, on les retrouve aussi sur les continents. Les agglutinations anticycloniques sont aussi appelées "centres d'actions" en raison de leur rôle fondamental dans la circulation des basses couches. Elles forment des cellules distinctes dans les basses couches. Il s'agit pour l'Afrique occidentale :

- A l'ouest, sur l'Atlantique, de l'agglutination dite des "Acores", définie à partir des valeurs moyennes par les climatologues. Elle connaît de fréquentes impulsions d'air froid, les AMP s'y télescopent, s'agglutinent et s'additionnent pour lui conférer le caractère de cellule permanente et stable. Le transport au sein de l'agglutination n'est pas arrêté mais simplement ralenti.
- A l'est de l'Atlas, de l'agglutination "saharienne" (en période hivernale) ou "saharo-méditerranéenne" (en période estivale). Elle naît sur le bassin oriental méditerranéen de la jonction des fragments d'AMP venus de l'Atlantique et ceux plus puissants qui descendent directement de l'Europe centrale entre les Alpes et les hauteurs turco-iraniennes de l'Anatolie-Taurus (M. Leroux, 1990). Sa fluctuation (hiver/été) lui vaut les diverses appellations de cellule maghrébine, "libyenne" ou "libyo-égyptienne".
- Au sud, l'agglutination dite de "Sainte Hélène", centrée sur l'Atlantique sud. Elle résulte de la fragmentation des AMP issus de l'Antarctique au contact des reliefs d'Afrique australe, le Grand Escarpement ininterrompu et puissant qui isole à son pied le Namib (M. Leroux, 1993). Cette agglutination anticyclonique est constamment réalimentée par de l'air froid en provenance du pôle sud. Ainsi, tout en favorisant la formation des agglutinations anticycloniques, le dynamisme des AMP leur impose une migration annuelle en fonction de son intensité et de sa variation saisonnière (fig. 10).

2. LA CIRCULATION TROPICALE

L'Afrique occidentale appartient au domaine tropical qui est limité par les agglutinations anticycloniques.



Zones	1	2	3	4	5
Largeur	—	1 200 Km	450 Km	1 000 Km	—
Flux	alizé boréal	mousson surmontée par de l'alizé boréal	mousson plus alizé	mousson surmontée par de l'alizé austral	alizé austral
Nébulosité	très faible	peu importante	très importante	peu importante	très faible
Type de nuages		Cb Ac As	Cb Ac As	Cu Sc Sc	
Type de pluies	—	essentiellement orageuses	pluies continues	bruine	—
Saison	non pluvieuse	pluvieuse	pluvieuse	pluvieuse	non pluvieuse

Figure 11 : Coupe de la Troposphère Ouest-Africaine en août le long du Méridien 0°
(P. Sagna, 1988)

En altitude, ces hautes pressions se rejoignent en une ceinture unique sous forme de "V" renversé et encadrent les basses pressions intertropicales (fig. 11). La circulation atmosphérique de l'Afrique occidentale se particularise par l'existence de flux, et de discontinuités. En altitude, s'individualisent des noyaux de vents forts représentés par les jets.

2.1. Le vent dans les hauts bassins.

Les caractères aérologiques moyens dépendent des types de circulation dans les hauts bassins. Ceux-ci connaissent des directions et des vitesses différentes suivant la prédominance des flux en surface.

2.1.1. Les directions du vent dans les hauts bassins

L'étude de la direction du vent sur les hauts bassins porte sur la période 1961-1990. Elle concerne les stations de Labé, de Bamako, de Tambacounda et de Kiffa.

Huit directions (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) sont retenues pour l'analyse des ces quatre stations (fig. 12, 13,14 et 15).La fréquence de la direction du vent est donnée en pourcentage et représentée sur le tableau 3.

L'analyse des valeurs de ce tableau aux différentes stations montre une double répartition des fréquences, conformément aux saisons climatiques des hauts bassins.

Ainsi, à la station de Labé, on observe une prédominance des vents de secteurs nord et est de janvier à avril. Les fréquences les plus élevées durant cette période correspondent surtout aux vents de secteur est, viennent ensuite par ordre d'importance ceux de secteur sud-est et nord-est. La fréquence la plus élevée est notée au mois de février (44,1 %) qui correspond au cœur de la saison sèche dans cette région. L'importance des vents de secteur est à sud-est est liée aux incursions du flux d'harmattan (fig. 12).

A partir du mois de mars, la fréquence des vents de secteurs nord à est diminue progressivement. Le mois d'avril qui assure une transition avec les vents de secteur sud à ouest n'enregistre plus que de très faibles fréquences encore liées au flux d'alizé. La tendance s'inverse totalement au cours du mois de mai avec une prédominance des vents de secteurs sud à ouest, liés au flux de mousson. Ceux-ci dominent alors dans la région jusqu'en octobre. Les fréquences les plus élevées correspondent aux vents de secteurs sud-ouest et ouest. Ces vents de secteur ouest représentent 60 % des fréquences enregistrées au mois d'août.

Le mois de novembre qui coïncide avec le balancement saisonnier du flux de mousson et d'alizé traduit une mosaïque de circulation avec des fréquences sensiblement identiques pour les directions présentes. En décembre, la circulation d'alizé se rétablit et les vents qui lui sont liés reprennent leur cours.

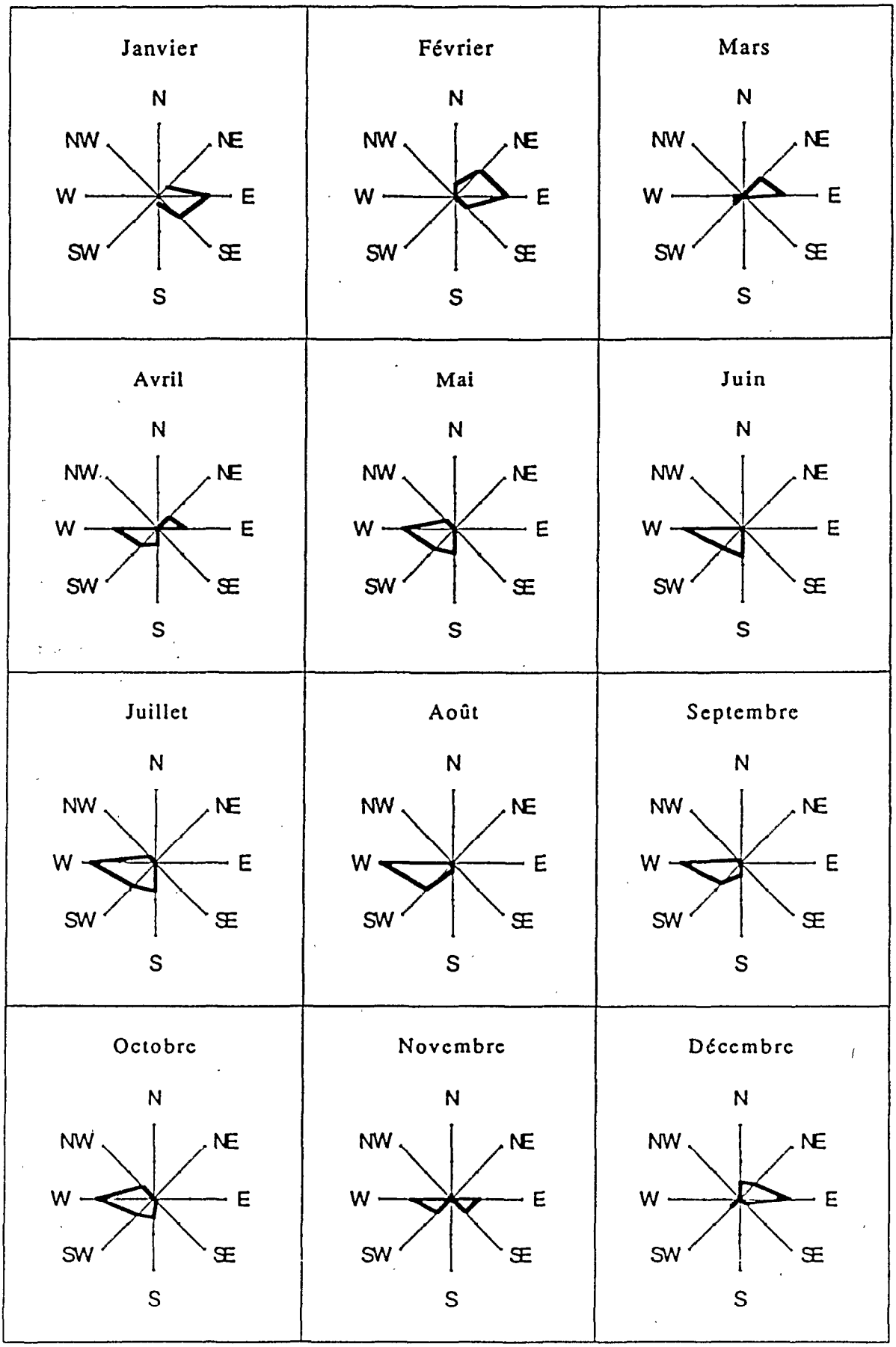


Figure 12 : Rose des vents à la station de Labé pour la période 1961-1990

Cette évolution de la direction des vents est aussi notée à Bamako en domaine sud-soudanien. A cette station, la prédominance des vents de secteur nord à est s'étale de novembre à avril.

Tableau 3 : Direction du vent dans les hauts bassins (période 1961-1990)

	Labé								Bamako							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Jan	-	10,4	41,6	25,4	6,6	-	-	3,3	16,6	20	46,6	-	-	-	-	-
Fév	9,6	30	44,1	13,6	-	-	-	-	20	33,3	50	-	-	-	-	-
Mars	3,3	20	33,3	3,3	-	10	6,6		10	30	53,3	6,6	-	-	-	-
Avr	-	13,3	23,3	-	13,3	20	36,6	-	-	20	43,3	14,4	6,6	-	-	-
Mai	-	-	-	-	20	23,3	43,9	9,6	-	-	33,3	-	20	11,6	13,3	-
Juin	-	-	-	-	23,3	23,3	50	-	-	-	-	6,6	26,6	33,3	40	-
Juil	-	-	-	-	13,3	26,6	53,3	6,6	-	-	-	-	16,6	36,6	43,3	3,3
Août	-	-	-	-	6,6	30	60	-	-	-	-	-	3,3	20	66,6	6,6
Sept	-	-	-	-	10	23,3	50	3,3	-	-	-	10	6,6	23,3	50	6,6
Oct	-	-	-	3,3	16,6	20	46,6	13,3	-	-	3,3	-	33,3	16,6	36,6	10
Nov	3,3	-	23,3	16,6	-	16,6	33,3	-	6,6	20	16,6	-	-	13,3	-	-
Déc	13,3	16,6	40,6	6,6	-	10	-	-	16,6	23,3	43,6	10	-	6,6	-	3,3

	Tambacounda								Kiffa							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Jan	10	26,6	43,3	-	-	-	-	-	12	52	36	-	-	-	-	4
Fév	10	20	30	-	-	-	-	-	-	60	36	-	-	-	-	4
Mars	16,6	36,6	3,3	-	-	-	-	-	4	64	20	-	-	-	-	4
Avr	16,6	16,6	-	-	3,3	3,3	33,3	13,3	-	72	16	-	-	-	-	-
Mai	-	-	-	-	-	23,3	66,6	3,3	8	12	-	-	-	20	60	4
Juin	-	-	-	-	3,3	26,6	53,3	3,3	-	-	-	-	4	44	52	-
Juil	-	-	-	3,3	6,6	16,6	50	3,3	-	4	-	-	12	40	36	8
Août	-	-	-	-	13,3	23,3	46,6	-	12	40	48	-	-	-	-	-
Sept	-	-	-	-	10	10	50	3,3	12	40	48	-	-	-	-	-
Oct	-	-	3,3	-	3,3	16,6	60	3,3		20	36	36	4	-	-	-
Nov	-	13,3	33,3	20	-	6,6	3,3	-		16	48	32	-	-	-	-
Déc	6,6	23,3	46,6	6,6	-	-	-	-	4	68	24	-	-	-	-	4

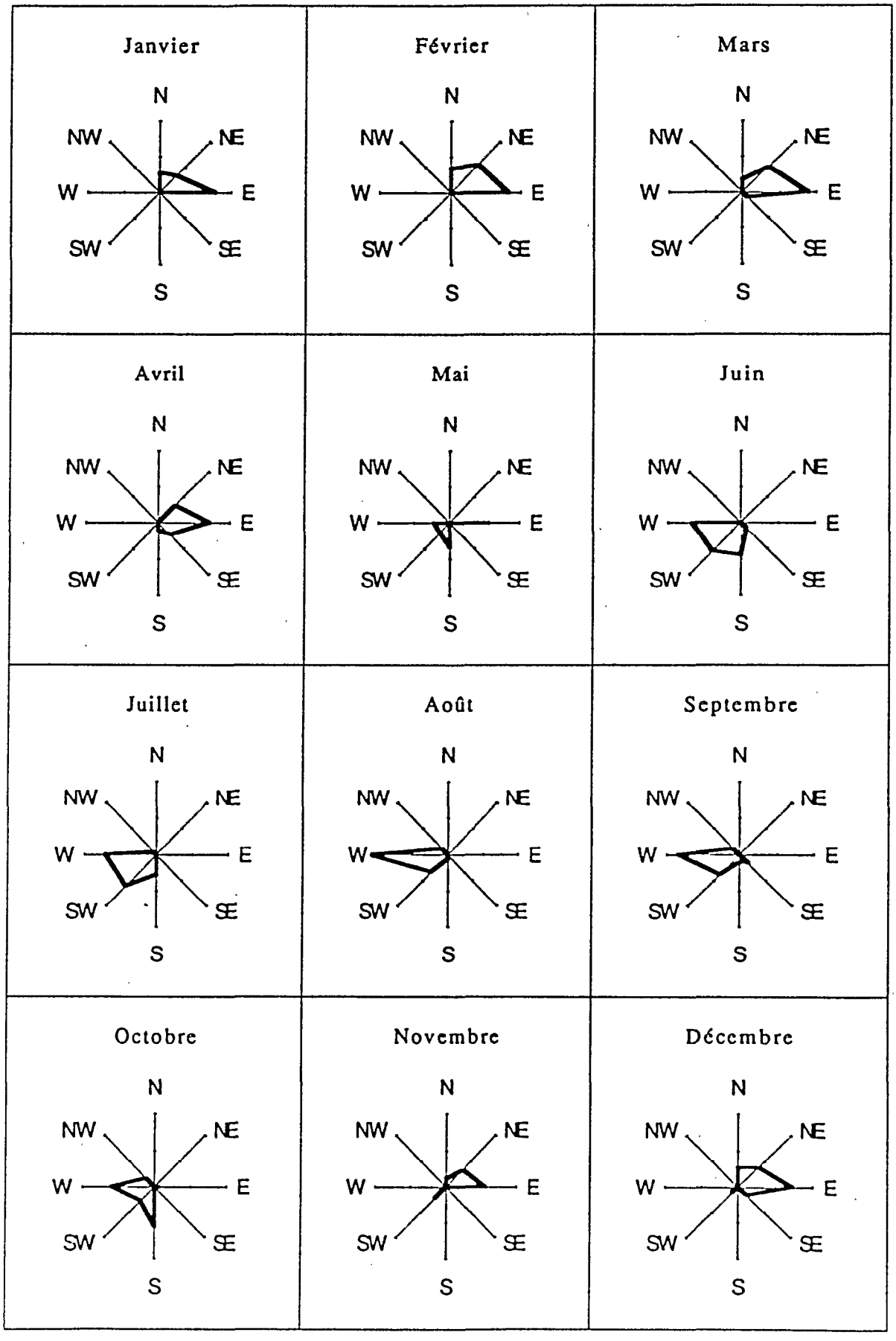


Figure 13 : Rose des vents à la station de Bamako pour la période 1961-1990

On note une nette prédominance des vents de secteur est qui enregistre les plus fortes fréquences. Celles-ci culminent au mois de mars avec 53,3 %. Le mois de mai est encore marqué par une fréquence importante des vents venant de ce secteur (33,3 %), qui cèdent ensuite la place aux vents liés à la mousson de juin à octobre. Les fréquences les plus élevées correspondent aux vents de secteurs sud-ouest et ouest.

Pour ce dernier secteur, les fréquences notées représentent respectivement 66,6 % et 50 % des fréquences du mois d'août et de septembre (fig. 13). Au mois d'octobre, le reflux de la mousson vers le sud des hauts bassins consacre les dernières fréquences importantes des vents qui lui sont liés (33 % pour les vents de secteur sud). Les mois de novembre et décembre sont déjà sous l'influence des vents d'alizés. Les fréquences les plus notables sont respectivement de 20 % pour ceux de secteur nord en novembre et 43,6 % des vents de secteur est en décembre.

En domaine nord-soudanien, la station de Tambacounda est soumise aux vents issus du flux d'alizé de novembre à avril (fig. 14). La fréquence la plus élevée revient aux vents de secteur est (43,3 %) en février. Cependant, on enregistre à cette station de forte fréquence des vents de secteur nord et nord-est notamment au mois de mars et d'avril. Leurs fréquences sont de 16,6 % en mars-avril pour ceux du secteur nord et respectivement de 36,6 % et 16,6 % en mars et en avril pour le secteur nord-est et nord (tab. 3).

A partir de ce mois, l'influence des vents de secteurs sud à sud-ouest se fait sentir. Les vents à dominante ouest atteignent déjà une fréquence de 33,3 %. Ils se renforcent pour les mois suivants où leur fréquence culmine dès le mois de mai avec 66,6 %. Le reste de la saison pluvieuse est une alternance entre les vents de secteurs sud-ouest et ouest jusqu'en octobre. La fin de ce mois marque une brutale inversion de la circulation qui voit de nouveau dominer les vents issus du flux d'alizé. Les fréquences des vents de secteur nord-est et est sont respectivement de 13,3 et 33,3 % en novembre. Elles atteignent 23,3 et 46,6 % en décembre.

A Kiffa, station caractéristique du domaine sahélien, les vents liés aux circulations d'alizé sont beaucoup plus fréquents que nulle part ailleurs dans les hauts bassins (fig. 15). A l'exception du mois de juin, les vents de secteur nord-est sont ainsi présents durant toute l'année. En effet, Kiffa, à la lisière du domaine saharien, est frappé de plein fouet par l'harmattan issu de l'agglutination saharienne. Ce vent à dominante nord-est enregistre des fréquences supérieures à 50 % de décembre à avril. Ce mois enregistre d'ailleurs la fréquence optimale avec 72 %. L'importance de cette fréquence est imputable à la vigueur des tempêtes de sable assez régulières durant ce mois.

Les autres vents notés au cours de cette période sont surtout de secteur est. Leur fréquence, plus faible que celle des vents déjà cités pendant la saison sèche, se renforce durant la saison des pluies. A cette période, ils enregistrent les plus fortes fréquences avec respectivement 48 % en août-septembre et 36 % en octobre. Ces fréquences élevées sont liées aux vents qui accompagnent les lignes de grains, principales sources des pluies en domaine sahélien. Les vents liés au flux de mousson sont assez réduits et n'enregistrent de fréquences significatives qu'entre mai et juillet.

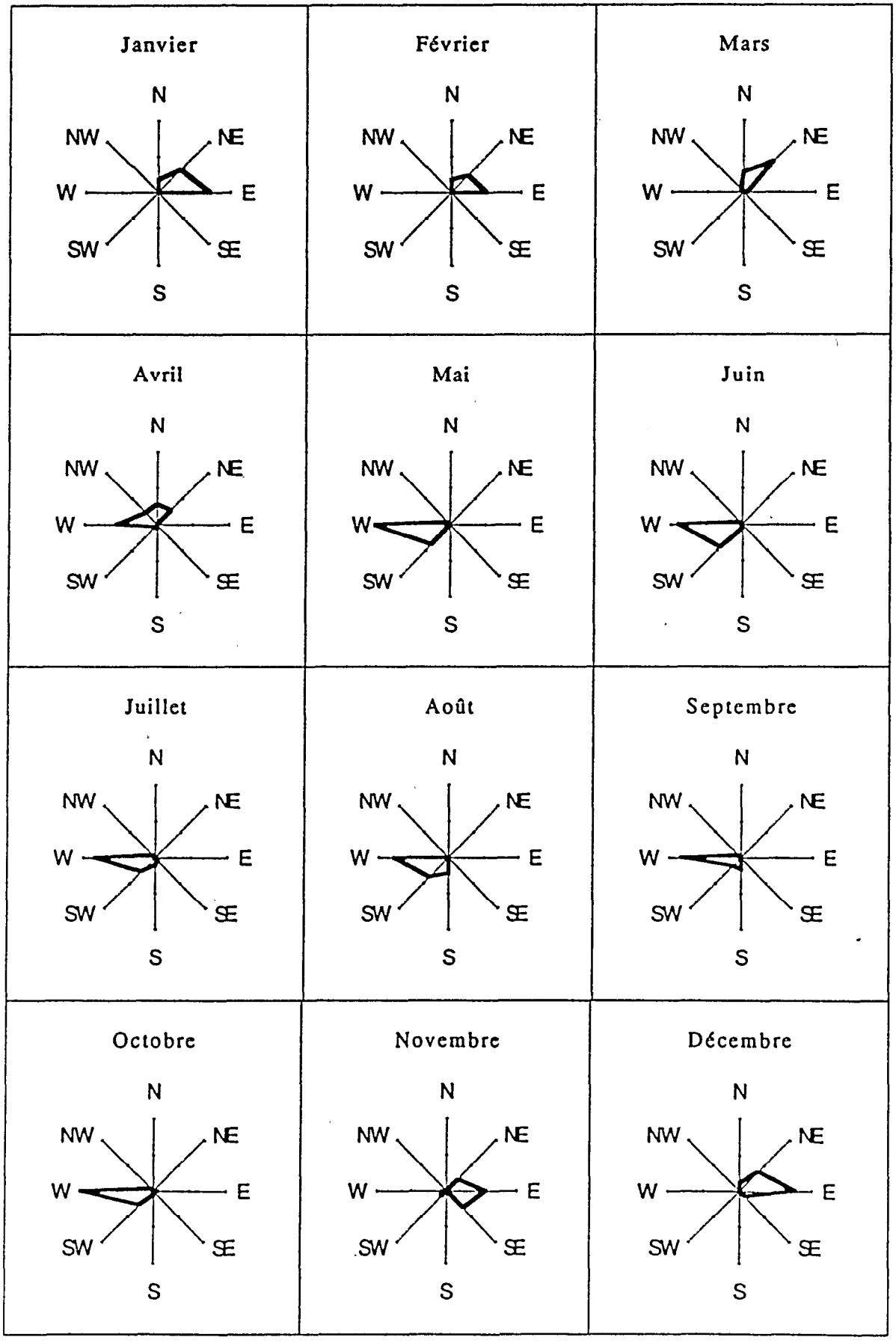


Figure 14 : Rose des vents à la station de Tambacounda pour la période 1961-1990

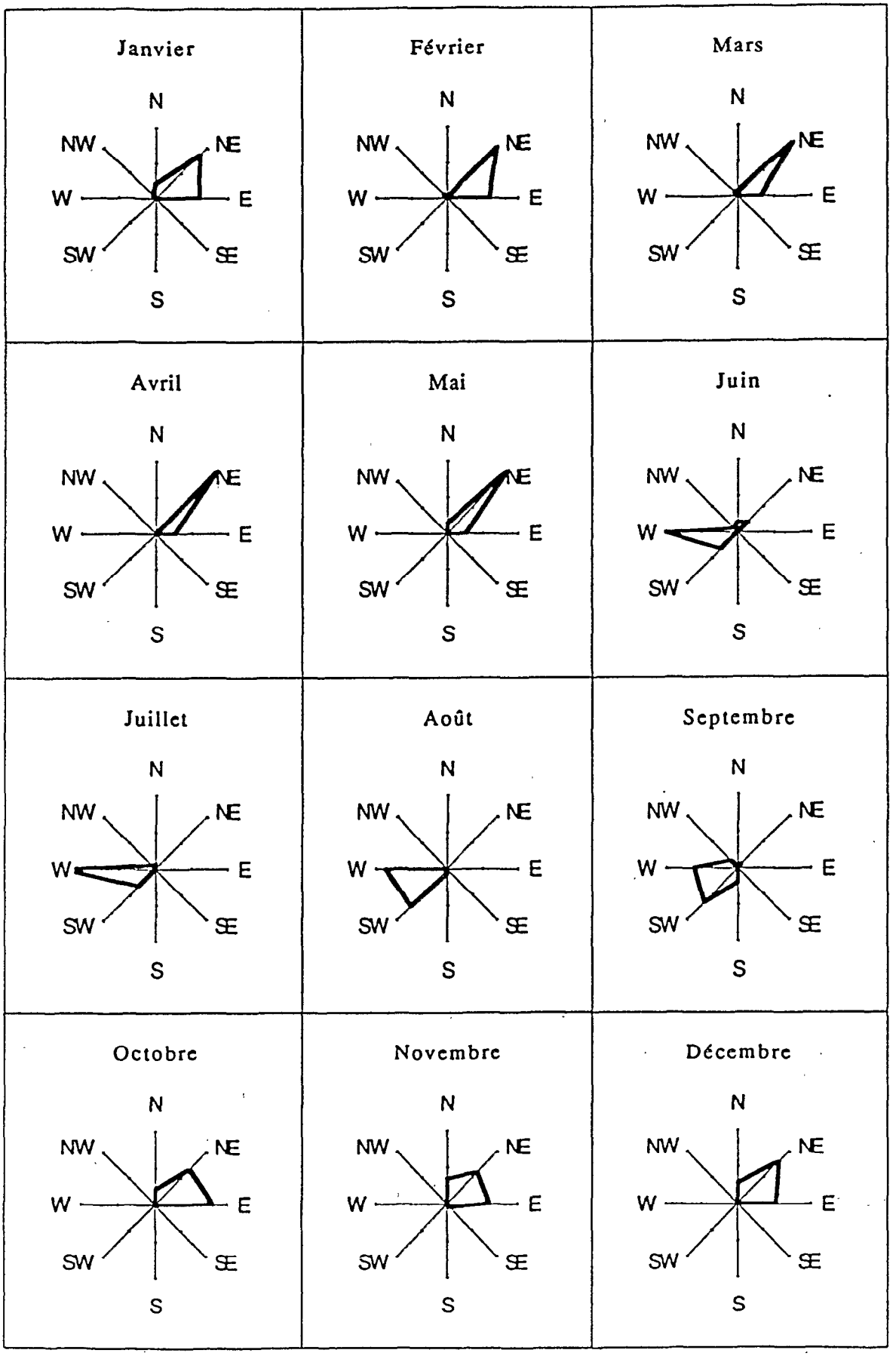


Figure 15 : Rose des vents à la station de Kiffa pour la période 1961-1990

A ce moment où ils dominent la circulation, on note des fréquences de 60 % en mai pour le secteur ouest et 44 % pour les vents de secteur sud-ouest en juin. Mais cette prédominance est très brève puisque dès juillet, la fréquence de ces vents est déjà inférieure à 50 %. Ce mois consacre en même temps leur disparition au profit des vents d'est.

2.1.2. Les variations saisonnières de la vitesse du vent

L'évolution de la vitesse du vent pour la période 1961-1990 montre une fluctuation à travers les différents mois de l'année (tab. 4). Ces variations sont fonction de l'évolution saisonnière et de la migration du sud au nord de l'Equateur Météorologique. De façon générale, la vitesse du vent dans les hauts bassins est beaucoup plus élevée durant la saison sèche. Elle s'affaiblit pendant la saison des pluies où l'on enregistre les minima.

Tableau 4 : Variation mensuelle de la vitesse du vent dans les hauts bassins

	Labé	Bamako	Kénieba	Tambacounda	Kayes	Nioro du Sahel	Kiffa
Janvier	2	2,35	1,86	2,52	1,65	2,85	3,25
Février	3	2,48	2,02	2,40	1,80	3,08	3,18
Mars	2,4	2,60	1,72	2,35	1,99	3,44	3,32
Avril	2,6	2,5	1,49	2,26	2,16	3,54	3,68
Mai	2,7	2,56	1,37	2,66	2,71	4,15	3,45
Juin	2,4	2,42	1,06	2,72	3,23	4,41	3,61
Juillet	1,7	2,14	0,84	2,09	2,77	3,68	4,15
Août	2,05	1,84	0,67	1,77	2,03	2,78	3,40
Septembre	1,36	1,62	0,76	1,39	1,51	2,73	2,51
Octobre	1,29	1,54	0,76	1,30	1,41	2,08	2,81
Novembre	1,14	1,85	0,63	1,33	1,18	2,36	2,78
Décembre	1,4	2,19	1,15	2,06	1,46	2,75	2,91
Année	2	2,17	1,20	2,07	2	3,15	3,25

Ainsi, la station de Labé en domaine guinéen enregistre la vitesse du vent la plus forte au mois de février (3 m/s). Ceci est normal du fait que ce mois correspond au cœur de la saison sèche en domaine guinéen. Le minimum est noté au mois d'août avec 0,63 m/s. Cependant, du fait de l'altitude, cette station connaît des coups de vents forts qui expliquent parfois les valeurs de certains mois (avril notamment).

La vitesse maximale mensuelle notée en domaine sud-soudanien est tardive par rapport au domaine guinéen. Elle intervient au mois de mars à Bamako (2,60 m/s), mais est précoce à

Kénieba (2,02 m/s) en février. La vitesse minimale intervient en juillet à Bamako (2,14 m/s) et en août à Kénieba (0,67 m/s).

En domaine nord-soudanien, les stations de Tambacounda et de Kayes enregistrent leur vitesse maximale au mois de juin avec respectivement 2,72 et 3,23 m/s. Ces valeurs maximales du mois de juin découlent des coups de vents forts qui accompagnent les foyers pluvio-orageux liés aux lignes de grains. La vitesse du vent faiblit à partir de ce mois mais le minimum est plus dispersé. Il est noté à Tambacounda en octobre avec 1,30 m/s alors qu'il est tardif à Kayes et survient à novembre avec 1,18 m/s.

En domaine sahélien, les stations de Nioro du Sahel et de Kiffa enregistrent leur valeur maximale respectivement aux mois de juin et de juillet. Celle-ci est respectivement de 4,41 m/s à Nioro du Sahel et 4,15 m/s à Kiffa. La vitesse minimale est notée en octobre à Nioro du Sahel avec 2,08 m/s. Elle est précoce à Kiffa avec 2,51 m/s au mois de septembre.

Les variations saisonnières de la vitesse du vent dépendent donc des flux en surface qui animent les saisons climatiques des hauts bassins. Ce sont ces flux qui déterminent les différents secteurs de vents notés. Ainsi, l'arrivée de la mousson dans les hauts bassins marque une domination des vents de direction sud-ouest et ouest. Ceux-ci sont plus fréquents dans les régions méridionales où la saison pluvieuse est beaucoup plus étendue. Au cœur de la saison des pluies, la régularité de la mousson explique les minima de vitesse enregistrés. Avec le reflux de la mousson, la circulation d'alizé se rétablit avec une composante des vents de secteurs nord-est et est. Ces vents atteignent leurs fréquences maximales au milieu de la saison sèche.

2.2. Les flux de surface

La circulation dans le domaine tropical s'effectue des hautes pressions tropicales vers les basses pressions intertropicales. En surface, les hautes pressions tropicales s'individualisent en agglutinations anticycloniques (Acores, Sainte-Hélène, agglutination saharienne).

La trace au sol des basses pressions tropicales peut se décaler énormément par rapport à l'Equateur géographique, ce qui oblige le flux qui le traverse à changer de direction pour devenir la mousson. Les flux qui animent en surface la circulation tropicale proviennent des agglutinations anticycloniques. Il s'agit essentiellement pour l'Afrique occidentale des alizés et de la mousson.

2.2.1. Les alizés : Alm et Alc

L'alizé est, par définition, un flux qui reste dans l'hémisphère géographique qui l'a vu naître. Il est caractérisé par une inversion de température due à la superposition d'une couche d'air d'origine polaire dans les basses couches et d'une autre couche tropicale qui la surmonte. L'importance de l'inversion est fonction du réchauffement de l'air polaire et de la puissance de la subsidence qui déterminent la stabilité ou l'instabilité du flux. Sa vitesse dépend de la puissance

des agglutinations anticycloniques et des saisons. Elle est généralement plus rapide en hiver qu'en été du fait de l'importance des échanges méridiens durant cette période.

Les circulations d'alizé sont très diverses et constituent une mosaïque de circulations. M. Leroux, (1974), distingue ainsi l'alizé de type 1 dit stable sur la façade orientale de l'agglutination, et l'alizé de type 2 instable qui s'écoule sur la façade occidentale de l'agglutination. Suivant le parcours de l'alizé et les nouveaux caractères qu'il acquiert, on distingue :

- L'alizé maritime (Alm), qui provient directement de l'agglutination des Acores. Il s'écoule sur la face orientale de son agglutination génératrice et, sur son parcours océanique, il hérite de nouveaux caractères. Il se réchauffe progressivement et sa tendance à l'instabilité s'accroît lentement. L'alizé maritime est un alizé stable (type 1) de direction nord et concerne toute la côte de l'Afrique septentrionale depuis le sud marocain jusqu'au-delà de Dakar en janvier, tout en englobant l'archipel du Cap-Vert. Il est responsable d'un type de temps frais et humide pendant la période hivernale. Quand l'alizé maritime pénètre sur le continent, il devient un flux sec de direction nord à nord-est. On parle alors d'alizé maritime continentalisé (Almc).
- L'alizé continental (*Harmattan*) est la branche la plus méridionale du flux issu de l'agglutination "saharo-méditerranéenne". Il s'écoule sur la face méridionale de sa cellule d'origine et balaie l'est et le sud de l'Afrique du Nord. Son air polaire initial se tropicalise et il acquiert rapidement de nouveaux caractères. Il est alors instable, avec une inversion élevée, un écart thermique faible, voire nul et une faible subsidence.

Son survol de la partie la plus sèche et chaude de l'Afrique septentrionale (désert du Sahara) lui ôte ses caractères d'origine. Il devient chaud et sec avec une direction nord-est à est. Il entretient sur son passage de forts taux d'évaporation et des températures élevées.

2.2.2. La mousson

La mousson est définie comme un flux qui s'intègre à la circulation d'un autre hémisphère géographique après avoir quitté son hémisphère d'origine. Dans l'hémisphère nord et dans le cadre de l'Afrique de l'Ouest, la mousson prend alors une direction sud-ouest après sa traversée de l'équateur. L'importance de la mousson, les caractères hygro-thermiques qu'elle revêt, lui ont valu le qualificatif de vecteur de pluie.

Toutefois, la mousson n'est que le prolongement d'un alizé qui, en traversant l'Equateur géographique subit une déviation de sa trajectoire à cause de la force de Coriolis. Cette situation est liée à la différence de pression de part et d'autre de l'équateur. Sur le continent, la mousson est un flux généralement peu épais (2 000 m) qui se réchauffe, se dessèche en fin de parcours et devient inapte à provoquer des pluies.

La rencontre des différents flux (alizé et mousson) à caractères proches mais différents se traduit par la formation de discontinuités. Ainsi, cette opposition se matérialise par l'existence d'une discontinuité qui est l'Equateur Météorologique.

2.3. Les discontinuités

Les discontinuités représentent la limite entre des flux ayant une origine et des caractères différents. Elles marquent ainsi une rupture de circulation (M. Leroux, 1974, 1980 ; P. Sagna, 1988). Suivant la diversité des flux, on note l'existence de plusieurs discontinuités en Afrique de l'Ouest : ce sont l'inversion d'alizé (I.Al), la Discontinuité d'alizé (D.Al) et l'Equateur Météorologique que nous étudions.

2.3.1. L'Equateur Météorologique

C'est une discontinuité planétaire qui sépare les vents qui proviennent de deux hémisphères météorologiques. L'Equateur Météorologique (EM) constitue la discontinuité la plus importante en Afrique occidentale puisqu'il est le siège des précipitations les plus abondantes.

Au-dessus de l'Afrique, l'Equateur Météorologique possède une double structure du fait de l'intervention du facteur thermique : la structure EMI (Equateur Météorologique Incliné) se rencontre dans les basses couches alors qu'on retrouve la structure EMV (Equateur Météorologique Vertical) dans les couches moyennes. Ces deux structures ont des dispositions pluviogènes différentes.

La structure EMI, parce qu'elle résulte du comportement thermique du substratum, est très sensible aux conditions de surface. Elle connaît une migration de sa trace au sol et représente la limite entre les alizés boréaux et la mousson. La structure EMI est stérilisante et peu pluvieuse à cause de l'alizé continental qui surmonte la mousson, du cisaillement des vents et des contrastes hygrométriques entre le flux d'harmattan chaud et sec et la mousson chaude et humide. Lorsqu'un facteur allogène pénètre dans la structure EMI, la stérilisation s'annihile momentanément pour provoquer des pluies. Ce sont les lignes de grains, issues des pulsations d'alizé. L'origine de ce facteur allogène est souvent attribuée aux noyaux de vent d'est, au JEA (Jet d'Est Africain) ou au JET (Jet d'Est Tropical), sans qu'on parvienne réellement à désigner l'élément fondamental.

La structure EMV, elle, se déplace lentement au cours de l'année parce qu'elle est plus réduite en latitude. Elle est quasi indépendante des conditions de surface, sa position et sa migration relèvent de la dynamique de la circulation générale. Ainsi, en été boréal, elle atteint 10-12° N. Les précipitations liées à l'Equateur Météorologique Vertical sont continues et abondantes (fig. 13). Le déplacement de l'Equateur Météorologique ainsi que la circulation qui lui est associée sont sujets à des variations saisonnières et ponctuelles.

Les variations saisonnières sont fonction de l'alternance des saisons (hiver et été) et expliquent la migration annuelle de l'Equateur Météorologique. Cette migration et la circulation qu'elle entraîne se déroulent en quatre phases (fig. 16) :

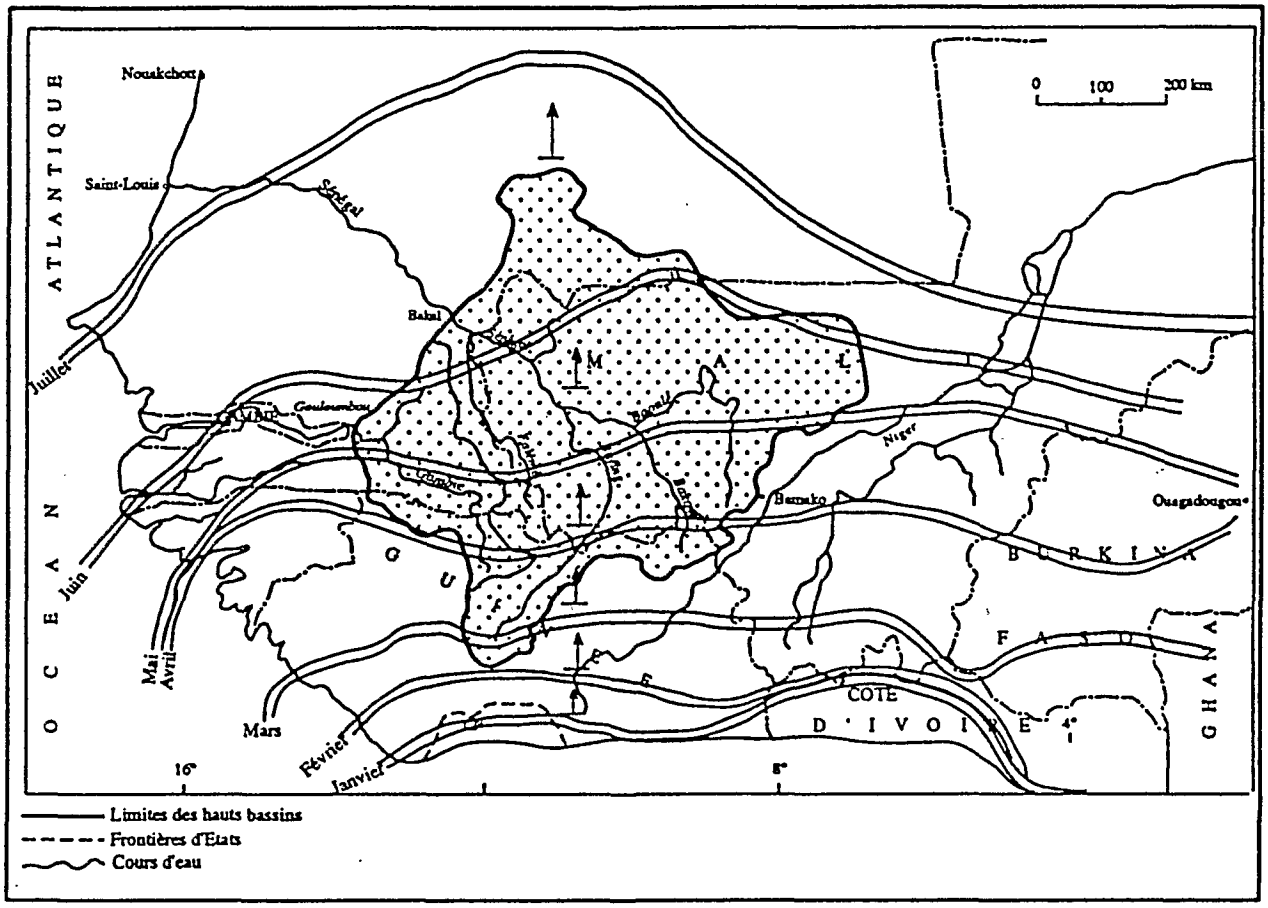


Figure 16 : Migration de la trace au sol de l'Equateur Météorologique en Afrique occidentale (M. Leroux, 1981).

- La première phase est notée au coeur de l'hiver et est centrée sur janvier. L'Equateur Météorologique se cantonne durant cette période dans sa position la plus méridionale.
- La deuxième phase se termine en juillet, au terme d'une lente et progressive remontée de l'Equateur Météorologique qui se décale très au nord.
- La troisième phase survient en juillet-août-septembre, période durant laquelle l'Equateur Météorologique atteint sa position la plus septentrionale.
- La quatrième phase débute dès septembre par un retrait rapide de l'Equateur Météorologique qui s'achève en janvier.

Les variations ponctuelles sont liées au dynamisme des agglutinations anticycloniques et affectent la structure inclinée de l'Equateur Météorologique. Elles déterminent le type de circulation (P. Sagna, 1988).

Ainsi en surface, sous l'effet du renforcement de l'agglutination des Açores, l'Equateur Météorologique peut reculer sur la façade ouest du continent. L'alizé maritime qui se trouve accru repousse alors la trace au sol de l'Equateur Météorologique sur une position plus méridionale. Cette situation survient aussi quand "l'agglutination saharienne" développe un flux d'alizé (continental) plus puissant que la mousson. Lorsque le flux de mousson du fait du renforcement de l'agglutination de Sainte-Hélène repousse les flux boréaux plus au nord, la situation précédente s'inverse et la trace au sol de l'Equateur Météorologique migre vers le nord. Mais quelle que soit la situation qui prévaut, ces variations ponctuelles de l'Equateur Météorologique dépendent de l'état (puissant ou affaibli) des agglutinations anticycloniques et des influences variables des deux hémisphères.

3. LES NOYAUX DE VENTS D'EST

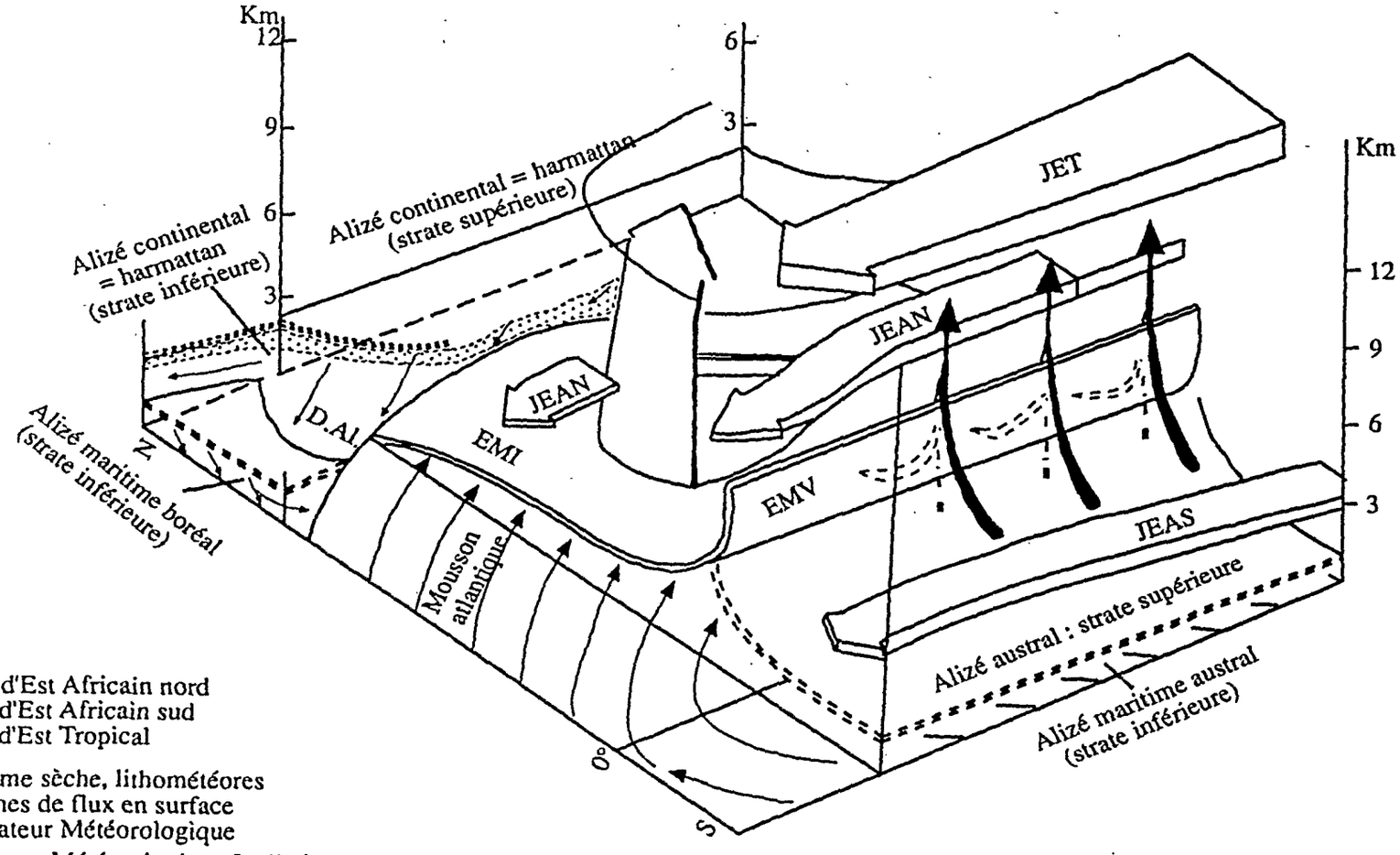
Dans la troposphère tropicale africaine, se rencontrent trois noyaux de vents d'est. Deux de ces noyaux s'individualisent dans les couches moyennes de part et d'autre de l'Equateur Météorologique :

Ce sont les Jets d'Est Africains (Jet d'Est Africain Nord et Jet d'Est Africain Sud).

Le troisième noyau de vent fort est constitué par le Jet d'Est tropical (JET). Il se rencontre dans la haute troposphère au-dessus de la structure verticale de l'Equateur Météorologique.

3.1. Le Jet d'EST Africain Nord (JEAN)

Le Jet d'Est Africain Nord (JEAN), comme son nom l'indique, se retrouve sur l'Afrique occidentale entre 3000 et 4000 m. Sa vitesse n'est pas constante. Elle se renforce grâce aux apports énergétiques de la mousson et aux gradients horizontaux de températures qui accélèrent la circulation.



JEAN Jet d'Est Africain nord
JEAS Jet d'Est Africain sud
JET Jet d'Est Tropical

Brume sèche, lithométéores
Lignes de flux en surface
Equateur Météorologique
EMI Equateur Météorologique Incliné
EMV Equateur Météorologique Vertical
D.Al. Discontinuité d'Alizés
Inversion de l'alizé maritime
Inversion de l'harmattan
Inversion de l'alizé austral

Figure 17 : Structure de la troposphère et composantes de la pluviogenèse sur l'Afrique occidentale et centrale (d'après M. Leroux, 1992)

Le JEAN est un noyau de vent fort qui suit la variation saisonnière des agglutinations anticycloniques et de l'Equateur Météorologique Incliné (EMI) Cette variation se réalise en quatre phases :

Une période de remontée lente qui survient de mars à juin et une autre qui marque un retrait rapide en octobre-novembre. Ces deux phases sont séparées par deux périodes de stagnation. La première concerne sa partie sud et se déroule de décembre à février, tandis que la seconde est notée de juillet à septembre dans sa partie nord. Le JEAN atteint sa position la plus septentrionale en août et sa plus grande vitesse en septembre. Le JEAN apparaît ainsi comme le résultat de la combinaison de deux circulations et intègre de fait la dynamique des échanges méridiens.

3.2. Le Jet d'Est Tropical (JET)

Le Jet d'Est Tropical (JET) se retrouve dans la haute troposphère. Son existence est liée comme les jets précités (JEAN et JEAS) à la différence de gradient de température. Il connaît des translations annuelles en latitude. Sa vitesse est beaucoup plus forte que celle des jets précédents, surtout en été. Cette vitesse est fonction de la latitude, de la longitude et de sa variation d'altitude.

Le JET connaît une migration qui suit celle des agglutinations anticycloniques en altitude. Cette migration est faible avec une amplitude moyenne de 10° de latitude. En été le jet se subdivise en deux noyaux dont l'un se situe vers 5° nord à 200 hPa et l'autre vers 15° nord à 100 hPa (M. Leroux, 1980 ; P. Sagna, 1988).

Les conditions structurales de l'Afrique de l'Ouest sont ainsi intimement liées aux échanges méridiens. Elles se résument en trois facteurs que nous associons aux mécanismes de la troposphère tropicale (fig. 17) :

- Les agglutinations anticycloniques et les flux de surface qui en sont issus ;
- Les discontinuités dont l'Equateur Météorologique est la plus importante avec sa double structure, EMI (qui forme sa trace au sol) et EMV (dans les couches moyennes) ;
- Les noyaux de vents forts en altitude, représentés dans les couches moyennes par les jets (JEAN) au dessus de l'EMI, le JEAS qui surplombe l'inversion d'alizé, et le JET dans les couches supérieures en aplomb de l'EMV.

Cependant c'est surtout dans les basses couches que se matérialisent ces échanges grâce aux flux qui, par leurs caractères (thermique et hygrométrique) et leur opposition, déterminent les aptitudes pluviogènes en l'Afrique de l'Ouest.

4. LA PLUVIOGENESE EN AFRIQUE OCCIDENTALE

La circulation atmosphérique en Afrique septentrionale procède de mécanismes simples qui s'intègrent à la dynamique de la circulation générale. Les précipitations en Afrique occidentale sont liées à trois conditions principales (M. Leroux, 1994) :

- Le potentiel hygrométrique de la masse d'air (qui est en même temps un potentiel énergétique),
- L'intervention d'un facteur déclenchant l'ascendance,
- Une structure favorable à cette ascendance (absence de cisaillement et de subsidence).

L'intervention de ces conditions se fait simultanément et il ne peut exister de relation directe et/ou immédiate entre la pluie et un paramètre isolé quelconque. Les facteurs locaux additionnels étant souvent rares et très localisés, l'évolution des facteurs généraux se traduit par des variations saisonnières.

4.1. Les saisons de l'Afrique occidentale : cas des hauts bassins

Compris entre les latitudes 10°20' et 14°54' N et les longitudes 7°17' et 13°30' W (fig. 2), les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie obéissent aux conditions de la pluviogenèse tropicale. Les saisons répertoriées dans les hauts bassins dépendent des mécanismes de la circulation générale. Les manifestations de ces mécanismes et les situations qui en résultent nous permettent de distinguer deux saisons principales : la saison non pluvieuse et la saison pluvieuse.

4.1.1. La saison non pluvieuse

Elle survient en hiver boréal à la faveur du renforcement des agglutinations anticycloniques boréales, suite à la descente des AMP vers le sud. Un temps anticyclonique règne avec une forte circulation d'alizé. Les AMP en provenance de l'Arctique sont alors beaucoup plus puissants. Ils connaissent une variation de puissance et d'étendue perceptibles à toutes les échelles de temps, ce qui leur confère une position beaucoup plus étendue sur l'Afrique occidentale. Ils réalimentent constamment les agglutinations des "Açores" et "saharienne" qui sont au maximum de leur puissance. L'agglutination de Sainte-Hélène, du fait de l'été austral, se trouve fortement amoindrie et décalée vers le sud.

Sur la frange littorale, prédomine l'alizé maritime (Alm) et l'alizé maritime continentalisé (Almc). La discontinuité constituée par la rencontre de l'alizé maritime et/ou alizé maritime continentalisé avec l'harmattan (discontinuité d'alizé) annihile toute velléité de développement nuageux car seule la strate inférieure de l'Alm est humide. Cette humidité est déposée sous forme de rosée.

La période ne connaît donc pas de précipitations importantes. Les rares pluies enregistrées sont d'origine extratropicale. Ce sont les "pluies de mangues" ou "heug" qui surviennent en décembre-janvier-février (A. Seck, 1962 ; M. Leroux, 1970, 1986).

A l'intérieur, région qui intéresse les hauts bassins, souffle l'harmattan. Il s'agit d'un vent chaud et sec de direction nord-est. Ainsi les régions septentrionales des hauts bassins sont les plus affectées mais son influence diminue vers le sud. Au maximum de sa translation vers le sud en avril-mai, toute la région est soumise à une chaleur intense. A partir du mois de mai, se manifeste l'influence de la circulation australe.

4.1.2. La saison des pluies

En été, les agglutinations anticycloniques boréales se trouvent décalées vers le nord. L'Afrique occidentale est alors peu influencée par les circulations d'alizé. Du fait de l'hiver austral, l'agglutination de Sainte-Hélène est constamment renforcée par les AMP en provenance du pôle sud. Elle migre alors vers le nord, en repoussant l'Equateur Météorologique vers sa position la plus septentrionale.

Les précipitations des hauts bassins, comme dans le reste de l'Afrique septentrionale, sont essentiellement liées à l'Equateur Météorologique. Leur importance dépend des structures de l'Equateur Météorologique (EMI et EMV) et de leur migration (fig 16). La densité de la couverture nuageuse et la réduction de l'insolation qui affecte les températures ont valu à cette période le substantif "d'hivernage". Les principaux facteurs de la pluviogenèse tropicale sont prédominants. L'origine des précipitations et leur nature sont alors intimement liées à l'importance de chaque facteur et aux interactions qu'ils peuvent connaître en fonction du milieu.

Les pluies apportées par les lignes de grains se forment dans la structure EMI et n'intéressent qu'une faible partie des hauts bassins. Les pluies qui proviennent des lignes de grains représentent 80 % des précipitations enregistrées en Afrique sahélienne (J. G. Omotosho, 1985). Le processus de formation des lignes de grains et leur importance ont été étudiés par M. Leroux, (1980) et P. Sagna, (1988). Les lignes de grains résultent de la combinaison de plusieurs étapes, dont la dernière voit le flux d'est descendre jusqu'au sol, obligeant la mousson à s'élever. Il en résulte la formation de nuages à grand développement vertical (type cumulonimbus) et les précipitations qu'elles entraînent ont généralement une direction est à ouest. Elles sont orageuses, de forte intensité, de courte durée et sont très aléatoires.

Les lignes de grains peuvent parfois ne pas provoquer des pluies, car elles n'utilisent que le potentiel qu'elles trouvent sur place. Ainsi, avant sa pénétration dans le flux de mousson, les pulsations d'alizé peuvent être responsables des tempêtes de sables ou *haboob*. Cependant, c'est surtout en fonction de l'épaisseur du flux de mousson et de la migration de l'Equateur Météorologique que varie la saison des pluies. Les pluies liées à la structure EMI sont fonction de sa migration.

Les régions situées au sud des hauts bassins sont ainsi les premières intéressées par les pluies (fig 16). Au maximum de la translation de l'EMI vers le nord au mois d'août, l'ensemble des hauts bassins est soumis à des pluies importantes. Dès ce mois, l'EMI opère un retrait rapide vers le sud qui voit de nouveau les régions méridionales bénéficier en dernier lieu de ses pluies.

Cette situation rend très variable la durée de la saison pluvieuse qui diminue du sud au nord des hauts bassins. L'extrémité sud connaît en plus de fortes pluies, liées à l'influence directe de la migration de l'Equateur Météorologique Vertical. Ce sont des pluies abondantes, peu orageuses (fig. 11) et souvent supérieures à 200 mm par mois (M. Leroux, 1994). La saison des pluies y est plus étendue et la présence d'un relief élevé (Fouta Djalon) favorise d'importantes pluies orographiques.

L'existence de deux saisons, une non pluvieuse, conformément à la prédominance des alizés, et l'autre pluvieuse en relation avec la mousson s'explique par le dynamisme des échanges méridiens en milieu tropical. Cette alternance des saisons, dans l'espace et dans le temps, a une grande incidence sur le cycle végétatif et les activités humaines.

Au fur et à mesure que s'affirme la continentalité, en relation avec la prédominance de l'alizé ou de la mousson, des nuances climatiques se dégagent et permettent de subdiviser les hauts bassins en domaines climatiques.

4.2. Les domaines climatiques des hauts bassins

La subdivision des hauts bassins en domaines climatiques a été largement inspirée de la pluviométrie. Ainsi, à partir de la figure 18 tirée de celle des isohyètes de l'Afrique occidentale (CIEH, 1968 et A. A. Sow, 1984), on peut retenir certains critères de différenciation :

- Les précipitations, très variables sur l'ensemble du bassin, sont comprises entre 1900 mm sur le Fouta Djalon au sud et 400 mm sur la bordure septentrionale.
- La carte des isohyètes pour la période 1931-1993 montre un tracé parallèle sur la moitié du bassin. Dans la partie sud, les isohyètes se resserrent et ont une direction sud-est. Ces différents constats nous permettent de distinguer quatre nuances pluviométriques qui correspondent chacune à un domaine climatique (fig. 19).

Mais les précipitations à elles seules ne suffisent pas à expliquer une répartition climatique. D'autres critères, aussi importants que les tonalités thermiques et hygrométriques sont tout aussi essentiels. Il nous faut donc admettre avec M. Leroux (1980) que "s'il convient de connaître les causes, ce sont précisément les effets qui fondent la délimitation climatique, car traduisant l'aboutissement entre les différents facteurs....". Force est donc de faire appel à ces facteurs, de façon à invoquer dans une classification géographique les causes avant les effets. Nous empruntons à cet auteur la dénomination suivante pour la subdivision climatique des hauts bassins. On retient ainsi du sud au nord (fig. 20) :

4.2.1. Le domaine guinéen

Le domaine climatique guinéen est limité au Fouta Djalon et à ses contreforts septentrionaux. Les précipitations y sont supérieures à 1500 mm et la saison des pluies s'étend de mars à novembre.

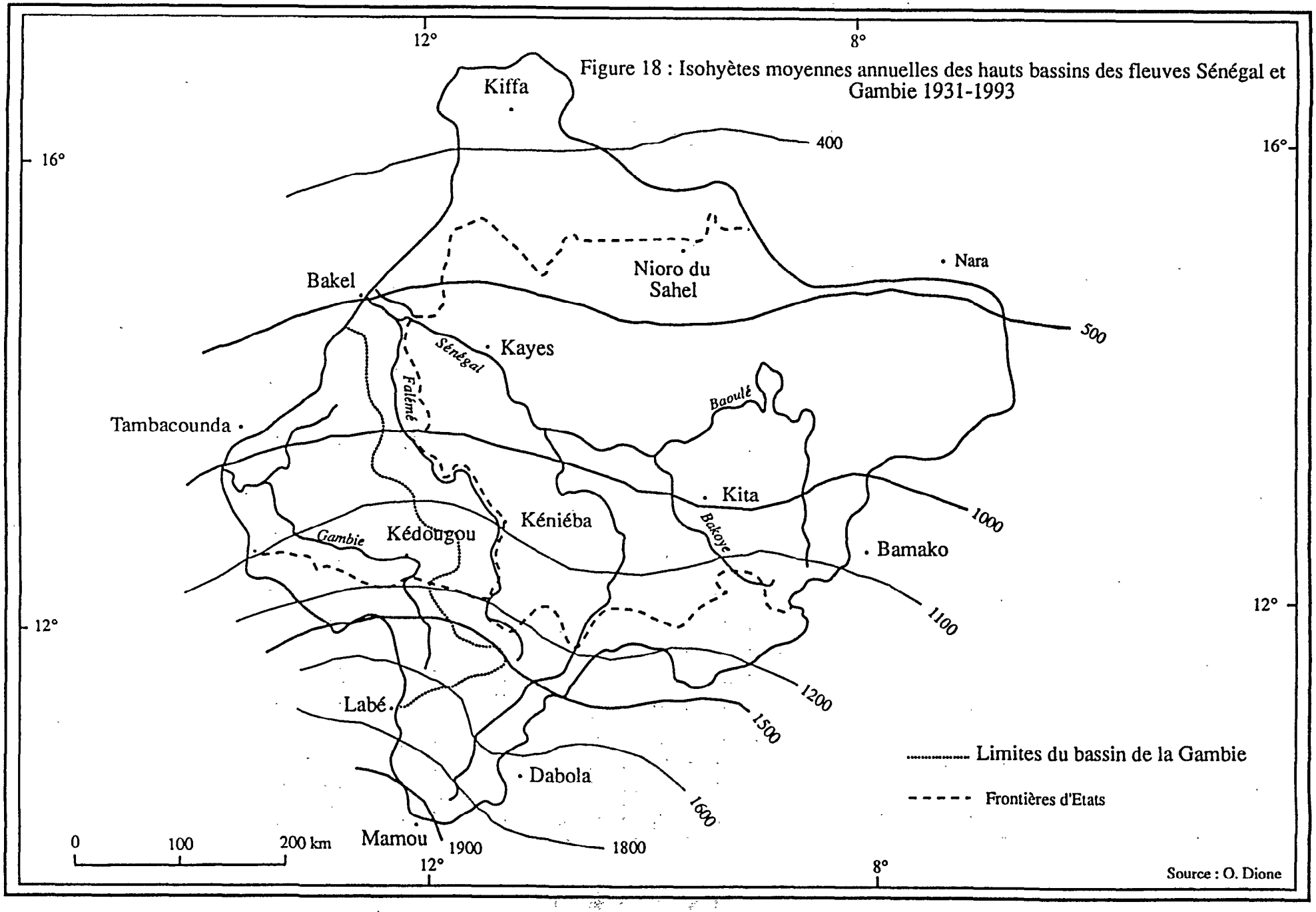


Figure 18 : Isohyètes moyennes annuelles des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie 1931-1993

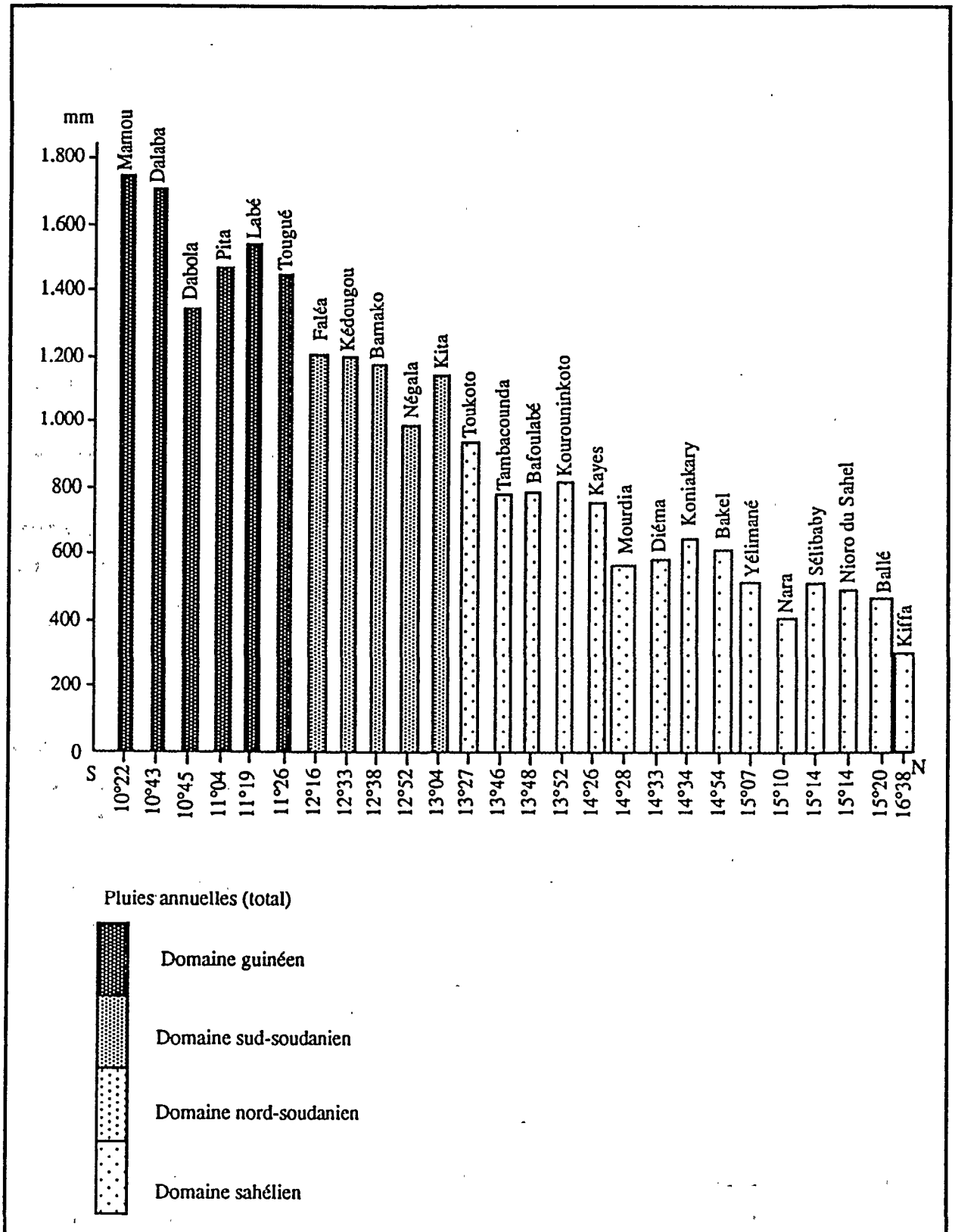


Figure 19 : Profil pluviométrique annuel des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

C'est dans ce domaine que naissent les principaux fleuves qui drainent les hauts bassins. Le fait caractéristique est l'importance du relief qui favorise des précipitations importantes. Pour la période 1931-1993 (fig. 20), le domaine guinéen est limité par les isohyètes 1500 et 1900 mm. Les températures y sont fraîches (22 à 25°C) et l'humidité relative annuelle est supérieure à 50%. Cette importance du relief dans la répartition des précipitations et la modération des températures ont amené certains auteurs par allusion au relief à dénommer ce domaine pluviométrique de "foutanien" (R. Molard, 1949 ; A. Seck, 1966 ; J. C. Olivry, 1983).

4.2.2. Le domaine sud-soudanien

Le domaine sud-soudanien constitue la nuance pluviométrique qui succède vers le nord au domaine guinéen. Il prend une partie des contreforts du Fouta Djalon et englobe tout le plateau Mandingue. Le relief ne présente pas d'incidence notable sur la distribution de la pluviométrie. La figure 20 traduit de ce fait une nette diminution des totaux de pluies au sortir du domaine guinéen. Les précipitations sont comprises entre 1500 et 1000 mm.

La saison des pluies est moins étendue par rapport au domaine guinéen, avec cependant une humidité relative supérieure à 50 %. L'effet thermique n'étant plus atténué par le relief, il est alors plus significatif. Les températures moyennes annuelles avoisinent 28°C.

4.2.3. Le domaine nord-soudanien

Le domaine nord-soudanien constitue un milieu de transition entre les nuances climatiques humides guinéenne et sud-soudanienne et celles franchement plus sèches au nord des hauts bassins. Les critères climatiques précédemment cités connaissent soit une baisse (pluie et humidité relative) soit une hausse (température).

Le domaine nord-soudanien forme une bande zonale de Kita à Bakel et large de plus de 250 km. La saison des pluies, assez concentrée dans le temps, est plus réduite qu'au sud. Elle ne dure que 4 à 6 mois avec des totaux compris entre 500 et 1000 mm. La tonalité hygrométrique peut être inférieure à 50 % alors que les températures moyennes annuelles sont souvent supérieures à 28° C.

4.2.4. Le domaine sahélien

Le domaine sahélien se définit par sa position en marge du Sahara et il est soumis à des conditions climatiques d'une grande sévérité. Il est peu étendu dans les hauts bassins puisqu'il n'occupe que les marges septentrionales. La saison des pluies ne dépasse pas 3 mois. Les précipitations, très variables et espacées dans le temps, sont inférieures à 500 mm. C'est un domaine climatique soumis à la forte influence de l'harmattan.

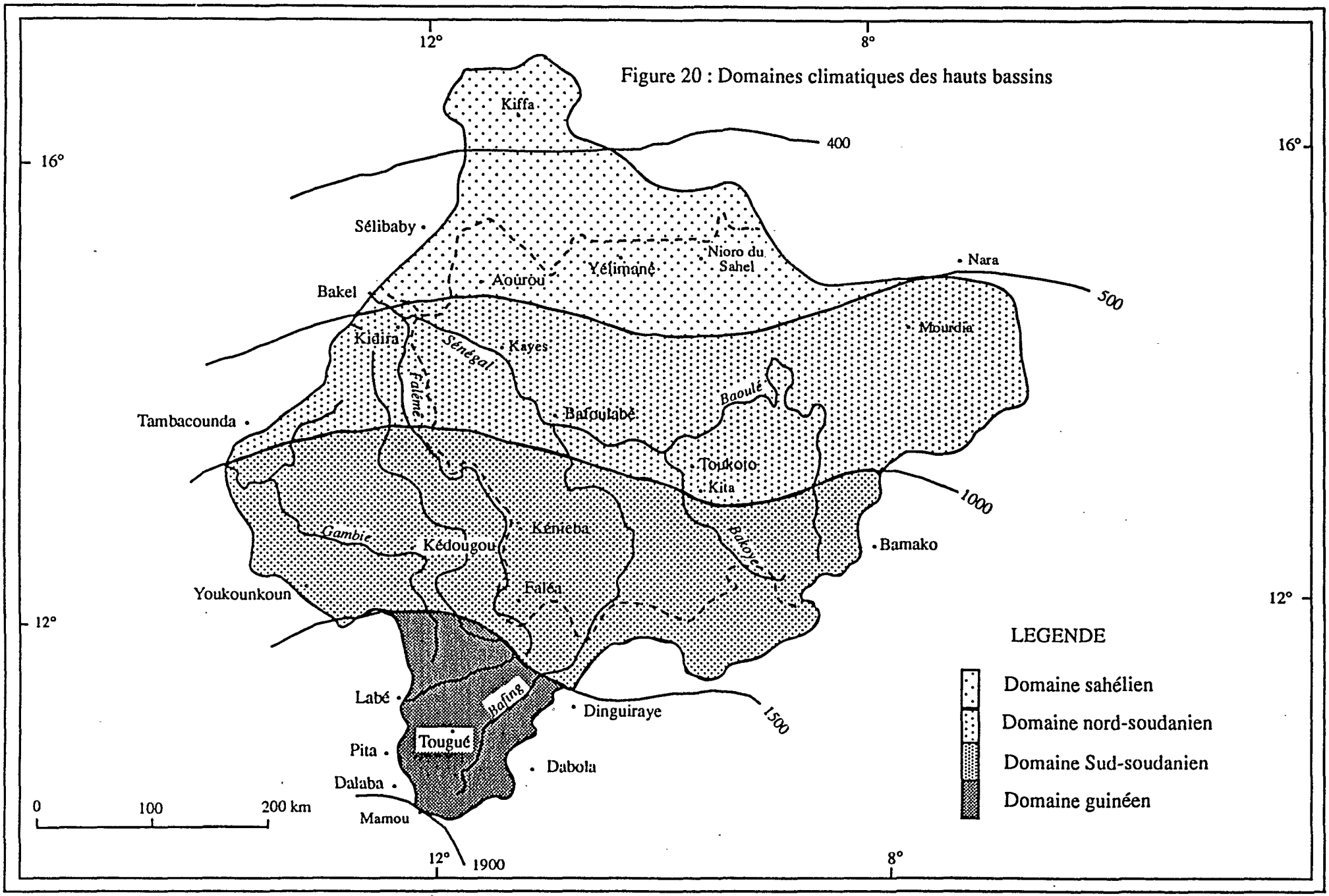


Figure 20 : Domaines climatiques des hauts bassins

L'humidité relative atteint à peine 40 %, tandis que les températures dépassent facilement 30° C. Les amplitudes diurnes sont souvent élevées.

Ce sont donc les mécanismes de la circulation générale qui fondent la dynamique de la circulation atmosphérique de l'Afrique occidentale. En altitude, ces mécanismes sont représentés par les noyaux de vents forts tandis qu'en surface, ils s'identifient aux agglutinations anticycloniques et aux flux de surface qui en sont issus. La prédominance de ces flux, les caractères qu'ils revêtent et leur opposition déterminent les saisons climatiques.

Dans les hauts bassins, l'importance de ces variations saisonnières s'apprécie surtout au regard de la pluviométrie. Son origine, les manifestations qu'elle revêt à l'échelle spatiale et son importance dans le temps se traduisent par l'existence de plusieurs domaines climatiques. Ce sont ces pluies qui fondent en premier lieu la subdivision climatique que nous étudions.

CHAPITRE 2

LES REGIMES PLUVIOMETRIQUES DES HAUTS BASSINS

La répartition de la pluviométrie dans les hauts bassins est caractérisée par l'alternance des saisons qui dépendent des mécanismes climatiques. Suivant la durée de la saison pluvieuse, les hauts bassins connaissent une inégalité dans la répartition mensuelle des pluies reçues.

Cette inégalité dans la répartition des pluies est aussi spatiale et imprime du sud au nord des hauts bassins des modifications dans la quantité de pluies reçues.

Les régimes pluviométriques qui en résultent sont eux aussi soumis aux mêmes nuances.

1. LES DONNEES PLUVIOMETRIQUES

Les données pluviométriques des hauts bassins connaissent des lacunes et une hétérogénéité qui nécessitent leur critique statistique pour établir leur fiabilité. Nous présentons trois modèles statistiques à partir desquels les données des hauts bassins ont été vérifiées et corrigées.

1.1. L'homogénéisation des données

Les données pluviométriques contiennent souvent des erreurs qui proviennent des observations recueillies ou du changement de site ou d'appareil de mesure. L'homogénéisation des données part d'une comparaison entre des stations d'un même domaine climatique en utilisant la méthode de double cumul ou "double masse".

Il s'agit en pratique de vérifier à partir d'une station de référence A, les données non homogènes d'une station B. Le cumul des données des stations A et B est ensuite porté sur un graphique, respectivement en abscisses pour la station de référence et en ordonnées pour celle à vérifier.

Le graphique ainsi obtenu traduit deux résultats :

- Si les points s'alignent de façon linéaire le long d'une droite joignant le premier et le dernier point, on en conclut que les données sont homogènes.
- En revanche des cassures peuvent apparaître dans la distribution des points. Les données sont alors non homogènes pour les raisons ci-dessus indiquées. On corrige alors les données en déterminant le rapport de pentes des tangentes $\propto$ et $\propto'$ de la droite ainsi tracée. La valeur de ce rapport, considérée comme coefficient correctif est ensuite multipliée par les valeurs considérées comme erronées en commençant par l'année où la ou les cassures est/sont observée (s) (fig. 21). L'homogénéité des stations retenues dans notre étude a été vérifiée à partir des stations de base et atteste une bonne fiabilité des données à analyser.

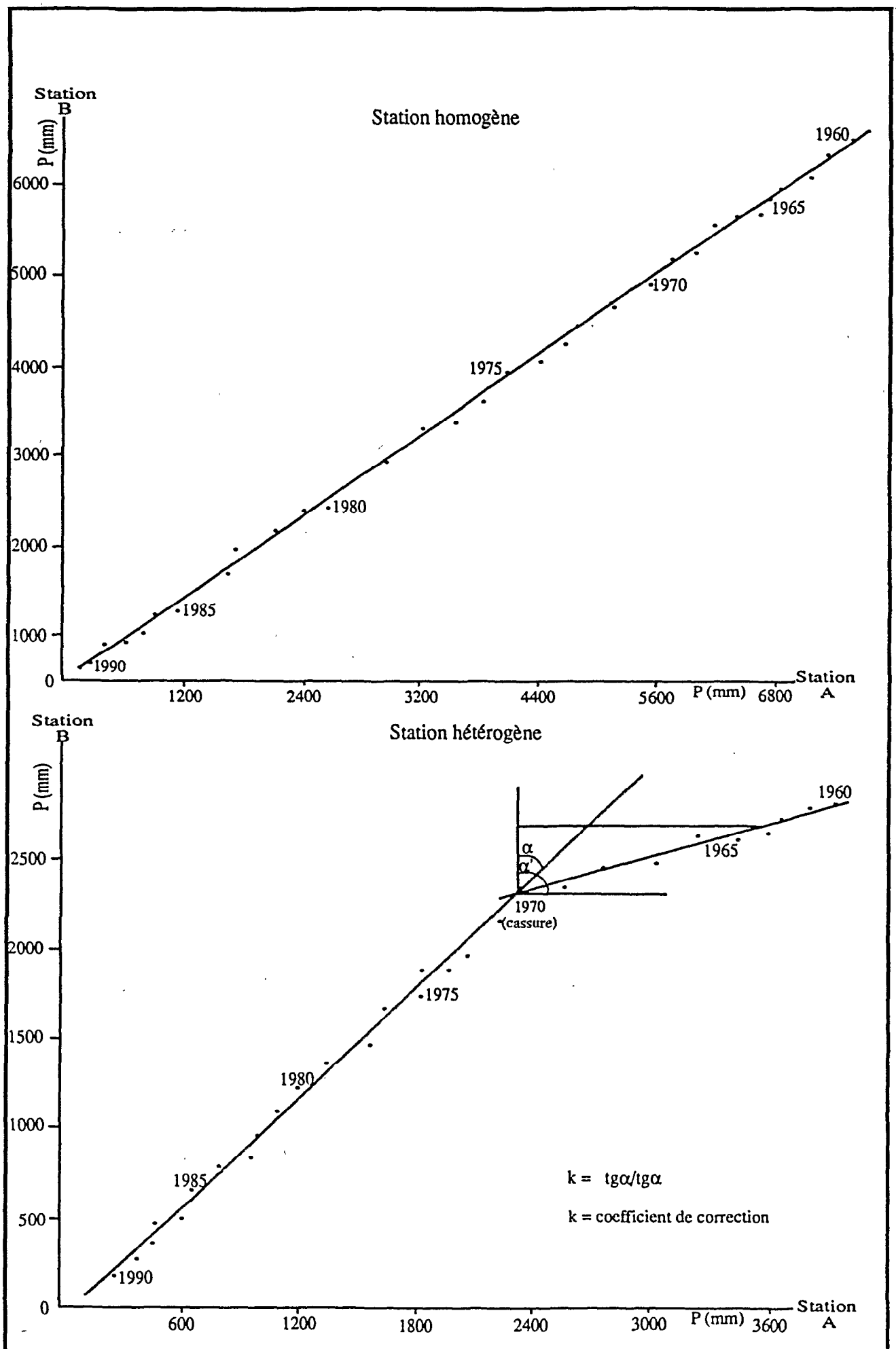


Figure 21 : Principe d'homogénéisation des données pluviométriques des hauts bassins

1.2. Le comblement des lacunes

Les données pluviométriques revêtent souvent des lacunes qui faussent la chronologie des séries. Ces lacunes sont peu importantes pour les mois qui correspondent à la saison sèche.

Par contre, elles sont importantes dès qu'il s'agit d'un mois compris dans la saison pluvieuse comme juillet, août ou septembre. Dans les hauts bassins, les années lacunaires correspondent soit à des vicissitudes historiques (guerre 1914-1918), soit à des périodes de luttes coloniales (1958-1960), soit à des instabilités politiques locales comme les "complots peuls" (1977-1979) qui ont longtemps agité le Fouta Djalon. Cette situation rend nécessaire un procédé de comblement sans pour autant exagérer les valeurs affectées. Nous appliquons cette méthode pour combler les lacunes annuelles des stations de Tambacounda, Nioro du Sahel, Bamako et Pita (tab. 5).

Le comblement des lacunes procède d'une régression linéaire entre des stations assez proches et ne considère que les couples de valeurs communes. Cette régression est assortie d'une équation qui est une fonction linéaire de la forme :

$$Y = ax + b$$

Tableau 5 : Comblement des lacunes par régression

de base	Stations à combler	Nombre de Valeurs communes	Equation de régression	R	Années comblées
Kita	Tambacounda	62	y = 0,81x +943,5	0,81	1929
Kiffa	Nioro	70	y = 0,77x +461,9	0,77	1935
Kédougou	Bamako	71	y = 0,22x +1006,1	0,22	1924, 1923, 1925
Labé	Pita	66	y = 0,14x + 1377,3	0,14	1982, 1984 1985, 1991

Elle associe un coefficient de corrélation R qui mesure le degré de liaison entre les deux stations. Quand la liaison est positive (r compris entre 0 et +1), on opère un comblement en intégrant la valeur x de la pluie notée à la station complète, pour trouver la valeur Y de la pluie recherchée pour la station lacunaire. Mais la valeur trouvée étant une possible parmi d'autres, l'équation de régression est accompagnée d'un intervalle de confiance obtenu selon la formule :

$$Y = ax + b \pm \sum, \text{ où}$$

$\sum$ représente le résidu positif ou négatif pouvant exister entre la vraie valeur et celle restituée.

La méthode du comblement nous a permis de compléter certaines lacunes mensuelles et annuelles relevées dans différentes stations (tab 5).

1.3. L'indice du vecteur régional

La méthode du vecteur régional et le programme conçus par Y. Brunet-Moret (1979) et améliorés par Y. L'Hote (1985) permettent de prendre en compte toutes les stations y compris celles de courte durée et celles dont la période d'observation présente des lacunes.
L'indice du vecteur régional suppose une bonne connaissance de l'évolution historique des postes soumis à l'étude. Les lieux d'emplacement, l'appareillage, les changements d'observateurs et les éventuelles interruptions doivent être signalées pour permettre l'établissement d'une suite chronologique des précipitations annuelles.
Les hauts bassins étant divisés en quatre grands domaines climatiques, nous avons adopté :
Le domaine guinéen (vecteur 1), le domaine sud-soudanien (vecteur 2), le domaine nord-soudanien (vecteur 3) et le domaine sahélien (vecteur 4). Les résultats obtenus indiquent une bonne homogénéité spatio-temporelle des séries pluviométriques comme l'indiquent les coefficients de variations compris entre 0,10 et 0,33. Les autres paramètres qui permettent la vérification de l'homogénéité des séries sont :
- Les valeurs importantes ou non, prises par les coefficients de corrélation entre station et vecteur,
- la valeur moyenne annuelle des écarts nuls à faibles si les corrections sont bien faites.

L'homogénéité des séries ainsi vérifiée, les totaux annuels manquants sont complétés par reconstitution d'une série homogène selon la formule :

$$P_X = P_i - Z_i$$

P_X est la pluie reconstituée,
P_i est la moyenne par station calculée par le vecteur
Z_i représente la valeur du vecteur pour chaque année.
Les stations qui ont des séries pluviométriques annuelles lacunaires ou brèves ont ainsi été complétées ou étendues à l'aide des quatre vecteurs pour couvrir les différentes périodes retenues à l'étude.

1.4. Les périodes d'étude retenues et les stations de base

Les données pluviométriques collectées connaissent outre la diversité des sources, des disparités dans la chronologie des séries. Se côtoient ainsi des séries pluviométriques dont l'origine remonte au début du siècle et d'autres très récentes qui datent des années 1950 (tab. 6). Certaines stations sont situées en dehors de la zone d'étude ou sont trop lacunaires et n'apportent pas de renseignements significatifs sur l'évaluation de la pluviométrie des hauts bassins.

Ces différentes considérations nous amènent après l'examen des séries des différentes stations à en éliminer certaines.

Tableau 5 : Stations pluviométriques des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

	Stations	Date de création	Latitude	Longitude	Altitude
Domaine	Kiffa	1922	16°38	11°24	110
	Ballé	1950	15°20	08°35	285
	Nioro du Sahel	1931	15°14	09°36	235
	Sélibaby	1933	15°14	12°10	60
	Nara	1930	15°10	07°17	263
Sahélien	Yélimané	1933	15°07	10°34	97
	Bakel	1918	14°54	12°28	25
Domaine	Sandaré	1950	14°53	10°18	281
	Mourdia	1950	14°28	07°28	314
	Kidira	1919	14°28	12°13	35
	Kayes	1895	14°28	11°26	46
Nord	Goudiry	1940	14°11	12°43	59
	Galougo	1950	13°50	11°04	91
	Bafoulabé	1933	13°48	10°50	104
	Tambacounda	1921	13°46	13°41	49
Soudanien	Toukoto	1933	13°27	09°35	177
	Kita	1933	13°04	09°27	328
	Kéniéba	1942	12°48	11°21	136
Domaine	Saraya	1948	12°47	11°47	186
	Sirakoro	1950	12°41	09°40	369
	Bamako	1919	12°38	08°01	331
sud	Kédougou	1919	12°33	12°13	122
Soudanien	Faléa	1950	12°16	11°17	455
	Mali	1931	12°08	12°18	1464
Domaine	Tougué	1922	11°26	11°40	868
	Siguiri	1923	11°26	09°10	361
	Labé	1923	11°19	12°18	1025
	Dinguiraye	1922	11°18	10°43	490
	Pita	1925	11°04	12°24	965
	Dabola	1923	10°45	11°07	438
Guinéen	Dalaba	1933	10°43	12°15	1202
	Mamou	1922	10°22	12°05	783

Pour le réseau malien, les postes pluviométriques de Kolokani, Oualia et Gourbassi présentent des lacunes qui limitent considérablement leur exploitation. Il en est de même pour certains postes du réseau sénégalais comme Saraya.

Les stations du réseau guinéen comme Dinguiraye, Gaoual et Youkounkoun ne sont pas retenues du fait de l'interruption des mesures depuis 1977.

A cause de l'inégalité des séries d'observations, nous retenons trois périodes pour affiner notre étude :

- Une période ancienne, qui va de l'origine des mesures à 1930. Cette période nous permet d'analyser les traits de la pluviométrie depuis la création de chaque station.
- Une période moyenne, qui commence en 1931 et englobe le maximum possible de stations. C'est à partir de cette période que nous choisissons les stations de référence ou stations de base. Celles-ci sont toutes synoptiques et particularisent les différents domaines climatiques des hauts bassins.

Ce sont du sud au nord :

* Les stations de Labé (11° 19' N), Dabola (10°45' N), et de Mamou (11° 22' N) pour le domaine guinéen,
* les stations de Kédougou (12° 33' N), Kéniéba (12° 48' N) et Bamako (12°38' N) pour le domaine sud-soudanien,
* les stations de Kita (13°04' N), Tambacounda (13°46' N), Kayes (14°26' N) et de Bakel (14°54'N), qui correspondent au domaine nord-soudanien,
* les stations de Nara (15°10' N), Nioro du Sahel (15°14' N) et de Kiffa (16°38' N) en domaine sahélien.

- une période contemporaine, qui va de 1961 à 1993, et qui comprend l'essentiel des stations des hauts bassins. C'est à partir de cette période que nous analysons les caractères exceptionnels de la péjoration pluviométrique.

Dans l'analyse de la pluviométrie, nous adoptons une échelle mensuelle, annuelle et décennale afin de mieux cerner l'évolution. Les normales 1931-1960 et 1961-1990 sont retenues comme références pour comparer l'évolution des périodes pluviométriques.

2. LES REGIMES PLUVIOMETRIQUES DES HAUTS BASSINS

Les régimes pluviométriques dépendent des quantités de pluies reçues et de la longueur de la saison pluvieuse. La figure 22 répertorie quatre régimes pluviométriques du sud au nord des hauts bassins et qui correspondent aux domaines climatiques déjà définis.

2.1. Le régime guinéen

Le régime pluviométrique guinéen correspond aux stations situées entre 10°22'N (limite méridionale des hauts bassins) et 12°N environ. Ce régime se particularise par des précipitations

abondantes. Le relief élevé (Fouta Djalon) induit cependant des nuances dans la distribution des pluies. Le régime pluviométrique guinéen connaît trois nuances locales dues soit à l'influence du relief (pluies orographiques) soit par la position en latitude.

2.1.1. La nuance pluviométrique de Labé

La position de cette station, sur le rebord occidental du Fouta Djalon, fait d'elle la plus élevée des hauts bassins. Labé se trouve à 1025 m d'altitude. Elle est directement exposée au flux de mousson et, l'effet orographique aidant, elle enregistre des totaux de pluies importants.
Le tableau 7 donne les valeurs caractéristiques de sa pluviométrie pour la période 1931-1993.

Tableau 7 : Valeurs caractéristiques de la pluviométrie en domaine guinéen Labé (1931-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	2	2,8	9	41	140	240	328	355	294	155	36,3	8,7	1612
Ecart type[5]	5,7	6,4	19	38	62	55	85	84	81	69,3	42,6	20,5	238
Coef. var	2,8	2,3	2,1	0,9	0,4	0,2	0,3	0,2	0,3	0,4	1,1	2,3	0,1
Maximum	29	34	115	177	281	365	591	573	527	412	246	108	2159
Minimum	0	0	0	0	12	93	147	208	126	37,5	0	0	1227
Coef. pluv[6]	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,02	0,01	

Le total annuel recueilli à la station est de 1612 mm. La saison des pluies débute en mars et se poursuit jusqu'en décembre. Les maxima sont notés en août avec 355 mm soit 22 % du total des pluies. Dès le mois de juin, les quantités de pluies enregistrées sont déjà importantes (240 mm) et atteignent en juillet (328 mm). Les pluies recueillies pour ces deux mois représentent respectivement 14,8 % et 20,3 % du total annuel. Le mois de septembre suit avec 294 mm soit 18,2 % des pluies annuelles. La succession de part et d'autre du mois le plus pluvieux des totaux les plus importants est due à l'orographie du Fouta Djalon. Dans ce secteur montagneux, existent des vallons et des dépressions perchés qui développent parfois une instabilité dans le flux de mousson (A. A. Sow, 1984).

La station de Pita illustre bien ce fait, eu égard à la similitude de ses pluies avec celles de Labé (1518 mm) alors qu'elle est à une altitude beaucoup plus basse (935 m). Les pluies d'octobre à décembre sont moins importantes et coïncident avec le retrait de la mousson des hauts bassins. La saison sèche ne dure que deux mois et correspond aux mois de janvier et février.

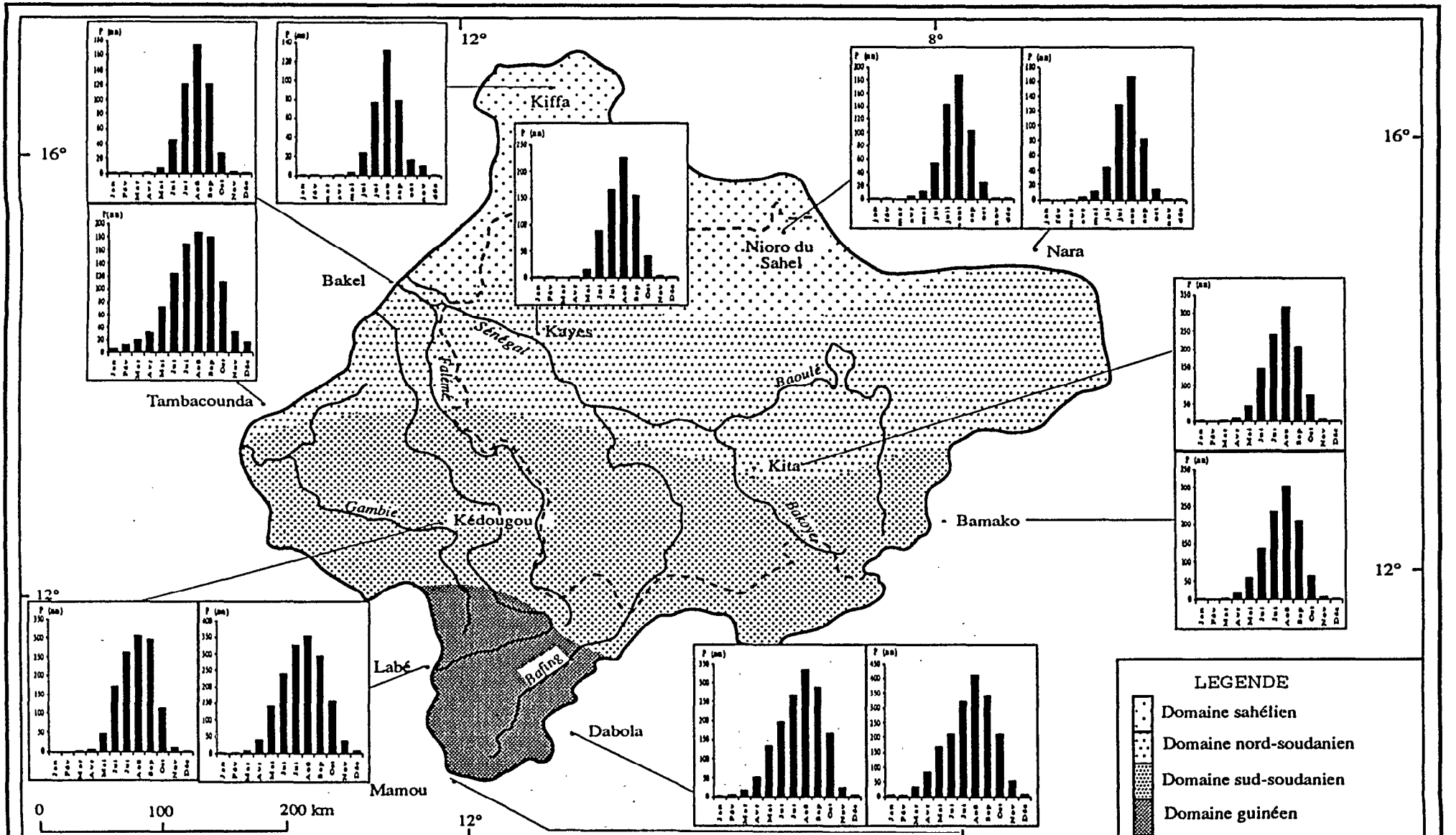


Figure 22 : Régimes pluviométriques des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie (période 1931-1993)

2.1.2. La nuance pluviométrique de Dabola

La station de Dabola (10° 45' N et 11° 07' W) se situe à 438 m sur le rebord oriental du Fouta Djalon. Le flux sud-ouest de mousson qui rencontre le flanc occidental du Fouta Djalon a déjà perdu une bonne partie de son potentiel précipitable. Sur le versant oriental, les vents ont une dominante nord-est avec des pluies moins abondantes. L'effet de foehn que connaît ainsi la station de Dabola se répercute sur sa pluviométrie. La station ne totalise en effet que 1502 mm pour la période 1931-1993 (tab. 8). Elle accuse ainsi un déficit de 110 mm par rapport à la station de Labé.

Tableau 8 : Valeurs caractéristiques de la pluviométrie en domaine guinéen Dabola (1931-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	1,6	5,2	16	53	135	199	267	338	286	166	25,7	4,4	1502
Ecart type	7	25	27	38	64	69	66	91	90	82,2	26,3	16,1	272
Coef.var	4,4	4,8	1,7	0,7	0,5	0,3	0,2	0,3	0,3	0,5	1,02	3,6	0,1
Maximum	19	149	76	134	249	315	345	527	464	383	88	26	1747
Minimum	0	0	0	0	0	50	106	132	146	0	0	0	636
Coef. pluv	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,02	0	

La saison des pluies débute en mars et se poursuit jusqu'en novembre. La montée des pluies est analogue à celle de Labé. Le mois d'août concentre le maximum avec 338 mm soit 20,9 % des pluies annuelles. Il est suivi du mois de septembre (286 mm) soit 19 % et de juillet avec 267 mm soit 17,7 %. La baisse des pluies qui s'opère en septembre est continue jusqu'en décembre. La saison sèche correspond aux mois de décembre et janvier.

2.1.3. La nuance pluviométrique de Mamou

La station de Mamou (10° 22' N) occupe la position la plus méridionale des hauts bassins. Cependant, son altitude est relativement modeste puisque Mamou ne se trouve qu'à 783 m. C'est pourtant la station qui enregistre les plus forts totaux de la période 1931-1993, avec 1838 mm (tab. 9). Par sa position en latitude, cette station connaît des précipitations essentiellement liées à la structure de l'EMV. La montée des pluies se réalise en six mois, de mars à août. La progression des pluies enregistrées s'étale sur trois phases. Elle est d'abord lente avec 34 mm en mars (1,8 %) elle passe à 85 mm en avril (4,6 %), et atteint 170 mm en mai (9,2 %). Elle s'accélère ensuite en juin-juillet avec respectivement 209 et 319 mm, soit 11,3 et 17,3 %.

Les précipitations culminent au mois d'août qui est déjà synonyme de déluge avec 412 mm soit 22,4 % du total annuel des pluies enregistrées. Au delà de ce mois, se forme un léger

tassement qui marque le début de la baisse des pluies. Celle-ci est progressive et les pluies de septembre et d'octobre sont encore importantes (340 et 210 mm), soit respectivement 18,4 et 11,4 %. En novembre et décembre, les pluies faiblissent et les totaux enregistrés ne sont plus que de 54,8 et 7,7 mm. Mais l'originalité de la station de Mamou est qu'elle ne connaît pas une véritable saison non pluvieuse. A la latitude de cette station, le retrait de l'Equateur météorologique est très bref.

Tableau 9 : Valeurs caractéristiques de la pluviométrie en domaine guinéen Mamou (1931-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	4,5	5,9	34	85	170	209	319	412	340	210	54,8	7,7	1838
Ecart type	12	9,5	41	51	77	70	83	79	98	79,7	45,7	16,6	289
Coef. var	2,6	1,6	1,2	0,6	0,5	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,8	2,1	0,1
Maximum	76	42	274	253	425	388	507	668	564	442	215	73	2579
Minimum	0	0	0	0,8	0,4	84	171	250	103	36	0	0	1238
Coef. pluv	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,03	0	

Le régime pluviométrique guinéen se particularise par l'importance de ses précipitations. Celles-ci sont influencées par le relief et la position en latitude. Mais quel que soit le facteur qui prédomine d'une station à l'autre, le régime guinéen connaît un même ordre de montée et de baisse des précipitations. Le régime pluviométrique guinéen est unimodal avec un maximun centré partout en août et un minimum qui survient en décembre ou en janvier.

2.2. Le régime sud-soudanien

Le régime pluviométrique sud-soudanien correspond aux stations situées sur les contreforts septentrionaux du Fouta Djalon et son prolongement oriental, le plateau Mandingue. Trois stations pluviométriques caractérisent ce régime pluviométrique (tab. 10) :

Kédougou sur le versant ouest des contreforts, Kénieba par sa position centrale et Bamako sur la bordure nord du plateau Mandingue. Les précipitations à ces stations pour la période 1931-1993 varient entre 1 200 et 1 000 mm. Les moyennes de la station de Kéniéba sont établies sur la période 1942-1993.

Les stations de Kédougou (12°33' N) et Bamako (12°38' N) totalisent respectivement pour la période 1211 et 1040 mm. La station de Kénieba enregistre quant à elle 1201 mm. Le relief ne joue pas ici un rôle majeur comme l'attestent les altitudes des différentes stations :
333 m pour Bamako alors que Kéniéba et Kédougou se trouvent à 136 et 122 m. Les précipitations enregistrées dans le domaine sud-soudanien ne dépendent en fait que de l'épaisseur du flux de mousson et de sa durée dans la région.

Tableau 10 : Valeurs caractéristiques de la pluviométrie en domaine sud-soudanien

Kédougou (1931-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,1	0,2	0,4	4,9	45	171	264	306	294	114	10,8	0,8	1211
Ecart type	0,6	1	1,6	9,3	43	55	70	93	84	83,6	19,5	4,4	218
Coef. var	7,4	3,8	4,1	1,9	1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	1,8	5,4	0,2
Maximum	4,5	5,6	11	43	199	337	501	505	543	418	96,6	34,3	2160
Minimum	0	0	0	0	0,9	71	122	21	128	0	0	0	748
Coef. pluv	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,3	0,09	0,01	0	

Bamako (1931-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,4	0,2	2,7	18	59	138	236	304	210	63,2	7,9	0,4	1040
Ecart type	1,8	0,7	5,8	23	35	49	72	92	77	52,7	16,6	30,9	192
Coef. var	4,1	3,2	2,2	1,3	0,6	0,4	0,3	0,3	0,4	0,8	2,1	6,3	0,2
Maximum	11	4,2	23	92	120	286	393	484	502	281	46,8	24,6	1500
Minimum	0	0	0	0	2,8	45	97	120	63	0,7	0	0	712
Coef. pluv	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,06	0,01	0	

Kénieba (1942-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,1	0,2	0,2	5,4	51,6	157	248,5	372,7	260,2	93	7,8	0,6	1201
Ecart type	0,5	0,9	1	7,2	35,7	59,7	87,2	159,2	93	80	12	3,3	281,6
Coef. var	5,7	5	4,3	1,3	0,6	0,3	0,35	0,4	0,3	0,8	1,6	5,3	0,2
Maximum	3,7	6,3	5,6	326	165	300	446	931,1	500,9	51	49,9	22	1913
Minimum	0	0	0	0	0	13,5	22,7	168,7	95	0	0	0	634,4
Coef. pluv	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,1	0	0	0	

La saison des pluies se réduit par rapport au domaine guinéen et ne dure que sept à huit mois. La montée des pluies se fait en quatre mois, de mai à août. Les totaux sont ainsi de 45 mm à Kédougou (3,7 %) et 59 mm à Bamako (5,6 %) au mois de mai. La station de Kénieba enregistre pour ce mois 51,6 mm soit 4,2 %.

Les mois de juin et juillet sont plus significatifs avec 171 et 264 mm à Kédougou (14,1 et 21,8 %). Ils représentent 138 et 236 mm à Bamako soit 13,2 et 22,6 % du total annuel des pluies reçues. Ces deux mois atteignent respectivement 156,7 et 248,5 mm à Kénieba soit 13 et 20,6%. Le mois d'août concentre partout le maximum.

La station de Kédougou enregistre pour ce mois 306 mm (25,2 %), tandis que Bamako totalise 304 mm, soit 29,2 %. Le mois d'août totalise 372,7 mm soit 31 % des pluies annuelles enregistrées à Kénieba.

La baisse des précipitations commence dès le mois de septembre et se prolonge jusqu'en décembre. Les totaux tombent alors à 294 mm à Kédougou (24,2 %) et ne sont plus que de 210 mm à Bamako soit 20,1 %. A Kénieba, elle se réduisent à 260,2 mm (21,6 %). Entre octobre et novembre la baisse des pluies s'accélère et le mois de décembre préfigure déjà la saison sèche.

Le régime sud-soudanien ne présente pas de contraste à l'analyse des stations pluviométriques qui le caractérisent (tab. 10). Certes des différences, du reste minimes, peuvent être observées sur la répartition des minima. Le maximum est noté partout au mois d'août. Le minimum qui correspond à la saison sèche est noté en décembre, janvier et février à Bamako Kédougou et Kénieba.

Le régime sud-soudanien est unimodal.

2.3. Le régime nord-soudanien

Les précipitations qui caractérisent le régime pluviométrique nord-soudanien sont moins abondantes et plus concentrées dans le temps que celles du régime sud-soudanien.

Le tableau 11 donne les valeurs caractéristiques aux différentes stations pour la période 1931-1993. Les totaux recueillis sont respectivement de 1044 mm à Kita, 841 mm à Tambacounda, 699 mm à Kayes et 498 mm à Bakel.

La montée des pluies se fait encore en quatre mois, de mai à août, et les totaux mensuels enregistrés représentent à peine la moitié de ceux du régime précédent.

La station de Kita, située plus au sud, enregistre des précipitations beaucoup plus importantes. En fait, Kita, située à la lisière du domaine sud-soudanien, se trouve à 328 m d'altitude et présente des similitudes avec la pluviométrie de ce domaine.

Au-delà de cette station, et en progression vers le nord, les totaux annuels de précipitations diminuent (tab. 11). Toutefois, le maximum aux différentes stations est toujours noté en août avec 317 mm à Kita (30,3 %), 251 mm à Tambacounda (29,8 %), 227 mm à Kayes soit 32,4 % et 171 mm à Bakel soit 34,3 %. La baisse des précipitations est beaucoup plus rapide et se réalise en deux mois (septembre et octobre). La saison sèche est plus étendue et dure six mois.

Le régime nord-soudanien est unimodal avec un maximum d'août et un minimum qui s'étale de novembre à mars à Kita, et de novembre à avril pour les autres stations.

Tableau 11 : Valeurs caractéristiques de la pluviométrie en domaine nord-soudanien

Kita (1931-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,5	0,2	0,9	11	42	145	240	317	208	72,3	7,08	0,6	1044
Ecart type	2,9	1,4	2,4	16	28	55	71	104	72	54,5	14,6	2,7	209
Coef. var	5,6	5,6	2,7	1,5	0,7	0,4	0,3	0,3	0,3	0,7	2	4	0,2
Maximum	22	9,7	14	83	124	276	459	569	439	260	77,1	16,3	1620
Minimum	0	0	0	0	0	55	99	130	63	0	0	0	661
Coef. pluv	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,2	0,07	0,01	0	

Kayes (1931-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,4	0,3	0,1	1,4	16	87	167	227	156	41,1	2,4	0,6	699
Ecart type	2,2	2,1	0,4	5,2	23	44	64	89	65	37,6	11	2,74	162
Coef. var	5,7	6,2	7,1	3,8	1,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,9	4,6	4,5	0,2
Maximum	17	17	3,4	30	122	224	344	526	370	203	82,9	19,8	1136
Minimum	0	0	0	0	0	17	45	55	59	0	0	0	375
Coef. pluv	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,2	0,06	0	0	

Tambacounda (1931-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,1	0,8	0,1	3	18	115	191	251	197	61,9	1,9	0,3	841
Ecart type	0,4	3,3	0,5	11	24	61	61	107	90	49	5,1	1,2	206
Coef. var	6,6	4,2	4,3	3,5	1,3	0,5	0,3	0,4	0,5	0,8	2,7	3,6	0,2
Maximum	3,5	24	3,1	67	129	338	385	495	441	207	26,5	6,3	1246
Minimum	0	0	0	0	0	11	80	68	31	0	0	0	434
Coef. pluv	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,2	0,07	0	0	

Bakel (1931-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,4	0,5	0	0,2	7,7	46	120	171	122	27,7	2,2	1,4	498
Ecart type	1,4	2	0,3	1	22	30	57	74	70	29	7,7	6,6	121
Coef. var	3,9	4,1	6,6	4,5	2,9	0,6	0,5	0,4	0,6	1	3,4	4,5	0,2
Maximum	10	11	2,4	7	165	150	350	385	358	132	49,9	48	903
Minimum	0	0	0	0	0	0	24	33	5	0	0	0	235
Coef. pluv	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,2	0,06	0	0	

2.4 Le régime sahélien

Le régime sahélien représente la particularité pluviométrique la plus septentrionale et la moins abondante des hauts bassins. Les précipitations qui intéressent le régime sahélien sont essentiellement liées aux lignes de grains. Ces dernières, ayant un parcours est-ouest, induisent des nuances sur les totaux de pluies recueillis.

Tableau 12 : Valeurs caractéristiques de la pluviométrie en domaine Sahélien

Nioro du Sahel (1931-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,3	0,4	0,1	3,4	12	53	142	187	103	24,7	1,8	0,9	528
Ecart type	1,9	2	0,4	8	27	34	62	89	57	23,5	4,9	3,4	172
Coef. var	6,3	5,6	4,9	2,3	2,3	0,6	0,4	0,5	0,6	0,9	2,6	3,7	0,3
Maximum	15	15	2,9	46	205	218	343	463	353	112	29	21,7	965
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Coef. pluv	0	0	0	0	0	0,1	0,3	0,4	0,2	0,05	0	0	

Nara (1931-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,6	0,1	0,3	3,1	11	44	128	166	82	14,6	1,3	0,3	448
Ecart type	2,2	0,3	1,3	5,8	14	33	45	70	36	14,7	7,31	2,13	119
Coef. var	3,6	5,7	4,3	1,9	1,4	0,7	0,4	0,4	0,4	1	5,6	7,2	0,3
Maximum	14	2	9,3	31	70	209	250	357	188	58,2	57,5	17	755
Minimum	0	0	0	0	0	1,3	47	34	12	0	0	0	199
Coef. pluv	0	0	0	0	0	0,1	0,3	0,4	0,2	0,03	0	0	

Kiffa (1931-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,3	1	0,1	0,2	2,2	24	77	133	81	16	10,7	0,9	340
Ecart type	1	5,4	0,7	0,7	7,5	27	64	72	59	23,6	65,5	4,2	151
Coef. var	3,6	5,2	4,7	3,5	3,4	1,1	0,8	0,5	0,7	1,5	6,1	4,8	0,4
Maximum	6	41	4,5	4	55	134	301	284	286	109	510	31,8	805
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Coef. pluv	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,4	0,2	0,05	0,03	0	

Dans les hauts bassins, les stations de Nioro du Sahel (15°14' N), Nara (15°10' N) et Kiffa (16°38' N) caractérisent le régime pluviométrique sahélien. Les précipitations se résument souvent à des orages violents et brefs. La saison des pluies, brève et très variable, se concentre en trois ou quatre mois. Pour la période 1931-1993, les totaux enregistrés sont de 528 mm à Nioro du Sahel, 448 mm à Nara, et 340 mm à Kiffa (tab. 12). La montée des pluies se fait en trois mois de juin à août qui enregistre le maximum. Pour la station de Nioro du Sahel, ce maximum est de 187 mm soit 35,4 % du total des pluies reçues. La station de Nara totalise pour ce mois 166 mm soit 37 % des pluies annuelles. A la station de Kiffa, le maximum du mois d'août n'est plus que de 133 mm. Cette valeur représente néanmoins (39,1 %) du total annuel de pluies enregistré à cette station. Le mois de septembre n'enregistre dans ce domaine que des pluies modérées à cause du retrait de la mousson. La saison sèche s'installe rapidement dans le domaine sahélien et s'étale sur sept à huit mois. Les minima très précoces sont notés en fin octobre ou début novembre.

La station de Nioro du Sahel qui assure la transition avec le domaine pluviométrique nord-soudanien et celle de Kiffa à la limite septentrionale des hauts bassins, traduisent la décroissance du sud au nord des précipitations en domaine sahélien (tab. 12).

Le régime sahélien est unimodal avec un maximum qui survient au mois d'août et un minimum noté de novembre à avril à Nioro du Sahel et Nara tandis qu'il se prolonge jusqu'en mai à Kiffa.

Les régimes pluviométriques qui caractérisent les hauts bassins révèlent de grandes différences quant à la répartition mensuelle de la pluviométrie et la durée de la saison pluvieuse. Ces différences peuvent être locales, traduisant ainsi les conditions géographiques propres à la région (orographie, position en latitude ou par rapport au flux de mousson). A l'échelle régionale, ces différences revêtent la particularité entre régimes pluviométriques distincts en fonction de la source des précipitations et de l'épaisseur de la mousson qui demeure le seul vecteur des pluies. Dans les hauts bassins, ces régimes pluviométriques sont unimodaux. Ces variations saisonnières de la pluviométrie ainsi analysées déterminent les précipitations annuelles. C'est donc en remontant à l'origine des stations de mesures que nous étudions l'évolution de la pluviométrie des hauts bassins.

CHAPITRE 3

LES CARACTERES DE LA PLUVIOMETRIE DES HAUTS BASSINS

Les précipitations enregistrées dans les hauts bassins connaissent des fluctuations spatiales et temporelles. Celles-ci relèvent d'une part de la diversité des domaines climatiques et d'autre part de la répartition des totaux de pluies enregistrés.

1. LES TRAITS DE LA PLUVIOMETRIE DES HAUTS BASSINS

La variabilité des précipitations dans les hauts bassins sera étudiée dans un premier temps à travers les pluies annuelles. Les fluctuations interannuelles nous permettront dans un second temps de déterminer les récurrences des pluies extrêmes et d'analyser l'évolution des pluies décennales.

Enfin, nous étudierons la variabilité des pluies mensuelles et nous évaluerons la lame d'eau moyenne reçue.

1.1. Les totaux pluviométriques annuels

Les histogrammes (fig. 23 et 24) représentent les hauteurs de pluies année par année de chacune des stations (classées par domaine climatique). L'observation de ces figures montre plusieurs constatations :

- Le minimum pluviométrique de Mamou, station la plus méridionale (1360 mm en 1992), représente à peu près le double du maximum pluviométrique de Kiffa, station la plus au nord avec 804,5 mm en 1954. Ceci confirme la baisse des précipitations du sud au nord des hauts bassins.
- Les maxima pluviométriques annuels observés peuvent se présenter la même année pour des stations proches ou très éloignées : Mamou (2575 mm en 1954), Kédougou (2160 mm en 1954), Kiffa (804,5 mm en 1954) ; Kita (1619,8 mm en 1936), Kayes (1136 mm en 1936) ; Tambacounda (1246 mm en 1935), Nara (755,3 mm en 1935) ; Bamako (1500 mm en 1967), Bakel (902,5 mm en 1967).
- L'année du maximum peut aussi être très variable à l'intérieur d'un même domaine climatique. Aucune des stations des hauts bassins n'a enregistré son maximum en même temps qu'une autre appartenant au même domaine climatique. Ce sont pourtant les minima qui concordent le moins dans le temps, même si leur distribution est plus homogène. Ils sont presque tous notés au cours des deux dernières décennies.
- La variation des hauteurs de pluies annuelles entre le maximum et le minimum peut aller du simple au triple pour certaines stations : Mamou (2575 et 1360 mm), Kédougou (2160 et 748,8 mm), Kayes (1136 et 361 mm).

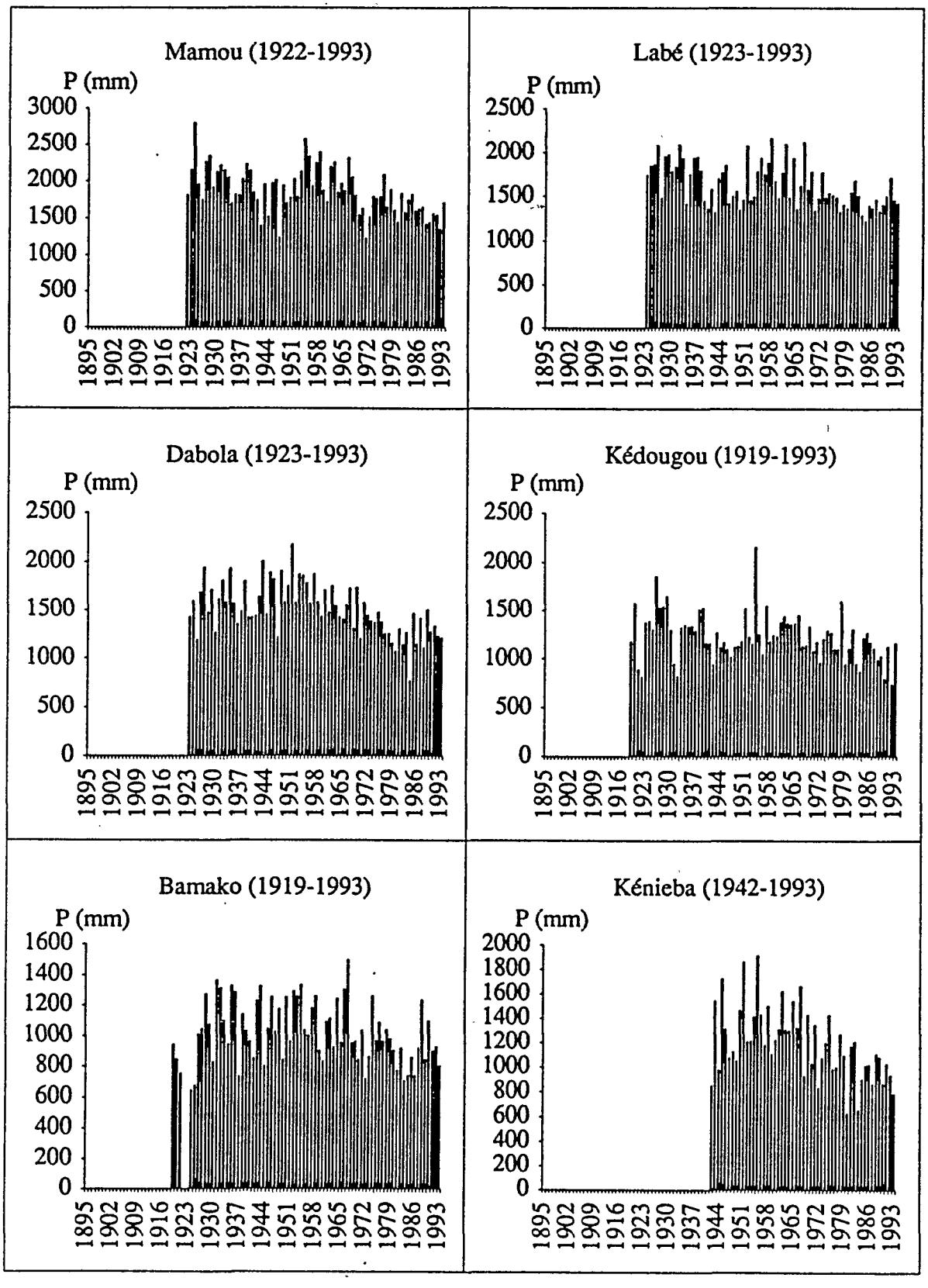


Figure 23 : Pluviométrie moyenne annuelle des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie depuis l'origine des mesures.

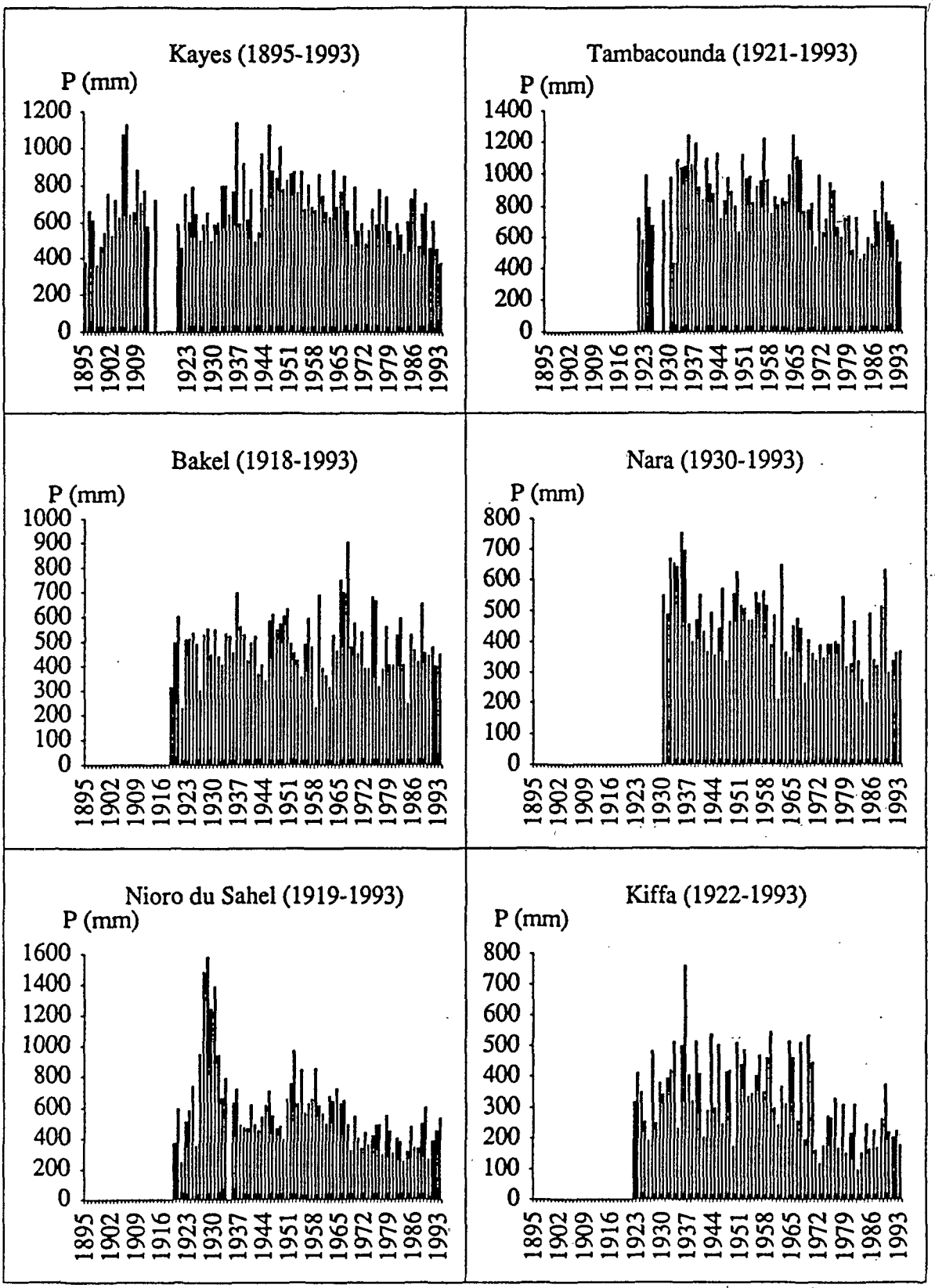


Figure 24 : Pluviométrie moyenne annuelle des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie depuis l'origine des mesures.

Cette variation entre l'année du maximum et celle du minimum peut quintupler ou être multipliée par dix : Nioro du Sahel (1579 et 247,7 mm), Tambacounda (1246 et 171,7 mm).
- L'observation des graphiques montre partout une variabilité assez élevée qui symbolise le schéma classique avec une courbe en "dents de scie" (Fig 23 et 24).

Les coefficients de variation qui indiquent la fluctuation d'un paramètre autour de sa moyenne rendent bien compte de cette situation (tab. 13, 14 et 15). En effet, plus ceux-ci sont élevés, plus la variation du phénomène est grande. Au cours de cette période, les coefficients de variation augmentent du sud au nord des hauts bassins. Ils se situent entre 0,14 et 0,17 en domaine guinéen, et sont de 0,19 à 0,23 en domaine sud-soudanien. En domaine nord-soudanien, ils deviennent plus élevés avec 0,23 à 0,37, et atteignent 0,42 à 0,50 en domaine sahélien.

1.2. La variabilité des pluies annuelles

Les pluies annuelles sont très irrégulières d'un domaine climatique à l'autre et connaissent localement des variations entre les stations. A l'échelle interannuelle, il n'existe pas entre les stations des hauts bassins de relation entre une année à pluviosité abondante ou faible. Toutefois, le recours aux premières années de mesure nous permet d'appréhender l'évolution de la pluviométrie.

1.2.1. Les pluies annuelles à Kayes

Cette station présente l'avantage de disposer des relevés les plus anciens des hauts bassins. Les premiers totaux annuels de pluies sont enregistrés dès 1895. Pour cette année, la station totalise 374 mm. Elle accuse un déficit de -267,8 mm par rapport à la moyenne de la période 1895-1993 qui est de 641,8 mm.

L'année 1896 quant à elle est excédentaire avec une moyenne annuelle de 665 mm soit + 23,2 mm au rapport de la moyenne de la série. Suivent ensuite une série d'années déficitaires qui coïncident avec la dernière sécheresse de la fin du siècle. Les totaux annuels de 1897 à 1900 sont tous situés en dessous de la moyenne, avec des déficits respectifs de -28 mm en 1897, -280,8 mm en 1898, -175 mm en 1899 et -99,8 mm en 1900.

De 1901 à 1910, la station enregistre des précipitations importantes avec une seule année sèche (-114 mm en 1902). Les totaux de 1905 et 1906 sont largement supérieurs à la moyenne, avec respectivement 1072 mm et 1126,5 mm soit des excédents de +430 et +484,7 mm.

En 1911, la pluviométrie est encore excédentaire (+768 mm). Mais une nette tendance à la baisse de la pluviométrie se dégage au-delà de cette année. Les déficits culminent en 1913, année durant laquelle la station de Kayes n'enregistre que 6 mm de pluie annuelle. C'est la sécheresse de l'année "1913" (J. Sircoulon, 1976) de triste mémoire pour les populations sahéliennes.

Tableau 13 : Caractéristiques de la pluviométrie aux stations de base depuis l'origine des mesures

Kayes (1895-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,3	0,3	0,2	1,5	18,2	84,9	163,9	221,2	149,9	39,8	2,3	0,7	641,8
Ecart type	1,8	1,8	1,1	5,5	27,5	43,6	67,4	87	62,6	35	9,6	3,9	228,5
Coef. var	6	6	8,1	3,6	1,5	0,51	0,41	0,53	0,41	0,8	4,1	5,5	0,35
Maximum	17	17	8	33	187	224	344	526	370	203	83	31	1136
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	43	0	0	0	0
Coef. pluv	0	0	0	0	0,02	0,13	0,25	0,34	0,23	0,06	0	0	

Bakel (1918-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,7	0,4	0,04	0,2	7,45	45,1	117	175	117,5	27	1,5	3	493,8
Ecart type	3,1	1,8	0,3	0,9	20,8	33,9	57,2	74,3	66,3	27,7	7,44	6,19	115,7
Coef. var	4,5	4,4	7,3	5	2,8	0,75	0,49	0,42	0,56	1,02	3,13	4,18	0,23
Maximum	24,5	11	2,4	7	165	195	350	385	358,2	131,6	49,9	48	820,5
Minimum	0	0	0	0	0	0	15,5	33,3	5	0	0	0	233,5
Coef. pluv	0,1	0,1	0	0	1,5	9,1	23,6	35,4	23,8	5,5	0,5	0,3	

Kédougou (1919-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,1	0,2	0,4	4,5	45,2	181,1	262,3	311,7	302,1	117,3	11,8	0,7	1236,7
Ecart type	0,5	0,8	1,5	8,6	41,8	90,5	73,6	93,1	100,9	84,5	21,1	4	237,5
Coef. var	8,07	4,18	4,12	1,9	0,9	0,5	0,28	0,29	0,33	0,72	1,78	5,79	0,19
Maximum	4,5	5,6	11	42,7	199,1	755,9	501,2	519	645	417,9	96,6	34,3	2160,1
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	20,8	0	0	0	0	748,3
Coef. pluv	0	0	0	0,4	3,7	14,6	21,2	25,2	24,4	9,5	1	0,1	

Bamako (1919-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,4	0,2	3	19,6	60,5	137,3	229,3	307,9	201	62,5	7,1	0,4	1010,6
Ecart type	1,6	0,6	5,9	26,1	38,4	47,5	71,5	95,7	77,39	52	15,6	2,9	218,8
Coef. var	4	3	1,96	1,33	0,63	0,34	0,31	0,31	0,38	0,83	2,19	7,2	0,21
Maximum	10,7	4,2	22,9	137	192	286,4	392,9	564,9	502	281,1	83	24,6	1499,5
Minimum	0	0	0	0	2,8	45,1	97,4	166,1	62,5	0,7	0	0	712,1
Coef. pluv	0	0	0,3	1,9	6	13,6	22,7	30,5	19,9	6,2	0,7	0	

Tableau 14 : Caractéristiques de la pluviométrie aux stations de base depuis l'origine des mesures

Nioro du Sahel (1919-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,3	0,3	0,1	3,8	13	57,7	153	213,3	110,4	24,3	1,7	0,9	577,4
Ecart type	1,9	1,9	0,4	8,9	27,7	42,3	80,2	143	70	24,3	4,6	3,3	265,6
Coef. var	5,4	6,1	5,3	2,3	2,1	0,7	0,5	0,7	0,6	1	2,7	3,6	0,5
Maximum	15,4	15,3	2,9	46	205	220,9	420,2	491	392	112	29	21,6	1579
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Coef. pluv	0	0	0	0	0	0,1	0,3	0,4	0,2	0	0	0	

Tambacounda (1921-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,2	0,7	0,1	2,6	18,1	110,6	179,1	239,4	194,7	60,7	1,9	0,3	820,4
Ecart type	1,67	3	0,45	9,87	25,8	62,3	68,64	109,9	91,49	49,5	4,8	1,1	220,5
Coef. var	6,7	4,5	4,6	3,7	1,4	0,5	0,3	0,4	0,4	0,8	2,5	3,7	0,26
Maximum	14	23,8	3,1	66,5	129,4	337,9	384,9	494,5	441	207,1	26,5	6,3	1246,2
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	171,7
Coef. pluv	0	0,1	0	0,3	2,2	13,5	21,8	29,2	23,7	7,4	0,2	0	

Mamou (1922-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	4,4	6,3	32,6	88,8	171,3	219,2	314,1	419,8	349,7	219	55,5	7,1	1875,3
Ecart type	11,5	10,7	39,9	53,2	72,9	82	81,62	84,71	103,3	83,7	45,7	15,6	307
Coef. var	2,6	1,7	1,2	0,6	0,4	0,3	0,26	0,20	0,29	0,38	0,82	2,2	0,16
Maximum	76	54	274	253	425	566	507	668	647	488	215	73	2801
Minimum	0	0	0	0,8	0,4	84	171	250	103	36	0	0	1238
Coef. pluv	0,2	0,3	1,7	4,7	9,1	11,7	16,8	22,4	18,7	11,7	3	0,4	

Kiffa (1922-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,5	0,9	0,1	0,2	2,9	22,6	74,6	133,7	77,9	15,6	9,25	0,9	339,4
Ecart type	1,9	4,98	0,63	1,06	8,69	25,7	60	70,31	55,86	22,55	59,85	0,08	144,2
Coef. var	3,5	5,5	5,12	3,9	2,9	1,1	0,8	0,5	0,71	1,44	6,46	4,25	0,42
Maximum	14,2	41	4,5	7,1	55,1	133,7	301	284,4	286,1	109	510	31,8	804,5
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100,3
Coef. pluv	0,16	0,27	0,03	0,07	0,8	6,6	21,98	39,4	22,95	4,59	2,72	0,28	

Tableau 15 : Caractéristiques de la pluviométrie aux stations de base depuis l'origine des mesures

Dabola (1923-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	1,8	4,7	16,2	50,8	137	203,3	265,3	341,5	289	163,6	24,6	4	1506,4
Ecart type	7,1	23,6	26,8	37	63	68,5	67	94,59	88,78	79	25,8	15,2	267,44
Coef. var	3,88	4,9	1,65	0,72	0,46	0,33	0,25	0,27	0,30	0,48	1,05	3,7	0,17
Maximum	50	149	150	150	288	480	430	578	544	430	95	105	2180
Minimum	0	0	0	0	0	50	106	132	145	0	0	0	636
Coef. pluv	0,1	0,3	1,1	3,4	9,1	13,5	17,6	22,7	19,2	10,9	1,6	0,3	

Labé (1923-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	1,9	2,5	9,3	41,1	141,4	243,4	332,4	359,9	296,3	164,9	37	7,7	1637,9
Ecart type	5,3	6	19,3	37,8	60	58,4	84	81,9	80,9	78,4	44,6	19,5	242,6
Coef. var	2,8	2,41	2,08	0,92	0,42	0,24	0,25	0,22	0,27	0,47	1,2	2,5	0,14
Maximum	29	34	115	177	281	365	591	573	527	430	246	108	2159
Minimum	0	0	0	0	12	93	147	208	125,9	37,5	0	0	1226,5
Coef. pluv	0,1	0,2	0,6	2,5	8,6	14,9	20,3	22	18,1	10,1	2,3	0,5	

Nara (1930-1993)

	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,6	0	0,3	3,1	11,3	43,8	129,2	167	81,9	14,4	1,3	0,3	449,3
Ecart type	2,2	0,3	1,3	5,7	15,6	32,3	45,4	69,6	35,5	14,6	7,2	2,1	118,6
Coef. var	3,6	5,7	4,3	1,8	1,37	0,73	0,35	0,41	0,43	1,01	5,62	7,24	0,26
Maximum	14	2	9,3	31	69,8	209,1	250,1	357	187,5	58,2	57,5	17	755,3
Minimum	0	0	0	0	0	1,3	47,2	34	12,4	0	0	0	198,7
Coef. pluv	0,14	0,01	0,06	0,69	2,52	9,75	28,74	37,16	18,2	3,2	0,28	0,06	

Kita (1942-1993)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	An
Moyenne	0,5	0,2	0,9	11	42	145	240	317	208	72,3	7,08	0,66	1044
Ecart type	2,9	1,4	2,4	16	28	55	71	104	72	54,2	14,6	2,69	209
Coef. var	5,6	5,6	2,7	1,5	0,7	0,4	0,3	0,3	0,3	0,7	2,07	4,04	0,2
Maximum	22	9,7	14	83	124	276	459	569	439	260	77,1	16,3	1620
Minimum	0	0	0	0	0	55	99	130	63	0	0	0	661
Coef. pluv	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,2	0,07	0,01	0	

L'année 1914 apporte un répit avec un excédent pluviométrique de +79,2 mm.

Malheureusement, cette année marque aussi l'interruption des mesures à la station de Kayes. Elles ne reprendront qu'en 1920, mais la création de la station de Bakel (1918) permet de pallier l'inexistence de mesures dans les hauts bassins.

Toutefois, on peut retenir à l'analyse de la série de Kayes, que la pluviosité des hauts bassins est déjà sujette à une forte variabilité interannuelle. Les valeurs de déficits et d'excédents notées certaines années écartent cependant toute cyclicité des épisodes pluviométriques. La sécheresse de l'année "1913" par son déficit élevé reste un fait marquant de ces différents épisodes en raison de son extension à tout le Sahel (*grande beeri*)[6].

Les moyennes décennales des périodes 1895-1904 et 1904-1914 sont largement déficitaires au rapport de la normale 1931-1960 avec respectivement -222 mm et -274 mm.

1.2.2. Les pluies annuelles à partir de 1918

L'année 1918 n'est évaluée qu'à la station de Bakel, la seule fonctionnelle avec 313,3 mm. Elle accuse un déficit de -182,2 mm par rapport à la moyenne de la série (493,8 mm).

A partir de 1919, l'ouverture des stations de Kédougou, Bamako et Nioro du Sahel consacre une ère nouvelle dans les mesures pluviométriques. Les totaux annuels recueillis aux trois stations sont respectivement de 1178,5 mm à Kédougou, 943,1 mm à Bamako et 373,5 mm à Nioro du Sahel. La station de Bakel est la seule excédentaire cette année là avec 497,8 mm.

Cette situation s'améliore durant l'année 1920 ; seules les stations de Bamako (-140,1 mm) et Kayes (-31 mm) sont encore déficitaires. Les stations de Kédougou, Bakel et Nioro du Sahel enregistrent des excédents respectifs de +337,8 mm, +105,5 mm et +18 mm.

L'année 1921 marque, en plus de la création de la station de Tambacounda, une pluviométrie déficitaire pour l'ensemble des stations : -342,7 mm à Kédougou, -329,3 mm à Nioro du Sahel, -262 mm à Bakel, -251 mm à Bamako, -160 mm à Kayes et -92,2 mm à Tambacounda. Ce déficit se poursuit en 1922 et l'ouverture de stations aux deux extrémités des hauts bassins (Mamou et Kiffa) confirme la baisse des pluies notée depuis 1919.

Les déficits enregistrés du sud au nord sont de -60 mm à Mamou, -411,7 mm à Kédougou, -853 mm à Bamako, -233,8 mm à Tambacounda. Seule la station de Kayes présente un excédent (+130 mm) tandis les stations de Nioro du Sahel et de Kiffa enregistrent des déficits de -62 et -19,7 mm.

De 1923 à 1930, l'évolution de la pluviométrie consacre partout des excédents. Les stations de Kayes, Bamako et dans une moindre mesure Tambacounda présentent quelques déficits aigus. Cette période correspond aussi à la création des stations de Labé, Dabola (1923) et Nara (1930).

---

[6] Grande beeri : terme Zarma-Songhay qui désigne la sécheresse de 1913 comme la "plus grande famine de l'histoire" cf. (A. Gado Boureima, 1988).

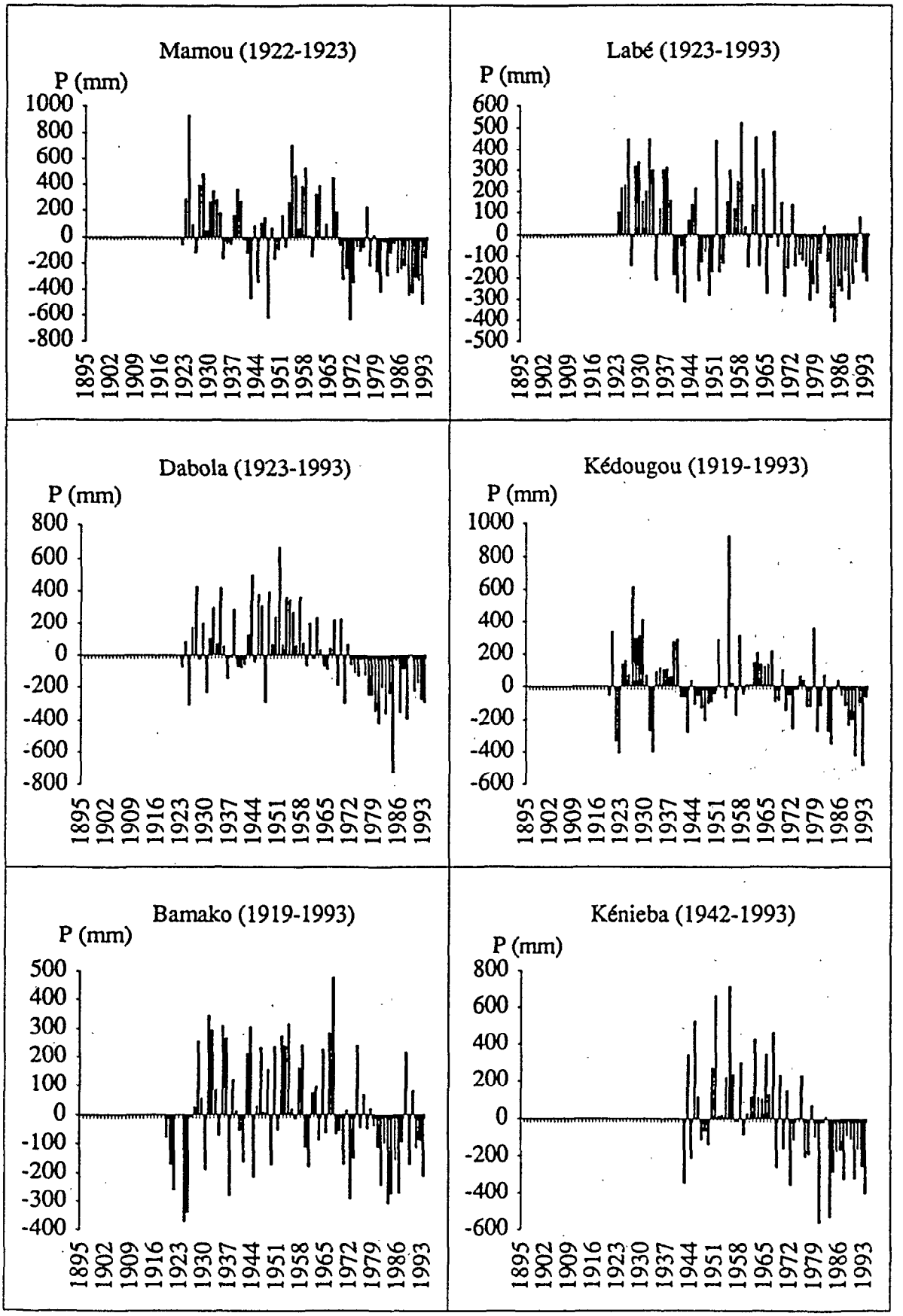


Figure 25 : Ecart de la pluviométrie d'une année par rapport à la pluviométrie moyenne

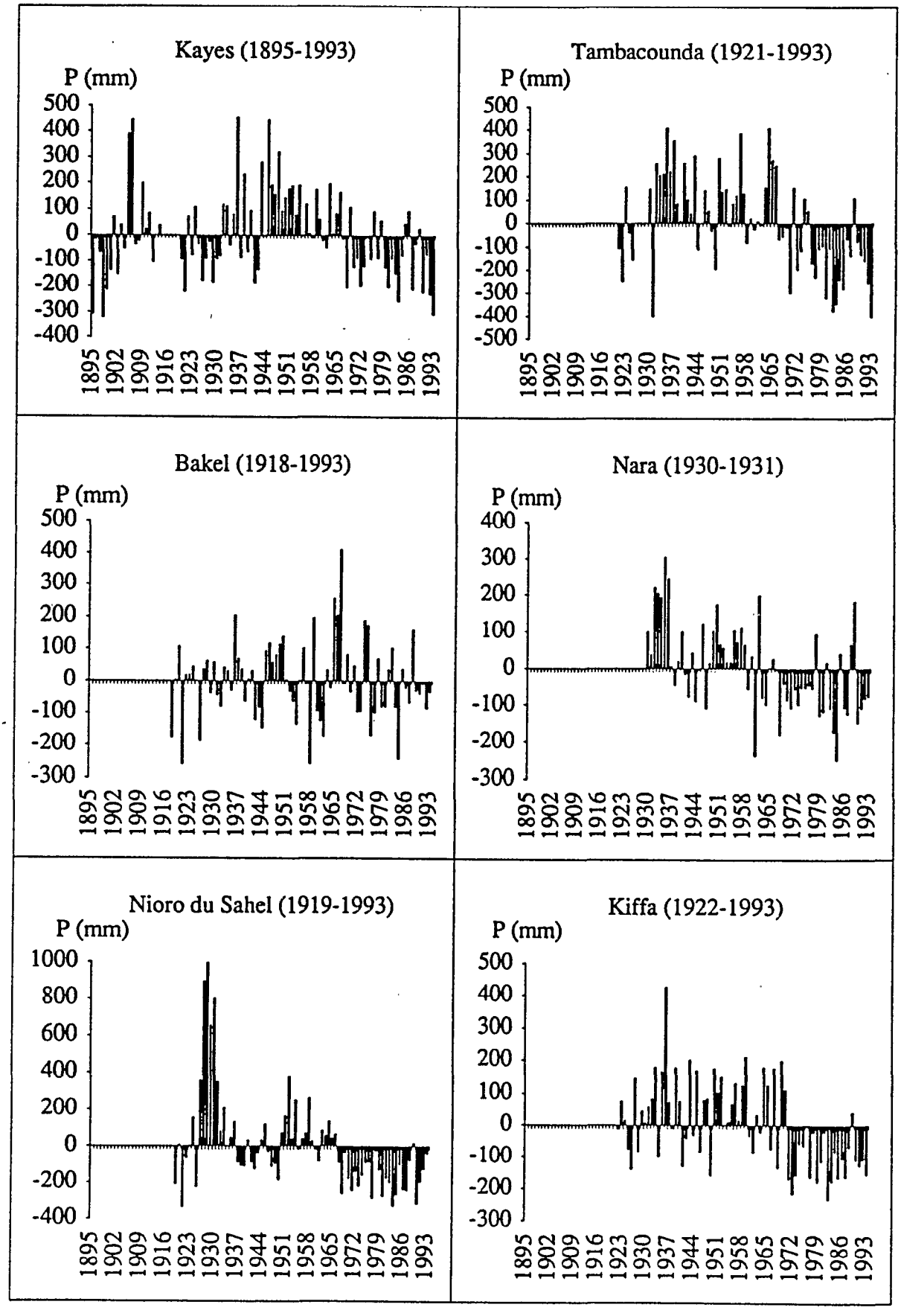


Figure 26 : Ecart de la pluviométrie d'une année par rapport à la pluviométrie moyenne

Au cours de la période 1895-1930, l'évolution des précipitations est marquée par des périodes de déficits et d'excédents. Ces valeurs extrêmes préfigurent déjà la variabilité des pluies annuelles. Les figures 25 et 26 qui présentent les écarts annuels par rapport à la moyenne de chaque station depuis le début des mesures confirment cette évolution. On observe sur l'ensemble des stations une fluctuation importante des totaux annuels de part et d'autre de la moyenne.

Toutefois au regard des graphiques, certaines tendances se confirment entre les périodes excédentaires et déficitaires. Les périodes excédentaires correspondent surtout aux années 1920. Les périodes déficitaires se localisent plus entre le début du siècle et 1917, puis elles sont continues depuis 1961. Ces périodes à pluviométrie extrême ne sont toutefois ni continues, ni homogènes.

1.3. Les pluies annuelles à partir de 1931

L'évolution de la pluviométrie à partir de 1931 est une suite d'alternance d'années humides et d'années sèches (fig. 27 et 28). Les périodes à pluviométrie excédentaire (1931-1940, 1950-1960) sont entrecoupées par des années déficitaires et inversement.

Tableau 16 : Ecarts moyens de la pluviosité par rapport aux normales 1931-1960 et 1961-1990.

Domaines climatiques	Stations	Moyenne 1931-1993	Normale 1931-1960	Normale 1961-1990	Ecarts % 1931-1960	Ecarts % 1961-1990
Guinéen	Mamou	1838	1948	1759	-5,6	4,5
	Labé	1612	1693	1539	-4,7	4,8
	Dabola	1501,9	1675,3	1352	-10,3	11
Sud-soudanien	Kédougou	1211	1252	1190	-3,2	1,7
	Bamako	1039,7	1106,4	988,8	-6	5,7
	Kéniéba	1201	-	1146,3	-	4,7
Nord-soudanien	Kita	1043,9	1158,4	937	-9,8	11,4
	Tamba	841,2	939,9	770,4	-10,5	9,2
	Kayes	699	787	633	-11,2	10,4
	Bakel	498	498	503,1	0	-1
Sahélien	Nioro	528	608,2	454,3	-13,1	16,2
	Nara	444,7	514,5	389,9	-13,5	14
	Kiffa	340,5	420,6	273,4	-19	24,5

Les figures 29, 30, 31 et 32 montrent les écarts de la pluviométrie d'une année par rapport aux normales 1931-1960 et 1961-1990. La comparaison des écarts annuels par rapport aux deux normales (tab. 16) traduit une grande disparité entre les déficits qui peuvent être relevés pour 1931-1960 et les excédents de 1961-1990.

L'évolution des écarts à partir de la normale 1931-1960 fait ressortir une forte variabilité surtout pour les 30 premières années.

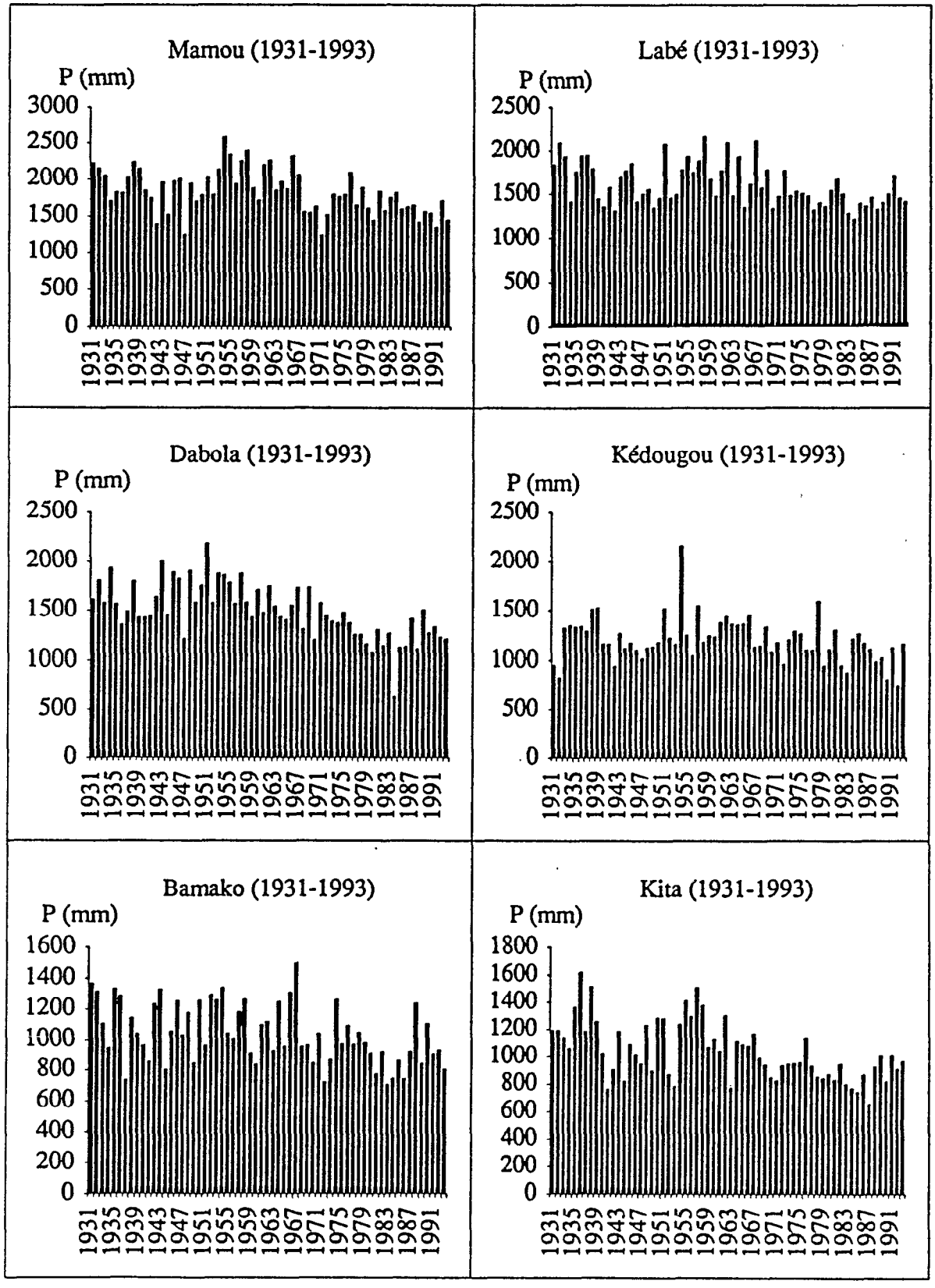


Figure 27 : Evolution de la pluviométrie des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie depuis 1931

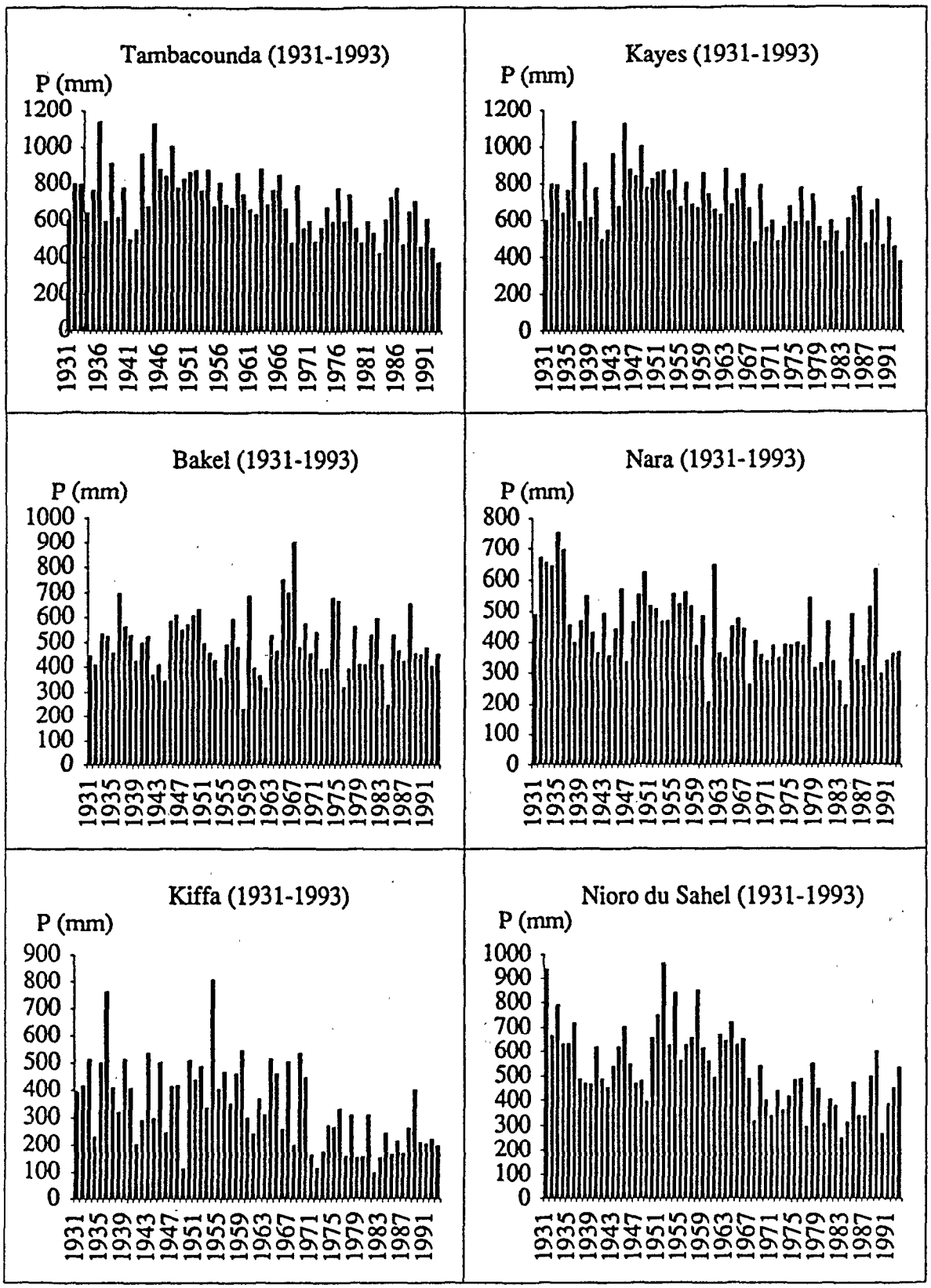


Figure 28 : Evolution de la pluviométrie des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie depuis 1931

Tableau 17 : Ecarts de la pluviosité d'une année particulière par rapport à la normale 1931-1960

Domaines climatiques	Stations	1931		1954		1969		1977		1980		1990	
		mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Guinéen	Mamou	274	14	631	32,4	-397	-20	-290	-14	-487	-25	-404	-20,7
	Labé	146	8,6	92	5,4	-114	-6,7	-365	-21,5	-147	-8,6	-189,1	-11,1
	Dabola	-56,3	-3,3	184,7	11	-355,3	-21,2	-413,3	-24,6	-590	-35,2	-391,2	-23,3
Sud-soudanien	Kédougou	-292,5	-23,3	908,1	72,5	84	6,7	-142,7	11,3	-135,9	-10,8	-444,5	
	Bamako	259,5	23,4	231,4	20,9	-140,7	-12,7	-134,8	-12,1	-198,8	-17,9	-4,9	-0,4
Nord-soudanien	Kita	36,1	3,1	80	6,9	-214,4	-18,5	-210,5	-18,1	-283,4	-24,4	-331,3	-28,5
	Tambacounda	-503,7	-53,5	-17,3	-1,8	-124,4	-13,2	-337,6	-35,9	-424,5	-45,9	-238,1	-30,2
	Kayes	-184,8	-23,4	87,3	11	4,8	0,6	-192,2	-24,4	-306,4	-38,9	-326,5	-41,4
	Bakel	-54	10,8	-140,8	-28,2	77	15,4	-107	-21,4	-88	-17,6	-47,9	-9,6
Sahélien	Nioro du Sahel	331,5	54,5	233,8	38,4	-64,8	-10,6	-309,2	-50,8	-298,2	-49	-337,5	-55,4
	Nara	-25,6	-4,9	-44,8	-8,7	-109,9	-21,3	-123,1	-23,9	-185,5	-36	-215,5	-41,8
	Kiffa	-27,48	-6,5	383,8	91,2	113,6	20,6	-260,4	-61,9	-262,6	-62,4	-209,1	-49,7

Tableau 18 : Ecarts de la pluviosité d'une année particulière par rapport à la normale 1961-1990

Domaines climatiques	Stations	1931		1954		1969		1977		1980		1990	
		mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Guinéen	Mamou	463	26,3	820	46,6	-208	-11,8	-101	-5,7	-298	-16,9	-215,3	-12,2
	Labé	548	35,6	246	15,9	238	15,4	-211	-13,7	7	0,4	-35,1	-2,2
	Dabola	267	19,7	508	37,5	384	28,4	-90	-6,6	-266,7	-19,7	-67,9	-5
Sud-soudanien	Kédougou	-230	-19,3	970,1	81,5	146	12,2	-80,7	-6,7	-73,9	-6,2	-159,3	-13,3
	Bamako	377,1	38,1	349	35,2	-23,1	-2,3	-17,2	-1,7	-81,2	-8,2	112,7	11,3
Nord-soudanien	Kita	257,5	27,4	301,4	32,1	7	0,7	1,1	0,1	-62	-5,1	-109,9	-6,6
	Tambacounda	-334,2	-43,3	152,2	19,7	45,1	5,8	-168,1	-21,8	-255	-33	-68,6	-8,9
	Kayes	-31	-12,9	241	38	159	25,1	-38	-6	-152	-24	-173	-27,3
	Bakel	-59,1	-11,7	-154,9	-30,7	71,9	14,2	-112,1	-7,9	-93,8	-26,6	-53	-10,5
Sahélien	Nioro du Sahel	485,4	106,8	387,7	85,3	89,1	19,6	-155,3	-34,1	-144,3	-65,9	-183,6	-40,4
	Nara	99	25,3	79,8	20,4	14,7	3,7	1,5	0,3	-144,3	-36,6	-90,9	-23,3
	Kiffa	119,7	43,7	531	194,2	260,8	95,3	-113,2	-41,4	-60,9	-22,2	-61,9	-22,6

Cette période correspond à une pluviométrie abondante (1931-1940 et 1951-1960) avec néanmoins des années déficitaires (1941-1950), ce qui atteste de l'irrégularité de la majorité des stations (fig. 29 et 30). A partir de 1968, cette variabilité devient plus modérée avec une tendance plus régulière à la baisse de la pluviométrie. Ceci se confirme au regard de la normale 1961-1990 qui traduit une partition de l'évolution des écarts en deux tendances : une tendance humide qui va de 1931 à 1968 et entrecoupée seulement par quelques années déficitaires, et une tendance sèche qui englobe la période actuelle. En fait, la forte pluviométrie de la première normale (1931-1960) influence fortement en négatif les valeurs de totaux annuels observés, surtout à partir de 1960.

Par contre, la normale 1961-1990 intervient dans une succession d'années déficitaires. La faiblesse des totaux pluviométriques enregistrés permet d'entrevoir une moindre variabilité de la période 1931-1993 (fig. 31 et 32).

Cette variabilité des écarts indique aussi les fortes valeurs de déficits ou d'excédents qui peuvent être atteintes lors d'années particulièrement sèches ou humides. Cependant, il est tout aussi difficile, du fait des variations spatiales observées, de trouver une particularité d'une année (pluvieuse ou sèche) à toutes les stations à la fois.

Le tableau 17 donne les valeurs des écarts de la pluviosité d'une année particulière par rapport à la normale 1931-1960. Il ressort des résultats obtenus que certaines années comme 1931 ou 1954 sont très pluvieuses à certaines stations (Bamako 1931, Kédougou 1954). Cette hétérogénéité de la variabilité des précipitations explique ainsi qu'une année largement excédentaire dans un domaine quelconque peut correspondre à de forts déficits dans un autre. L'exemple de l'année 1954 considérée comme très pluvieuse est assez éloquent :

- En domaine guinéen et sud-soudanien, toutes les stations enregistrent cette année là de forts excédents : Mamou +32,4 %, Labé +5,4 %, Dabola +11 %. La station de Kédougou totalise durant cette année un excédent record de +72,5 % tandis que Bamako enregistre +20,9 %.
- Par contre, en domaine nord-soudanien et sahélien, des disparités sont notées entre les stations.

Ainsi, l'année 1954 est excédentaire en domaine nord-soudanien, notamment à Kita (+6,9%) et Kayes (+11 %) alors qu'elle est normale à Tambacounda (-1,8 %) et accuse un déficit à Bakel (-28,2 %).

- En domaine sahélien, les stations de Nioro du Sahel (+38,4 %) et Kiffa (+91,2 %) sont excédentaires, alors que la station de Nara accuse un déficit de -8,7 %.

On remarque, d'autre part, que par rapport à la normale 1961-1990, les écarts de l'année 1954 sont moins prononcés pour tous les domaines climatiques.

Les années déficitaires sont uniformes pour les stations des hauts bassins quelle que soit la normale utilisée (tab. 17 et 18). Ce qui retient l'attention, outre la péjoration pluviométrique du domaine guinéen le plus nanti en précipitations, c'est la tendance généralisée à la baisse des précipitations sur l'ensemble du bassin. Cette situation se traduit par une régularité du phénomène qui maintient les totaux très en dessous de la normale 1931-1960.

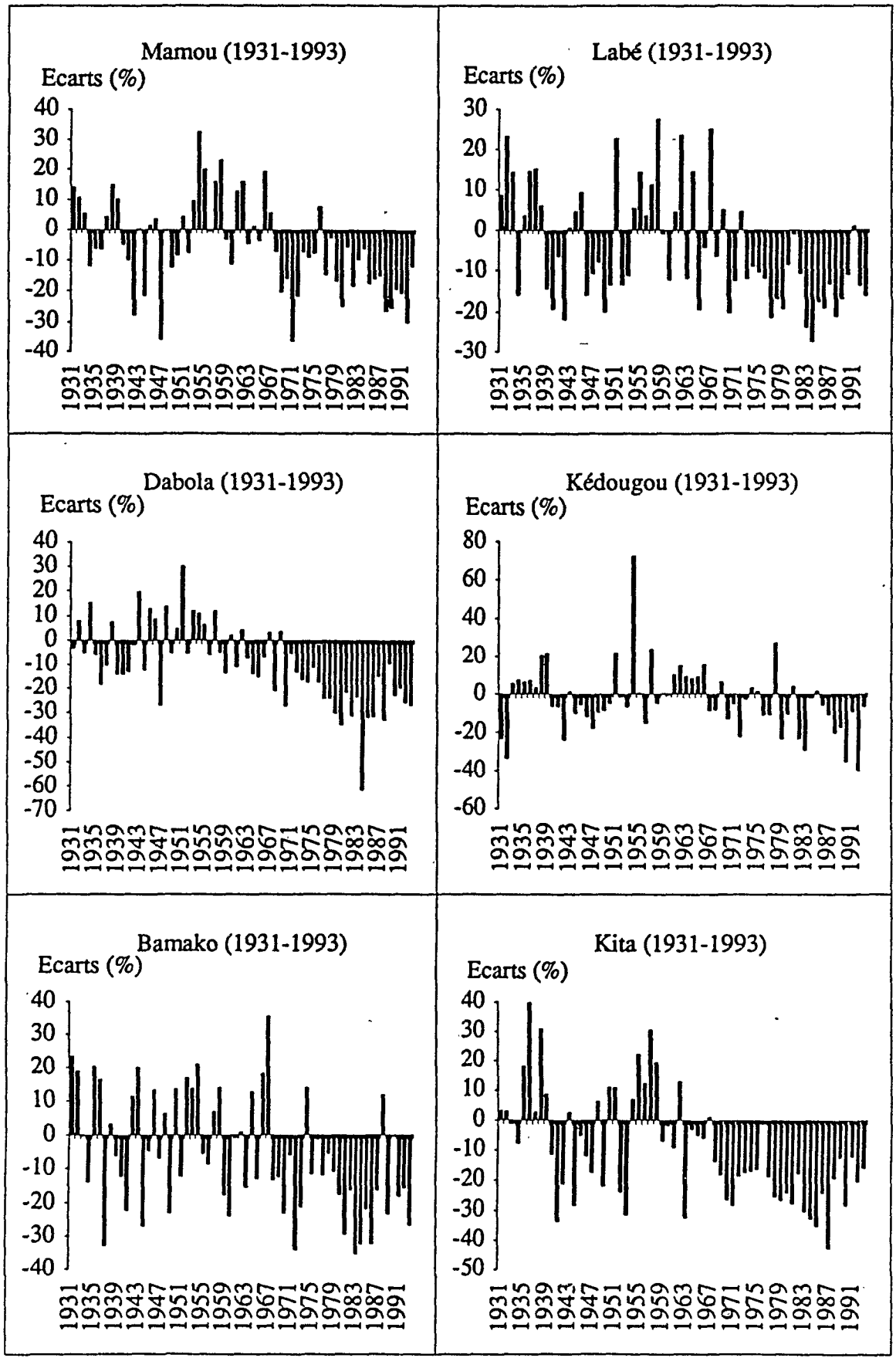


Figure 29 : Ecarts de la pluviométrie d'une année par rapport à la normale 1931-1960

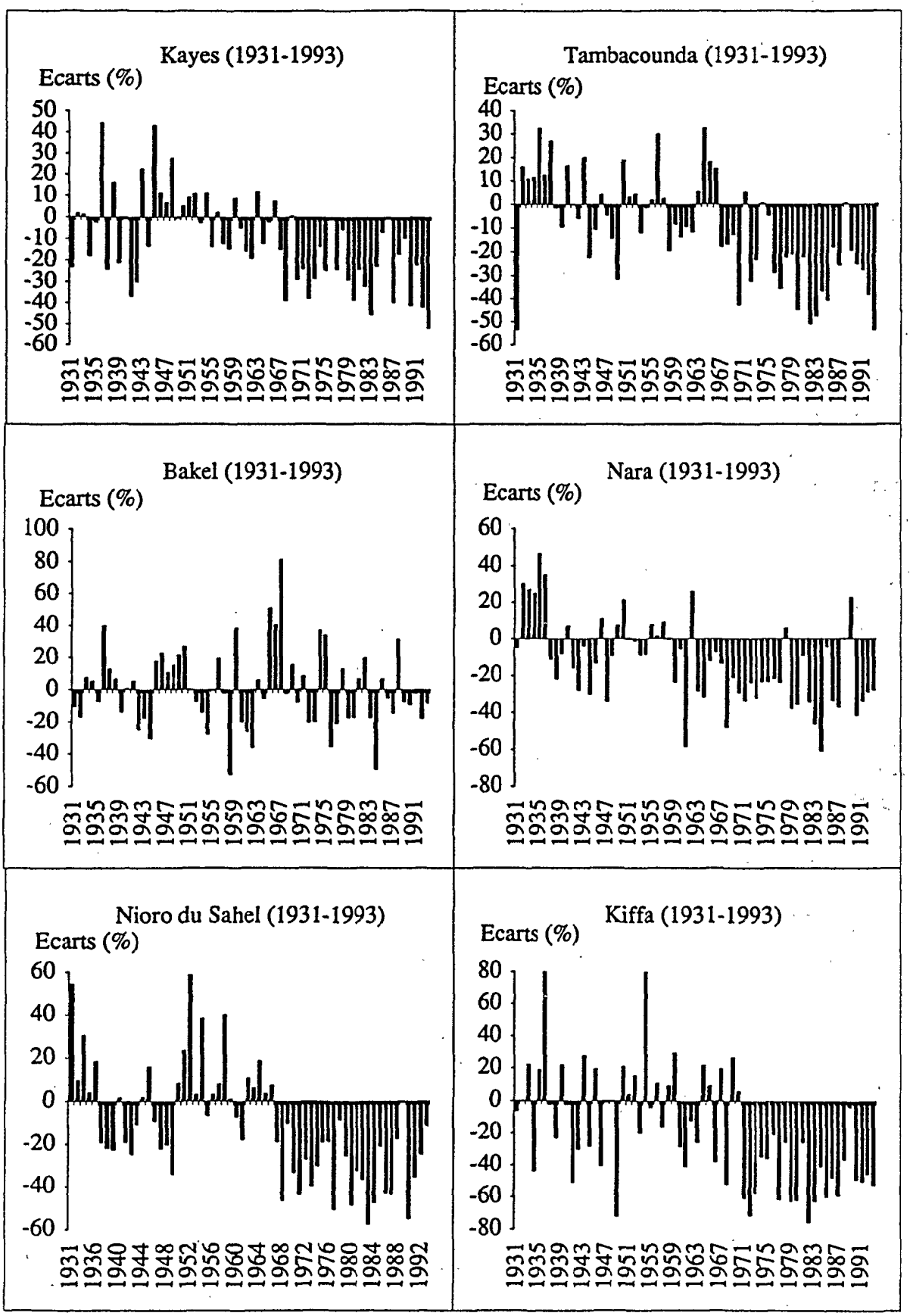


Figure 30 : Ecarts de la pluviométrie d'une année par rapport à la normale 1931-1960

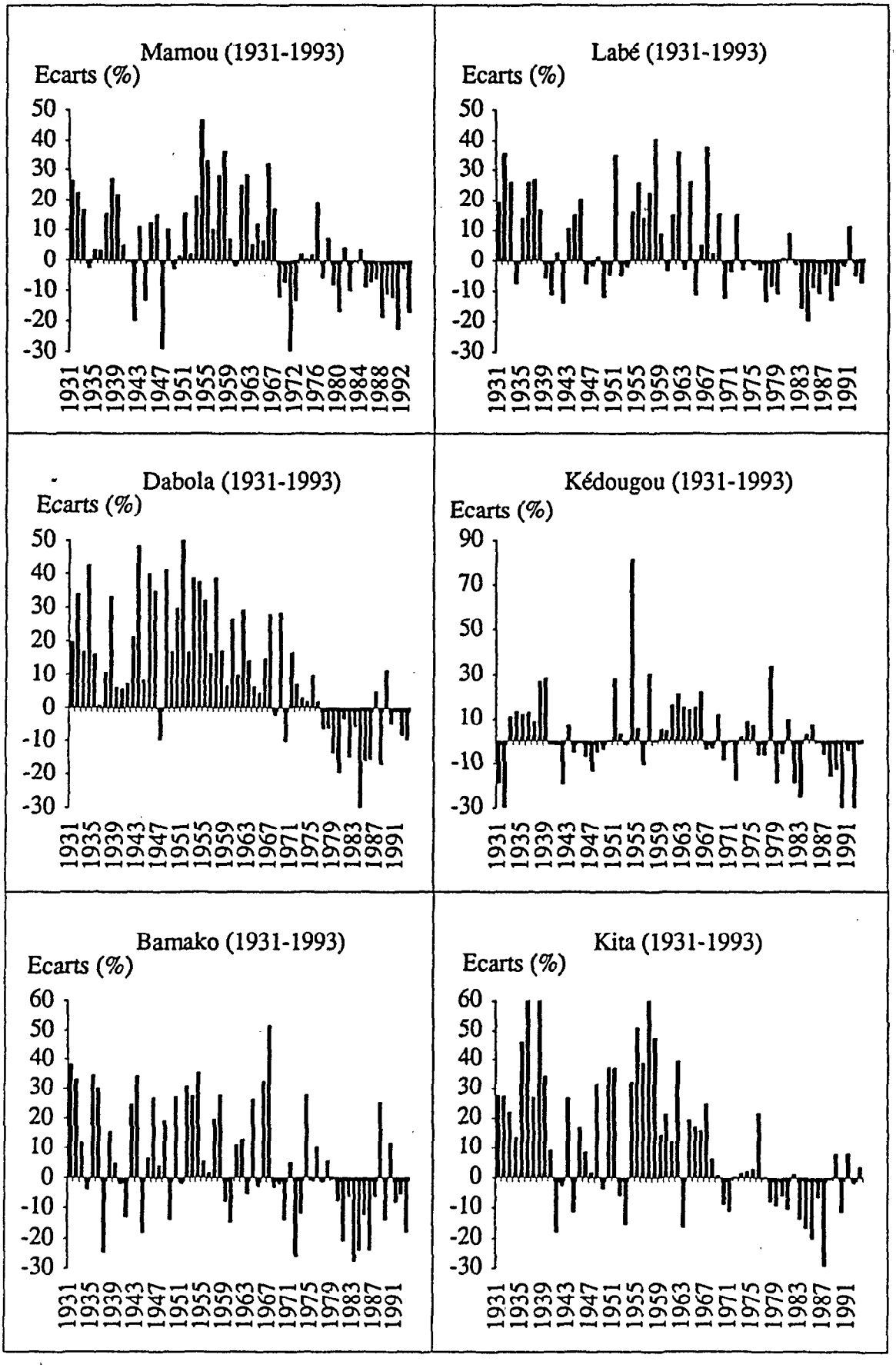


Figure 31 : Ecarts de la pluviométrie d'une année par rapport à la normale 1961-1990

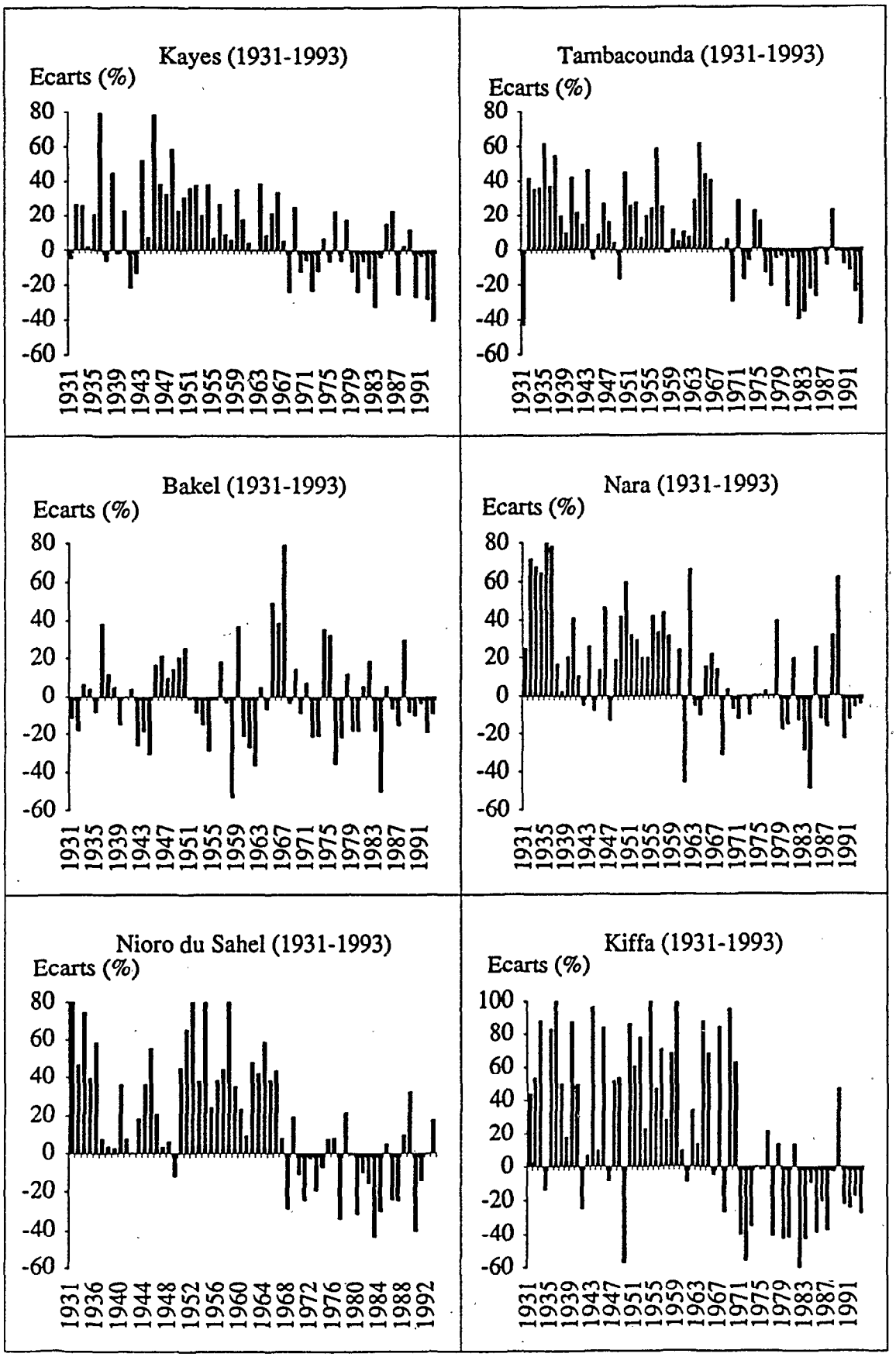


Figure 32 : Ecarts de la pluviométrie d'une année par rapport à la normale 1961-1990

1.3.1. Les pluies fréquentielles

L'étude fréquentielle des pluies des hauts bassins permet de déterminer les précipitations des années sèches et des années humides.

Pour la période 1931-1990, l'analyse des pluies fréquentielles montre l'importance de la variabilité des précipitations à partir de la durée de retour de certaines valeurs de pluies et des coefficients d'irrégularités observés.

Les pluies fréquentielles sont obtenues par la formule suivante :

$$\text{Log Pf} = \text{Log P} \pm \text{U} \times \delta$$

Pf : pluie fréquentielle recherchée,

P : la moyenne annuelle de la série

δ : l'écart type de la série

u : la variable réduite de Gauss donnée par la table de Gauss

Tableau 19 : Pluies fréquentielles à différentes stations des hauts bassins

	Période Sèche						Période humide				
	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	K_3	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
Stations	100 ans	50 ans	20 ans	10 ans	5 ans		5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Mamou	1248,9	1311,7	1410,6	1502,9	1621	1,5	2131,7	2281,9	2411,2	2562,8	2667,1
Labé	1236,8	1264,4	1311,5	1360	1428	1,3	1827,4	1981,2	2129,3	2322,3	2468,8
Dabola	1002,5	1049,8	1125,3	1197,5	1291,7	1,3	1738,1	1882,4	2012,1	2170,8	2284,7
Kédougou	783,5	813,3	869,6	931,2	1018,9	1,6	1441,4	1563,5	1665,9	1782	1859,8
Kénieba	646,2	697,1	778,8	857,1	959,3	1,6	1429,4	1574,1	1700,8	1851,1	1956,2
Tamba	316,6	376,3	465,7	545,2	641,4	2	1009,7	1106	1185,4	1274,9	1334,5
Kayes	397,3	421,1	460,1	498,2	549,4	1,8	809,8	899,4	982	1085,3	1161,1
Bakel	250,4	273,5	309,8	344,1	388	1,8	582,2	640	690,1	748,9	789,6
Kiffa	114	133,5	165,8	197,7	241,1	2,7	466,9	545,9	619	710,7	778

K_3 = coefficient d'irrégularité

Le tableau 19 présente les différentes fréquences à partir de cette variable ainsi que les fréquences de retour de certaines précipitations notées en période sèche ou humide.

Le coefficient d'irrégularité K_3 est donné par le rapport entre la pluie décennale humide et la pluie décennale sèche[7], (Y. Brunet-Moret, 1969). Dans les hauts bassins, les précipitations

[7] Les pluies fréquentielles décennales humides correspondent à la fréquence 0,90 tandis que les pluies fréquentielles décennales sèches correspondent à la fréquence 0,10.

extrêmes correspondent à la centennale humide pour la pluie maximale alors que la pluie minimale est recueillie chaque année.

Ainsi, en domaine guinéen, à la station de Mamou, le maximum enregistré (2801 mm en 1924) est exceptionnel, puisque sa récurrence est supérieure à la centennale humide qui est de 2667,1 mm. En revanche, le minimum de la période (1360 mm en 1991) est assez proche de la vincennale sèche (1410,6 mm). A Labé, le maximum pluviométrique (2118 mm en 1967) a une durée de retour qui correspond à la vincennale humide tandis que le total annuel le plus bas (1227 mm en 1984) a une récurrence de 50 ans en année sèche soit 1264,4 mm.

Le maximum pluviométrique de la station de Dabola (2180 mm en 1951) a une récurrence proche de la cinquantennale humide alors que son minimum exceptionnel de 1984 (636 mm) ne revient même pas à la centennale sèche (1002,6 mm).

A la station de Kédougou en domaine sud-soudanien, le maximum de 1954 est exceptionnel (2160 mm). Cette valeur n'est même pas atteinte pour une centennale humide. La différence (-300,2 mm) avec la centennale humide de la station (1859,8 mm) suppose que l'année 1954 soit extrêmement pluvieuse à Kédougou ou alors il s'agit simplement d'une valeur aberrante. Le minimum enregistré à la station (748,3 mm en 1992) a un retour d'un an sur cent.

A Kénieba, les valeurs extrêmes de la période (1956,2 et 646,2 mm) correspondent toutes aux centennales humide et sèche.

A Tambacounda en domaine nord-soudanien, l'année la plus humide (1223 mm en 1956) est voisine de la cinquantennale humide (1274 mm). Le minimum qui survient en 1993 (434 mm) revient une année sur vingt.

Ces valeurs extrêmes correspondent à la centennale humide (1161,1 mm) et sèche (397,3 mm) à la station de Kayes alors qu'à Bakel, le maximum de 1967 (902 mm) ne revient pas en centennale humide. Par contre, le minimum tombé à cette dernière station (317 mm en 1962) revient une année sur vingt.

En domaine sahélien, la station de Kiffa enregistre son maximum pluviométrique une année sur dix en période humide tandis que son minimum (119 mm en 1972) ne revient qu'une année sur cent en période sèche.

Ces écarts entre maximum et minimum en période humide ou sèche se reflètent sur les coefficients d'irrégularités (tab. 19). Ceux-ci sont assez élevés pour la période sur l'ensemble des stations et augmentent du sud au nord des hauts bassins.

Ainsi, les pluies fréquentielles, estimées pour la période 1931-1993 confirment l'existence de périodes humides englobant néanmoins des années sèches entre 1931 et 1960. Mais, c'est surtout l'existence de périodes sèches à partir de 1968 qui s'observent le mieux, année à partir de laquelle plus aucun module pluviométrique ne correspond à une récurrence de période humide.

1.3.2. La variabilité des pluies décennales

Le tableau 20 donne les valeurs caractéristiques de la pluviosité décennale dans les hauts bassins. On constate d'emblée, que la forte variabilité des précipitations d'une station ou d'un domaine climatique à l'autre, demeure la règle générale.

Tableau 20 : Caractéristiques de la pluviosité décennale des hauts bassins

Stations	Latitude	1931-1940	1941-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990
Mamou	10°22	2004,1	1731,2	2108	1983,8	1684,4	1642,6
Dabola	10°45	1604,4	1674,7	1746,9	1518,3	1343,3	1195,9
Labé	11°19	1754,3	1553,1	1771,4	1708,7	1491,3	1416
Kédougou	12°33	1266	1127,4	1363,3	1310,2	1182,3	1076,2
Bamako	12°38	1124	1085	1110	1093	986	888
Kénieba	12°48	-	-	1411,4	1351,1	1091,5	1076,2
Kita	13°04	1257	1017	1200,7	1039,8	930,1	841
Tamba	13°46	998,5	894,3	926,9	900,5	742,2	668,3
Kayes	14°26	765	814	782	698	606	595
Bakel	14°54	509,4	521,2	463,1	554,8	477,3	477,2
Nara	15°10	579,1	465	499,3	397,5	384,6	299
Nioro	15°14	580,3	537,4	706,8	558,2	415,4	389,1
Kiffa	16°38	447,9	354,6	459,4	384,4	211,5	224,3

Cependant, certaines similitudes peuvent apparaître au travers de décennies considérées comme humides ou sèches et qui se traduisent par une disparition, une remontée et/ou une descente des isohyètes ou leur changement de configuration (fig. 33).

1.3.2.1. La décennie 1931-1940

Elle est marquée par une pluviométrie abondante. Plusieurs stations des hauts bassins enregistrent durant cette période des totaux largement supérieurs aux normales de référence.

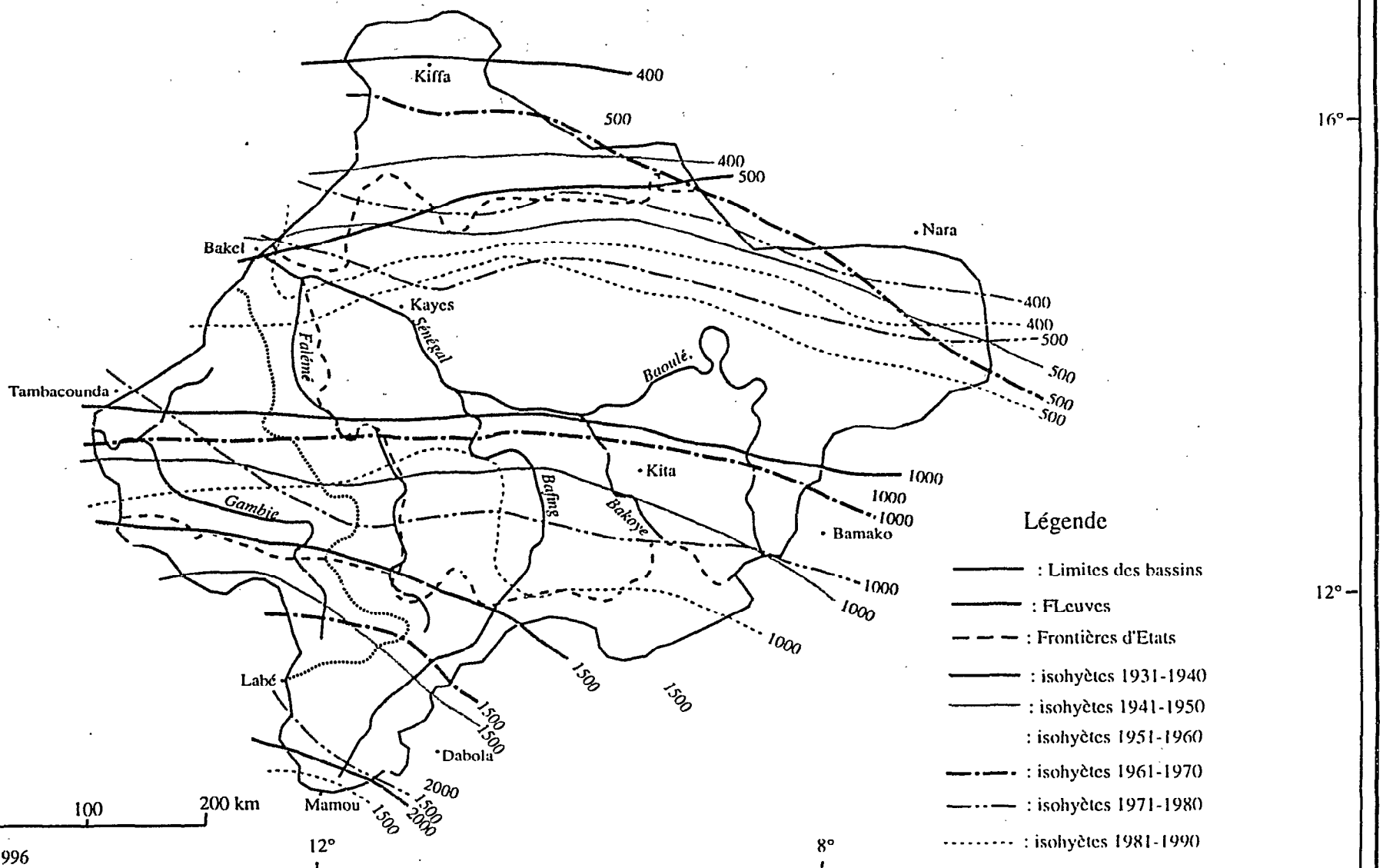
Les stations de Mamou et de Dabola totalisent respectivement 2004,3 mm et 1754,3 mm. Les excédents respectifs notés par rapport à la normale 1931-1960 sont de +2,8 % et +3,6 % tandis qu'ils atteignent +12,5 % et +12,7 % par rapport à 1961-1990.

Par contre, la station de Dabola ne totalise durant cette période que 1604,4 mm. Elle enregistre ainsi un déficit de -4,4 %.

La décennie 1931-1940 consacre en domaine sud-soudanien une pluviométrie légèrement excédentaire (+1,1 % à Kédougou, +1,5 % à Bamako).

En domaine nord-soudanien, seule la station de Kayes présente une pluviométrie normale durant cette période alors que les stations Kita, Tambacounda et Bakel sont largement excédentaires.

Figure 33 : Migration décennale des isohyètes principales de 1931 à 1990



En domaine sahélien, la station de Nioro du Sahel est déficitaire de -4,5 % tandis que les stations de Nara et Kiffa enregistrent au cours de la même période des excédents respectifs de +12,5% et de +6,4 %.

Assurément la décennie 1931-1940 inscrit les hauts bassins dans une phase de pluviométrie abondante. Certes, celle-ci n'est pas uniforme sur l'ensemble des stations mais les valeurs de déficits (relativement modérés) témoignent de cette situation. La carte des isohyètes de la période (fig. 34) situe les bassins entre les isohyètes 400 et 2000 mm. Celles-ci ont un tracé parallèle sur l'ensemble du bassin et se resserrent progressivement vers le sud. L'apparition de l'isohyète 500 mm au delà de 15°14' nord traduit une pluviométrie abondante durant cette décennie.

1.3.2.2. La décennie 1941-1950

La pluviométrie de la décennie 1941-1950 s'inscrit pratiquement en terme inverse par rapport à la décennie précédente. Toutes les stations des hauts bassins à l'exception de quelques unes (Dabola, Bakel et Kayes) enregistrent de forts déficits durant cette période.

En domaine guinéen, les stations de Mamou et Labé sont respectivement déficitaires de -11,1% et -8,2 %, tandis que Dabola enregistre une pluviométrie normale.

En domaine sud-soudanien, Kédougou et Bamako enregistrent quant à elles des déficits de -9,9 % et -11,9 %.

En domaine nord-soudanien, les stations de Kayes et Bakel enregistrent des excédents exceptionnels de +3,4 % et +2,2 % tandis que Kita, Tambacounda et Bakel sont déficitaires respectivement de -12,2 % et -17 %.

Les stations de Kiffa, Nara et Nioro du Sahel, toutes en domaine sahélien enregistrent de forts déficits : -15,6 % à Kiffa, -9,6 % et -9,3 % respectivement à Nara et à Nioro du Sahel.

La carte des isohyètes de cette période (fig. 34) consacre la disparition de l'isohyète 2000 mm et une migration des isohyètes vers le sud. Leur tracé devient plus espacé vers le nord du bassin tandis qu'au sud, les isohyètes ont tendance à plonger.

La décennie 1941-1950 inscrit les hauts bassins dans une phase pluviométrique déficitaire. Beaucoup de stations enregistrent au cours de cette période, des déficits élevés. Les stations de Bakel et Kayes, exceptionnellement excédentaires durant cette période indiquent l'irrégularité dont est sujette la pluviométrie .

1.3.2.3. La décennie 1951-1960

Cette décennie marque un retour à la normale de la pluviométrie dans les hauts bassins. Certaines stations atteignent ou dépassent même les totaux enregistrés au cours de la décennie 1931-1940.

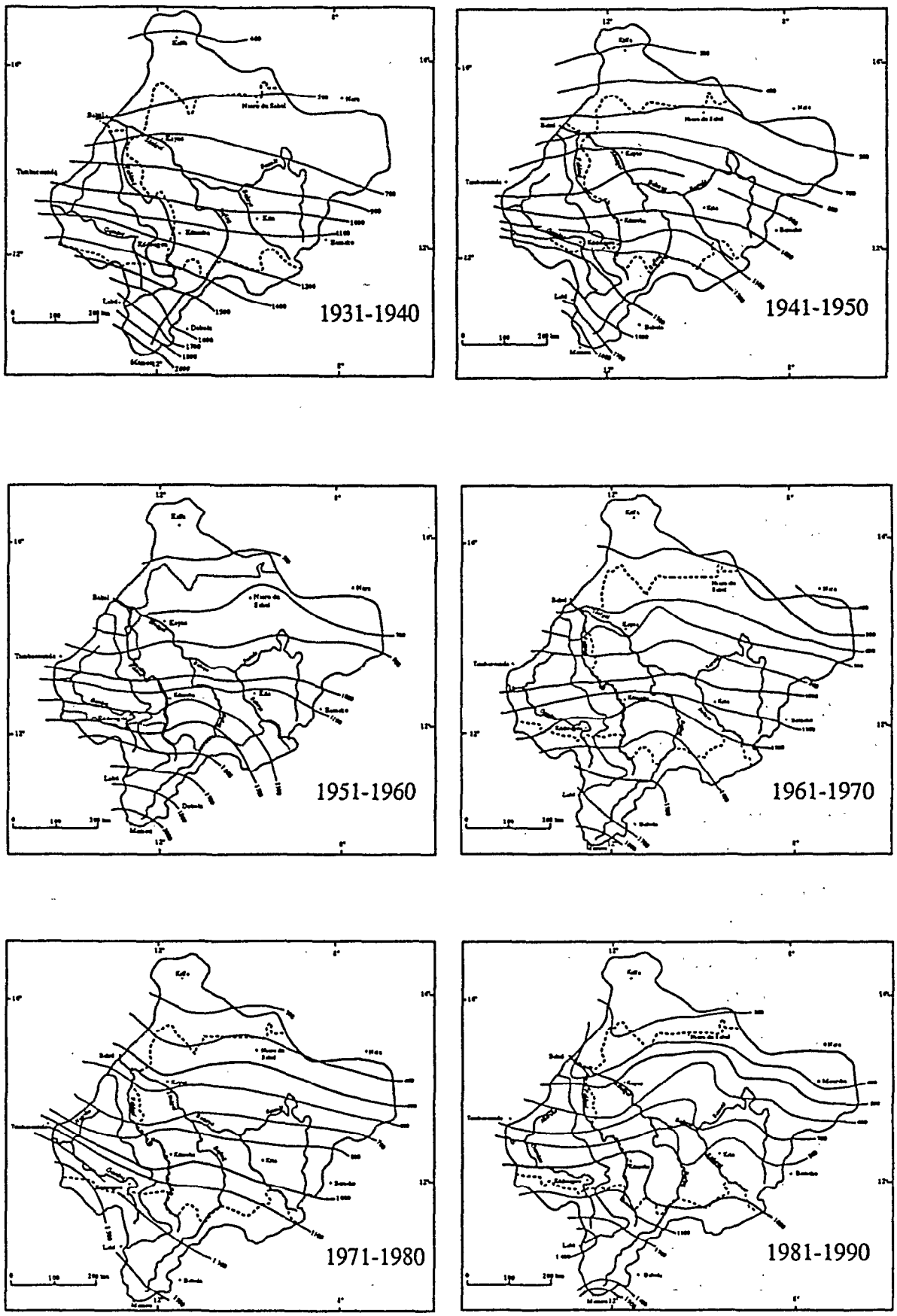


Figure 34 : Migration décennale des isohyètes dans les hauts bassins

Les stations de Mamou, Labé et Dabola sont toutes excédentaires avec respectivement +8,2 %, +4,6 % et +4,2 %.

En domaine sud-soudanien, les stations de Kédougou et Bamako enregistrent des excédents respectifs de +8,8 %, +0,3 %. Par contre en domaine nord-soudanien, une disparité existe entre les stations. Ainsi, les stations de Bakel et Kayes situées plus au nord, sont déficitaires durant cette période (-8 % à Bakel et -8,6 % à Kayes) alors que la station de Kita au sud est excédentaire de +3,6% et Tambacounda plus à l'ouest présente une pluviométrie normale.

En domaine sahélien, Nioro du Sahel et Kiffa sont excédentaires avec respectivement +16,2 % et +9,2 %, tandis que la station de Nara est déficitaire (-6,2 %).

En dépit du déficit observé à certaines stations, la période 1951-1960 est dans l'ensemble excédentaire dans les hauts bassins. La carte des isohyètes pour la même période traduit le retour de l'isohyète 2000 mm. De même, la remontée des isohyètes vers le nord est manifeste (fig. 34) avec le cantonnement de l'isohyète 500 mm au delà de 15° de latitude nord.

1.3.2.4. La décennie 1961-1970

Elle est marquée par une nouvelle baisse des précipitations avec cependant une dualité entre le sud et le nord des hauts bassins.

Ainsi, en domaine guinéen, on note à Mamou et Labé une pluviométrie normale tandis que Dabola est déficitaire (-8,4 %). Cette situation se prolonge en domaine sud-soudanien où on enregistre un excédent à Kédougou (+4,6 %) et une pluviométrie normale à Bamako.

Dans les domaines nord-soudanien et sahélien par contre, la décennie 1961-1970 se traduit par une baisse de la pluviométrie. En dehors de Bakel qui totalise à cet effet un excédent (+11,4%) toutes les autres stations sont déficitaires. Les stations de Nioro du Sahel (-8,2 %) et Nara (-22,7 %) en domaine sahélien enregistrent au cours de cette période des déficits supérieurs ou égaux à ceux de la décennie 1941-1950.

La carte des isohyètes pour la période se traduit par un reflux vers le sud des isohyètes et le cantonnement de l'isohyète 1800 mm à l'extrême sud des hauts bassins (fig. 34).

1.3.2.5. La décennie 1971-1980

Elle prolonge la baisse déjà notée au cours de la décennie précédente. Toutes les stations des hauts bassins enregistrent au cours de cette période des déficits.

En domaine guinéen, les stations connaissent les plus faibles totaux jusque-là jamais égalés. Ainsi, Mamou et Labé enregistrent des déficits respectifs de -13,5 % et -11,9 % tandis qu'à Dabola, le déficit atteint -19,8 %. Ces déficits se prolongent en domaine sud-soudanien où les stations de Kédougou et Bamako sont déficitaires respectivement de -5,5 % et -16,4 %.

La partie septentrionale des hauts bassins, déjà la moins pourvue en pluie, connaît au cours de cette période des déficits extrêmes. En domaine nord-soudanien, les stations de Kita et

Tambacounda enregistrent des déficits records, avec respectivement -19,7 % et -40,7 %. Ces déficits sont prononcés à Kayes avec -27,1 % et sont de -4,1 % à Bakel.

En domaine sahélien, toutes les stations enregistrent de forts déficits. Ils sont ainsi de -31,6% à Nioro du Sahel, -25,2 % à Nara tandis que Kiffa atteint son déficit record avec -49,7 %. En fait, c'est à un véritable recul pluviométrique auquel on assiste au cours de cette décennie.

La carte des isohyètes de la période situe les hauts bassins entre les isohyètes 1500 et 300 mm. La translation des isohyètes vers le sud déjà notée au cours de la décennie précédente se trouve fortement accrue (fig. 34).

Ainsi, l'isohyète 500 mm se trouve au dessous de 14° nord et accuse une descente de plus de 200 km alors que l'isohyète 1000 mm décroît d'environ 100 km.

1.3.2.6. La décennie 1981-1990

La tendance à la baisse de la pluviométrie déjà évoquée au cours des deux décennies précédentes atteint durant cette période une phase chronique. Le fait le plus inquiétant n'est plus le déficit des stations, mais les valeurs records qui sont atteintes. Sur l'ensemble des hauts bassins, la péjoration pluviométrique est uniforme avec une intensité jusque-là insoupçonnée.

Les stations du domaine guinéen enregistrent même des déficits records. A Mamou, station la plus arrosée des hauts bassins, le déficit est de -15,7 % alors qu'il atteint -16,3 % à Labé. La station de Dabola enregistre quant à elle un déficit record de -28 %. C'est un fait grave, eu égard à l'importance du domaine guinéen qui totalise en pluviométrie normale les 1/3 de la lame d'eau reçue dans les hauts bassins.

Ces déficits extrêmes sont aussi notés au fur et à mesure que l'on va vers le nord des hauts bassins. Les stations de Kédougou et de Bamako en domaine sud-soudanien enregistrent un même déficit de -9 %.

En domaine nord soudanien, Kita et Tambacounda atteignent leur record avec -8,2 % et -28,8 %. Par contre, aux stations de Kayes et Bakel les déficits notés (-28,5 % et -4,1 %) sont inférieurs à ceux des épisodes secs de 1890 et de 1910 à Kayes et à la sécheresse exceptionnelle de la décennie 1951-1960 à Bakel.

Les valeurs records de déficits, atteintes au cours de la décennie 1981-1990 traduisent le caractère croissant de la péjoration pluviométrique notée dans les hauts bassins deux décennies auparavant. Malgré la variabilité des déficits qui tendent à se réguler, c'est surtout l'intensité du phénomène, son extension et sa durée qui retiennent l'attention avec un constat général : le manque cruel d'eau à travers toute la région. La carte des isohyètes pour la période (fig. 34) schématise bien cette situation. Elle consacre la disparition du domaine guinéen des hauts bassins et une nouvelle répartition de la région en trois domaines :

- un domaine sud-soudanien compris entre 1500 mm (extrémité sud) et 1000 mm,
- un domaine nord-soudanien, assez étendu et compris entre 1000 mm et 500 mm,
- un domaine sahélien fluctuant entre les isohyètes 500 mm et 200 mm.

L'évolution des précipitations à l'échelle annuelle comme décennale se traduit par une forte variabilité. Ces fluctuations des totaux annuels et décennaux peuvent aussi être notés à travers les variations mensuelles de la pluviométrie.

1.3.3. La variabilité mensuelle des précipitations

Les précipitations enregistrées dans les hauts bassins connaissent une variabilité mensuelle qui se traduit par une fluctuation du maximum pluviométrique.

Comme le montre le tableau 21, le décompte du nombre de fois qu'apparaît le maximum montre que ce sont les mois de juillet et de septembre qui, pour la plupart des cas se partagent la place du maximum avec le mois d'août.

Tableau 21 : Fréquences d'apparitions du maximum pluviométrique depuis l'origine des mesures

Stations	séries	Juillet	Août	Septembre	Octobre
Mamou	71 ans	08	48	14	01
Labé	71 ans	18	38	14	01
Dabola	72 ans	09	43	18	02
Kédougou	75 ans	11	42	22	-
Kénieba	52 ans	10	33	08	01
Bamako	73 ans	12	53	07	01
Kita	63 ans	09	47	07	-
Tambacounda	71 ans	15	39	17	-
Kayes	93 ans	16	66	11	-
Bakel	76 ans	13	47	16	-
Nara	64 ans	15	47	02	-
Nioro du Sahel	73 ans	15	52	06	-
Kiffa	71 ans	10	48	13	-

Ainsi, en domaine guinéen, on assiste à un étalement du maximum pluviométrique du fait que la mousson souffle plus longtemps dans cette région. Cependant, c'est le mois d'août qui concentre partout le maximum d'observations.

D'autre part, on remarque que plus on progresse vers le nord où les modules pluviométriques annuels sont les plus faibles, plus le mois d'août est prédominant.

L'analyse des coefficients de pluviosité, tout en indiquant une grande variabilité mensuelle, confirme que c'est le mois d'août qui est le plus arrosé (tab. 13, 14 et 15).

Ces observations sont confirmées par le tableau 22. Le mois d'août concentre partout des valeurs supérieures à la moyenne, même si pour certaines stations, Tambacounda et Nara

notamment, les mois de juillet et de septembre enregistrent des fréquences importantes. Ces trois mois représentent du reste plus de la moitié des précipitations reçues dans les hauts bassins.

Tableau 22 : Valeurs relatives du maximum pluviométrique en pourcentage (période 1931-1993)

Stations	Juillet	Août	Septembre	Octobre
Mamou	12,6	69,8	15,8	-
Labé	25,3	53,9	20,6	-
Dabola	14,2	60,3	23,8	3,1
Kédougou	15,8	57,1	26,9	-
Bamako	17,4	69,8	11,1	1,5
Kita	14,5	75,8	11,2	-
Tambacounda	22,2	55,5	20,6	-
Kayes	17,4	69,8	12,6	-
Bakel	17,7	59,6	24,1	-
Nara	23,8	73	3,1	-
Nioro du Sahel	20,9	67,7	9,6	-
Kiffa	14,5	66,1	19,3	-

La variation mensuelle des précipitations est plus quantitative que temporelle, le mois du maximum pluviométrique étant souvent stable. Cependant, qu'elle soit précoce (juillet) ou tardive (septembre ou octobre), la place du maximum est surtout fonction de la durée de la saison pluvieuse et de l'importance du nombre de jours de pluies. Ces précipitations journalières augmentent du nord au sud des hauts bassins conformément aux modules pluviométriques annuels moyens (fig 27 et 28). Le nombre de jours de pluie est ainsi de 27 jours à Kiffa, 45 jours à Nioro du Sahel, 57 jours à Kayes. Il est de 74 jours à Kita, 82 jours à Kénieba et atteint 122 jours à Labé (C. Rochette, 1974 ; D. Orange, 1992).

2. L'ABONDANCE PLUVIOMETRIQUE MOYENNE

L'abondance pluviométrique ou la lame d'eau moyenne reçue correspond aux précipitations qui alimentent l'écoulement avec pour effet à court ou à long terme la genèse de crues. Plusieurs méthodes permettent, à partir des postes pluviométriques installés dans un bassin, de la déterminer : la moyenne pondérée des surfaces, la méthode des isohyètes par planimétrage et la méthode de Thiessen. C'est cette dernière méthode que nous retenons car elle permet outre l'estimation de la lame d'eau reçue, d'évaluer l'aire d'influence de chaque station.

2.1. La lame d'eau reçue par la méthode de Thiessen*

L'application de cette méthode requiert un réseau pluviométrique assez dense pour que les postes pluviométriques puissent être reliés entre eux par une ligne droite. On trace ensuite au centre de chaque droite une perpendiculaire de façon à obtenir un polygone que contrôle un poste pluviométrique (fig. 35). La superficie de chaque polygone est obtenue par planimétrage, puis elle est multipliée par la pluie moyenne du poste qui le contrôle et est divisée par la superficie du bassin.

Tableau 23 : Lame d'eau reçue par la méthode de Thiessen

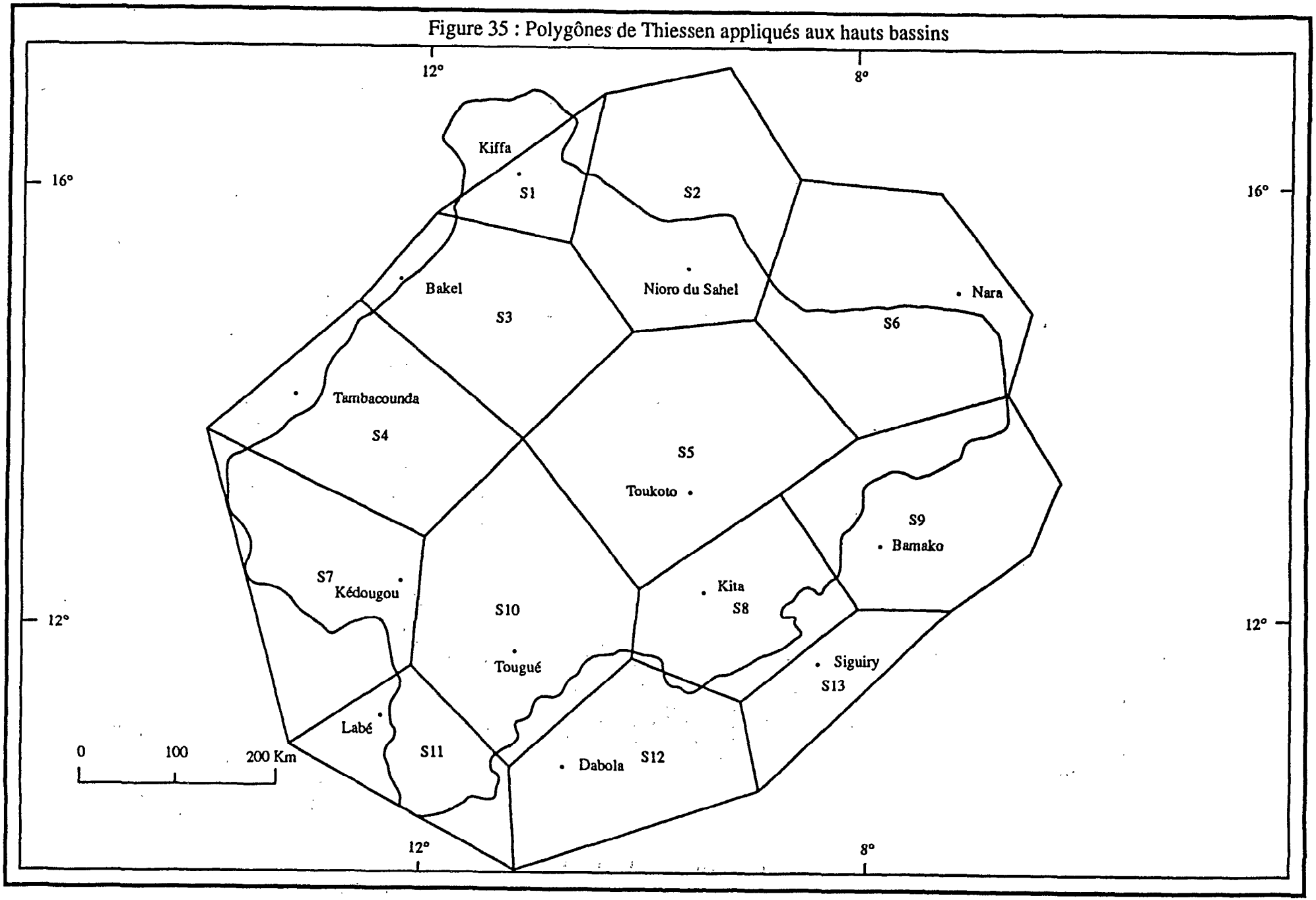
Stations	Pluie moyenne (mm)	Aire contrôlée (km^2)	Pluie pondérée (mm)
Kiffa (s^1)	340,4	9 000	8,1
Nioro du Sahel(s^2)	528	43 200	60,7
Bakel (s^3)	498	37 600	49,8
Tambacounda (s^4)	841,2	29 000	64,9
Toukoto (s^5)	836,5	28 600	63,6
Nara (s^6)	444,7	43 200	51,1
Kédougou (s^7)	1211	33 400	107,6
Kita (s^8)	1043,9	23 000	63,9
Bamako (s^9)	1039,7	39 800	110,1
Tougué (s^{10})	1523,5	28 200	75,4
Labé (s^{11})	1612	18 600	79,8
Dabola (s^{12})	1501,9	28 400	113,5
Siguiri (s^{13})	1249	13 600	45,2
		375 600	893,7

Le résultat ainsi obtenu (tab. 23) représente la pluie pondérée de chaque aire par rapport à la surface totale du bassin. La somme de ces pluies pondérées sur l'ensemble des stations du bassin représente la lame d'eau moyenne reçue par le bassin (J. Llamas, 1985).

Le tableau 23 donne les résultats de cette méthode ainsi que la lame d'eau moyenne des hauts bassins. Elle est ainsi de 893,7 mm pour la période 1931-1993. Ce total semble satisfaisant

* Née dans les plaines d'Allemagne du nord, la méthode de Thiessen assimile l'espace géographique à une surface bien plate et trace les isohyètes comme si la pluviométrie évoluait régulièrement entre deux stations quel que soit le relief régional, son orientation et son gradient. Cette conception de la méthode la rend difficilement applicable pour les régions accidentées.

Figure 35 : Polygônes de Thiessen appliqués aux hauts bassins



au regard de la superficie obtenue par planimétrage. Mais cette méthode connaît des limites du fait que l'aire de certaines stations peut déborder du bassin versant (fig. 35).

La lame d'eau moyenne reçue détermine donc l'écoulement dans les hauts bassins. Son importance et sa variation favorisent l'apparition de phénomènes particuliers à l'écoulement comme les crues et les étiages.

L'évolution de la pluviométrie des hauts bassins se traduit par un fait propre à la zone intertropicale, la variabilité des précipitations. Lorsqu'elle est temporelle, cette variabilité s'apparente soit à la différence des totaux interannuels ou décennaux soit à la position du maximum pluviométrique mensuel. Dans l'espace, cette variabilité est beaucoup plus nette puisqu'elle se traduit par une baisse des totaux du sud au nord des hauts bassins. Cette variabilité des précipitations peut aussi être saisie à travers les pluies fréquentielles. La récurrence de certains totaux et les périodes auxquelles elle correspond permettent de mieux connaître l'évolution temporelle et spatiale de la pluviométrie. Ces différentes variations affectent aussi la lame d'eau reçue par les hauts bassins et déterminent la nature de l'écoulement des cours d'eau. Mais outre la variabilité, l'évolution de la pluviométrie des hauts bassins indique surtout une baisse continue des pluies enregistrées. Cette péjoration pluviométrique quasi généralisée à partir des années 1960 est assez préoccupante. C'est par elle que nous terminons l'analyse de la pluviométrie en raison du rôle hydrologique des hauts bassins et de la durée exceptionnelle de la sécheresse.

CHAPITRE 4

LA PEJORATION PLUVIOMETRIQUE RECENTE ET SES MANIFESTATIONS

Les précipitations des hauts bassins ont pour caractéristique générale leur variabilité. A l'échelle temporelle comme spatiale, cette évolution montre une succession d'années sèches et d'années humides. Ainsi, dans le temps, nous assimilons ces ensembles d'années humides ou sèches à des périodes excédentaires ou déficitaires. Ces dénominations incitent toutefois à la prudence en raison de la notion relative de l'excédent ou du déficit sur une échelle de temps donnée.

Dans l'évolution des pluies annuelles, une succession relativement longue d'années à forte pluviosité correspond à une période excédentaire. Une suite d'années déficitaires est assimilée à une période déficitaire (A. A Sow, 1984).

Dans l'analyse des périodes excédentaires ou déficitaires, au-delà du phénomène propre, ce sont les particularités qui retiennent l'attention. Ainsi, certaines années peuvent être extrêmement pluvieuses : 2801 mm en 1924 à Mamou, 2118 mm en 1967 à Labé, 2180 mm à Dabola en 1951. De même, pour les périodes déficitaires, certains totaux peuvent être faibles, voire insignifiants au regard de la moyenne (636 mm en 1984 à Dabola pour une moyenne de 1506 mm, 434 mm en 1993 à Tambacounda pour une moyenne de 820,4 mm).

Ces périodes déficitaires plus connues sous le nom de sécheresse ont déjà fait l'objet de plusieurs études (J. Sircoulon, 1976 ; C. Toupet, 1979, 1980, 1993 ; J.C. Olivry, 1982 ; A. A. Sow et H.M. Lô, 1984). Nous n'étudions cependant que les manifestations de la période récente en raison de ces caractères confirmés par les auteurs précédents à savoir sa durée, son intensité et son extension.

1. GENESE ET EVOLUTION DU CONCEPT DE SECHERESSE

L'apparition des périodes de déficit pluviométrique a de tout temps marqué l'imagination populaire africaine. Du reste, l'apogée et le déclin des grands empires sahéliens sont souvent corrélés aux périodes d'abondance et de déficit pluviométriques (A. Gado Boureima, 1988).

Cependant, s'il est relativement aisé de reconnaître les phases d'extrêmes climatiques à partir de faits et de chronologies historiques (S.E. Nicholson, 1981 ; A. Gado Boureima, 1988), il est tout autant difficile de retenir une définition qui recueille l'assentiment de tous.

C'est parce que la notion de sécheresse intéresse de manière diverse plusieurs spécialités que sa conception est très variable. Pour le climatologue, le total de pluies annuelles en dessous de la normale ou d'un indice quelconque, est considéré comme déficitaire. Son prolongement dans le temps amène alors à parler de sécheresse. Cette situation peut ne pas être assimilée à une sécheresse pour l'hydrologue si les précipitations reçues dans le temps sont suffisamment fortes pour engendrer un écoulement satisfaisant.

Ces difficultés de trouver une définition qui convienne aux différentes spécialités nous amènerons dans notre analyse hydrologique, à chercher une relation entre péjoration pluviométrique et sécheresse hydrologique. Seulement, l'évolution climatique récente, par ses manifestations, nécessite une définition succincte pour éviter des amalgames de terminologie possibles entre sécheresse, désertification, aridification et désertisation .

Ainsi, C. Toupet et P. Michel, (1979) définissent la sécheresse comme "un phénomène accidentel de durée variable marquée par un déficit anormal en eau, entraînant une rupture des équilibres naturels, une désorganisation de l'aménagement du pays, une baisse considérable de la production vivrière et des bouleversements sociaux qui peuvent être irréversibles".

Pour Dregne, (1977), la désertification est l'appauvrissement d'écosystèmes arides, semi-arides, ou semi-humides sous les effets combinés des activités humaines et de la sécheresse. Une pareille définition ne saurait en tout état de cause, du moins pour l'instant, s'appliquer au contexte climatique des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie.

C. Toupet, (1984), tranche le débat car si le terme désertification est d'un usage courant, il recouvre plusieurs définitions qu'il convier de différencier. Cet auteur distingue :
- le dessèchement qui traduit une succession de sécheresses de plus en plus fréquentes et sévères,
- l'aridification qui marque la tendance d'un climat vers une forte aridité,
- et la désertification qui marque la tendance strico-sensu qui signifie l'extension de paysages désertiques.

Mais, si ces termes se sont généralisés aujourd'hui, la sécheresse récente n'est que la suite d'une longue liste de sécheresses qui ont jalonné l'histoire du Sahel. Cette tendance au dessèchement peut être décelée à partir des pulsations climatiques du Quaternaire récent. En effet, cette période est marquée par des phases, humide (Inchirien) et sèche (Ogolien), qui permettent de mieux comprendre l'histoire climatique du Sahel. L'étude des paléoclimats nous permettra de mieux entrevoir ces fluctuations.

Les mouvements de populations sont aussi une source qui retrace l'évolution historique de la sécheresse. C. Toupet, (1963, 1966) montre que la disparition de la civilisation Gangara (ancêtres des *Soninké*) serait liée aux effets de la sécheresse. Les vestiges retrouvés sur les plateaux du Tagant et de l'Assaba qu'occupaient ces populations (nombreux villages de pierres, et des champs à murettes et terrassettes) montrent bien que ces peuples vivaient d'une agriculture pluviale.

En effet, les territoires Gangara rappellent bien les formes d'aménagements des plateaux soudaniens recevant une pluviométrie annuelle avoisinant 450 à 500 mm comme sur le plateau dogon et la falaise de Bandiagara. La migration des Gangara est donc liée à "une oscillation climatique négative depuis le Moyen Age, de quelques 200 mm, soit un décalage d'environ 200 km vers le sud si l'on se réfère à leur espacement actuel" S. Daveau, (1963).

Aussi, nous retenons avec J. Sircoulon, (1982), que s'il est "commode d'exprimer la sécheresse sous la forme d'un déficit en eau disponible, en privilégiant le paramètre précipitation", les pluies ne sont que l'amont des autres paramètres de l'eau tels que les fleuves, les rivières.

J. Sircoulon, retient pour la période instrumentale en Afrique intertropicale trois phases de sécheresse pluviométrique :

- Une période sèche de 1910 à 1916, remarquablement sévère et étendue, qui se fait sentir jusqu'au bassin du Congo,
- Une période sèche de 1940 à 1949 se présentant par groupe d'années sans affecter tout le Sahel,
- Une période sèche de 1968 à nos jours, la plus intense de toutes les trois.

Mais si les périodes de sécheresse sont connues, il n'en demeure pas moins que la recherche des causes oppose encore les spécialistes. A l'éventail des hypothèses avancées, on peut retenir :

- Les causes locales, parmi lesquelles les interactions entre climat et environnement sont les plus retenues. Dans cette optique, l'action anthropique, même modeste semble avoir beaucoup d'impacts sur le phénomène.

Tableau 24 : Mécanismes de feed back (rétro-action) permettant aux modifications des caractères du sol provoquées par la sécheresse de la renforcer (S. E. Nicholson, 1982).

Modification provoquée par la sécheresse	Mécanisme de feed back	Paramètre de feed back
Albédo (du sol) causé par : - la disparition de la végétation - l'assèchement du sol - la transformation des propriétés du sol	Bilan radiatif	Formation de nuages/d'orages
Température du sol	Evaporation Mouvement ascendant	Humidité de l'atmosphère Energie pour les orages
Variations thermiques - en fonction de l'altitude - en fonction de la distance par rapport au désert	Mouvements ascendants Stabilité des jets streams Puissance des jets streams	Formation de nuages/orages Mouvement des orages
Humidité du sol	Evaporation, Condensation dans l'air	Humidité de l'atmosphère Energie pour les orages
Destruction de la végétation	Nuclei de glace	Formation de nuages

La panoplie de toutes ces hypothèses se retrouve dans les mécanismes du "feed back". Cette théorie se fonde sur des systèmes d'auto-alimentation qui font que la modification d'un paramètre se répercute sur le climat qui en retour aggrave plus encore le paramètre. Le tableau 24 nous donne un exemple d'un feed back (rétro-action) de la sécheresse conçu par S. E. Nicholson, (1982).

Une telle conception des faits privilégie ainsi les phénomènes locaux. L'action anthropique, à travers le déboisement, les feux de brousse et autres activités humaines en rapport avec le milieu naturel (surpâturage) sont ainsi tenus comme responsable de la sécheresse. Mais dans le cas du Sahel, si l'action anthropique, il est vrai, a contribué à accentuer le phénomène, elle ne peut en aucun cas expliquer la tendance générale de la sécheresse observée.

Cependant ces différentes hypothèses sont encore à l'état théorique et ne requièrent pas une adhésion commune.

D'autres spécialistes voient dans la sécheresse des causes planétaires liées à l'interaction et/ou au dynamisme des mécanismes cosmiques, planétaires ou atmosphériques. Dans cet ordre d'idée, on retient :

- Une modification d'ensemble des mécanismes climatiques qui explique la vaste extension géographique des phases de sécheresse ou d'humidité (J. C. Olivry. , 1982);
- Les échanges énergétiques, cosmiques et planétaires qui, par fluctuation, imposent les phénomènes de sécheresse ou d'inondation (R. Garnier, 1973).
- Le dynamisme des échanges méridiens qui, par hémisphères géographiques interposés, mettent en relation les différents phénomènes climatiques (M. Leroux, 1980, 1992, 1993).

Nous reviendrons plus en détail sur cette dernière hypothèse pour mieux saisir la dynamique de la sécheresse récente.

Ces différentes hypothèses posent le problème à partir duquel une période peut être considérée comme sèche ou inversement. Le recours aux indices annuels (S.E. Nicholson, 1989) ou aux écarts moyens que nous utilisons restent encore les meilleurs indicateurs des périodes de péjoration pluviométrique.

1.1. La sécheresse récente déterminée par la méthode des quintiles

La variabilité des précipitations fait qu'une période déficitaire ou excédentaire ne suffit pas pour définir une phase humide ou sèche. Ainsi, pour l'analyse de la sécheresse récente, nous utilisons la méthode des quintiles.

Cette méthode subdivise une série pluviométrique classée par ordre croissant en cinq tranches. Chaque groupe représente 20 % de la population de données de la série d'observation. Les valeurs limites 1 et 4 excluent les quintiles "très déficitaires" et "très excédentaires" et délimitent les trois quintiles centraux qui représentent 60 % des observations. Ceux-ci sont bien regroupés autour de la moyenne et leur calcul s'effectue par la moyenne des deux valeurs inférieure et supérieure les plus proches.

Le seuil 2 représente la valeur en dessous de laquelle une période est dite "déficitaire" ou "très déficitaire", tandis que le seuil 3 correspond à la valeur au-dessus de laquelle une période est dite "excédentaire" ou "très excédentaire". L'intervalle compris entre les seuils (2 et 3) correspond à la période dite normale.

Le tableau 25 présente ainsi pour chaque station les valeurs limites qui déterminent les différentes phases pluviométriques. La figure 36 reproduit schématiquement la classification des quintiles à travers les variations interannuelles de la période 1961-1993 dans trois stations des hauts bassins.

Tableau 25 : Quintiles (en mm) et écart moyen (en %) pour la période 1961-1993

	Record inférieur	Valeur limite 1		Valeur limite 2		Valeur limite 3		Valeur limite 4		Record supérieur
Stations	mm	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm
Mamou	1238	1558,2	-10	1632,5	-6	1781,5	+2	1883,5	+8	2324
Labé	1227	1366,5	-11	1459,5	-5	1506	-2	1645	+7	2118
Dabola	636	1188,5	-12	1277,5	-5	1386	+3	1495,5	+11	1747
Kédougou	748	1013	-14	1136,5	-3	1217	+4	1367	+16	1595
Bamako	712	848,5	-13	922	-6	969	-1	1099	+12	1500
Kénieba	634	925	-18	1030	-9	1144	+2	1323	+17	1666
Kita	661	833	-11	896,5	-5	949,5	+1	1030,5	+10	1306
Tamba	433,8	583,5	-22	700	-7	761,5	+1	918	+22	1246
Kayes	375	483	-22	592,5	-4	642	+4	734	+19	880
Bakel	250	401	-19	452,5	-9	483	-3	585,5	+18	903
Nara	199	326	-16	348,5	-10	390	+1	458,5	+25	648
Nioro	255	340,5	-25	404,5	-11	482,5	+6	548	+20	721
Kiffa	100	170,5	-37	220	-18	262	-3	349	+30	534

Les quintiles se combinent souvent avec l'écart moyen obtenu par l'expression :

$$E_m = P_i\text{-}P_m/P_m \times 100,$$

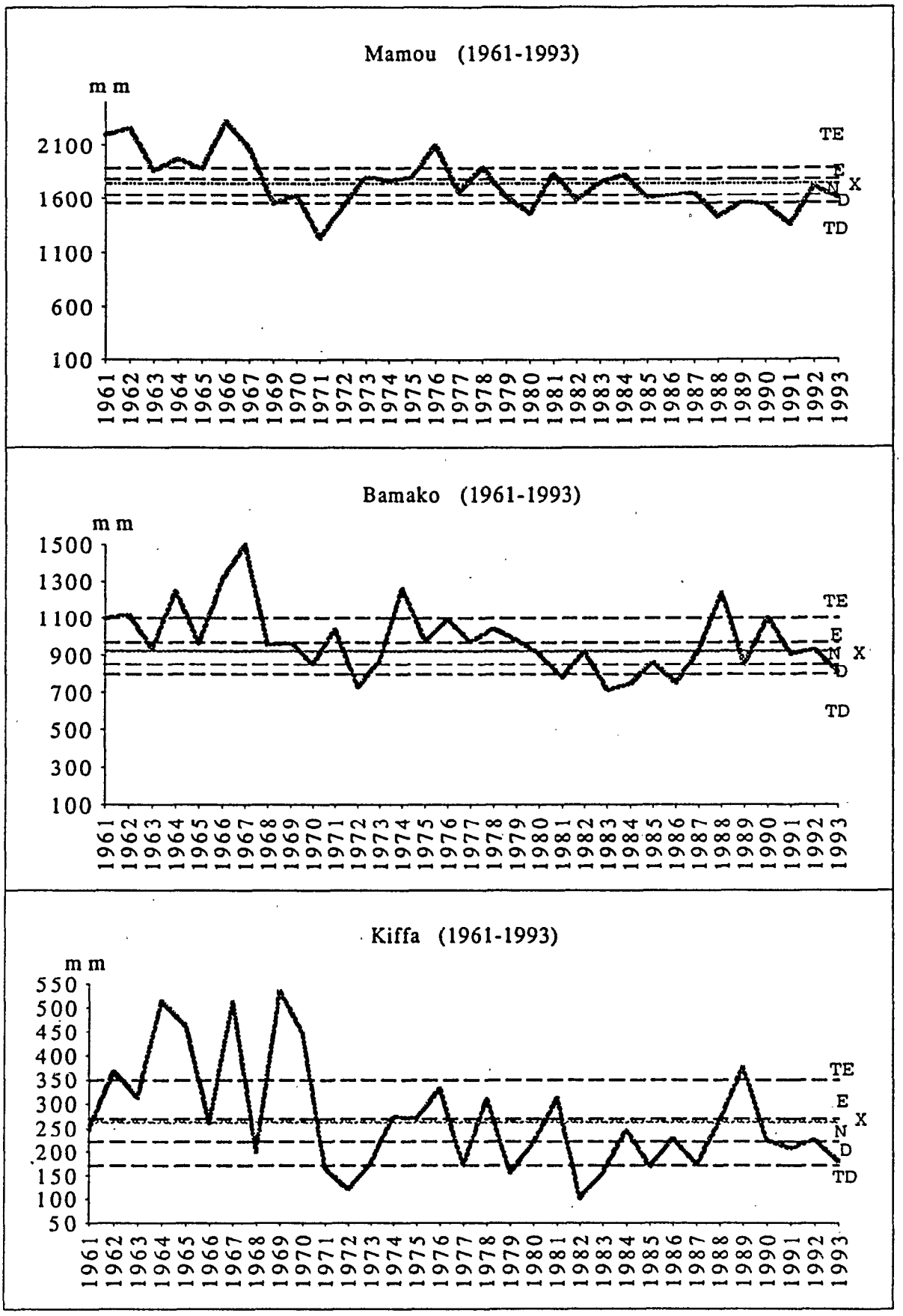
E_m = Ecart moyen,

P_i = module pluviométrique annuel,

P_m = moyenne pluviométrique de la série.

L'écart moyen négatif qui correspond à la valeur limite 2 pour chaque station est considéré comme le seuil de sécheresse. En revanche, l'écart moyen positif donné par le rapport de la valeur limite 4 représente le seuil d'une année dite "excédentaire" (tab. 25). Toutefois, une sécheresse ou une phase humide suppose que la valeur de l'écart moyen (positive ou négative) puisse s'inscrire dans un long terme en raison de l'irrégularité de la pluviométrie.

Les seuils ainsi définis pour chaque série pluviométrique sur la période 1961-1993 (tab. 25) permettent ainsi d'identifier les périodes excédentaire, déficitaire, normale, à chaque station à travers les domaines climatiques.



– – – – – – : Valeurs limites des quintiles ——— X : Moyenne annuelle

——— : Précipitations annuelles

TE : Très excédentaire N : Normale TD : Très déficitaire

E : Excédentaire D : Déficitaire

Figure 36 : Variations interannuelles des précipitations et seuils limites des quintiles à trois stations des hauts bassins

Les valeurs limite 2 appliquées à la méthode de l'écart moyen ci-dessus défini permettent de dégager pour chaque station un déficit en pourcentage considéré comme le seuil de sécheresse.

Pour cette période, le seuil de sécheresse en domaine guinéen est compris entre -5 et -6% (tab 25). La station de Mamou détient le seuil le plus élevé avec -6 % alors que la station de Dabola a un seuil négatif de -5 %. La station de Labé, se situe dans la même fourchette avec un seuil négatif de -5%.

En domaine sud-soudanien, l'écart moyen négatif est plus variable puisqu'il est compris entre -3 et -9 %. Le seuil de déficit est ainsi plus fort à Kénieba (-9 %) alors qu'il est respectivement de -3 % à Kédougou et -6 % à Bamako.

Ce seuil de sécheresse se situe entre -4 et -9 % en domaine nord soudanien. Les stations de Bakel et de Tambacounda présentent les seuils les plus forts avec respectivement -9 % et -7 %. La station de Kita présente un seuil voisin à celui de Tambacounda (-5 %) alors que Kayes dispose de l'écart moyen négatif le plus faible (-4%).

Le domaine sahélien présente quant à lui les écarts négatifs les plus élevés des hauts bassins. Ceux-ci varient entre -10 % à Nara jusqu'à -18 % à Kiffa. La station de Nioro du Sahel dispose d'un seuil de -11 %.

Ainsi les valeurs limites 2 et 4 sont très variables d'une station à l'autre, à travers même, un domaine climatique (tab. 25). Les faibles valeurs qui peuvent être notées pour le déficit moyen (seuil 2) ou l'excédent moyen (seuil 4) sont à imputer à l'irrégularité interannuelle car les seuils moyens se calquent sur la distribution spatiale des précipitations. Les écarts reconnus pour les différentes stations nous autorisent donc à parler de sécheresse en nuançant le caractère d'une station à l'autre.

2. LA SECHERESSE RECENTE ET SES MANIFESTATIONS

S'il n'est plus nécessaire d'évoquer la cohorte des méfaits et les conséquences dramatiques qui résultent de la sécheresse, force est de reconnaître que la période actuelle est de loin celle qui bat tous les records de déficit. Nous utilisons ainsi l'échelle temporelle et spatiale pour analyser les caractères de cette tragédie généralisée que J. Sircoulon, (1976), résume en un triptyque : rigueur, persistance et extension.

2.1 Les caractères temporels de la sécheresse

L'évolution de la péjoration pluviométrique actuelle a fait dire à C. Toupet, (1973), "que la tendance à la diminution des pluies au cours du siècle dernier est très vraisemblable..., elle est continue et confirme le dessèchement historique". Aussi, si le phénomène n'est pas nouveau, il faut rechercher son aggravation à travers plusieurs critères.

2.1.1. Le début de la sécheresse récente

Les spécialistes s'accordent sur l'année 1968 comme étant le début de la sécheresse récente et celle de 1969 comme le dernier hivernage pluvieux du Sahel. Ainsi, si la durée du phénomène apparaît comme longue dans le temps, l'analyse des écarts moyens permet de différer d'une station à l'autre le début de la sécheresse (tab. 26).

Nous considérons alors qu'il y a véritablement une sécheresse chaque fois que des écarts moyens négatifs, qui correspondent à ceux de la valeur limite 2, se succèdent dans le temps pour une série d'années.

Tableau 26 : Fréquences d'apparitions et déficits extrêmes annuels de la période 1961-1993 aux stations de référence.

Stations	Normale 1961-1990	Fréquences d'apparitions	Déficits extrêmes		
			Année	mm	%
Mamou	1759	42 %	1971	1238	-23,8
Labé	1539	42%	1984	1226,5	-20,2
Dabola	1352	39%	1984	636	-52,6
Kédougou	1190	42%	1992	748,6	-36,2
Kénieba	1146,3	36 %	1980	634,4	-43,6
Bamako	988,8	42%	1983	712,1	-27,2
Kita	937	39%	1987	660,8	-29,6
Tambacounda	770,4	42%	1993	433,8	-42,2
Kayes	633	42%	1993	374,7	-39,4
Bakel	503,1	42 %	1984	249,6	-49,8
Nioro du Sahel	454,3	42%	1983	253,3	-43,8
Nara	389,9	42%	1984	198,7	-48,6
Kiffa	273,4	42%	1982	100,3	-62,7

En domaine guinéen, c'est curieusement la station de Mamou, pourtant la plus arrosée des hauts bassins qui est touchée la première dès 1969 (-10,8 %). La station de Labé enregistre son début de sécheresse en 1970 avec -12,4 %. A la station de Dabola, le début du phénomène est plus tardif et survient en 1977 avec -6,1 %.

En domaine sud soudanien, la station de Kédougou connaît son début de sécheresse dès 1967 (-32,9 %), mais c'est à partir de 1976 que l'aggravation est plus nette. Par contre, cette sécheresse est précoce à la station de Kénieba et intervient dès 1968 avec -16,7 %, tandis que Bamako enregistre son début de sécheresse en 1970 avec -13,2 %.

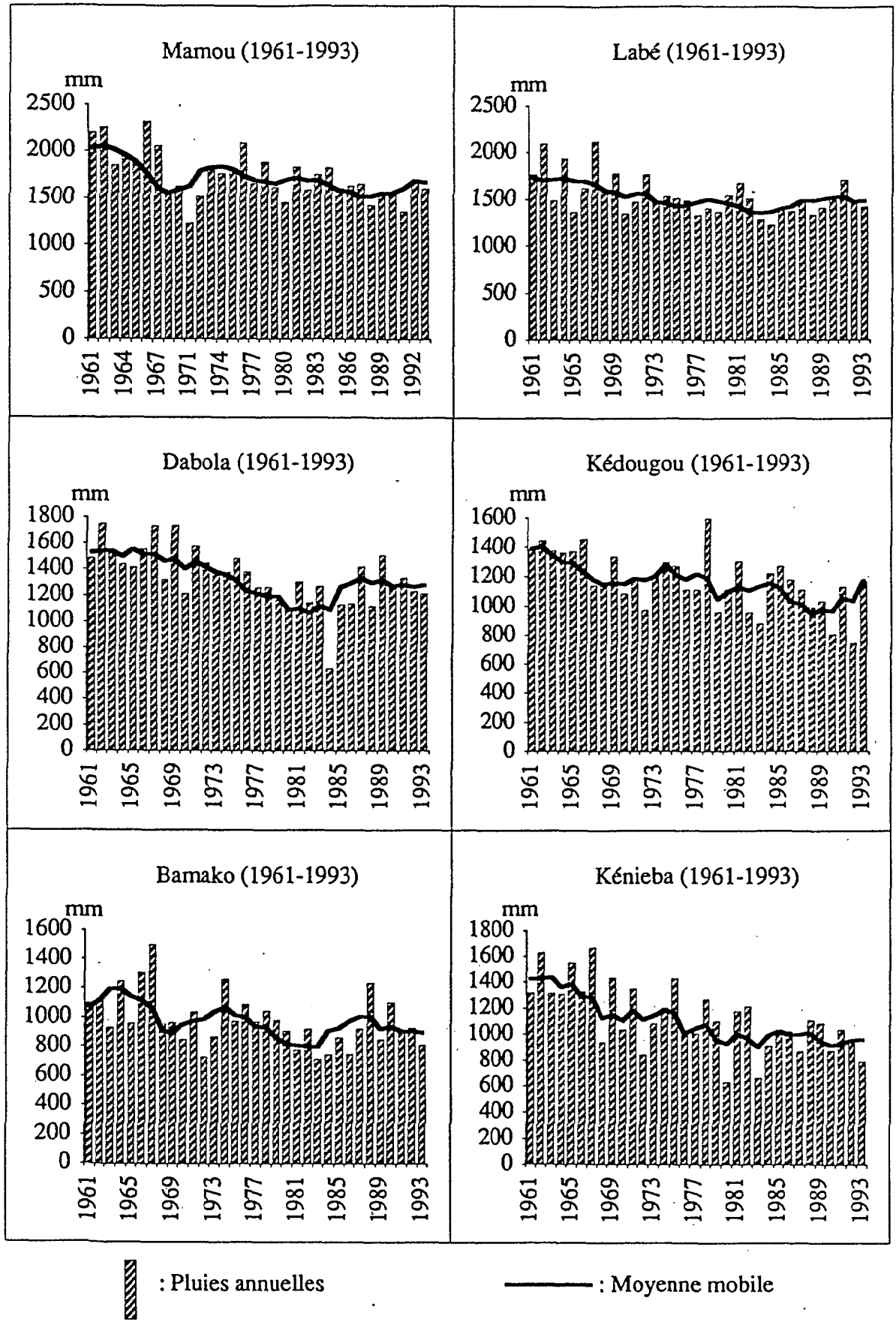


Figure 37 : Précipitations annuelles et moyennes mobiles quinquenales dans les hauts bassins

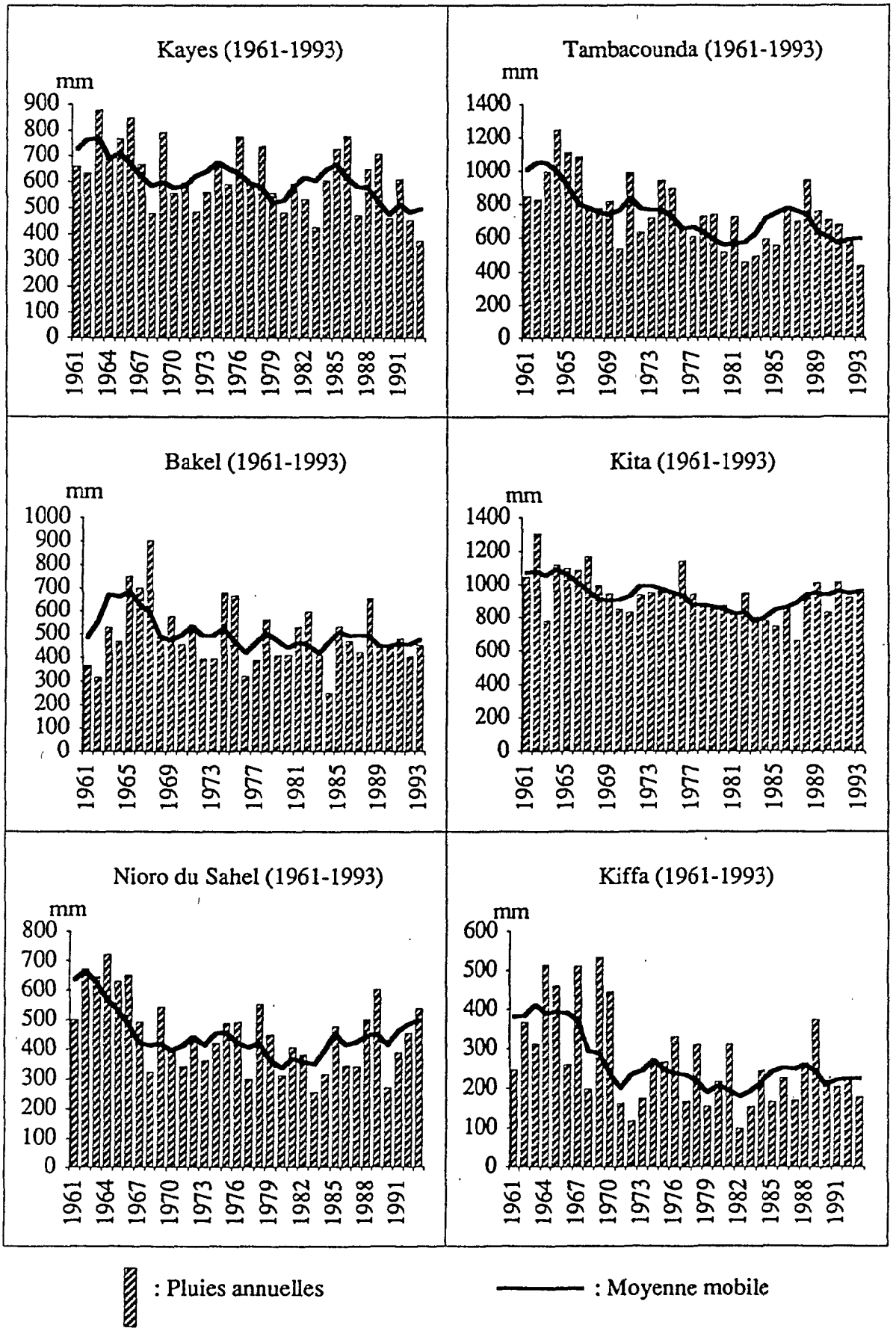


Figure 38 : Précipitations annuelles et moyennes mobiles quinquenales dans les hauts bassins

Les stations de Kita à l'extrême sud du domaine nord-soudanien, ainsi que Tambacounda la plus occidentale du même domaine, connaissent en 1970 le début de la sécheresse avec -9,5 % et -28,5 %. Aux stations de Kayes et de Bakel situées plus au nord du même domaine, la sécheresse y est plus précoce et intervient en 1968 à Kayes (-22,4 %) tandis que Bakel est déjà déficitaire en 1961 (-26,6 %).

En domaine sahélien, si l'année 1968 présente à toutes les stations des déficits assez élevés (-28%) à Nioro du Sahel, (-31,4%) à Nara et (-25,9%) à Kiffa, ces deux dernières sont déjà déficitaires en 1961 avec respectivement -45,7% et -8,5%.

Les figures 37 et 38 présentent l'évolution des pluies annuelles ainsi que les moyennes mobiles pondérées sur 5 ans pour chaque station. On remarque que la variation lissée des précipitations à travers ces moyennes mobiles rend mieux compte de la péjoration pluviométrique récente. Le début de la sécheresse peut ainsi varier, même si ce sont surtout les valeurs du déficit moyen atteint dès les premières années qui sont inquiétantes.

C'est à travers ces valeurs (-10 %), domaines climatiques confondus, que se définit la notion de rigueur évoquée par plusieurs auteurs (J. Sircoulon, 1976 ; J.C. Olivry, 1982 ; A. A. Sow et H. M. Lô , 1984 ; M. Leroux, 1992).

2.1.2. L'intensité de la sécheresse récente

Elle constitue surtout le fait le plus marquant depuis le déclenchement de la sécheresse en 1968. Mais cette intensité n'est pas partout identique et ses fréquences montrent bien son ampleur.

Ainsi, la station de Labé, pourtant la seconde par ses totaux après Mamou, enregistre un record de 14 années déficitaires sur les 33 de la période d'observation (tab. 26). Faut-il voir dans ce triste épisode l'effet d'altitude de Labé, station la plus élevée des hauts bassins ? Les deux autres stations du domaine guinéen enregistrent elles aussi des périodes très longues. A Mamou, 14 années soit 42 % de la période de référence sont déficitaires alors que Dabola totalise 13 années déficitaires soit 39 %.

Kédougou, station du domaine sud-soudanien, connaît le même nombre d'années déficitaires (14 ans) que les deux premières stations du domaine guinéen (Mamou et Labé). La station de Kénieba totalise 12 années déficitaires soit 36 % tandis que Bamako compte 14 années déficitaires soit 42 %.

En domaine nord-soudanien, la station de Kita est la moins affectée avec seulement 13 années de pénurie (39 %). A Tambacounda et Kayes, 14 années sont en dessous de la moyenne (42 %) alors que la station de Bakel, la plus septentrionale de ce domaine connaît le même nombre d'années déficitaires (42 %).

En domaine sahélien, les stations de Nioro du Sahel et Nara totalisent chacune 14 années déficitaires soit 42 %. La station de Kiffa, la plus au nord des hauts bassins, enregistre 13 années de péjoration pluviométrique sur 33 soit 39 %.

La fréquence de la sécheresse dans les hauts bassins est donc quasi régulière depuis 1961. Mais le fait le plus intéressant est le nombre d'années déficitaires qui est pratiquement égal aux différents domaines climatiques. Ceci montre que la tendance générale de la sécheresse récente est spatiale et affecte de manière quasi-unanime l'ensemble des hauts bassins. Aussi, c'est surtout à travers les déficits extrêmes de certaines années comme 1972 ou 1977 qu'on peut évoquer l'intensité du phénomène.

2.1.2.1. L'année 1972

Elle fut considérée à l'époque comme le paroxysme de la sécheresse en raison des déficits jamais atteints depuis 1968. Dix stations sur les 13 de référence de la période sont déficitaires cette année là. En domaine guinéen, la station de Mamou enregistre son déficit extrême dès 1971 (-23,8 %) puis celui-ci tombe à -12,4 % en 1972. Les deux autres stations du domaine guinéen (Labé et Dabola) sont excédentaires avec respectivement +15,1 et +7,7 %.

Les stations du domaine sud-soudanien atteignent cette année là leur record de déficit. Ceux-ci sont de -18,4 % à Kédougou ; ils passent à -25 % à Kénieba et atteignent -25,6 % à Bamako.

En domaine nord-soudanien, Kita a une pluviométrie normale alors que le déficit à Tambacounda est de -15,6 %. Ce déficit est supérieur à - 20 % à Bakel (-20,8 %) et Kayes (-21,5 %).

La pluviométrie est normale aux stations de Nara et de Nioro en domaine sahélien au cours de l'année 1972, tandis que la station de Kiffa atteint au même moment un déficit record de -55,9 %.

2.1.2.2. L'année 1977

Elle s'inscrit dans la même mouvance que 1972. Toutes les stations de référence des hauts bassins à l'exception de Nara sont déficitaires. Les records de déficits jusque-là jugés inégalables sont dépassés à certaines stations.

En domaine guinéen, toutes les stations sont déficitaires et le record revient à Labé qui enregistre -13,6 %. Il en est de même pour les stations du domaine sud-soudanien où Kénieba atteint -10,5 %.

En domaine nord-soudanien, les stations de Kita et de Kayes enregistrent une pluviométrie normale. Les autres stations du même domaine (Tambacounda et Bakel) dépassent durant la même année leurs déficits enregistrés en 1972. Ceux-ci s'élèvent à -19,8 % à Tambacounda et (-21,5 %) à Bakel.

Ces déficits tombent en domaine sahélien, où Nara totalise une pluviométrie normale alors qu'à Kiffa le déficit se réduit à -36,7 %. La station de Nioro du Sahel connaît pendant ce temps son déficit le plus élevé avec -34,2 %.

2.1.2.3. De 1980 à 1990

La tendance à la siccité déjà uniforme, s'intensifie sur les hauts bassins. Plusieurs stations égalent ou battent leur propre record de déficit, les années les plus expressives étant 1982, 1983, 1984, 1987.

Ainsi, dès 1980, Kénieba atteint un déficit de -43,6 % par rapport à la moyenne (1961-1993) tandis que celui-ci s'élève à -44,6 % par rapport à la normale (1961-1990). Ces déficits sont partout ailleurs élevés et supérieurs à -10 %.

En 1982, la station de Kiffa atteint un déficit de -62,7 % par rapport à la normale (1961-1990) tandis que les autres stations à l'exception de Bakel (+19,6 %) sont déficitaires de plus de -15 %.

L'année 1983 survient avec des déficits partout supérieurs à -20 % ; certaines stations dépassent ou enregistrent alors des déficits jamais égalés depuis le début des mesures. Les trois stations guinéennes connaissent des déficits modérés avec un maximum à Labé (-16,2 %), en domaine sud-soudanien ces valeurs sont déjà élevées. La station de Bamako dépasse pour la première fois son record de 1972 avec -27,2 % par rapport à la moyenne, et -27,9 % par rapport à la normale 1961-1990. Kédougou, atteint pour la première fois un déficit de -24,8 % tandis que Kénieba en est à son second record (-40,8 %) après 1972.

Mais c'est surtout dans les domaines nord-soudanien et sahélien que la sécheresse de l'année 1983 est la plus sévère. Dans le premier domaine cité, les déficits dépassent -30 % notamment à Tambacounda (-34,9 %) et Kayes (-31,1%). Le second domaine enregistre quant à lui les plus forts déficits (-40 %) avec respectivement -43,8 % à Nioro du Sahel et -42,3 % à Kiffa.

Cette péjoration pluviométrique perdure au cours de l'année 1984. Le domaine guinéen connaît un léger mieux notamment à Mamou qui accuse une pluviométrie normale (+4,7 %) mais Labé est encore déficitaire de -20,2 %, et Dabola atteint son record de la période (-52,6 %).

Ces déficits tombent à -20 % en domaine sud-soudanien -18,9 % à Kénieba et -23,8 % à Bamako. Ils sont encore supérieurs à -25 % en domaine nord-soudanien où Bakel est très déficitaire (-49,8 %). En milieu sahélien, le déficit est encore supérieur à -30 % notamment à Nara qui culmine à -48,6 % et Nioro du Sahel qui accuse un déficit de -30,5 %.

La suite à ces deux années est un intermède plus clément, mais dès 1987 des déficits néanmoins modérés réapparaissent dans les hauts bassins. Le domaine guinéen semble toutefois plus épargné avec une tendance à la normale de la pluviométrie à Labé et Mamou, pendant que Dabola enregistre une pluviométrie normale (+5,4 %).

En domaine sud-soudanien, le déficit se résorbe à -10 % sauf à Kénieba où il se maintient à -22,5 %. Les stations du domaine nord-soudanien connaissent elles aussi des déficits modérés (entre -15 et -20 %) tandis que celles du domaine sahélien varient entre -25 et -30 %.

2.1.2.4. De 1991 à 1993

Ces trois années sont marquées par un net regain de la sécheresse, tendance confirmée à certaines stations à partir de 1990. De toutes les stations du domaine guinéen, seule Labé connaît un excédent moyen en 1991 (+11,1 %). Le déficit le plus fort à cette station se situe en 1993 (-7,8 %) de même qu'à Dabola (-9,4 %). Il est précoce à Mamou et survient en 1991 avec -21,8 %.

Ces déficits se prolongent en domaine sud-soudanien où l'année 1993 totalise les plus forts déficits. Ceux-ci varient de -30 à -36 % entre Kénieba et Kédougou, tandis qu'à Bamako, le déficit se situe à -17,3 %.

En domaine nord-soudanien, on note une amélioration de la pluviométrie à Kita en 1992 (+2 %). Aux autres stations cependant, Bakel a déjà un déficit de -18,5 % en 1992, tandis qu'à Kayes et Tambacounda, le déficit est compris entre -39 et -42 %. Tambacounda enregistre cette année son déficit le plus élevé depuis 1961 : -42,4 % en 1993.

Cette situation est presque identique en domaine sahélien. Mais les déficits y sont précoces notamment à Nioro du Sahel et Nara. Ils surviennent en 1991 avec respectivement -14,1% à Nioro du Sahel et -12 % à Nara. La station de Kiffa enregistre son plus fort déficit en 1993 (-33,2 %) tandis qu'à Nioro du Sahel on note pour la même année une pluviométrie normale (+17,9 %).

L'analyse des années à déficit élevé met en évidence une caractéristique de la sécheresse récente : sa persistance. Celle-ci est variable d'une station à l'autre au sein d'un même domaine climatique. Dans le domaine guinéen, si Labé compte le nombre d'années les plus déficitaires (tab. 26), c'est cependant la station de Dabola qui enregistre les plus forts déficits. En domaine sud-soudanien, c'est la station de Kénieba par sa position centrale qui connaît les déficits les plus élevés. La station de Kita est la moins affectée en domaine nord-soudanien, tandis que Bakel l'emporte légèrement sur Tambacounda quant aux déficits extrêmes. Enfin en domaine sahélien, c'est à Kiffa que culminent les plus forts déficits des hauts bassins.

Pourtant, c'est la variabilité qui fait ressortir certaines années communes aux hauts bassins par leurs très forts déficits. Elle est toutefois loin d'établir une périodicité et ne traduit qu'une tendance générale des déficits autour de la moyenne. C'est ce fait qui rend la sécheresse plus remarquable pour défrayer la chronique des journaux lors d'années exceptionnelles. Car les forts déficits observés au-delà de la variabilité des précipitations peuvent être liés aux facteurs locaux. Mais peut-on imputer à ces deux paramètres les caprices notés çà et là au gré des années sèches ? En 1972, Mamou, pourtant situé seulement à 783 m d'altitude est très déficitaire, avec -12,4 %, alors que Labé qui culmine à 1025 m a un excédent de +15,1 %.

L'orographie serait-elle à l'origine de cette nuance ? Mais alors que dire de Nara qui est à peine à 263 m et enregistre une pluviométrie normale ? Peut-on évoquer la situation géographique comme facteur d'explication ? La station de Kiffa, la plus septentrionale, enregistre les plus forts déficits des hauts bassins (-45,7 % en 1961, -36,7 % en 1977, -62,7 % en 1982). Doit-on évoquer sa position latitudinale pour justifier ces déficits ? Et alors comment expliquer qu'en

1989, Mamou (10°22' N) enregistre un déficit de -10 % alors que Kiffa (16°38' N) a un excédent de +39 %.

La position en longitude est-elle mise en cause en raison du gradient d'abondance pluviométrique est-ouest en certains domaines climatiques ? En 1984, la station de Nioro du Sahel (09°36' W), théoriquement la plus arrosée, connaît un déficit de -30,5 % moins important qu'à Nara (7°17' W, -48,6 %) et Bakel (12°28' W, -49,8 %). Mais que retenir alors de l'année 1977 où Nara reçoit une pluviométrie normale, alors que Bakel et Nioro du Sahel sont déficitaires respectivement de -21,5 % et -34,2 % ?

Assurément les facteurs géographiques, s'ils peuvent influencer les déficits ou les excédents moyens, ne justifient en rien la persistance de la sécheresse actuelle. C'est donc en fonction de la circulation générale, des paramètres climatiques en jeu, que se matérialise suivant son abondance et sa durée, le cachet particulier de chaque saison pluvieuse (M. Leroux, 1970).

C'est aussi à travers ce complexe de la circulation atmosphérique qu'il faut rechercher, au sein des périodes de sécheresse, l'apparition de certaines années humides qui atténuent l'intensité du phénomène.

2.1.3. Les années insolites

Les précipitations enregistrées dans les hauts bassins montrent, depuis 1961, une succession d'années sèches entrecoupées par une ou deux années excédentaires. Ce sont ces dernières que nous considérons comme "insolites" en raison des forts excédents qu'elles peuvent revêtir, tout en suivant ou en précédant une période sèche. On peut ainsi retenir certaines années caractéristiques :

2.1.3.1. L'année 1969

Elle a longtemps été considérée comme le dernier hivernage pluvieux du Sahel du fait des forts excédents enregistrés après l'alerte de 1968. Onze stations de référence sur les treize des hauts bassins enregistrent cette année un excédent. Celui-ci est très fort en domaine guinéen où Labé et Dabola enregistrent leur extrême humide de la période (+15,5 % et +29,1 %). La station de Mamou est toutefois déficitaire de -10,8 % au même moment.

Cet excédent pluviométrique se poursuit en domaine sud-soudanien avec +27,2 % à Kénieba. Bamako (+10 %) et Kédougou (+13,8 %) enregistrent pendant ce temps une pluviométrie normale.

Mais c'est surtout par rapport aux régions septentrionales des hauts bassins que l'année 1969 est vraiment pluvieuse. Toutes les stations de référence accusent cette année une pluviométrie normale et parfois un excédent synonyme de "déluge ":

- +27,9 % à Kayes et +15,4 % à Bakel en domaine nord-soudanien,
- +19,5 % à Nioro du Sahel et +98,4 % à Kiffa en domaine sahélien.

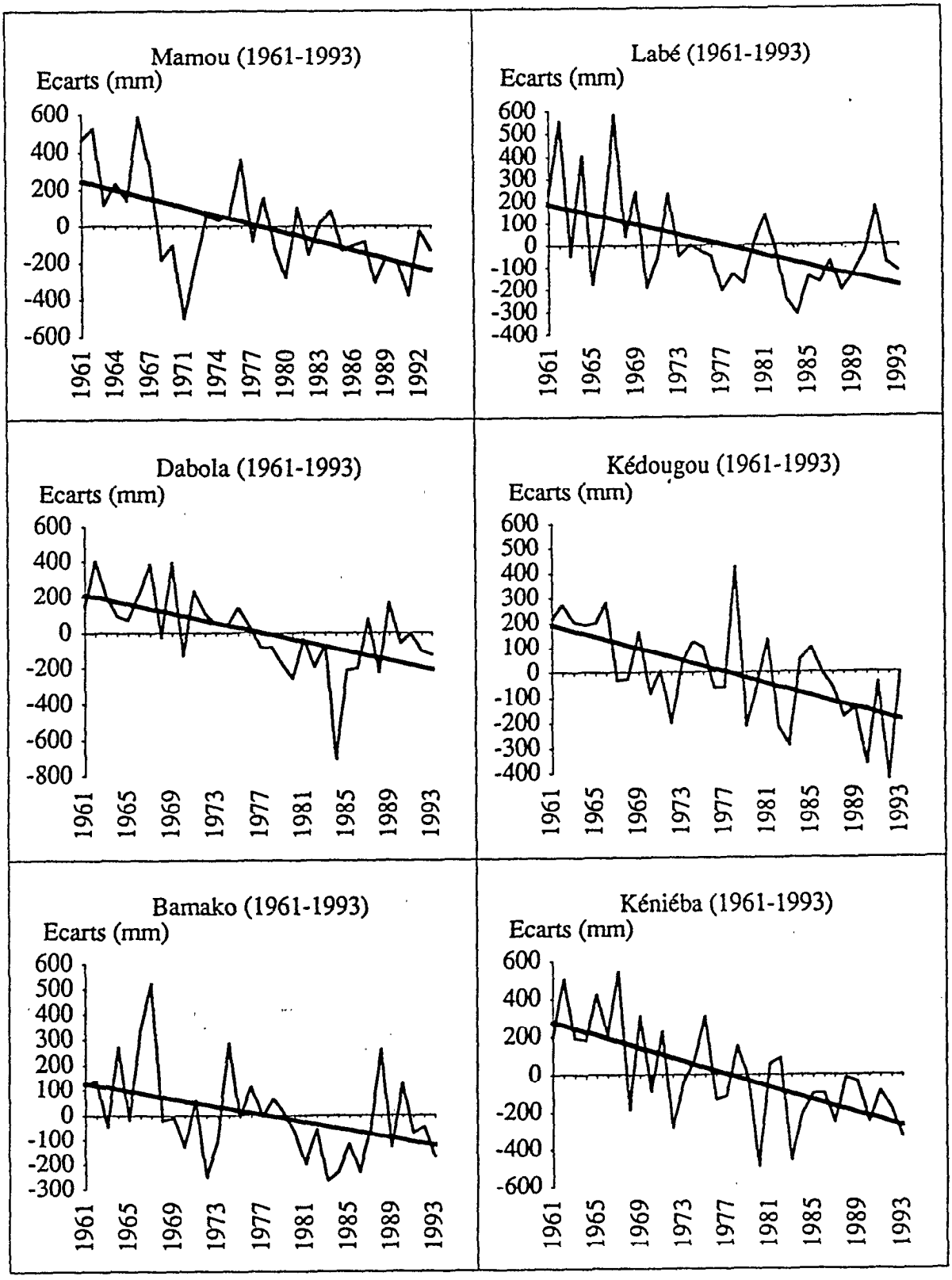


Figure 39 : Evolution générale des précipitations des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie depuis 1961

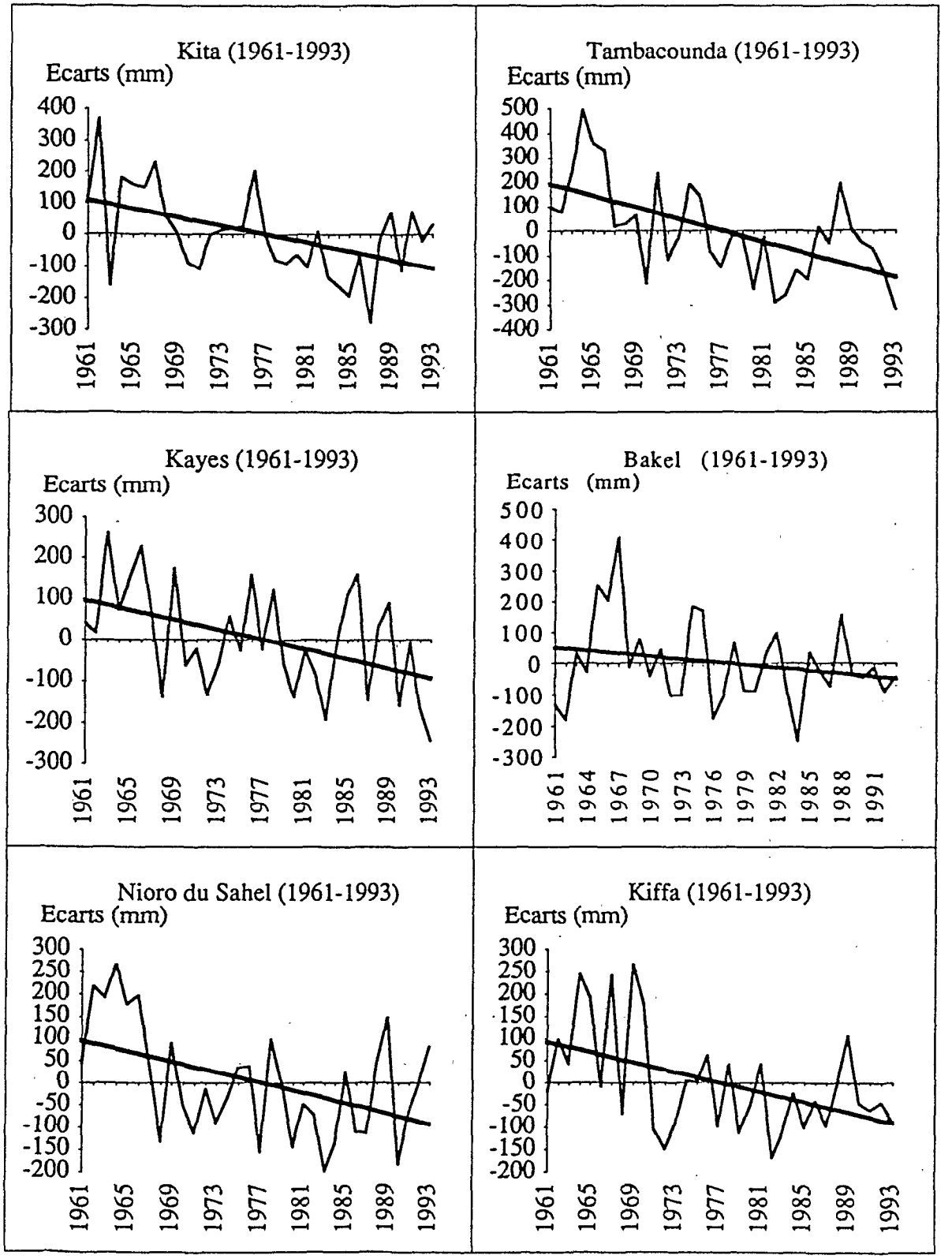


Figure 40 : Evolution générale des précipitations dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie depuis 1961

2.1.3.2. L'année 1974

Cette année apporte un léger répit après le premier paroxysme de 1972-1973. Mais les valeurs atteintes sont nettement inférieures à celles de 1969. Les stations guinéennes connaissent cependant une pluviométrie normale durant cette année. Partout ailleurs, la tendance est à la normale ou même à l'excédent :

- +28,7 % à Bamako, et +10,4 % à Kédougou en domaine sud-soudanien,
- +36,4 % à Bakel, +25,4 % à Tambacounda en domaine nord-soudanien,
- les stations sahéliennes de Nara, Kiffa et Nioro du Sahel ont une pluviométrie normale au cours de cette année.

2.1.3.3. L'année 1989

La pluviométrie de cette année n'est guère mieux que celle des années mentionnées ci-dessus même si son caractère "insolite" est plus marqué après les terribles années déficitaires de 1983 et 1984. En fait, l'année 1989 n'est réellement pluvieuse que pour les domaines nord-soudanien et sahélien.

Vers le sud des hauts bassins, cette année porte encore à un degré moindre les stigmates des précédentes années de sécheresse. Seul Dabola est excédentaire (+12 %) en domaine guinéen. Mamou et Labé sont respectivement déficitaires de (-10 %) et (-8,5 %). La situation est similaire en domaine sud-soudanien où les déficits l'emportent, Bamako et Kédougou accusent respectivement -13,3 % et -12,1 %.

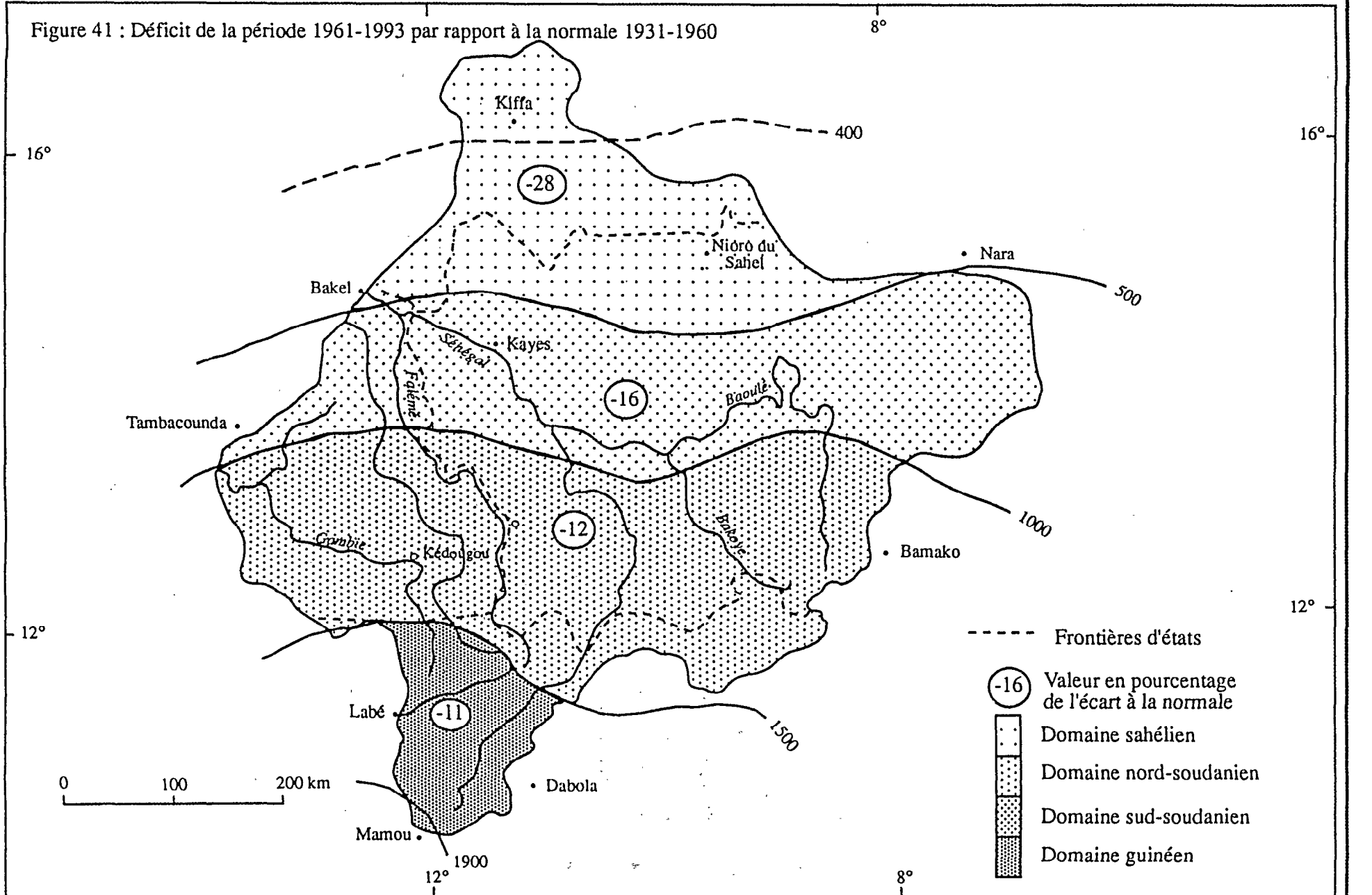
Par contre, dans le domaine nord-soudanien, les pluies sont mieux fournies. Les stations de Kayes et Kita enregistrent des écarts positifs respectifs de +14,4 %, +7,5 %, alors que Tambacounda dans une moindre mesure, a une pluie normale. Ces pluies sont nettement meilleures en domaine sahélien, où Nara atteint son excédent de la période (+63,2 %). Les stations de Kiffa et Nioro du Sahel présentent quant à elles, un excédent de +30 %.

La tendance à l'assèchement observée dans les hauts bassins depuis 1968 se poursuit inexorablement sans qu'on puisse réellement en prévoir la fin. Les figures 39 et 40 traduisent partout une baisse généralisée des précipitations. Dans ce contexte, les années insolites ne sont qu'un faible palliatif de la succession d'années sèches. Mais au-delà de la rigueur et de l'intensité de la sécheresse c'est aussi sur l'ampleur du phénomène qu'il convient de s'interroger.

2. 2. Les caractères spatiaux de la sécheresse récente

Ils ressortent à travers la position en latitude des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Le caractère le plus apparent étant l'extension de la sécheresse aux différents domaines climatiques des hauts bassins et sa forte variabilité spatiale du sud au nord.

Figure 41 : Déficit de la période 1961-1993 par rapport à la normale 1931-1960



2.2.1. L'extension de la sécheresse récente

Elle prend tout son sens par la progression des déficits, depuis les stations guinéennes situées entre 10 et 11° nord jusqu'aux plus septentrionales des hauts bassins (16°42'N) à Kiffa. C'est donc à une uniformité spatiale du phénomène qu'on assiste depuis 1968, même si l'ampleur diffère d'un domaine à l'autre. La figure 41 présente les déficits des différents domaines climatiques de la période 1931-1993 par rapport à la normale 1931-1960. Le domaine guinéen enregistre ainsi les plus faibles déficits (-11 %). Ces déficits passent à -12 % en domaine sud-soudanien. Ils sont en domaine nord-soudanien estimés à -16 %, et atteignent -28 % en domaine sahélien.

On remarque que dans chaque domaine climatique, ces déficits représentent plus du double du seuil de sécheresse défini pour la période (tab. 25), ce qui illustre encore l'ampleur et l'intensité du phénomène. Cependant, cette uniformité à l'échelle générale peut masquer une variabilité spatiale de la sécheresse.

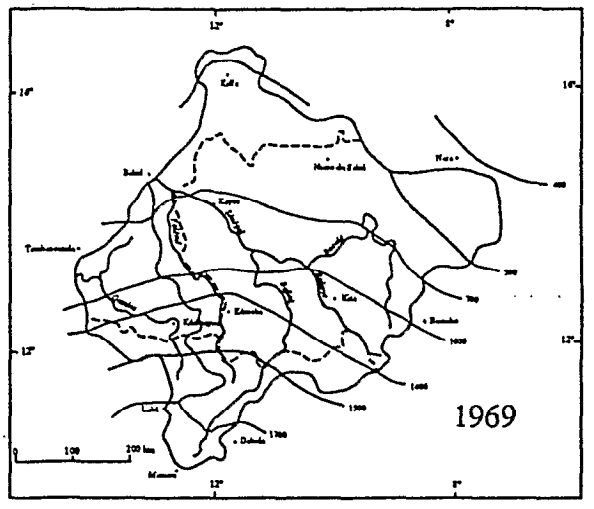
2.2.2. La variabilité spatiale de la sécheresse

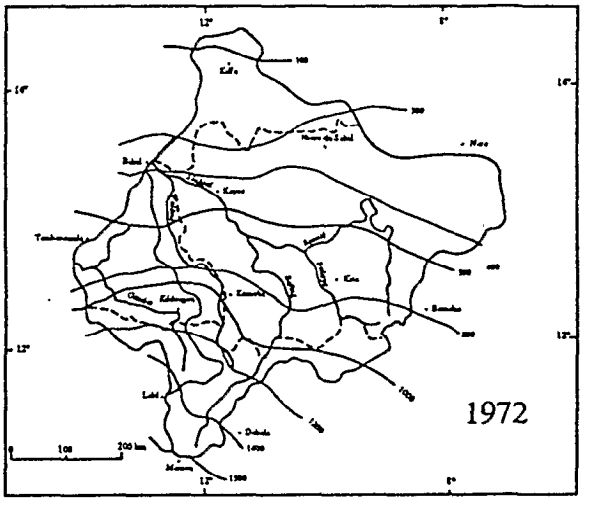
On oublie souvent le caractère aléatoire de la sécheresse pour ne retenir que ses méfaits. Cette vision conduit parfois à des erreurs et certaines déclarations fracassantes sont des plus illusoires. Ainsi, K. Waldheim[8] (1974) clamait "D'ici à moins de cinquante ans...la progression du désert risque de rayer totalement de la carte trois ou quatre pays d'Afrique". Il est donc urgent de nuancer la sévérité du phénomène car la sécheresse n'est pas stationnaire et fluctue à travers les années sèches et humides (C. Toupet, 1983 in série hydrologique). L'analyse de la migration des isohyètes (fig. 42) montre que les isohyètes 500, 1000 et 1500 mm descendent très au sud durant les années sèches comme 1972, 1983, 1991 à 1993. Par contre lors des années humides (1969, 1974 et 1989), leur remontée est spectaculaire et elles repoussent vers le nord de plusieurs centaines de kilomètres la sécheresse.

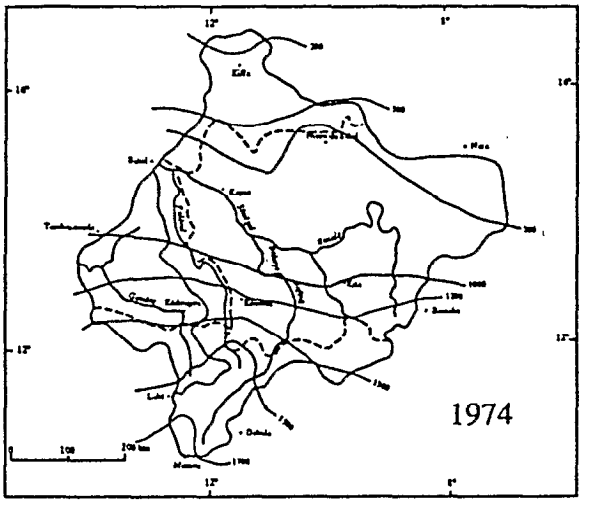
Les principales caractéristiques de la sécheresse récente sont : sa répartition aléatoire dans le temps, une uniformité spatiale et surtout sa persistance durant de nombreuses années. Ces observations générales masquent pourtant sa grande variabilité qui peut être localisée. Aussi, la sécheresse qui sévit dans les hauts bassins, comme du reste dans le Sahel tout entier depuis 1968, n'a vraiment jamais pris fin, bien que certaines années de rémission en aient donné l'illusion. Ceci écarte donc toute idée de cyclicité de la sécheresse mais pose le problème des normes pluviométriques à retenir.

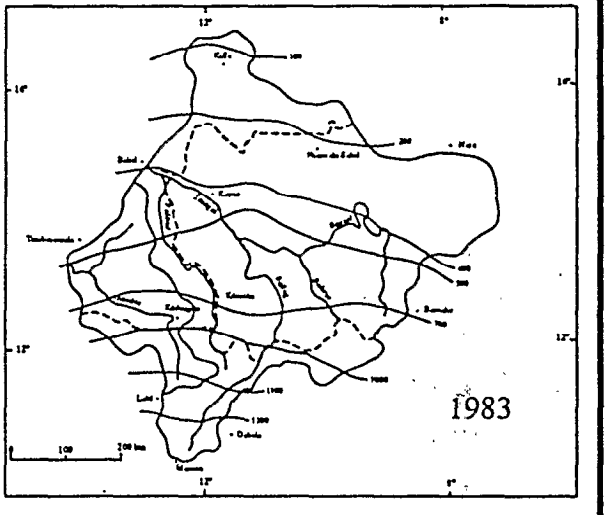
---

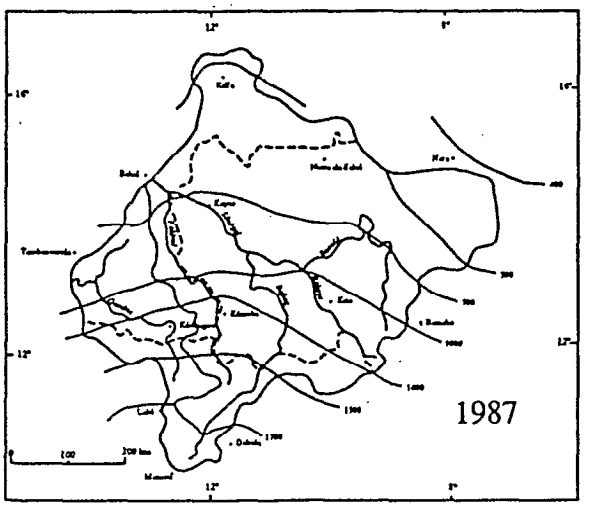
[8] Secrétaire Général des Nations Unies, discours prononcé à la conférence du CILSS (Comité Inter Etats de Lutte contre la Sécheresse au Sahel) à Ouagadougou (Burkina Faso) en 1974.











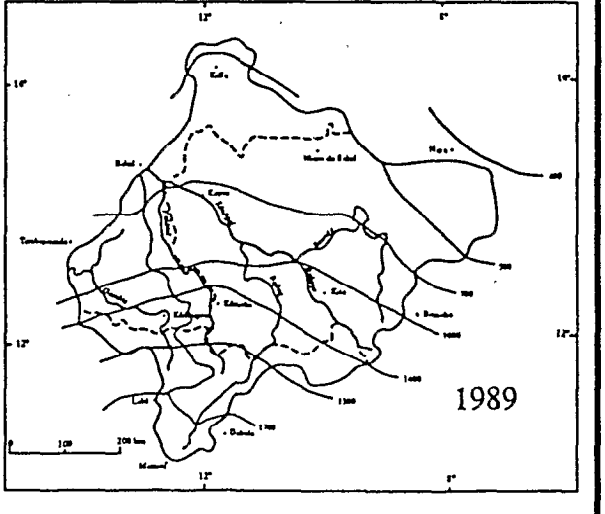


Figure 42 : Migration des isohyètes dans les hauts bassins lors des années extrêmes

Depuis 1950, la modification des précipitations dans les hauts bassins et au Sahel en général a été particulièrement spectaculaire. Les années 1950, nous l'avons évoqué, se sont traduites partout par des excédents, parfois même très élevés. Mais ces conditions favorables ont pris fin en 1968 et depuis, la situation n'a cessé d'empirer. Certaines années extrêmes sèches comme 1972, 1977, 1983 ont fait craindre le pire. Elles ont alterné avec des années humides qui laissaient croire en une possible fin de la sécheresse (J. Y. Gac .et H. Faure, 1985). Ces conditions de prévisions difficiles sont fortement influencées par la pluviométrie abondante notée dans la zone soudano-sahélienne durant l'optimum climatique contemporain (années 1950). La représentativité des anciennes normales de références (normale 1931-1960, moyenne des séries d'observation) se trouve ainsi remise en cause. Mais doit-on aussi se référer aux normes climatiques actuelles sans une certitude sur les conditions à venir ?

Enfin, il convient de noter que la sécheresse qui affecte les hauts bassins et dans une large mesure le Sahel n'est pas un fait unique à ces régions. Les épisodes secs en France (1976, 1992), aux Etats Unis (1992), la sécheresse des années 1970 et 1980 en Afrique australe et septentrionale, le cas du Nordeste brésilien, achèvent de convaincre que les conditions pluviométriques actuelles sont à inscrire dans les oscillations climatiques planétaires. Toutefois, au-delà de la pluviométrie, considérée comme le facteur apparent de la sécheresse, d'autres critères tels que l'évolution des facteurs thermiques et les régimes de l'écoulement sont tout aussi importants pour comprendre la sécheresse actuelle. Il nous faut donc, rechercher dans un premier temps, à travers les autres éléments du climat, les raisons de ces déficits hydroclimatiques si exacerbés qu'ils évoquent une rupture climatique (Carbonnel et Hubert, 1985 ; J. C. Olivry, 1992).

CHAPITRE 5

LES TEMPERATURES DANS LES HAUTS BASSINS

Les températures constituent après les précipitations le facteur le plus important du climat. Dans la zone intertropicale, les températures varient peu dans le temps. Elles ne constituent pas un élément fondamental de différenciation climatique à l'inverse de la pluviométrie, même si parfois elles permettent de caractériser certaines régions (hautes terres de Guinée par exemple). Ainsi, dans les hauts bassins, la distribution de la chaleur est essentielle car elle s'accompagne d'une siccité qui la renforce ou d'une humidité qui la tempère. Les enseignements tirés de l'étude des températures nous permettront d'étudier les autres éléments du climat qui lui sont liés comme l'humidité relative, l'insolation et l'évaporation.

1. LES CARACTERES MOYENS DES TEMPERATURES

Les caractères moyens des températures sont étudiés à travers les régimes saisonniers qui découlent de la répartition des températures mensuelles.

1.1. Les régimes thermiques et les saisons climatiques

Les régimes thermiques des hauts bassins dépendent des variations du rayonnement solaire qui déterminent deux saisons climatiques distinctes de sens cosmique (hiver et été). La distribution des températures mensuelles montre, à travers les hauts bassins des régimes thermiques bimodaux. La répartition de ces maxima et minima mensuels enregistrés sont fonction de quatre saisons principales (fig. 43) :

- Une saison sèche et fraîche ou *Nor* [9] qui va de décembre à février et correspond à l'hiver de l'hémisphère nord. C'est au cours de cette période que survient le minimum thermique principal qui est noté en décembre-janvier.
- Une saison sèche et chaude appelée *Tioron* qui s'étale de mars à mai-juin et qui précède les premières pluies d'hivernage. Le maximum principal des températures se situe au cours de cette période, notamment en avril-mai.
- Une saison humide et fraîche ou *Nawet* au cœur de la saison pluvieuse. Elle survient en août-septembre et concorde avec le minimum secondaire des températures.
- Une saison humide et chaude, centrée entre fin septembre et novembre. Elle correspond à la fin de la saison pluvieuse. Cette saison est appelée *Loli*. La remontée des températures qui intervient durant cette période est fonction des précipitations plus ou moins abondantes déversées au cours de la saison des pluies.

[9] Nor, Tioron, Nawet, Loli : Termes wolof (Sénégal) désignant les différentes saisons climatiques.

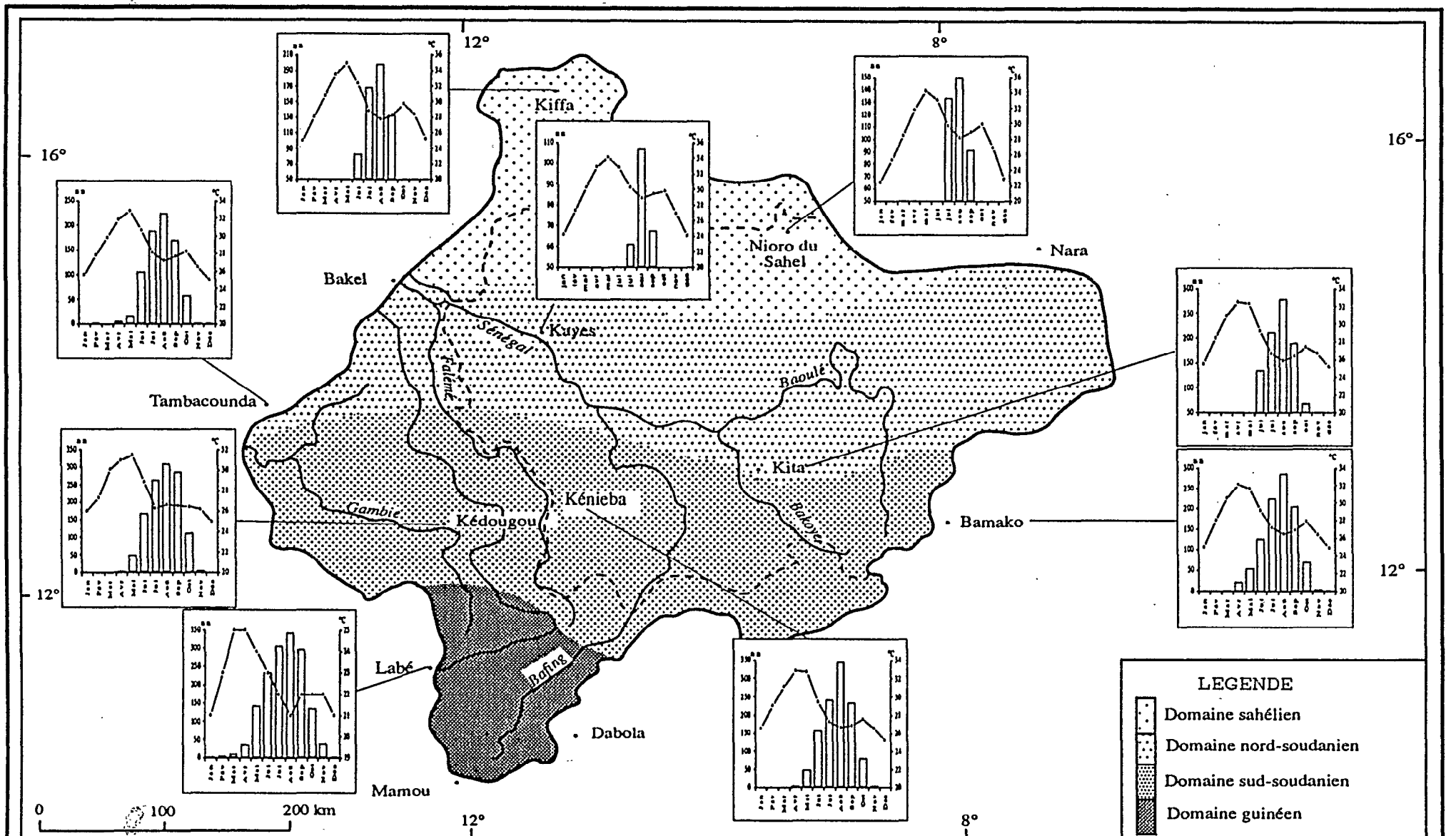


Figure 43 : Régimes ombrothermiques des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

1.2. La distribution des températures mensuelles

Ce sont les variations des températures mensuelles qui expliquent les différentes saisons thermiques des hauts bassins. Les nuances observées, jointes aux facteurs géographiques nous permettent de distinguer du sud au nord des hauts bassins quatre régimes thermiques qui correspondent aux régimes pluviométriques déjà définis.

1.2.1. Le régime thermique guinéen

Le régime thermique guinéen est analysé à la station de Labé. La végétation plus dense, les fortes précipitations et l'effet de l'altitude en font la station qui enregistre les températures les plus faibles des hauts bassins.

Les températures maximales annuelles pour la période 1961-1990 sont de 28,6°C (fig. 50). Le maximum principal s'étale de mars à avril : 32,3 et 32,4°C (fig 44), alors que le maximum secondaire intervient en novembre avec 28,2°C. Le mois d'août concentre les températures minimales principales avec 25,2°C (fig. 46). Le minimum secondaire intervient en décembre avec 27,6°C.

Les températures minimales annuelles pour la même période sont de 14,7°C (fig. 51). Le maximum principal des températures intervient en mars avec 18,8°C (fig. 45), tandis que le maximum secondaire est noté en juillet avec 17,6°C (fig. 47). Le minimum principal est noté en décembre-janvier (fig. 49) avec 9,4 et 9,9°C. Le minimum secondaire intervient en août avec 17,5°C (fig. 47).

L'écart diurne moyen annuel est de 13,9°C (tab. 27). Il est très élevé durant la saison non pluvieuse où il atteint 19,9°C en février ; il baisse avec l'arrivée des pluies et n'est plus que de 7,7°C en août (tab. 27). L'amplitude thermique annuelle qui est la différence de température moyenne entre le mois le plus chaud et le mois le plus frais est de 6,1°C. Elle est partout inférieure à l'écart moyen diurne.

Le tableau 27 indique des écarts beaucoup plus faibles pour les températures minimales et moyennes que maximales. L'évolution mensuelle consacre partout une allure bimodale des températures, avec une tendance plus marquée pour les températures maximales. La précocité des maxima principaux pour le régime thermique guinéen (mars-avril) découle surtout de l'évolution progressive de la mousson. Le mois de mars à avril correspond à une transition entre la saison sèche et celle des pluies, ce qui explique les fortes valeurs de températures.

1.2.2. Le régime thermique sud-soudanien

Les stations de Bamako à l'est et de Kénieba au centre des hauts bassins illustrent le mieux le régime thermique sud-soudanien.

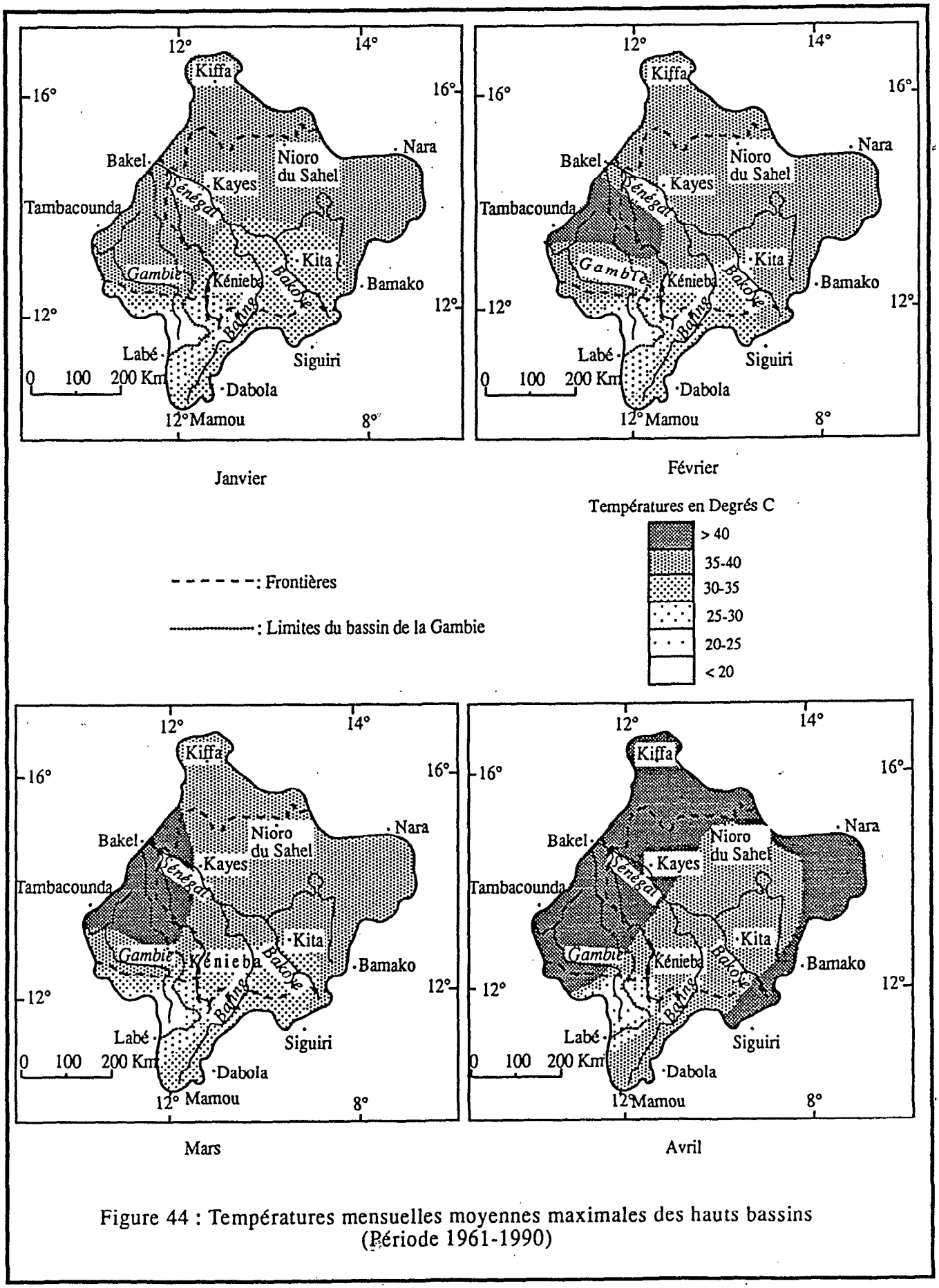


Figure 44 : Températures mensuelles moyennes maximales des hauts bassins (Période 1961-1990)

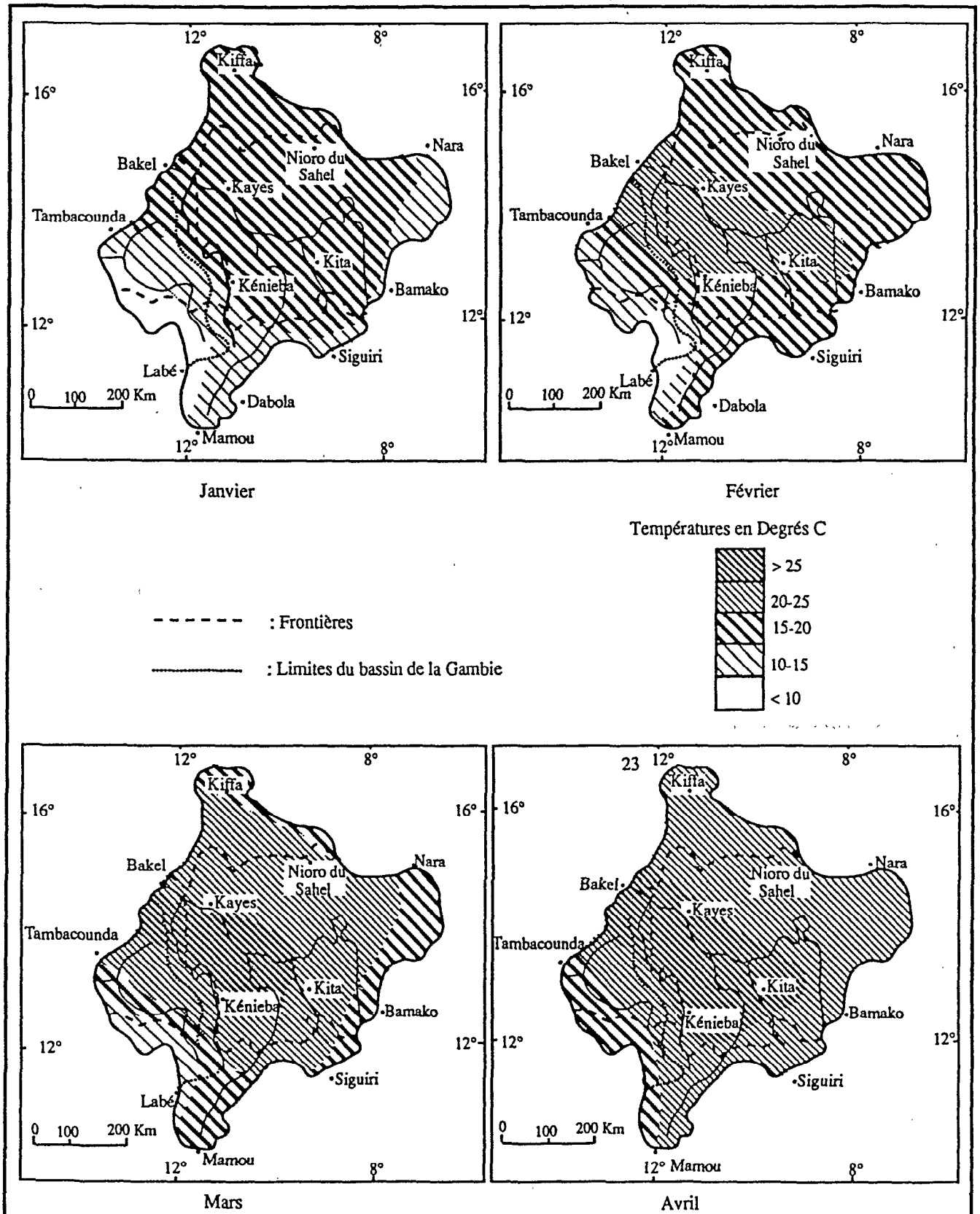


Figure 45 : Températures mensuelles minimales moyennes des hauts bassins (Période 1961-1990)

Tableau 27 : Caractéristiques des températures mensuelles en domaines climatiques guinéen, sud-soudanien et nord-soudanien

	Domaine guinéen				Domaine sud-soudanien								Domaine nord-soudanien							
Stations	Labé				Bamako				Kénieba				Kayes				Tambacounda			
Mois	Tn	Tm	Tx	Am	Tn	Tm	Tx	Am	Tn	Tm	Tx	Am	Tn	Tm	Tx	Am	Tn	Tm	Tx	Am
Janvier	9,9	19,6	29,4	19,5	16,6	24,9	33,3	16,8	18,5	26,5	34,6	16,2	16,6	25	33,3	16,7	13,1	25,6	38	24,9
Février	11,7	21	31	19,9	19,6	28	36,4	16,8	20,8	29	37,3	16,5	19,3	27,9	36,6	17,3	15,4	27,7	40	24,6
Mars	18,8	23,1	32,3	18,4	22,5	30,5	38,6	16,1	23,2	31,2	39,2	16	22,2	30,7	39,2	17	17,8	29,8	41,8	23,9
Avril	16,8	24,6	32,4	15,6	24,8	32,1	39,5	14,7	25,5	32,9	40,3	14,8	25,6	33,5	41,4	15,8	20,9	31,9	42,9	22
Mai	17,5	24	30,5	13	25,3	31,6	37,9	12,5	26,6	32,7	38,9	12,3	28,1	34,9	41,7	13,6	22,7	32,9	43	20,3
Juin	17,4	22,5	27,6	10,2	23,4	29,1	34,7	11,3	24,4	29,4	34,5	10,1	26,6	32,4	39,1	11,5	20,5	30,7	40,8	20,3
Juillet	17,6	21,7	25,7	8	22	27,2	32,3	10,3	23,1	32,2	31,4	18,3	24,2	28,8	33,4	9,2	20	28,1	36,1	16
Août	17,5	21,3	25,2	7,7	21,7	26,5	31,3	9,5	22,7	26,6	30,5	7,7	23,4	27,8	32,1	8,6	20,4	27,2	34	13,6
Septembre	16,8	21,4	26	9,1	21,5	26,8	32,2	10,7	22,4	26,9	31,3	8,8	23,3	28,2	33,2	9,8	20,1	27,6	35,2	15,1
Octobre	16,1	21,6	27,1	10,9	20,9	27,8	34,7	13,8	22,1	27,6	33,1	11	23,1	29,7	36,3	13,1	18,9	28,3	37,8	18,9
Novembre	12,5	20,3	28,2	15,9	17,7	26,4	35,1	17,3	18,1	26,6	35,1	17	20,1	28,4	36,7	16,6	14	26,4	38,8	24,8
Décembre	9,4	18,5	27,6	18,2	16	25	33	17	16,3	25,3	34,2	17,9	17,1	25,2	33,4	16,5	12,5	25	37,6	25,1
Moyenne	14,7	21,6	28,6	13,9	21	28	34,9	13,9	22	28,9	35	13,9	22,5	29,4	36,3	13,8	18,8	27,6	43,4	31,7

Tn : Température minimale
Tm : Température Moyenne
Tx : Température maximale
Am : Ecart diurne moyen annuel = Tx-Tn

Les températures maximales moyennes annuelles entre les deux stations sont assez voisines (tab. 27). Elles s'élèvent à 34,9°C à Bamako et à 35°C à Kénieba (fig. 50).

Les maxima principaux interviennent en avril avec 39,5°C à Bamako et 40,3°C à Kénieba (fig. 44). Les maxima secondaires surviennent en novembre avec 35,1°C aux deux stations (fig. 48). Les minima principaux sont notés en décembre avec 33°C à Bamako et 34,2°C à Kénieba. Les minima secondaires sont notés en août et sont plus élevés à Kénieba (22,7°C) qu'à Bamako (21,7°C).

Les températures minimales annuelles aux deux stations sont respectivement de 21°C à Bamako et de 22°C à Kénieba (fig. 51). Le maximum principal des températures minimales est tardif par rapport à celui des températures maximales. Il survient en mai avec 25,3°C à Bamako et 26,6°C à Kénieba (fig. 45). Le maximum secondaire survient en octobre avec 20,9°C à Bamako et 22,1°C à Kénieba (fig. 49). Le minimum principal est noté en décembre avec 16°C à Bamako et 16,3°C à Kénieba. Le minimum secondaire intervient en août avec 21,7°C à Bamako et 22,7°C à Kénieba.

Les variations des températures minimales sont moins sensibles et elles sont surtout influencées par les températures maximales. Celles-ci, assez élevées donnent au régime thermique sud-soudanien une évolution bimodale (tab. 27).

Les écarts diurnes moyens annuels sont de 13,9°C aux deux stations. Ils sont très élevés durant la saison sèche avec 17,5°C à Bamako et 17,9°C à Kénieba. Ils faiblissent en août et ne sont plus que de 7,9°C à Bamako et 7,7°C à Kayes. Les amplitudes thermiques annuelles sont de 7,2°C à Bamako et 7,6°C à Kénieba.

1.2.3. Le régime nord-soudanien

Les stations de Kayes et de Tambacounda représentent des nuances typiques du régime thermique nord-soudanien. Les températures connaissent une hausse plus sensible par rapport aux régimes thermiques précédents (tab. 27).

Les températures maximales annuelles sont de 36,3°C à Kayes et 43,4°C à Tambacounda (fig. 50). Les maxima principaux sont notés en mai avec 41,7°C à Kayes et 43°C à Tambacounda (fig. 46). Les maxima secondaires surviennent en même temps en novembre avec 36,7°C à Kayes et 38,8°C à Tambacounda (fig. 49). Le minimum principal de Kayes avec 33,3°C en janvier (fig. 44) est tardif par rapport à celui de Tambacounda qui survient en décembre avec 37,6°C (fig. 48). Par contre, les minima secondaires des températures maximales sont notés en août avec 32,1°C à Kayes et 34°C à Tambacounda.

Les températures minimales moyennes annuelles à Kayes représentent presque le double de celles de Tambacounda (fig. 51). Elles sont respectivement de 22,5°C à Kayes et 11,7°C à Tambacounda. La place des maxima ne varie pas par rapport à celle des températures maximales. Elle est toujours en mai avec 28,1°C à Kayes et 22,7°C à Tambacounda (fig. 47).

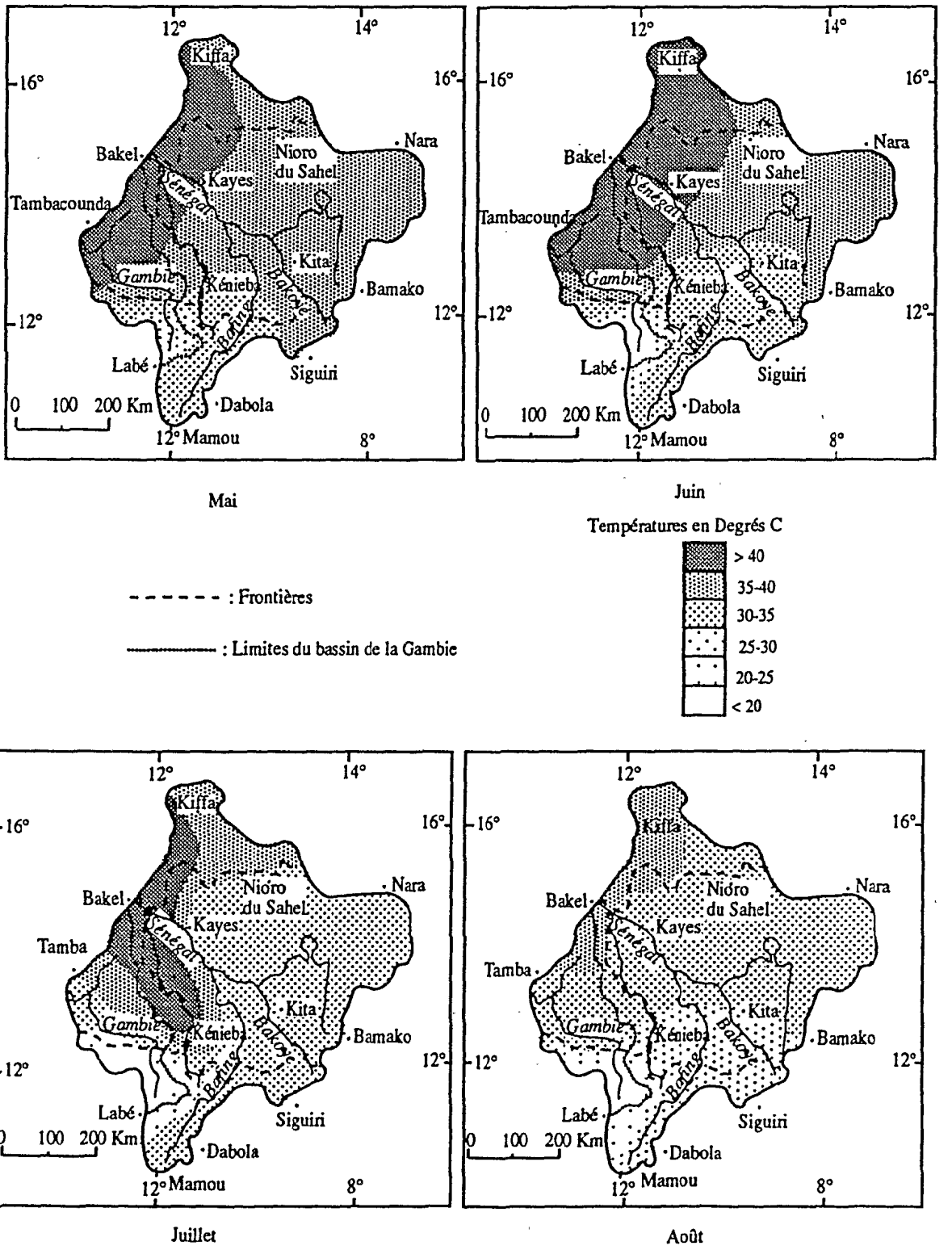


Figure 46 : Températures mensuelles maximales moyennes des hauts bassins (Période 1961-1990)

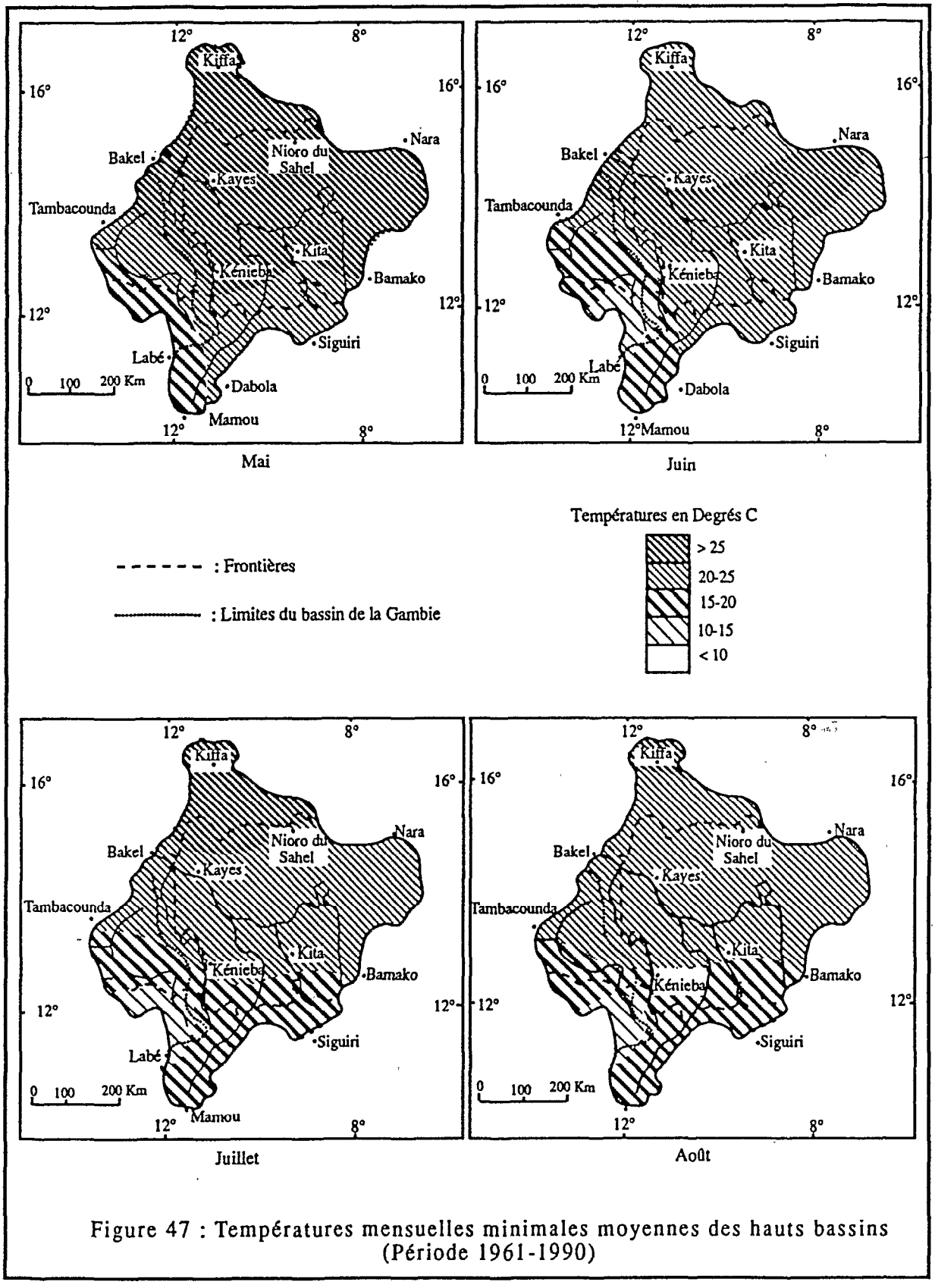


Figure 47 : Températures mensuelles minimales moyennes des hauts bassins (Période 1961-1990)

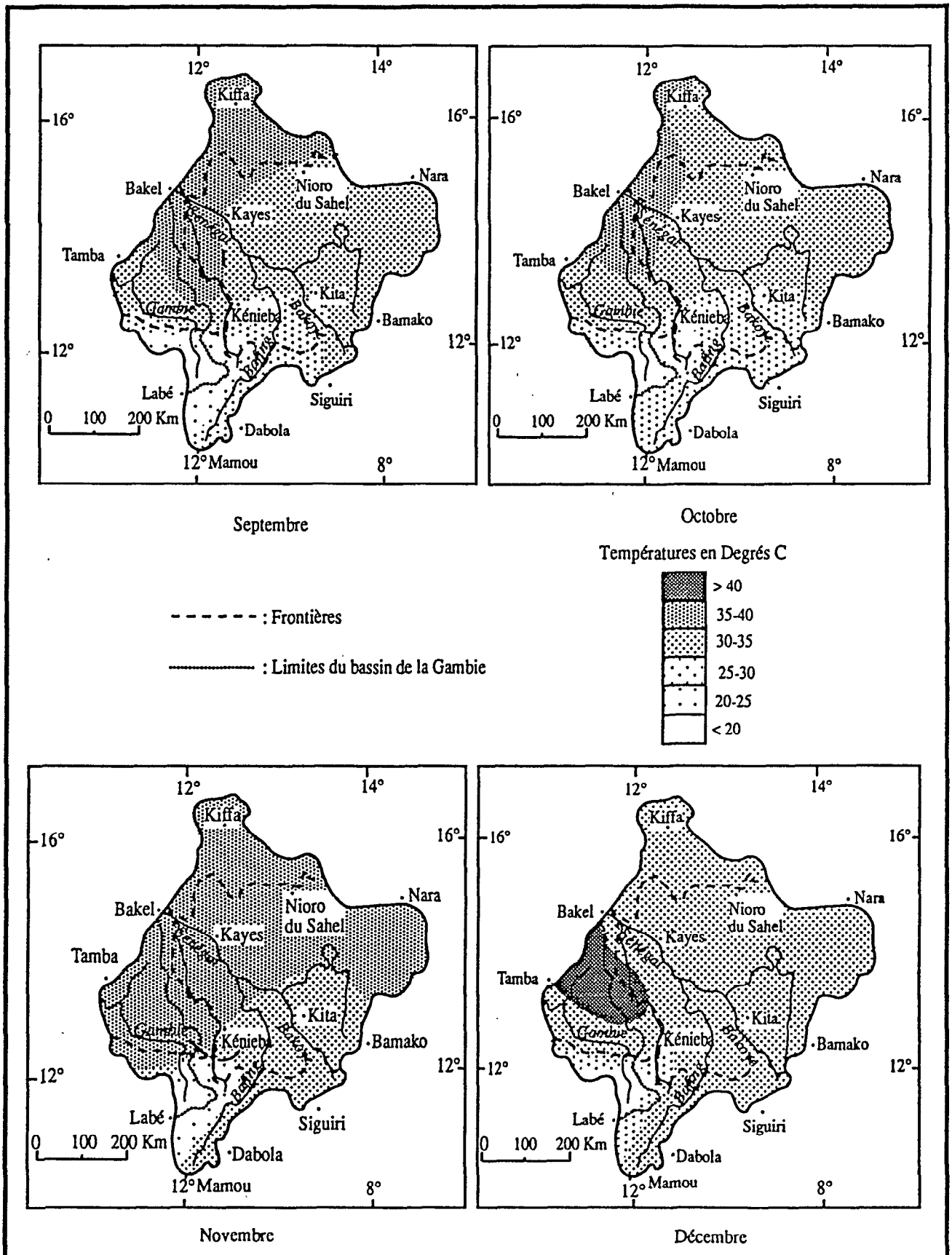


Figure 48 : Températures mensuelles maximales moyennes des hauts bassins (Période 1961-1990)

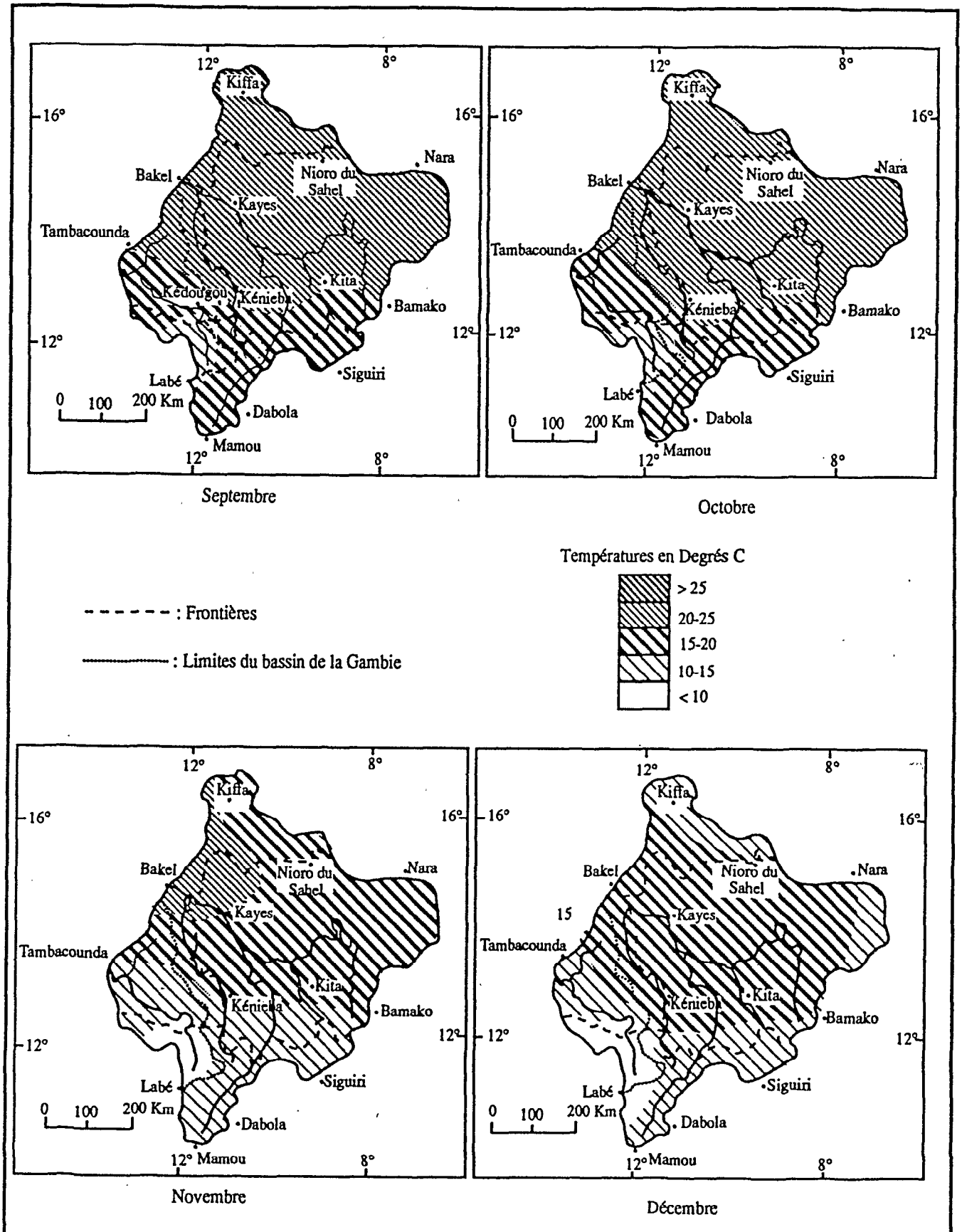


Figure 49 : Températures mensuelles minimales moyennes des hauts bassins (période 1961-1990)

Les maxima secondaires sont plus modérés et surviennent en octobre avec 23,1°C à Kayes et 18,9°C à Tambacounda (fig. 49). Les minima principaux sont tous de janvier (fig. 45) avec 16,6°C à Kayes et 13,1°C à Tambacounda. Le minimum secondaire de Kayes correspond au mois d'août avec 23,4°C. Celui de Tambacounda est précoce et intervient en juillet avec 20°C (fig. 47).

Les écarts diurnes moyens annuels sont respectivement de 13,8°C à Kayes et 31,7°C à Tambacounda. Ils sont moins importants durant la saison des pluies (8,6°C à Kayes et 13,6°C à Tambacounda). Leur maximum se situe en février à Kayes (17,3°C) et en décembre à Tambacounda (25,1°C). Les amplitudes thermiques annuelles sont plus élevées à Kayes (9,9°C) qu'à Tambacounda (7,9°C). Le régime thermique nord-soudanien est un régime bimodal.

1.2.4. Le régime thermique sahélien

Le régime thermique sahélien est analysé aux stations de Nioro du Sahel et de Kiffa. Pour la période 1961-1990 (tab. 28), les températures maximales moyennes sont respectivement de 35,9°C à Nioro du Sahel et 36,8°C à Kiffa (fig. 50).

Tableau 28 : Caractéristiques des températures mensuelles en régime sahélien

	Domaine sahélien							
Stations	Nioro du Sahel				Kiffa			
Mois	Tn	Tm	Tx	Am	Tn	Tm	Tx	Am
Janvier	13,4	22,4	31,4	18	17,8	24,2	30,5	12,7
Février	16	25,3	34,6	18,6	20,7	27,3	33,9	13,2
Mars	19,5	28,4	37,4	17,9	23,5	30,3	37	13,5
Avril	23,6	31,8	40	16,4	25,5	32,8	40,1	14,6
Mai	27	34,3	41,5	14,5	25,8	34,1	42,3	16,5
Juin	26,8	33,1	39,4	12,6	23,8	32,8	41,8	18
Juillet	24,6	29,7	34,7	10,1	22,3	30,2	38,2	16
Août	23,5	28,1	32,8	9,3	21,6	28,9	36,3	14,7
Septembre	23,4	28,9	34,5	11,1	21,4	29,4	37,4	16
Octobre	22,5	29,9	37,3	14,8	21,1	29,8	38,5	17,5
Novembre	18,1	26,9	35,7	17,6	18,4	27	35,6	17,2
Décembre	14,2	22,9	31,6	17,4	17,4	24,5	30,8	13,4
Moyenne	21,1	28,5	35,9	14,3	21,6	26,3	31	9,3

Les maxima principaux assez voisins surviennent en mai avec 41,5°C à Nioro du Sahel et 42,3°C à Kiffa (fig. 46). Les maxima secondaires interviennent en octobre avec respectivement 37,3°C à Nioro du Sahel et 38,5°C à Kiffa.

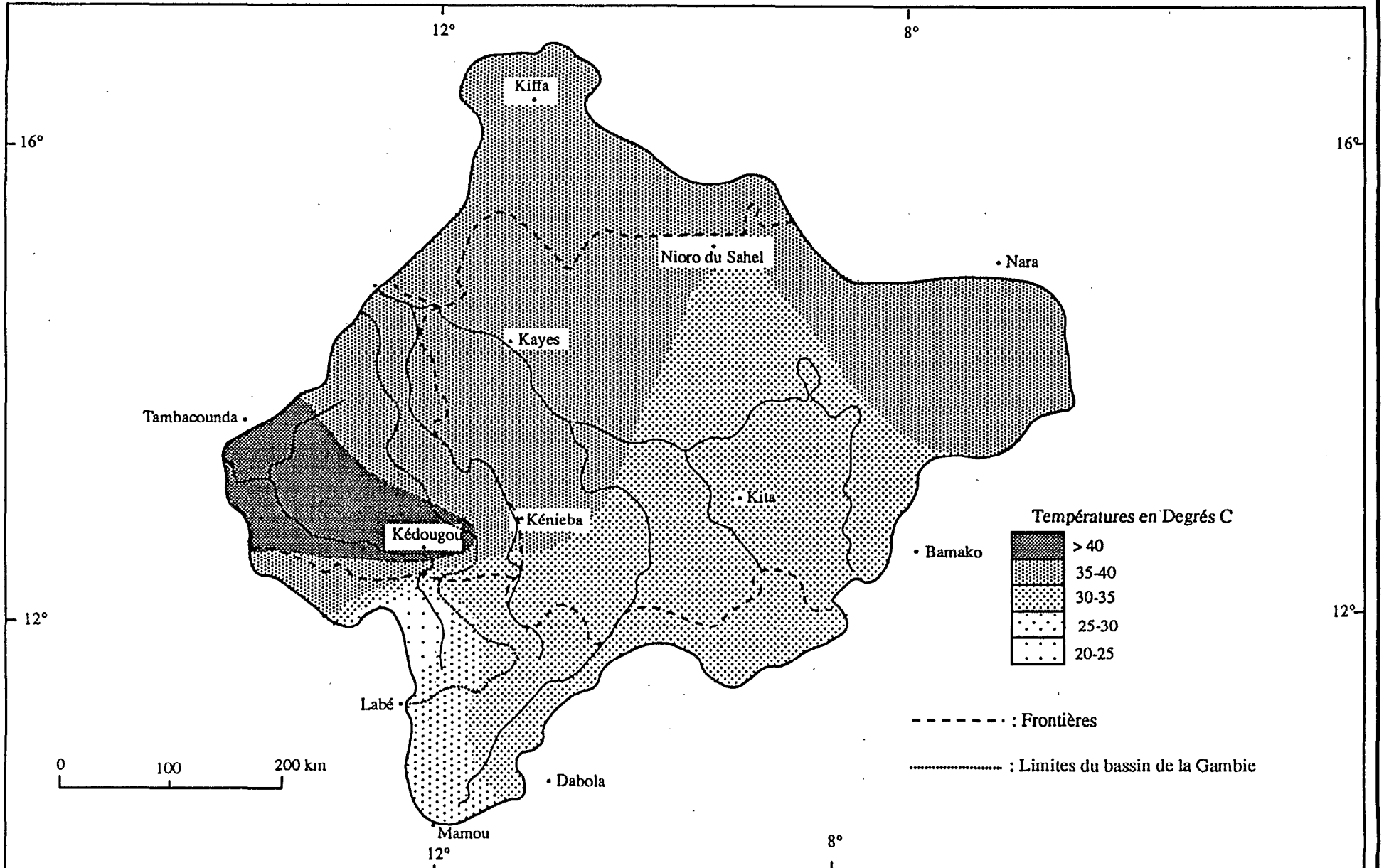


Figure 50 : Températures maximales moyennes annuelles des hauts bassins
(période 1961-1990)

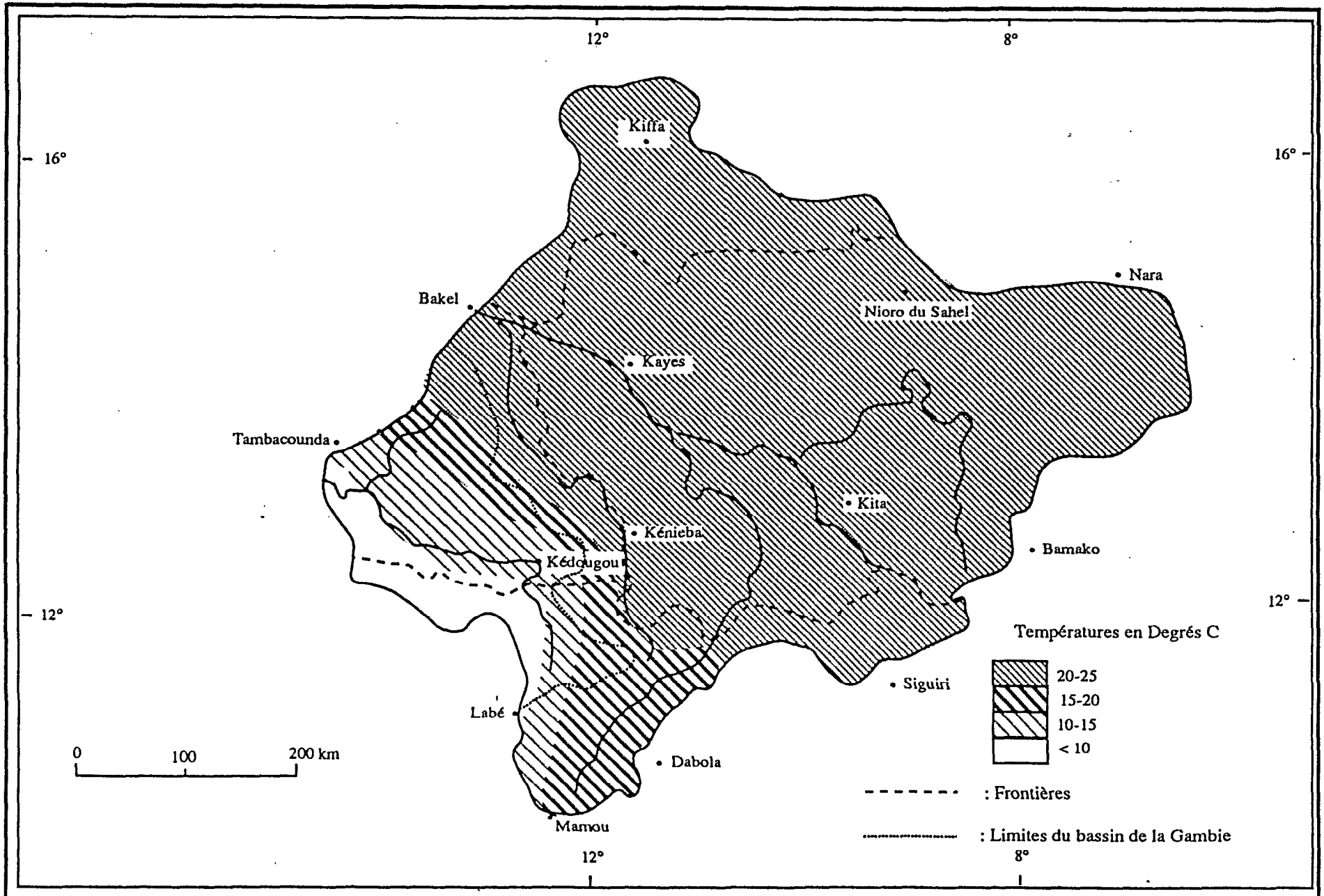


Figure 51 : Températures minimales moyennes annuelles des hauts bassins (période 1961-1990)

Les minima principaux des températures maximales sont notés en janvier avec 31,5°C à Nioro du Sahel et 30,5°C à Kiffa (fig. 44). Les minima secondaires interviennent en août avec 32,8°C à Nioro du Sahel et 36,3°C à Kiffa (fig. 46).

Les températures minimales annuelles sont assez voisines aux deux stations (fig. 51). Elles sont respectivement de 21,1°C à Nioro du Sahel et 21,6°C à Kiffa. Le mois de mai correspond toujours aux maxima principaux des températures avec 27°C à Nioro du Sahel et 25,8°C à Kiffa (fig. 45). Le maximum secondaire d'octobre est beaucoup plus faible puisqu'il n'est que de 22,5°C et 21,1°C respectivement à Nioro du Sahel et Kiffa (fig. 49).

Le minimum principal est tardif à Nioro du Sahel (fig. 45) et est noté en janvier (13,4°C), alors qu'il survient en décembre (fig. 49) à Kiffa (17,4°C).

Le minimum secondaire survient en septembre à Nioro du Sahel et est assez élevé (23,4°C). Il est noté en octobre à Kiffa avec 21,1°C. Les écarts diurnes moyens annuels sont les plus forts des hauts bassins avec 14,8°C à Nioro du Sahel et 15,2°C à Kiffa. Leur maximum est noté en saison sèche comme aux autres stations.

Ce maximum des écarts diurnes est précoce à Kiffa (17,5°C) en octobre et survient en même temps que le maximum secondaire des températures. Il est tardif à Nioro du Sahel et n'apparaît qu'en février (18,6°C).

Les minima qui surviennent au cœur de la saison des pluies sont relativement élevés. Ils varient de 9,3°C à Nioro du Sahel à 14,7°C à Kiffa. L'amplitude thermique annuelle est plus forte à Nioro du Sahel (11,9°C) qu'à Kiffa (9,9°C).

Ces variations dans la position du minimum principal entre Nioro du Sahel et Kiffa n'altère pas l'évolution du régime thermique sahélien. Celui-ci reste bimodal avec un maximum principal noté en mai et un maximum secondaire qui survient en octobre. Les minima principaux surviennent en décembre à Kiffa et en janvier à Nioro du Sahel. Les minima secondaires connaissent aussi un décalage d'un mois puisqu'ils sont notés en septembre et en octobre respectivement à Nioro du Sahel et à Kiffa.

L'évolution générale des températures mensuelles et les régimes thermiques qui en découlent montrent certaines caractéristiques fondamentales (fig 52) :

- Les maxima principaux sont toujours enregistrés en saison sèche avec un décalage d'un mois du sud au nord des hauts bassins ;
- Les maxima secondaires sont aussi notés au début de la saison sèche, généralement en octobre ou novembre. Les maxima principaux et secondaires précédent et suivent ainsi la saison des pluies.
- Les minima principaux interviennent en décembre-janvier tandis que les minima secondaires sont surtout notés au cœur de la saison des pluies, particulièrement au mois d'août ;
- Les écarts diurnes dépendent de la sécheresse de l'atmosphère et sont plus élevés au début de la saison sèche (janvier-février). Ils sont faibles durant la saison des pluies, l'air humide de la mousson atténuant le rayonnement nocturne. Ils augmentent du sud au nord des hauts bassins.

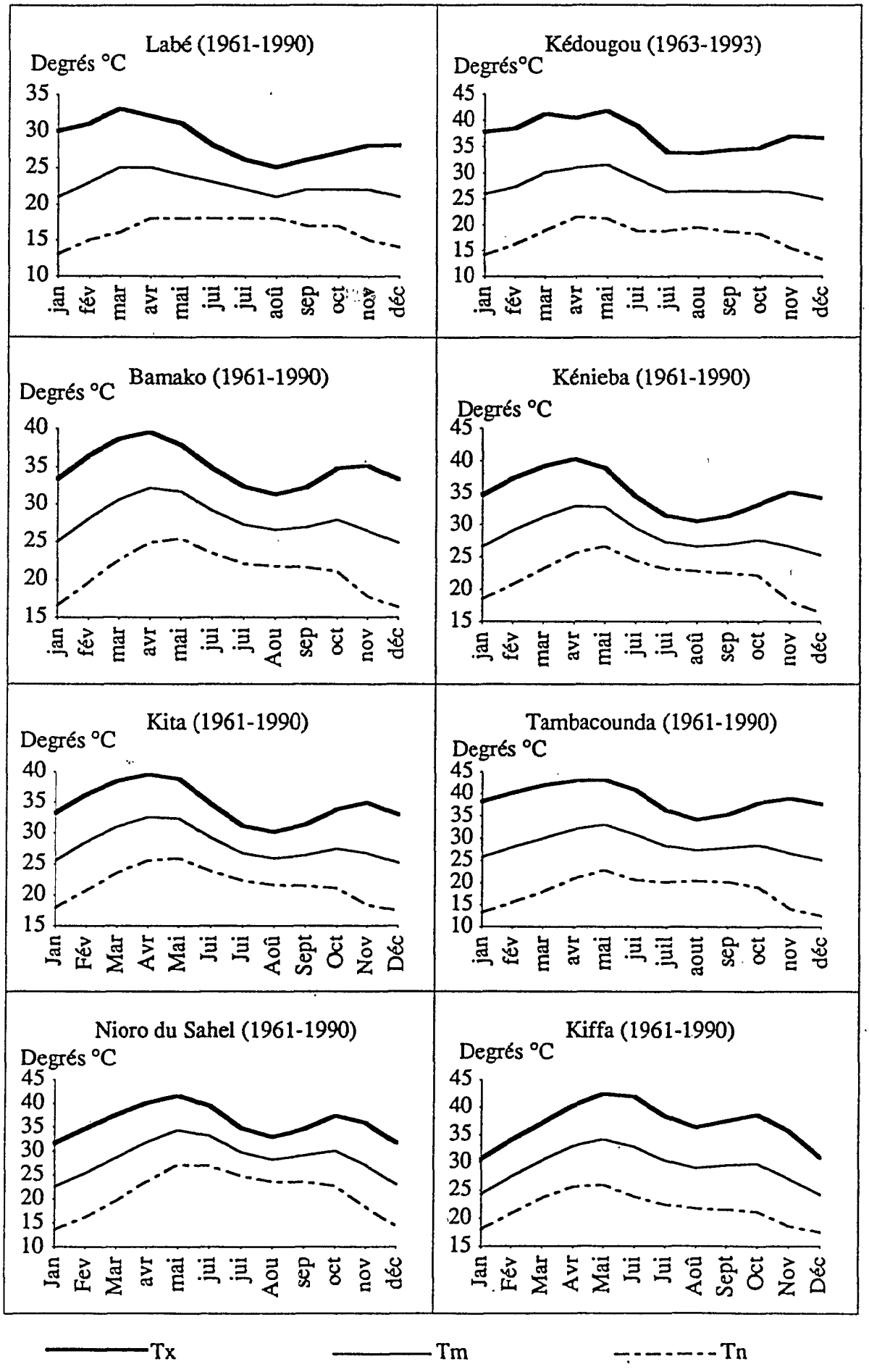


Figure 52 : Evolution mensuelle des températures maximales, moyennes et minimales dans les hauts bassins (période 1961-1990)

- L'évolution générale des températures est tronquée par l'évolution cosmique qui déterminerait un maximum d'été et un minimum d'hiver. Les régimes bimodaux observés résultent ainsi des précipitations enregistrées, de la diminution de l'insolation, de l'augmentation de l'humidité relative qui accompagne la mousson et de l'écran nuageux ;
- Les régimes thermiques connaissent des nuances du sud au nord en fonction de l'arrivée de la mousson, de la diminution de l'altitude et de la discontinuité du couvert végétal.

Ces variations saisonnières des températures se répercutent aussi sur les températures annuelles qui déterminent l'évolution interannuelle.

2. LES TEMPERATURES MOYENNES ANNUELLES

Les données de températures des hauts bassins proviennent des réseaux météorologiques nationaux qui se partagent les hauts bassins. Elles sont relevées aux stations de base retenues dans l'analyse pluviométrique.

Tableau 29 : Etat des données de températures par stations

Stations	Période observée	Domaine climatique
Nioro du Sahel	1941-1993	sahélien
Kiffa	1954-1993	
Nara	1977-1993	
Kayes	1941-1993	nord-soudanien
Tambacounda	1951-1993	
Kita	1955-1993	
Faladye	1932-1980	sud-soudanien
Kédougou	1963-1993	
Kénieba	1948-1993	
Bamako	1941-1993	
Labé	1939-1990	guinéen

Comme le montre le tableau 29, les données de températures des hauts bassins connaissent une hétérogénéité des séries chronologiques. Elles sont aussi sujettes à des lacunes, comme les données pluviométriques. Ces différentes remarques nous amènent dans notre analyse des températures à adopter une démarche qui va du général au particulier.

Dans un premier temps, nous étudions année après année comment se distribuent les températures dans les hauts bassins. Dans le souci d'englober le maximum de stations, le recoupement de ces informations retient les périodes 1951-1970 et 1972-1993, ainsi que la normale 1961-1990, pour l'étude des caractères thermiques moyens.

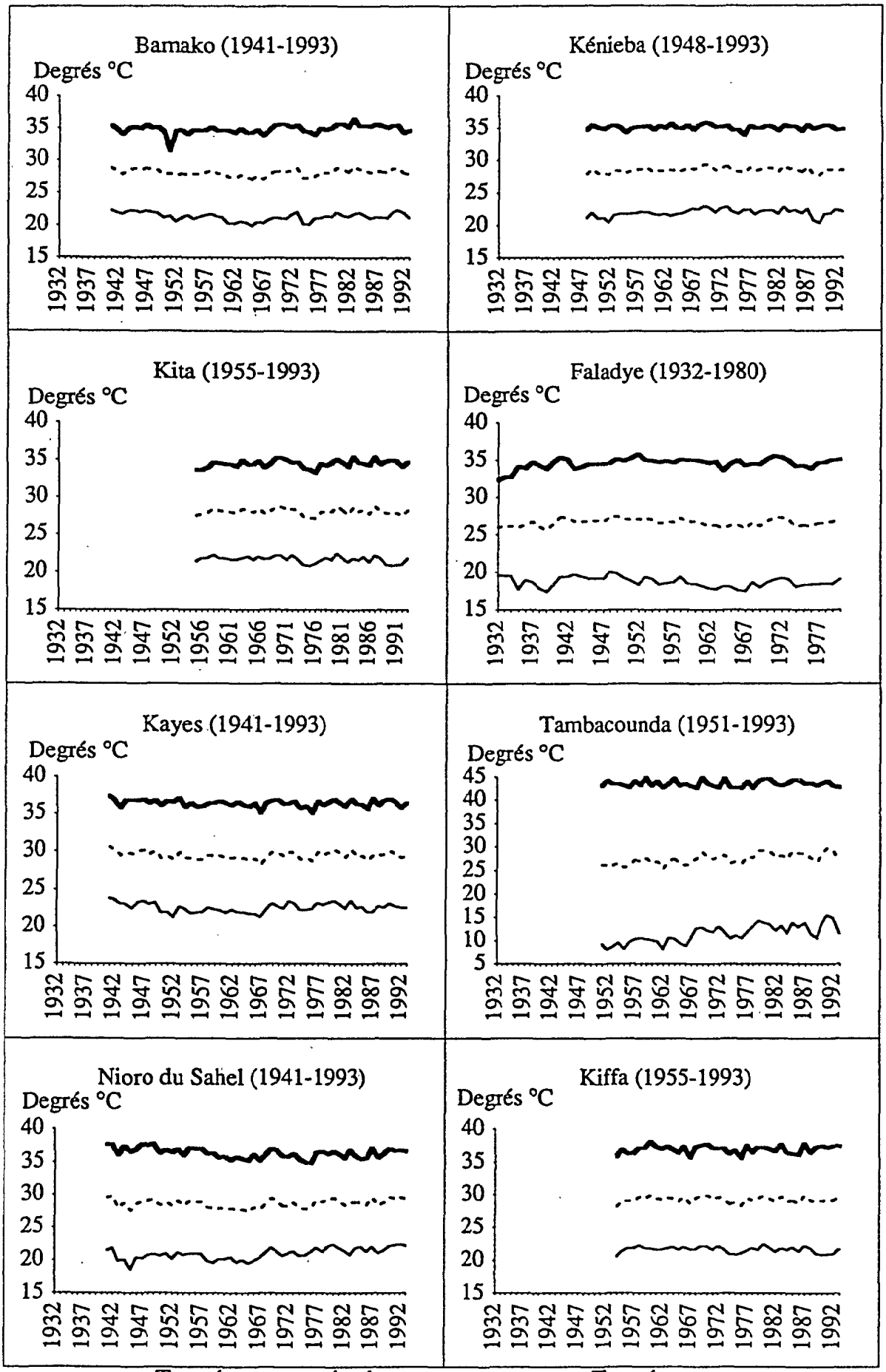


Figure 53 : Températures annuelles maximale, moyenne et minimale dans les hauts bassins depuis l'origine des mesures

2.1. Les courbes générales

Les valeurs de températures maximales et minimales moyennes annuelles sont représentées sur la figure 53. Malgré leur tracé à la même échelle pour des séries de longueur inégale, on se rend compte d'emblée du peu d'informations qui peuvent en être tirées. Elles le sont encore moins pour les séries courtes comme Kita ou Kédougou qui n'apportent pas de compléments significatifs.

Tableau 30 : Comparaison entre températures maximales et minimales moyennes à différentes stations

Stations	Températures	Période 1941-1993	Période 1951-1970	Période 1972-1993
Kiffa	Tx moy.	-	-	36,9
	Tn moy.	-	-	21,5
Nioro du Sahel	Tx moy.	36,3	36,1	36
	Tn moy.	20,9	20,4	21,5
Kayes	Tx moy.	36,3	36,3	36,3
	Tn moy.	22,6	22	22,7
Tambacounda	Tx moy.		43,4	43,4
	Tn moy.		9,9	12,5
Faladye	Tx moy.	-	34,7	-
	Tn moy.	-	18,3	-
Bamako	Tx moy.	34,8	34,4	35
	Tn moy.	21,3	20,8	21,3
Kénieba	Tx moy.	-	35,1	34,9
	Tn moy.	-	23	21,9
Labé	Tx moy.	-	28,7	28,6
	Tn moy.	-	13,4	14,7
Mamou	Tx moy.	-	29,9	-
	Tn moy.	-	17,1	-

L'observation de ces graphiques montre qu'il y a peu de changements réels dans l'allure générale des courbes. Les moyennes annuelles des stations les plus anciennes notamment Bamako, Kayes et Nioro du Sahel traduisent une très faible variation. Pourtant ces trois stations sont à des latitudes et à des situations géographiques différentes. Les températures maximales moyennes pour la période 1941-1993 sont respectivement de 34,8°C à Bamako et 36,3°C à Kayes et à Nioro du Sahel.

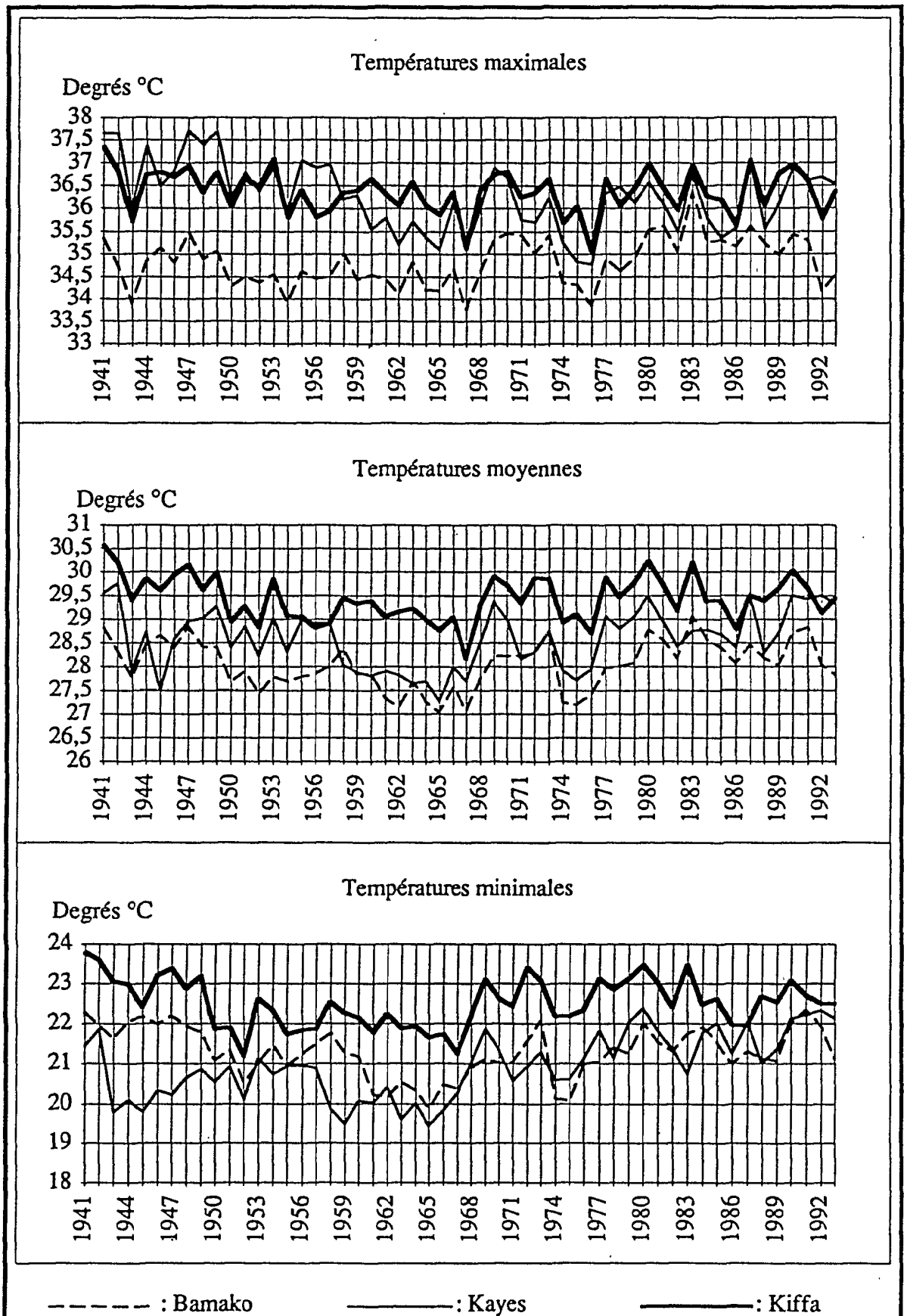


Figure 54 : Evolution des températures maximales, moyennes et mininales dans les hauts bassins

Les températures minimales moyennes pour la même période accusent elles aussi une faible différenciation. Elles sont de 21,3°C à Bamako, 22,6°C à Kayes et 20,9° à Nioro du Sahel. La figure 54 qui visualise cette comparaison montre une tendance presque similaire des courbes pour les trois stations.

Le tableau 30 qui compare les températures maximales et minimales moyennes pour les périodes 1941-1993, 1951-1970 et 1972-1993 confirme les mêmes faibles écarts entre les stations. Ceux-ci ne dépassent jamais 0,8°C. Ils sont aussi plus fréquents pour les températures minimales.

On peut donc retenir globalement, que les températures annuelles des hauts bassins varient peu. Les températures, en permanence élevées, sont liées à la latitude tropicale des hauts bassins. Les valeurs les plus fortes reviennent aux températures maximales alors que les températures minimales sont plus modérées et induisent les nuances les moins perceptibles. Cependant, ces valeurs ne sont que des moyennes et ne traduisent que la tendance générale d'une période.

2.2. La distribution spatiale des températures annuelles

Les températures des hauts bassins se répartissent suivant un gradient méridien principal. Ce gradient est fonction de l'extension en latitude des hauts bassins mais aussi de sa continentalité ce qui permet de différencier plusieurs zones climatiques : la zone guinéenne au sud, la zone soudanienne dans ses composantes sud-nord et la zone sahélienne.

2.2.1. Le gradient sud-nord des températures annuelles

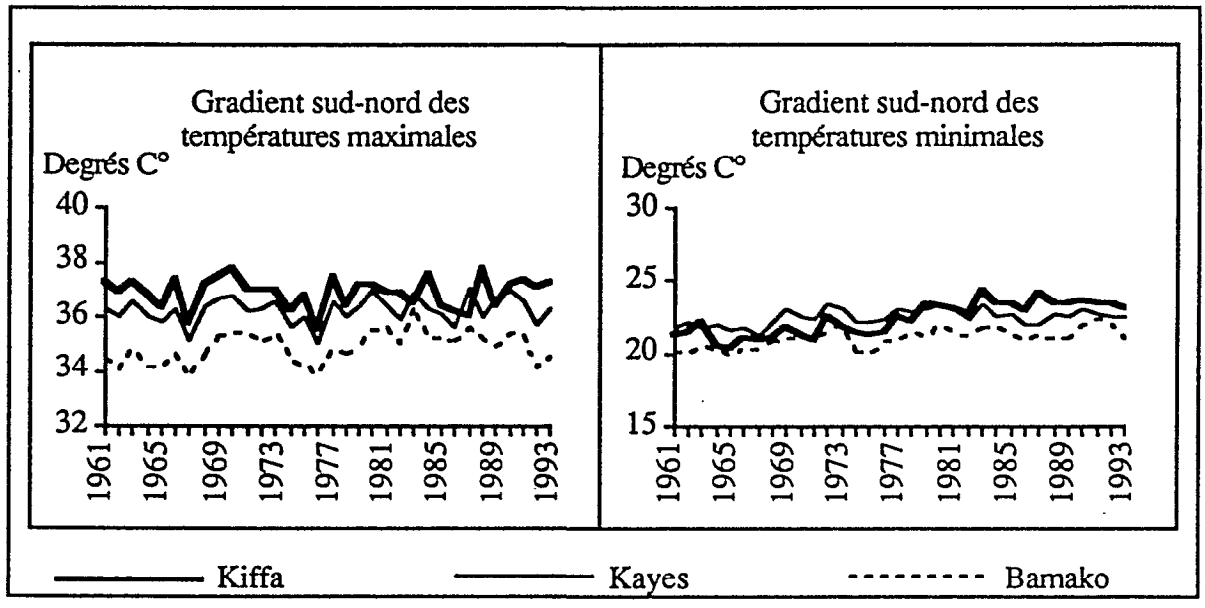
La figure 55 présente l'évolution spatiale du sud au nord des températures moyennes maximales et minimales. En l'absence de données annuelles continues pour le domaine guinéen, c'est la station de Bamako en domaine sud-soudanien qui est retenue avec Kayes et Kiffa.

L'observation des deux graphiques met en évidence des températures maximales moins élevées à Bamako par rapport aux autres stations. La station de Kiffa, la plus septentrionale enregistre les températures les plus élevées.

Par contre l'écart est moins accentué pour les températures minimales surtout pour la première décennie. La comparaison des courbes de Kayes et de Kiffa est assez édifiante puisqu'elle montre une allure similaire pour les températures maximales. Seul le décalage des courbes traduit les valeurs plus élevées atteintes par la station la plus au nord.

En revanche, on observe dans l'allure des températures minimales une légère hausse, plus marquée entre 1961 et 1974 à Kayes qu'à Kiffa. La station de Bamako enregistre les températures minimales les moins élevées des trois stations, même si on note une légère hausse entre 1989 et 1992.

Figure 55 : Gradient thermique sud-nord d'après trois stations des hauts bassins



Le gradient de températures pour la période 1961-1993 confirme la hausse des températures du sud au nord des hauts bassins. Cette hausse est manifeste entre la région montagneuse du Fouta Djalon et les plaines sahéliennes du nord des hauts bassins. Elle est aussi plus significative pour les températures maximales.

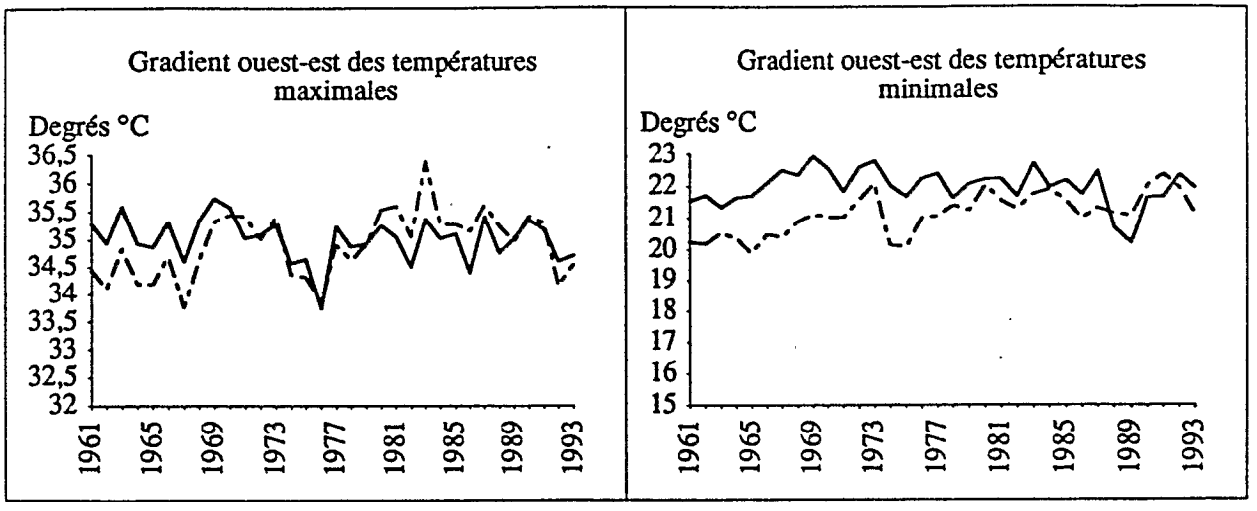
2.2.2. Le gradient ouest-est des températures

Le gradient ouest-est nous renseigne sur la différence de températures annuelles entre les stations d'un même domaine climatique. La figure 56 visualise deux à deux à travers les hauts bassins l'évolution des températures maximales et minimales annuelles. Les graphiques de cette figure appellent quelques remarques :

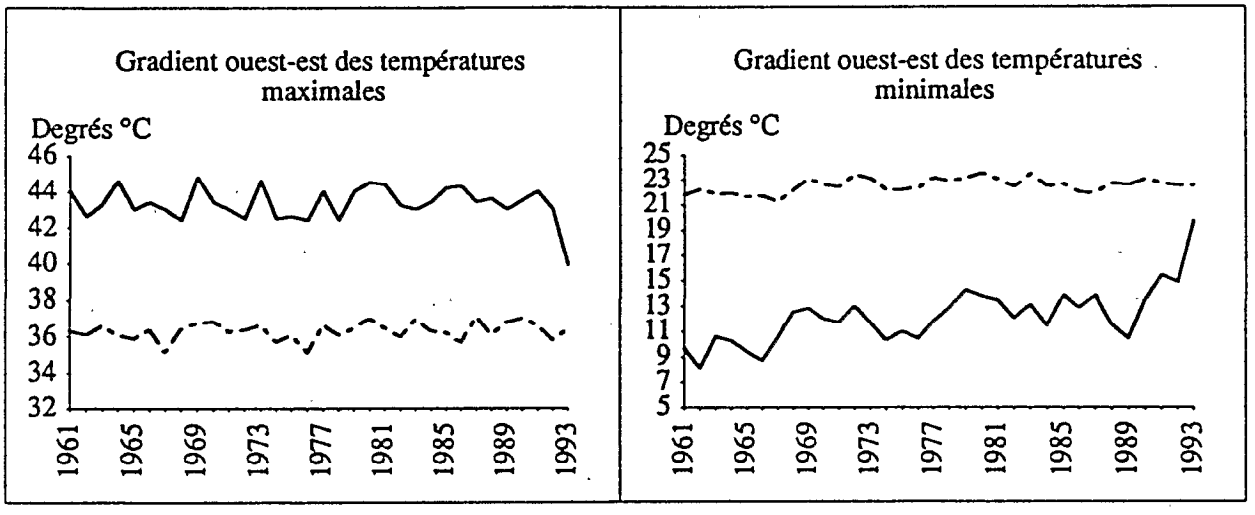
- Les températures maximales moyennes croissent d'ouest en est avec cependant des nuances d'un domaine à l'autre.

En domaine guinéen, l'orographie et la continentalité constituent les principaux facteurs de différenciation thermique. Ainsi, la station de Labé, située à 1025 m d'altitude et directement exposée au flux de mousson, connaît des températures beaucoup plus fraîches que les autres stations guinéennes situées à l'est et à altitude plus faible.

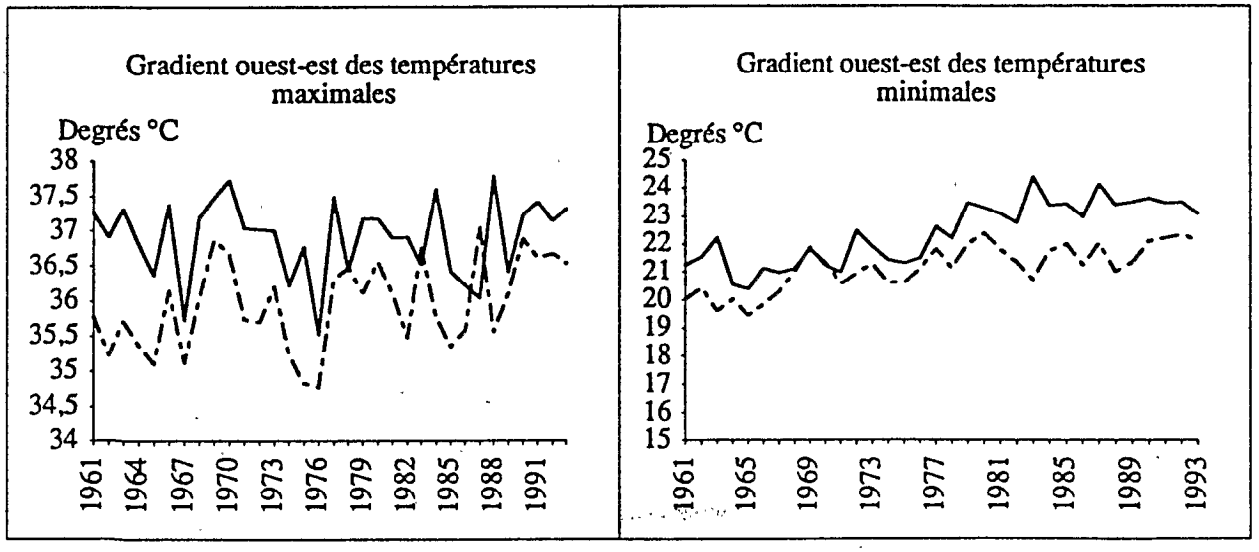
En domaine sud-soudanien, les températures maximales de Kénieba (à l'ouest) sont plus élevées que celles de Bamako pour la décennie 1961-1970. Au-delà de cette période ce sont les températures de la dernière station citée qui sont plus fortes. En fait, Bamako, très à l'est des hauts bassins, est sensible aux vents d'harmattan qui peuvent influencer sa température.



Domaine sud-soudanien : ---- Bamako ——— Kénieba



Domaine nord-soudanien : ------ Kayes ——— Tambacounda



Domaine sahélien : ------ Nioro du Sahel ——— Kiffa

Figure 56 : Gradient thermique ouest-est à différentes stations des hauts bassins

En domaine nord-soudanien, les températures maximales moyennes de Tambacounda sont nettement supérieures à celles de Kayes. Les écarts entre les deux stations atteignent 5°C environ, ce qui se traduit par un gradient d'est en ouest dans ce domaine .

Le gradient thermique, croissant d'ouest en est, est aussi noté en domaine sahélien, mais il est plus modéré entre les stations de Kiffa et de Nioro du Sahel.

- Les températures minimales moyennes connaissent elles aussi un gradient d'accroissement ouest-est. Le domaine nord-soudanien en est la meilleure illustration avec les stations de Tambacounda et de Kayes.

L'analyse du gradient thermique dans les hauts bassins montre que la distribution des températures annuelles est surtout fonction des facteurs géographiques : latitude, longitude et altitude (Fouta Djalon). Ces variations spatiales des températures sont aussi temporelles.

3. EVOLUTION INTERANNUELLE DES TEMPERATURES

L'évolution interannuelle des températures est analysée dans un premier temps à partir des séries de références et des températures décennales. A l'appui des périodes déjà définies (1951-1970 et 1972-1993), nous étudions les paramètres statistiques de cette variabilité.

Puis nous dégageons la tendance générale des températures des hauts bassins pour la période récente (1961-1993).

3.1. La variabilité des températures annuelles

Les faibles écarts observés entre les températures maximales et minimales moyennes à travers les périodes retenues masquent des différences qui peuvent exister d'une année à l'autre.

L'analyse des figures 57, 58 et 59 qui présentent les écarts de la température (maximale ou minimale) d'une année par rapport à la moyenne appelle quelques remarques :

- Les températures maximales et minimales connaissent une grande variation d'une année à l'autre. Leur distribution autour de la moyenne est assez régulière ;
- Les températures maximales ou minimales peuvent avoir une même évolution sur plusieurs années ce qui permet de distinguer des périodes de hausse et de baisse ;
- Les maxima et les minima annuels de températures ne correspondent pratiquement pas d'une station à l'autre, ce qui permet d'entrevoir des maxima et des minima précoces ou tardifs.

Ces caractéristiques interannuelles se confirment au regard des températures décennales (tab. 31). L'évolution des températures moyennes décennales indique une tendance à la hausse des températures. Certes, celle-ci est modérée, parfois même amortie par les fluctuations spatiales. Cependant on peut noter qu'à l'exception de la décennie 1951-1960 (forte pluviométrie), toutes les autres périodes sont marquées par une hausse de leurs températures.

La décennie 1981-1990, qui prolonge ainsi la péjoration pluviométrique est aussi celle des températures les plus fortes enregistrées dans les hauts bassins.

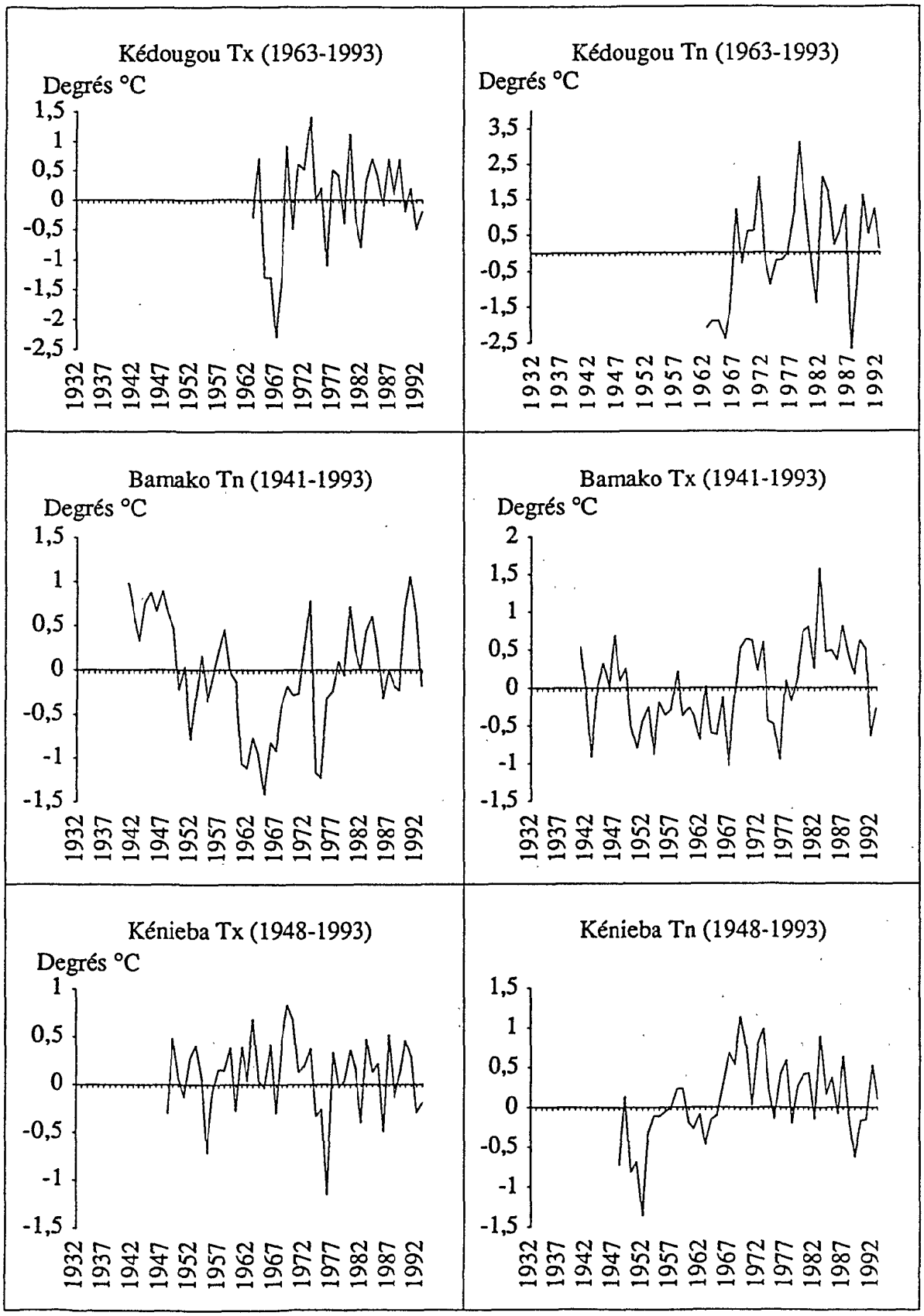


Figure 57 : Ecart de la température d'une année par rapport à la moyenne.

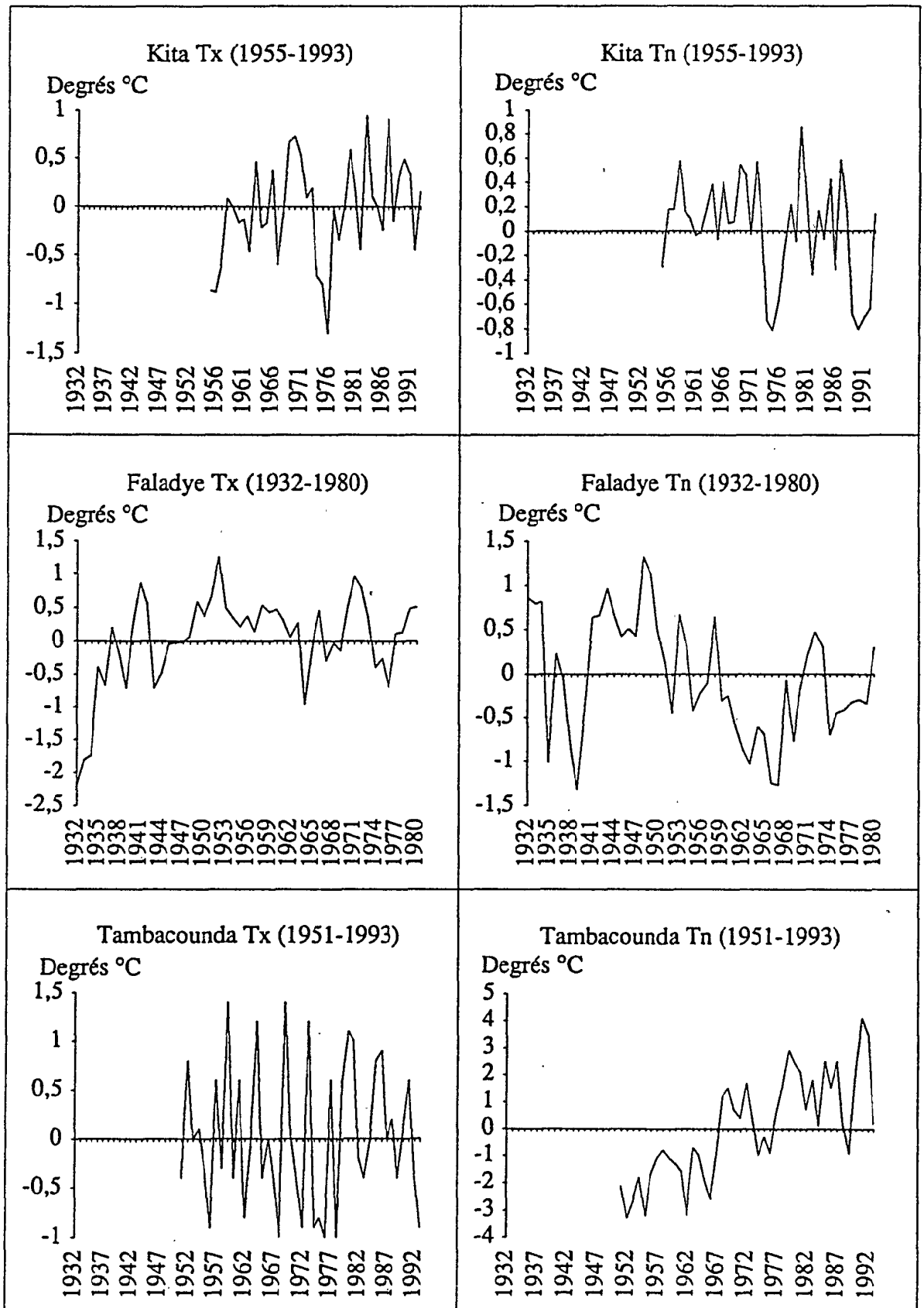


Figure 58 : Ecart de la température d'une année par rapport à la moyenne.

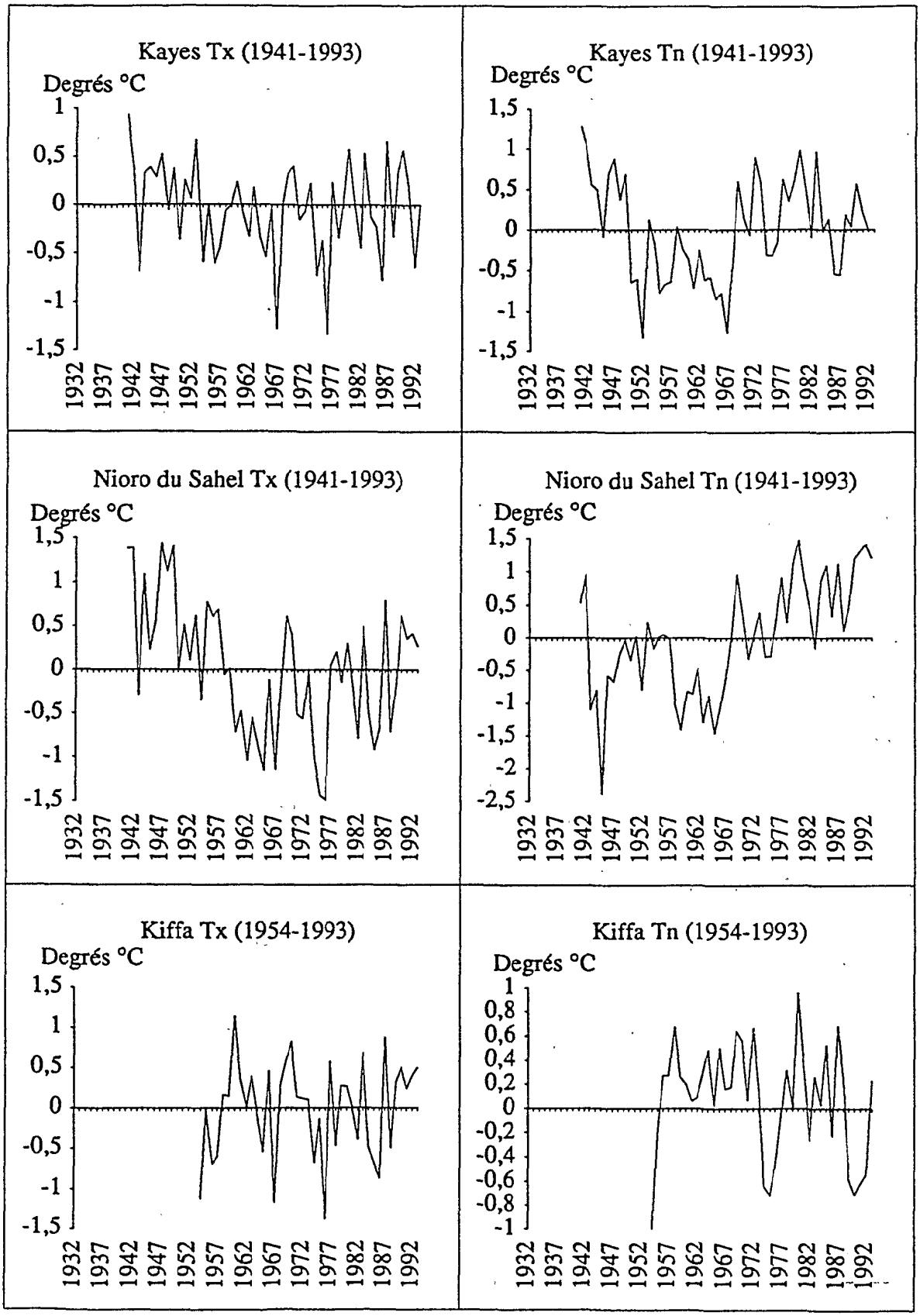


Figure 59 : Ecart de la température d'une année par rapport à la moyenne.

Les valeurs atteintes par les températures minimales, surtout en domaine nord-soudanien et sahélien attestent de la relation entre la baisse des précipitations et l'augmentation des températures.

Tableau 31 : Températures décennales maximales et minimales à quelques stations des hauts bassins

	1941-1950		1951-1960		1961-1970		1971-1980		1981-1990	
	Tx	Tn	Tx	Tn	Tx	Tn	Tx	Tn	Tx	Tn
Bamako	34,8	21,9	34,2	21,2	34,6	20,4	34,8	21,1	35,4	21,4
Kénieba	-	-	35	21,6	35,2	22,1	34,9	22,1	35	27,8
Kédougou	-	-	-	-	41,6	11,4	42,6	13,6	42,5	13,1
Kita	-	-	34,3	21,5	34,6	21,8	34,3	22,3	34,7	21,8
Tambacounda	-	-	43,5	9,4	43,5	10,5	43,3	12,1	43,6	12,6
Kayes	36,6	23	36,3	22	36,2	22,1	36,2	22,8	36,4	30,1
Nioro du Sahel	37,1	20,4	36,5	20,5	35,8	20,3	35,8	21,3	36,1	29,4
Nara	-	-	36,5	20,8	35,6	21,1	35,7	21,3	36,1	29,5
Kiffa	-	-	33,7	20,5	34,1	19,7	33,9	20,1	33,5	21,2

Les tableaux 32 et 33 qui présentent les paramètres statistiques des températures respectivement pour la période 1951-1970 et 1972-1993 permettent de mieux affiner la variabilité interannuelle des températures.

En plus des paramètres classiques que sont la moyenne et l'écart type de la série, nous retenons le maximum, le minimum et le coefficient de variation déjà défini.

L'amplitude thermique annuelle (Am) qui est la différence entre la température moyenne du mois le plus chaud et du mois le plus frais nous renseigne sur les variations des différentes stations.

Pour la période 1951-1970, sur les six stations retenues sur l'ensemble des hauts bassins (tab. 33), on observe :

- Dans un même domaine climatique, les températures minimales varient peu. Ces variations sont de 1°C en domaine sud-soudanien (Bamako et Kénieba), elles sont plus élevées en domaine nord-soudanien où elles sont de 3,7°C (Faladye et Kayes) ;
- Les températures moyennes ont aussi de faibles variations qui sont toutefois plus élevées en domaine sud-soudanien (1,4°C) qu'en domaine nord-soudanien (0,1°C) ;
- Les températures maximales connaissent une variabilité plus élevée en domaine nord-soudanien. Entre Bamako et Kénieba, la différence des températures maximales est de 0,6°C tandis qu'elle s'élève à 1,6°C entre Faladye et Kayes ;

Stations	Bamako			Kénieba			Faladye			Tambacounda			Kayes			Nioro du Sahel		
Paramétres statistiques	Tx	Tm	Tn	Tx	Tm	Tn	Tx	Tm	Tn	Tx	Tm	Tn	Tx	Tm	Tn	Tx	Tm	Tn
Moyenne	34,4	27,6	20,8	35	29	21,8	34,7	26,5	18,3	43,4	26,6	9,9	36,3	29,2	22	36,1	28,3	20,4
Ecart type	0,79	0,37	0,50	0,36	2,7	5,4	0,43	0,4	0,54	0,70	0,8	1,3	0,43	0,39	0,46	0,63	0,59	0,65
Maximum	35,4	28,3	21,7	35,7	29,3	22,9	35,8	27,2	19,2	44,8	28,8	12,8	37,1	29,9	23,1	37	29,4	21,8
Minimum	31,4	27	19,8	34,1	27,8	20,4	33,5	25,8	17,4	42,4	25,3	8	35,1	28,2	21,2	35,1	19,4	27,3
C. V	0,02	0,01	0,02	0,01	0,09	0,24	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,13	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03
Am	7,5	7	8,7	9,8	5,7	10,4	8,3	8,3	12,8	11,4	7,8	9	8,1	9,5	11,1	9,8	11,5	13,4

Tableaux 32 : Paramètres statistiques de la période 1951-1970 dans certaines stations des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

Stations	Bamako			Kénieba			Kita			Tambacounda			Kayes			Nioro du Sahel		
Paramétres statistiques	Tx	Tm	Tn	Tx	Tm	Tn	Tx	Tm	Tn	Tx	Tm	Tn	Tx	Tm	Tn	Tx	Tm	Tn
Moyenne	35	28,2	21,3	34,9	28,4	21,9	34,5	28	21,5	43,4	27,9	12,5	36,3	29,5	22,7	36	28,8	21,5
Ecart type	0,56	0,48	0,56	0,39	0,38	0,59	0,52	0,44	0,49	0,73	0,93	1,42	0,49	0,41	0,45	0,64	0,54	0,56
Maximum	36,4	29	22,3	35,4	29	22,7	35,4	28,8	22,5	44,6	29,7	15,4	37,1	30,2	23,5	37	29,5	22,3
Minimum	33,9	27,1	20	33,7	27,6	20,1	32,3	27,1	20,8	42,4	26,4	10,3	35,1	28,7	21,9	34,7	27,7	20,6
C. V	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Am	7,1	5,5	8,9	10	9,7	9,8	8,5	7,6	8,8	6,9	8,2	9,6	8,1	10,1	10	10,7	11,9	13,1

Stations	Kiffa		
Paramétres. statistiques	Tx	Tm	Tn
Moyenne	36,9	29,2	21,5
Ecart type	0,56	0,41	0,49
Maximum	37,8	30	22,5
Minimum	35,5	28,3	20,8
C. V	0,01	0,01	0,02
Am	12,4	12,4	14

Tableaux 33 : Paramètres statistiques de la période 1972-1993 dans certaines stations des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

- L'amplitude thermique annuelle est beaucoup plus importante pour les températures minimales sur l'ensemble des stations sauf à Tambacounda ;
- A l'exception de la station de Tambacounda pour les températures minimales (0,13), les coefficients de variations sont compris entre 0,03 et 0,01. Ces valeurs relativement faibles traduisent la faible variation des températures pour cette période.

La variabilité interannuelle des températures moyennes minimales et maximales pour la période 1951-1970 est assez faible sur l'ensemble des hauts bassins (tab. 32). Néanmoins des différences apparaissent du sud au nord où les températures ont tendance à augmenter. Les variations peuvent être faibles à modérées entre deux stations d'un même domaine.

Pour la période 1972-1993, la station de Faladye lacunaire est remplacée par celle de Kita. La station de Kiffa, par sa position plus au nord et dont la série recoupe la période, est aussi incluse.

L'analyse du tableau 33 relatif à cette période permet de confirmer les observations déjà notées dans le tableau précédent à savoir :
- La faible variation des températures minimales et maximales comme l'indiquent les faibles coefficients de variation compris entre 0,03 et 0,01.
- Les amplitudes thermiques annuelles connaissent la même évolution avec cependant des valeurs plus élevées pour les températures maximales de certaines stations (Kénieba, Nioro du Sahel).

La variabilité interannuelle des températures montre donc une faible variation des températures. On remarque toutefois que les températures s'accroissent du sud au nord des hauts bassins mais, à l'intérieur de chaque domaine climatique, des nuances existent, en fonction de la position de la station et des influences locales qu'elle peut connaître. On peut recenser aussi à travers les valeurs de ces deux périodes relativement égales (respectivement 20 ans et 22 ans) que les températures de la période récente sont légèrement plus élevées pour l'ensembe des stations.

3.2. Evolution récente des températures annuelles (1961-1993)

L'étude du comportement des températures annuelles pour la période récente fait suite aux premières conclusions sur l'évolution des séries de références.

La période 1961-1993 qui englobe le plus de stations (6) est ainsi retenue. Les figures 60 et 61 montrent grâce à une droite de régression la tendance des températures à chacune des stations. L'évolution de ces graphiques appelle quelques remarques :
- Les températures maximales annuelles ont une tendance à la hausse pour toutes les stations à l'exception de Kénieba. Cette tendance est très nette notamment à Bamako, Nioro du Sahel et Kayes. Cette hausse est modérée pour les stations de Kiffa et de Kita alors que pour Kénieba, une tendance à la baisse est observée à partir de la dernière décennie.

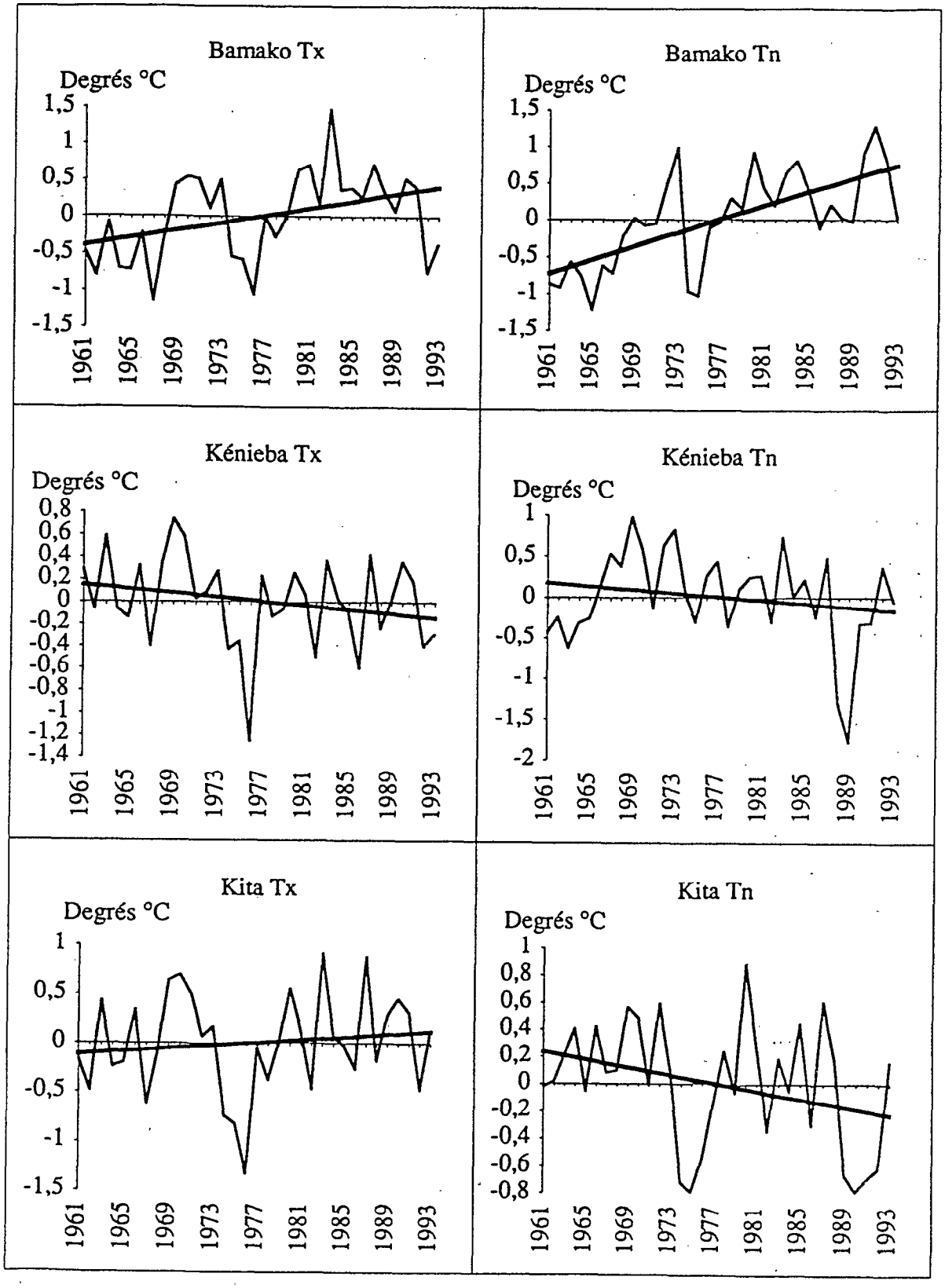


Figure 60 : Evolution des températures maximales et minimales annuelles (période 1961-1993)

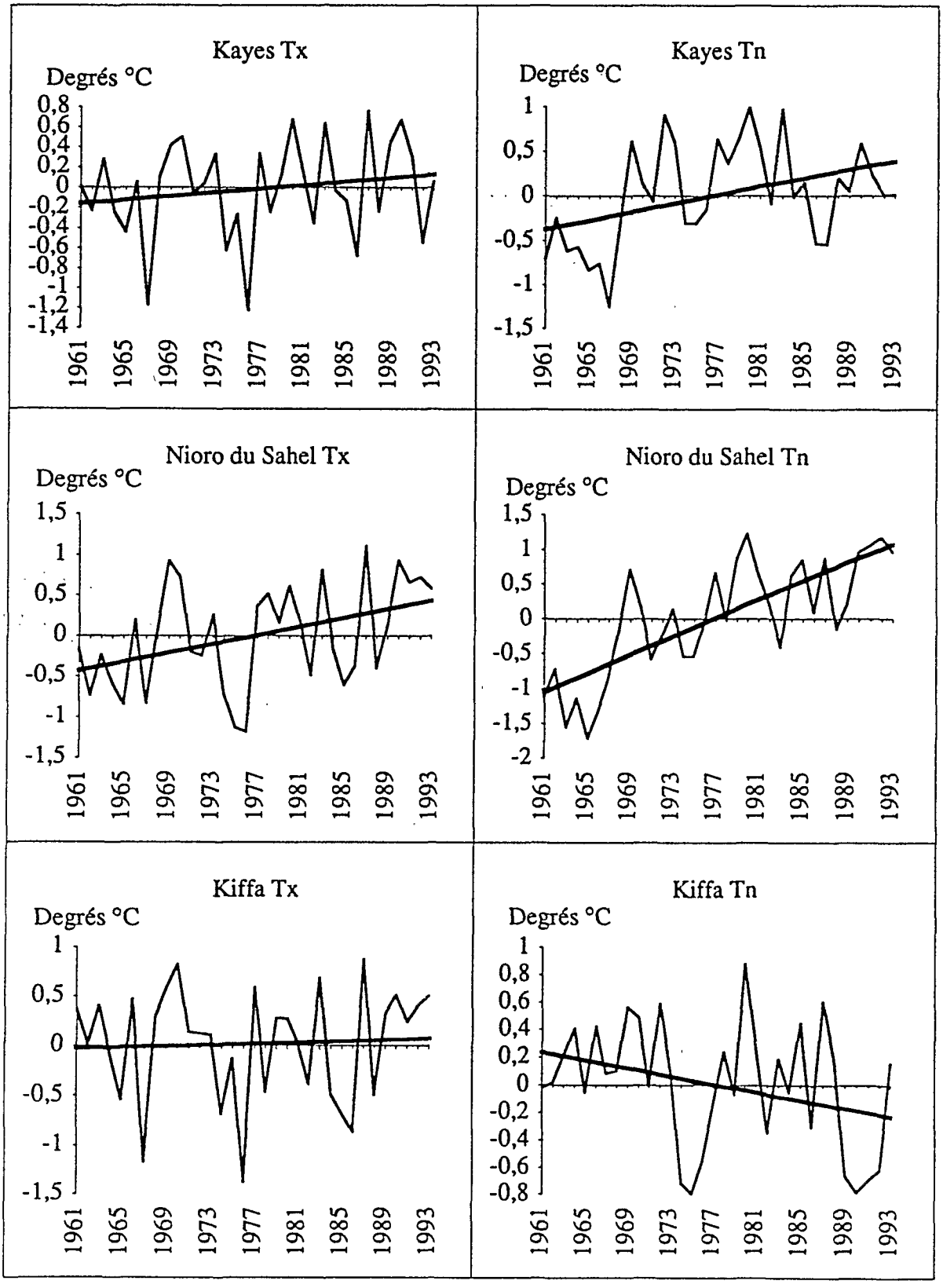


Figure 61 : Evolution des températures maximales et minimales annuelles (période 1961-1993)

- Cette hausse est aussi constatée pour les températures minimales. Elle est très nette pour Bamako, Nioro du Sahel et Kayes. Par contre, elle s'inverse pour les stations de Kiffa et de Kita où la baisse est notée comme à Kénieba pour ces 13 dernières années.

L'évolution générale des températures annuelles montre une tendance à la hausse dans les hauts bassins même si certaines stations (Kénieba notamment, Kita et Kiffa) connaissent une baisse de leurs températures minimales. L'évolution des trois autres stations (Bamako, Nioro du Sahel et Kayes) achève de convaincre sur la tendance d'ensemble à la hausse des températures (tab. 33). Les températures moyennes (Tm) qui permettent de gommer ces écarts entre les températures maximales et minimales traduisent mieux cette augmentation des températures pour la période 1961-1993. Enfin, les mêmes conclusions sur la hausse des températures, ont été faites sur le Sénégal (J. B. Ndong, 1996), et sur le Soudan (O. H. Suliman, 1996).

Les températures des hauts bassins connaissent dans l'ensemble de faibles variations. Celles-ci opposent souvent les températures maximales très élevées aux températures minimales assez faibles. L'instabilité des températures est surtout observable à travers les valeurs de l'écart moyen diurne (Am). A l'échelle spatiale, ces variations montrent d'une part une augmentation méridienne et d'autre part une accentuation d'ouest en est des températures. Malgré ces variations, l'évolution des températures pour la période récente s'illustre particulièrement par une tendance à la hausse des valeurs observées. Cette évolution coïncide avec une intense péjoration pluviométrique ce qui, sans doute, affecte les autres éléments du climat qui sont étroitement liés aux températures.

CHAPITRE 6

L'HUMIDITE RELATIVE, L'INSOLATION ET L'EVAPORATION DANS LES HAUTS BASSINS

L'humidité relative, l'insolation et l'évaporation sont moins étudiées par rapport aux autres facteurs du climat comme la pluviométrie et les températures, sur lesquelles repose l'essentiel de la climatologie tropicale. De même, leur utilisation est d'une portée limitée en raison des difficultés de mesure notamment celle de l'évaporation.

L'humidité relative est définie par le rapport entre la tension de vapeur (e) dans l'atmosphère et la tension de vapeur d'eau saturante à la même température (e_w). L'humidité relative est mesurée par un psychromètre et s'exprime en pourcentage.

C'est parce que l'humidité relative, l'insolation et l'évaporation ne sont souvent évoquées que dans leurs conditions extrêmes qu'elles sont injustement considérées comme éléments mineurs.

Pour autant, peut-on sous-estimer l'importance de l'humidité atmosphérique quand celle-ci incite le paysan sahélien à anticiper le semis des céréales à long cycle végétatif pour qu'elles puissent concorder avec l'essentiel des pluies ?

Peut-on sous estimer l'importance de l'insolation quand l'énergie qui régit la physique de l'atmosphère provient du soleil ? D'ailleurs, les expérimentations d'énergie renouvelable faites dans les pays sahéliens augurent que le soleil pourrait devenir une source d'énergie pour ces derniers. Mais le soleil, est aussi source de méfaits comme la forte insolation qui dessèche tout sur son passage et accélère le tarissement des ressources d'eau en saison sèche.

Dans la problématique, qui est la nôtre, où les bilans de l'écoulement des cours d'eau, leur modification à l'échelle spatiale et le remplissage de la retenue de Manantali sont une donnée incontournable, le rôle de l'évaporation est fondamental.

Ainsi, l'état hygrométrique des hauts bassins, leur ensoleillement et les taux d'évaporation qui y sont enregistrés sont utiles à évoquer. Malgré les informations disparates dont nous disposons, ces éléments sont étudiés parce qu'ils apportent des renseignements supplémentaires à la connaissance du climat des hauts bassins.

1. L'HUMIDITE ATMOSPHERIQUE DANS LES HAUTS BASSINS

Le degré hygrométrique représente le rapport entre la quantité de vapeur d'eau réelle et la quantité maximale admissible ou niveau de saturation qui correspond au temps de pluies ou de brouillard. Dans les hauts bassins, l'importance de l'humidité relative est fortement liée à l'influence du flux de mousson.

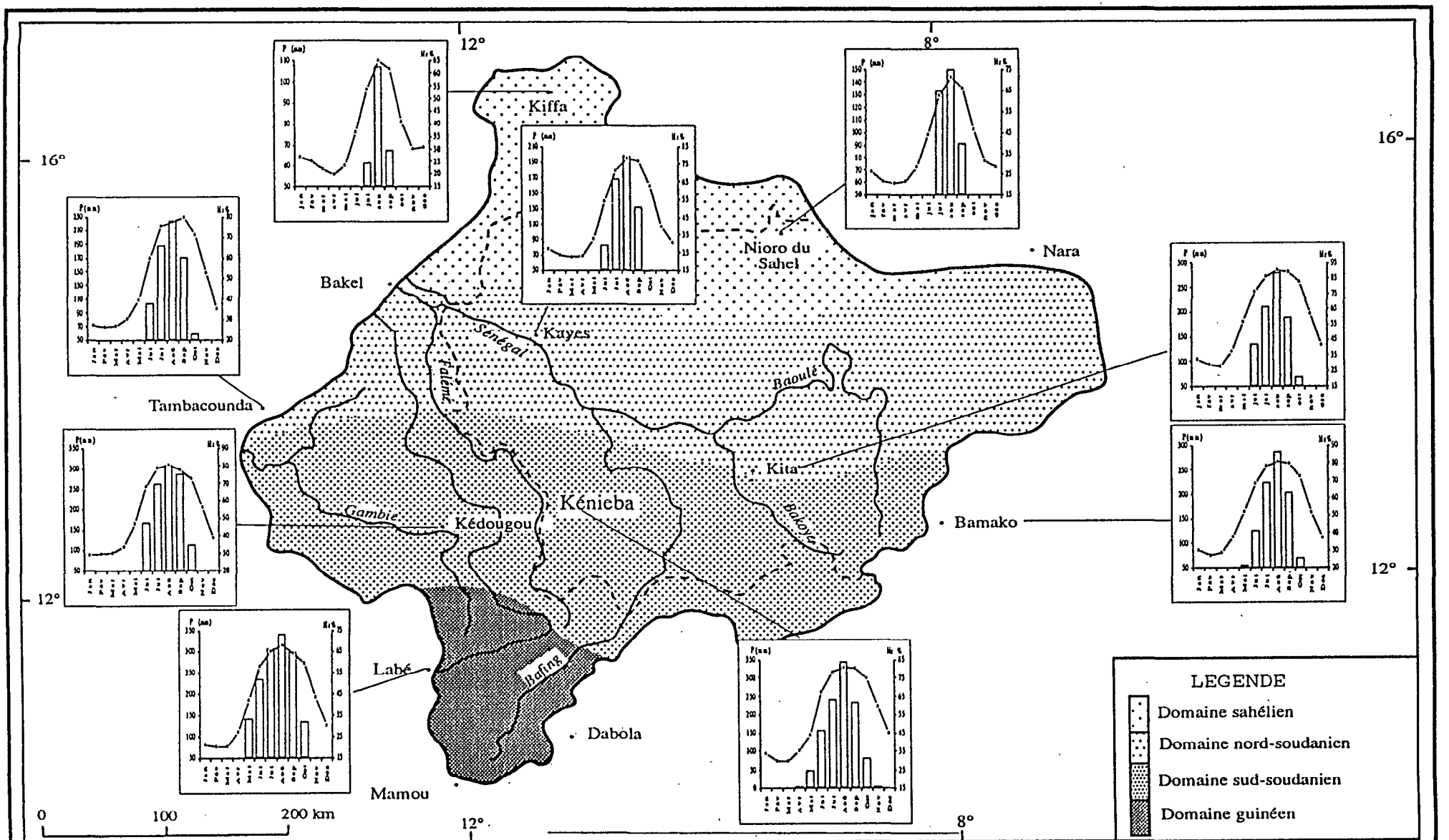
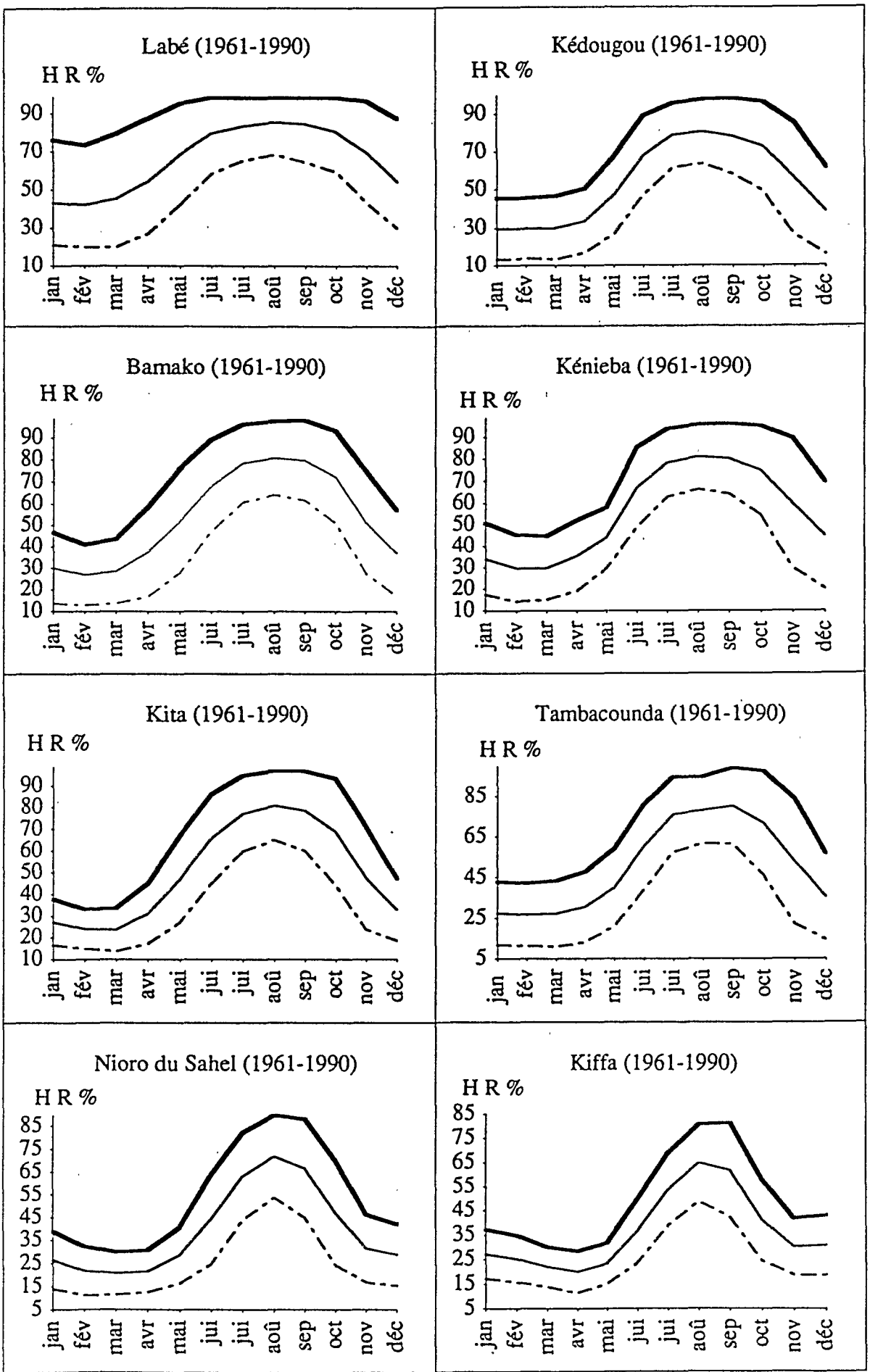


Figure 62 : Régimes d'humidité relative et des précipitations des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie



———: H R maximale ———: H R moyenne – – – – : H R minimale

Figure 63 : Humidité relative mensuelle des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie (période 1961-1990)

Le tableau 34 présente les données disponibles sur l'humidité relative des hauts bassins. Les données concernant le domaine guinéen sont peu accessibles et nous ne disposons que de celles de la normale 1961-1990.

Tableau 34 : Etat des données d'humidité relative d'après certaines stations

Stations	Période observée	Domaine climatique
Nioro du Sahel	1941-1993	sahélien
Kiffa	1953-1982	
Nara	1977-1993	
Kayes	1941-1993	nord-soudanien
Tambacounda	1951-1993	
Kita	1955-1993	
Kédougou	1961-1993	sud-soudanien
Kénieba	1943-1993	
Bamako	1950-1993	

1.1. Les régimes hygrométriques des hauts bassins

L'humidité relative se calque sur la distribution des pluies et des températures dans les hauts bassins. La figure 62 présente, comme pour la pluviométrie et les températures, quatre régimes hygrométriques : le régime guinéen, sud-soudanien, nord-soudanien et sahélien. Ces régimes se différencient par la distribution mensuelle des taux d'humidité enregistrés.

1.1.1. La distribution mensuelle de l'humidité relative

Les variations saisonnières sont fonction de l'installation de la saison pluvieuse ou sèche et des conditions hygrométriques qui l'accompagnent (fig. 63). L'analyse du tableau 35 qui récapitule les moyennes mensuelles de la période 1961-1990 montre certaines caractéristiques de l'humidité relative maximale et minimale à travers les domaines climatiques.

1.1.1.1. Le domaine guinéen

La station de Labé présente les valeurs de l'humidité relative du domaine guinéen.

Le maximum mensuel de l'humidité relative maximale à cette station s'étale de juin à octobre avec un taux d'humidité de 98 % pendant 5 mois (fig. 66 et 68). Le minimum mensuel de l'humidité relative maximale est noté en février avec 73 % (fig. 64).

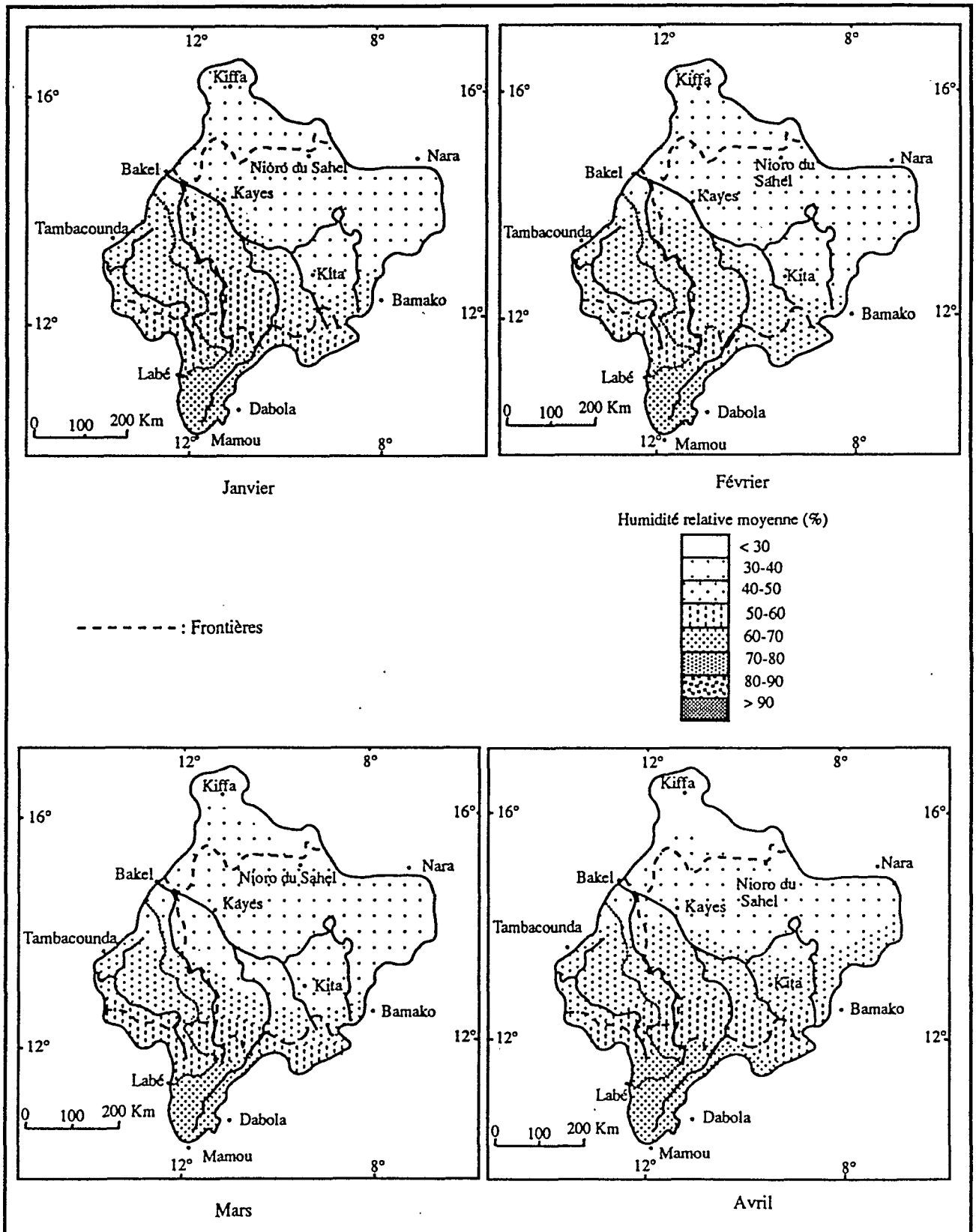


Figure 64 : Humidité relative maximale mensuelle dans les hauts bassins (période 1961-1990)

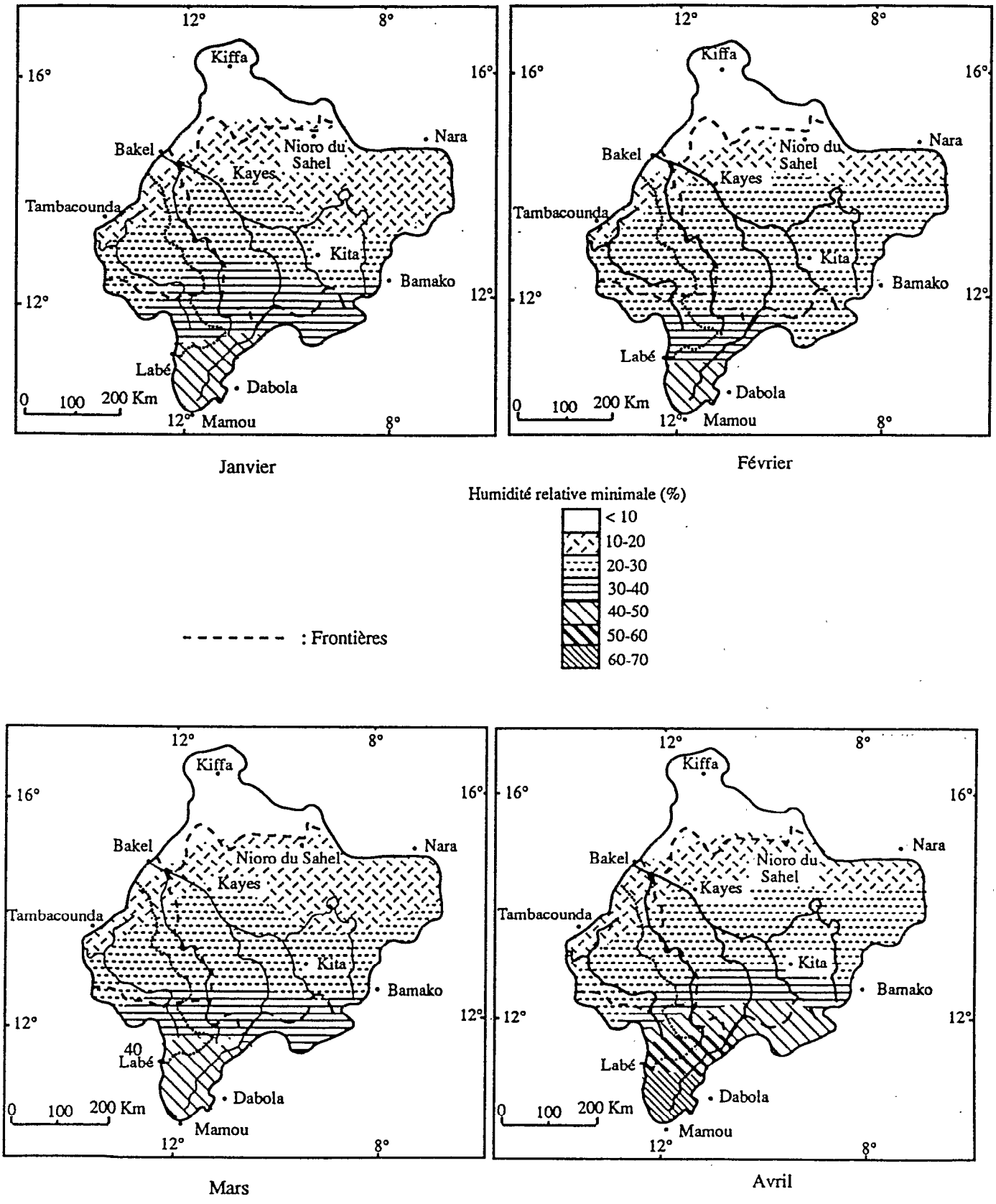


Figure 65 : Humidité relative minimale mensuelle dans les hauts bassins (période (1961-1990)

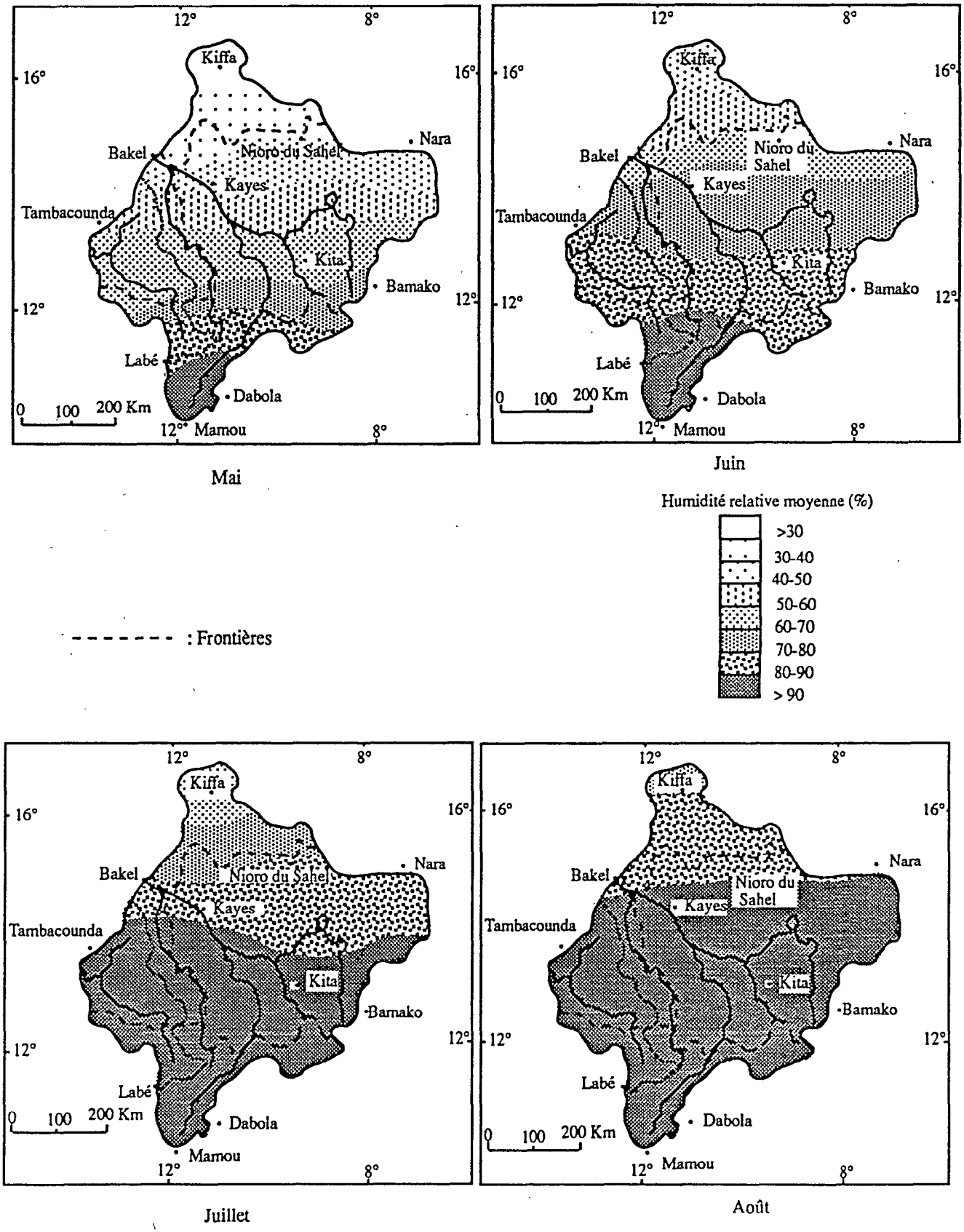


Figure 66 : Humidité relative maximale mensuelle dans les hauts bassins (période 1961-1990)

L'humidité relative minimale est faible surtout durant la saison sèche où elle est de 20 % en février-mars (fig. 68). Son maximum intervient en août avec 68 % (fig. 68).

L'humidité relative en domaine guinéen présente un régime unimodal avec un maximum de juin à octobre et un minimum de février à mars. Les moyennes annuelles sont très élevées pour l'humidité maximale (fig. 70) tandis qu'elles sont faibles pour les moyennes minimales (fig. 71).

Tableau 35 : Variations mensuelles de l'humidité relative dans les hauts bassins

	Labé		Bamako		Kénieba		Tamba		Kayes		Nioro	
Mois	U_X	U_n	U_X	U_n	U_X	U_n	U_X	U_n	U_X	U_n	U_X	U_n
Janvier	76	21	46,5	17	50,5	17,1	42,7	11,6	40,4	13,2	38,7	13,7
février	73	20	40,8	12,8	45	14,1	41,9	11,2	34,2	12,6	32	11
Mars	79	20	43,3	13,6	44,4	14,8	43,1	10,8	33,3	12	29,6	11,2
Avril	87	27	58,2	16,5	51,8	18,9	47,6	13,1	33,8	11,9	30,3	12,3
Mai	95	42	75,8	27,9	57,8	29,6	58,7	20,6	47,1	18	40,3	16,2
Juin	98	58	88,8	49	85,1	48,6	80,6	38,9	73,2	34,4	63,4	24,3
Juillet	98	65	95,9	60,5	93,5	62,6	94,2	57,2	88,4	54,1	81,	43,6
Août	98	68	97,5	63,8	95,5	66,1	94,3	61,3	93,5	62,8	89,5	53,3
Septembre	98	64	97,8	61,3	96	63,9	98,5	61,3	94,3	59,5	87,5	44,5
Octobre	98	59	93	50,9	94,9	54,1	97,1	45,3	86,7	38,7	69,4	23,9
Novembre	96	43	74,8	27,4	89,4	29,5	83,4	22	60,1	19,6	45,8	16,6
Décembre	87	30	57,4	17	69,4	19,9	56,3	14,1	45,7	16	41,8	15,2
Année	90	43	72,4	34,4	72,8	36,6	70,1	30,6	60,9	29,4	54,2	23,8

1.1.1.2. Le domaine sud-soudanien

L'analyse des valeurs aux stations de Bamako et de Kénieba renseigne sur les variations de l'humidité relative moyenne mensuelle en domaine sud-soudanien.

L'humidité relative est maximale à Bamako et Kénieba en septembre avec respectivement 97,5 % et 96 % (fig. 68). Le minimum est noté en février avec 40,8 % à Bamako et en mars à Kénieba avec 44,4 % (fig. 64).

L'humidité relative minimale enregistre des valeurs moins élevées qu'en domaine guinéen. Le maximum est noté au mois d'août avec respectivement 63,8 % à Bamako et 66,1 % à Kénieba (fig. 67). Le minimum est en février avec 12,8 % à Bamako et 14,1 % à Kénieba (fig. 65).

L'humidité relative en domaine sud-soudanien présente un régime unimodal avec un maximum d'août à septembre et un minimum de février. Les moyennes annuelles (fig. 70 et 71) sont respectivement de 72,4 et 34,4 % à Bamako et 72,8 et 36,6 % à Kénieba.

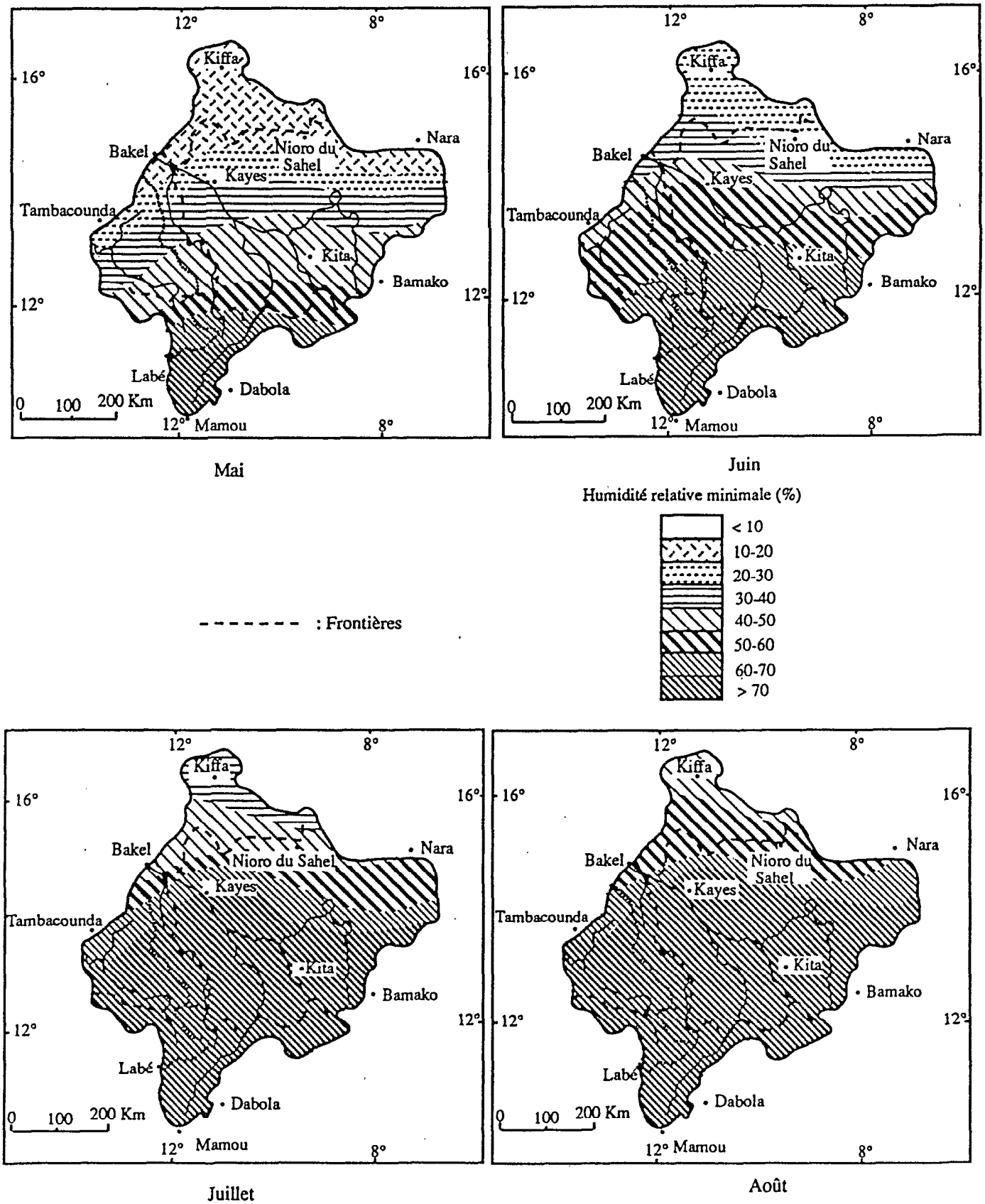


Figure 67 : Humidité relative minimale mensuelle dans les hauts bassins (période 1961-1990)

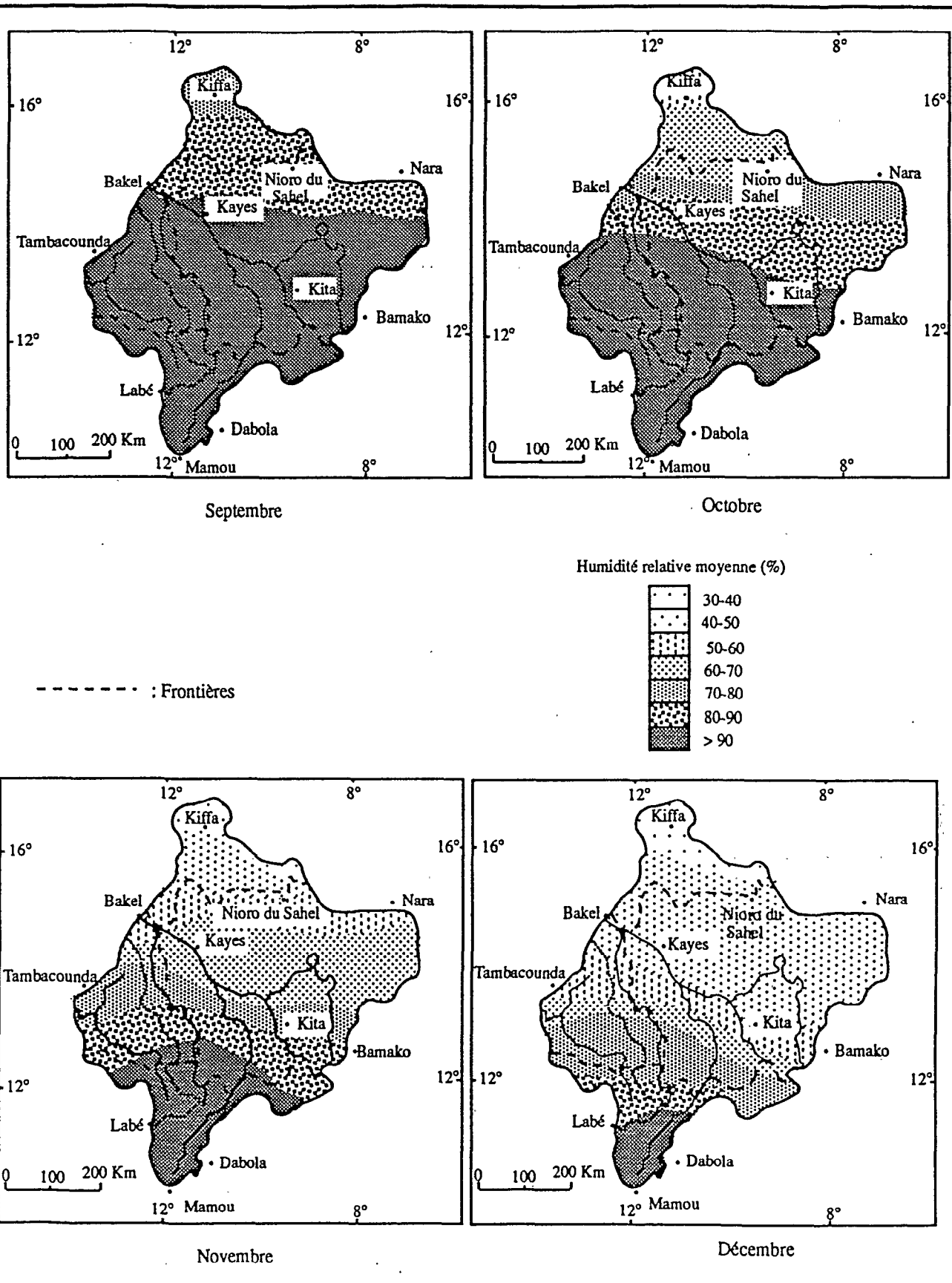


Figure 68 : Humidité relative maximale mensuelle dans les hauts bassins (période 1961-1990)

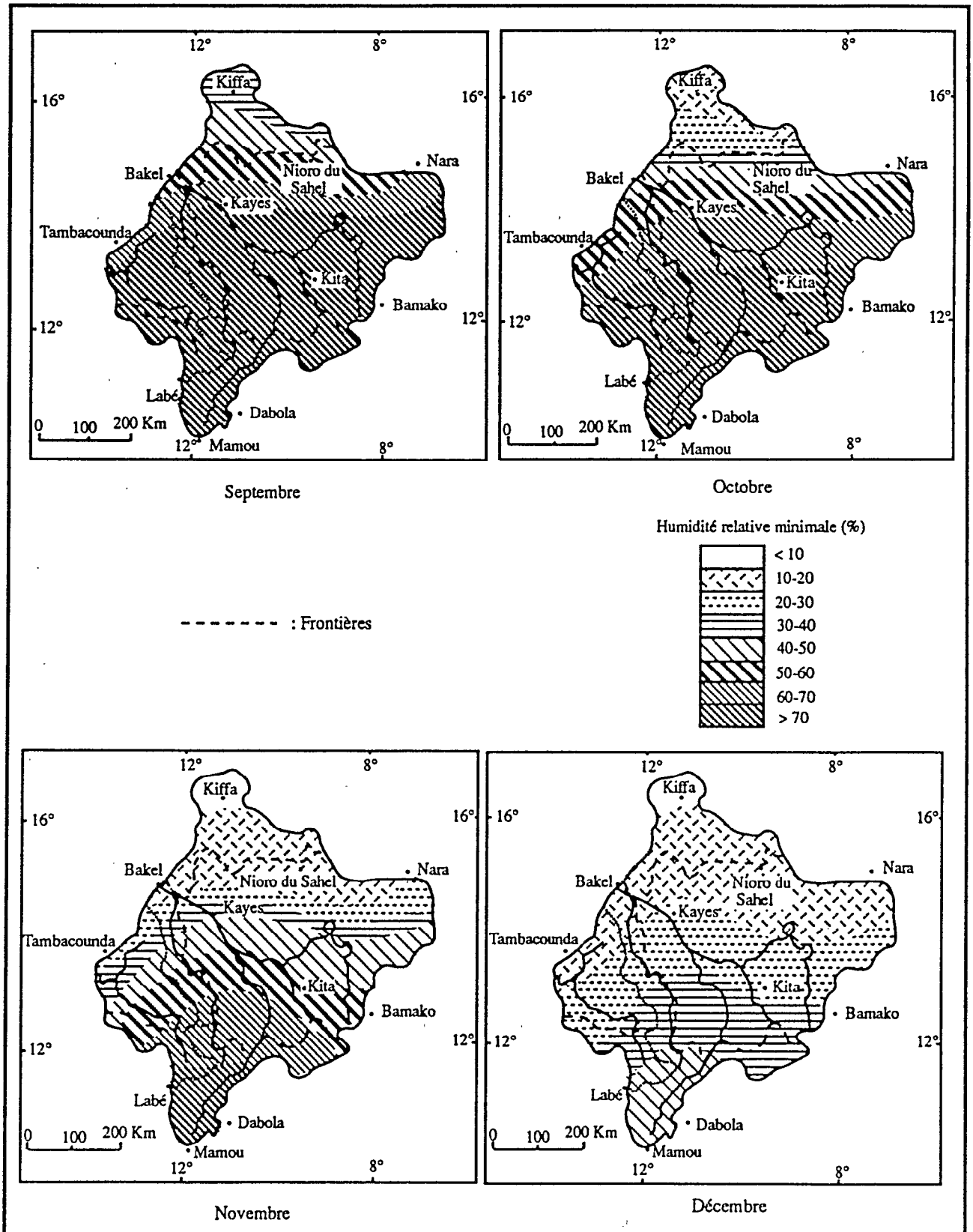


Figure 69 : Humidité relative minimale mensuelle dans les hauts bassins (période 1961-1990)

1.1.1.3. Le domaine nord-soudanien

Les stations de Tambacounda et de Kayes en domaine nord-soudanien présentent les caractéristiques de l'humidité relative pour la période 1961-1990 (tab. 35).

Pour l'humidité relative maximale, le maximum est noté en septembre à Tambacounda avec 98,5 % tandis qu'il est de 94,3 % à Kayes (fig. 68). A Tambacounda, quatre mois (juillet à octobre) enregistrent une humidité relative maximale de plus de 90 %. Par contre à la station de Kayes, seuls les mois d'août et de septembre dépassent une humidité relative maximale de plus de 90 %.

L'humidité relative minimale étale sa valeur la plus élevée en août-septembre à Tambacounda avec 61,3 % (fig. 67 et 69), alors qu'elle ne survient qu'en août à Kayes avec 62,8% (fig. 67). Le minimum de Tambacounda (10,8 %) en mars (fig. 65) est précoce par rapport à celui de Kayes qui intervient en avril avec 11,9 % (fig. 65).

L'humidité relative en domaine nord-soudanien présente un régime unimodal avec un maximum en août-septembre et un minimum en mars-avril. Les moyennes annuelles maximales et minimales sont assez proches entre Tambacounda et Kayes. Elles sont respectivement de 70,1 % et 30,6 % à Tambacounda, alors qu'elles sont de 60,9 % et 29,4 % à Kayes (fig. 70 et 71).

1.1.1.4. Le domaine sahélien

Le domaine sahélien est par prédilection celui des extrêmes climatiques des hauts bassins. L'humidité relative est analysée à la station de Nioro du Sahel (tab. 35).

Les valeurs de l'humidité relative à cette station sont les plus faibles. En fait, le domaine sahélien enregistre en dernier les apports de la mousson, ce qui se répercute sur les taux d'humidité reçue. La brièveté de la mousson dans cette région, et les conditions de ponction des autres facteurs thermiques qui sont ici beaucoup plus denses expliquent cette faiblesse. Les taux maximaux sont notés au mois d'août mais ne dépassent jamais 90 %. Le maximum de Nioro du Sahel est de 89,5 % (fig. 66). Le minimum est noté au mois de mars avec 29,6 % (fig. 64).

L'humidité relative minimale enregistre des valeurs presque similaires aux autres domaines climatiques. Le maximum survient toujours au mois d'août avec 53,3 % (fig. 67). Le minimum est de 11 % et intervient dès le mois de février (fig. 65).

L'humidité relative en domaine sahélien présente un régime unimodal avec un maximum en août et un minimum de février. Les taux moyens annuels, les plus faibles de toutes les stations sont respectivement de 54,2 et 23,8 % (fig. 70 et 71).

La distribution de l'humidité relative mensuelle et les valeurs atteintes dans les hauts bassins sont fonction de l'importance de la mousson et de sa progression. Les valeurs maximales sont toutes notées au cœur de la saison pluvieuse, période pendant laquelle la mousson baigne la région. L'humidité de l'air est alors maximale ce qui concorde avec la chute des précipitations.

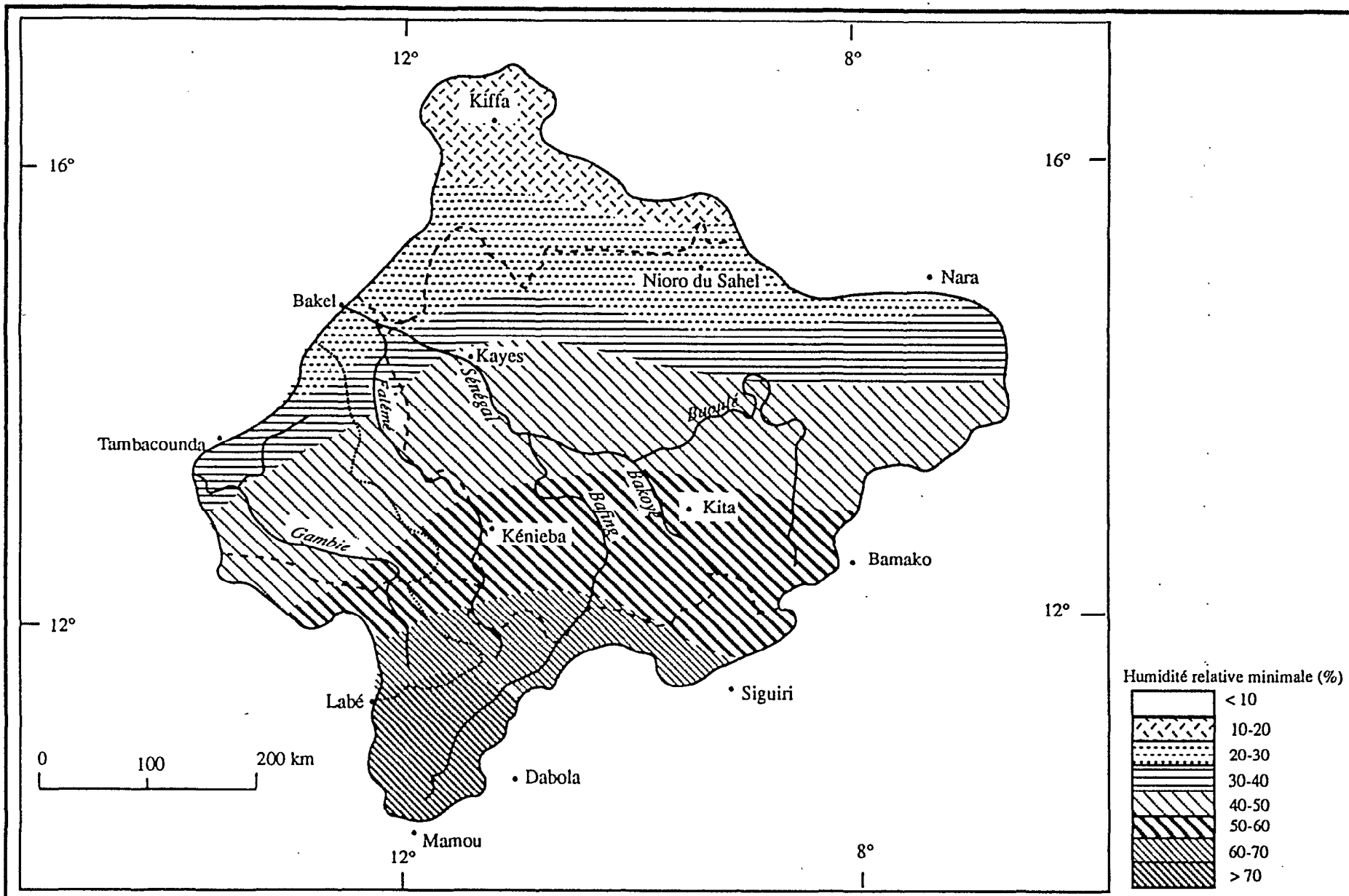


Figure 70 : Humidité relative minimale moyenne annuelle des hauts bassins (période 1961-1990)

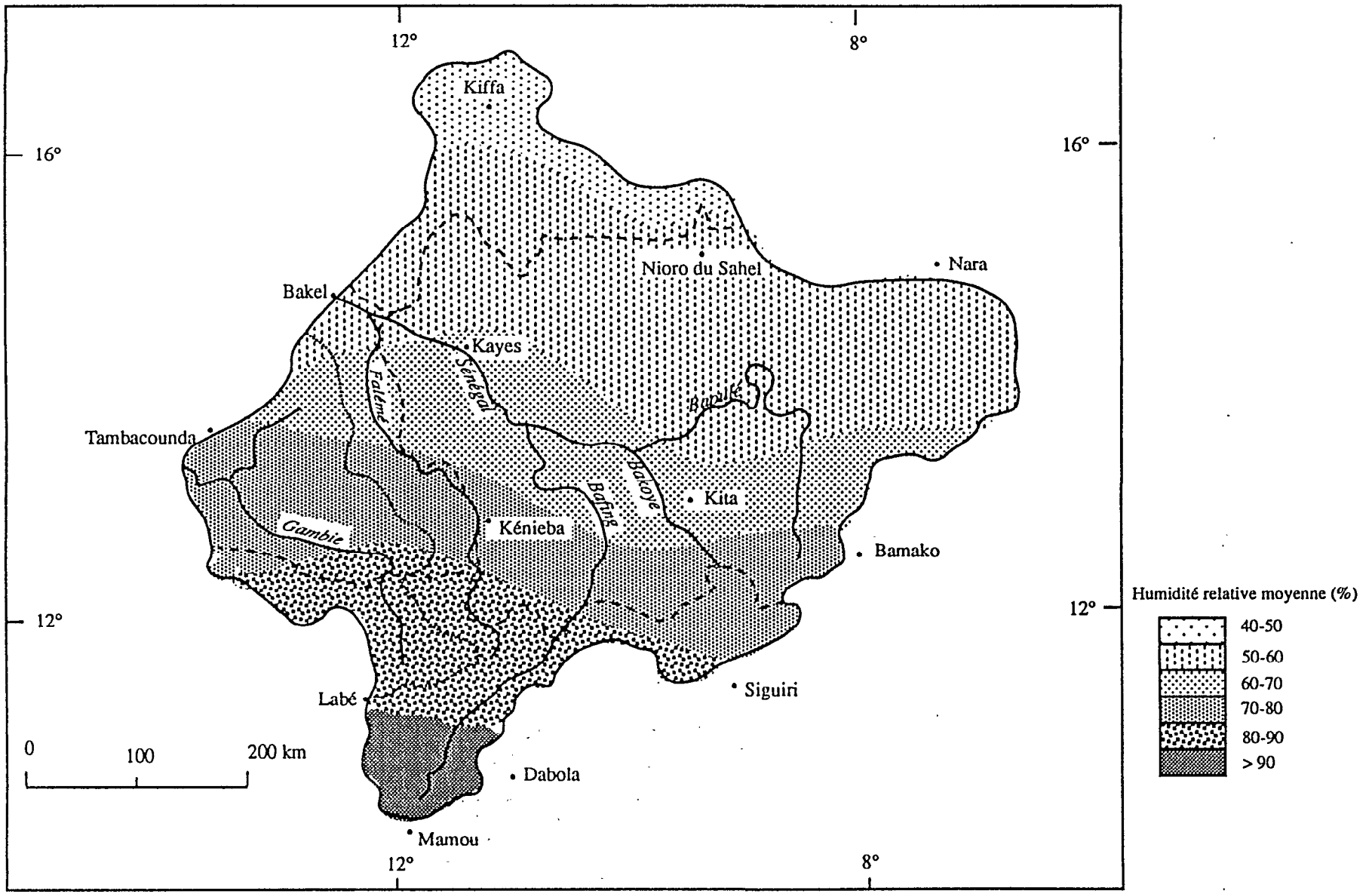


Figure 71 : Humidité relative maximale moyenne annuelle des hauts bassins (période 1961-1990)

La diminution des taux d'humidité relative du sud au nord des domaines climatiques s'explique par la progression de la mousson qui épuise progressivement son potentiel d'humidité. A cela, s'ajoute l'intervention des autres facteurs (insolation, évaporation) qui favorisent la dispersion des valeurs extrêmes qui peuvent ainsi être tardives ou précoces d'une station à l'autre. Ce sont par ailleurs ces facteurs qui confèrent à l'humidité relative ces faibles valeurs en saison sèche. Cependant, ces variations mensuelles sont aussi observées à l'échelle annuelle.

1.2. L'humidité relative annuelle

Les figures 72 et 73 schématisent à travers différentes stations des hauts bassins l'évolution de l'humidité relative maximale et minimale moyenne annuelle. En dépit de l'inégalité des séries d'observation, on se rend compte d'emblée que les taux annuels varient d'une année à l'autre. L'analyse de ces graphiques montre une forte variation entre l'humidité relative maximale et minimale.

Tableau 36 : Comparaison entre humidité relative maximale moyenne et minimale moyenne dans différentes stations

Stations	Humidité relative	Période 1951-1970	Période 1972-1993
Nioro du Sahel	Hr max moy.	61,4	52,6
	Hr min moy.	27,3	23,7
Kayes	Hr max moy.	46,1	44,7
	Hr min moy.	29,4	29,4
Tambacounda	Hr max moy.	75,2	69,1
	Hr min moy.	32,1	30
Kita	Hr max moy.	-	65,9
	Hr min moy.	-	33,6
Kénieba	Hr max moy.	75,8	72,5
	Hr min moy.	37,2	37,3
Bamako	Hr max moy.	74,4	71,1
	Hr min moy.	37,3	33

Le recoupement de certaines périodes comme précédemment fait pour les températures permet de mieux observer cette variation interannuelle. Le tableau 36 donne une comparaison de l'humidité relative maximale et minimale moyenne annuelle sur les périodes 1951-1970 et 1972-1993. Les valeurs de ce tableau appellent quelques remarques :

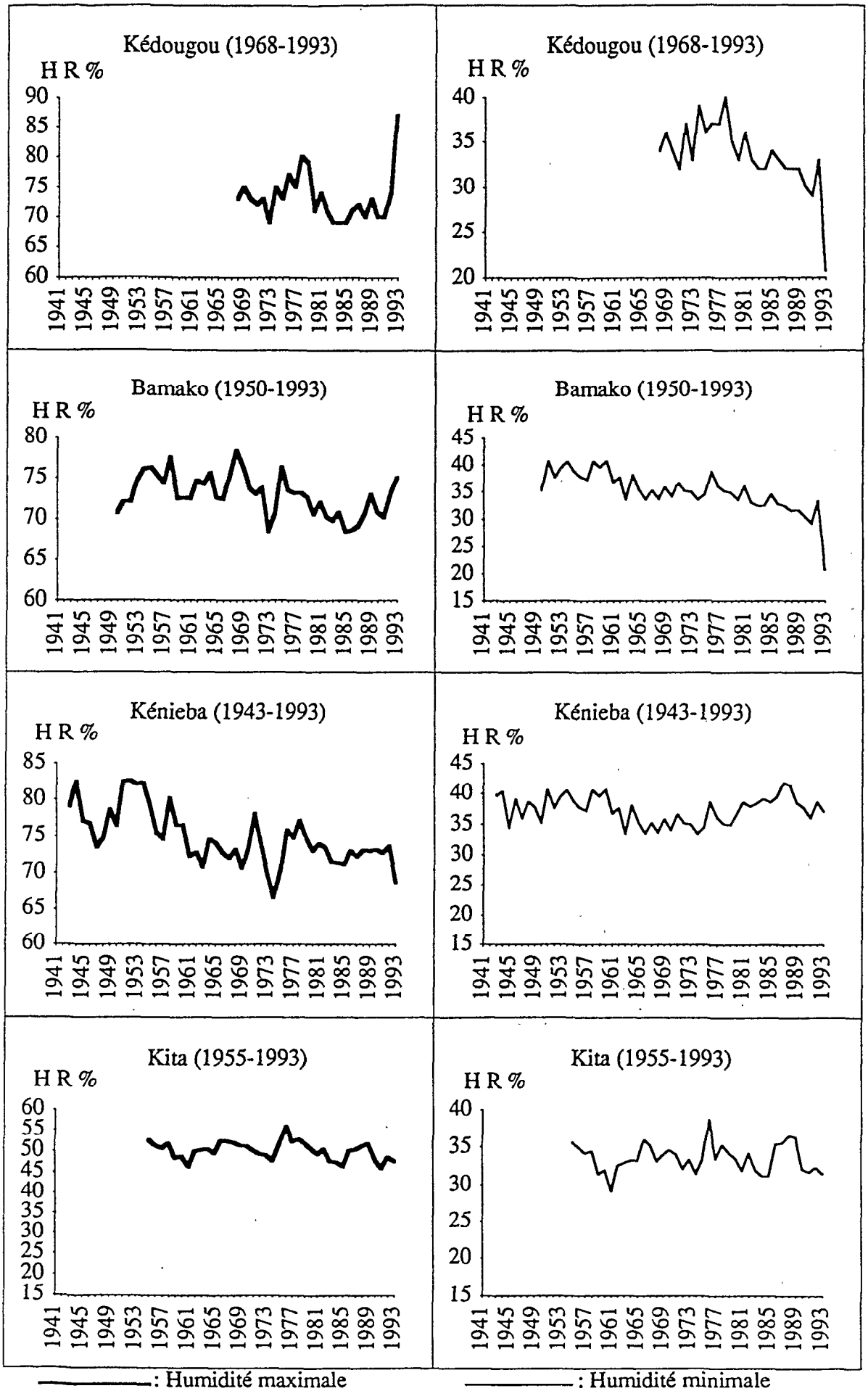


Figure 72 : Evolution de l'humidité relative maximale et minimale annuelle pour certaines stations des hauts bassins

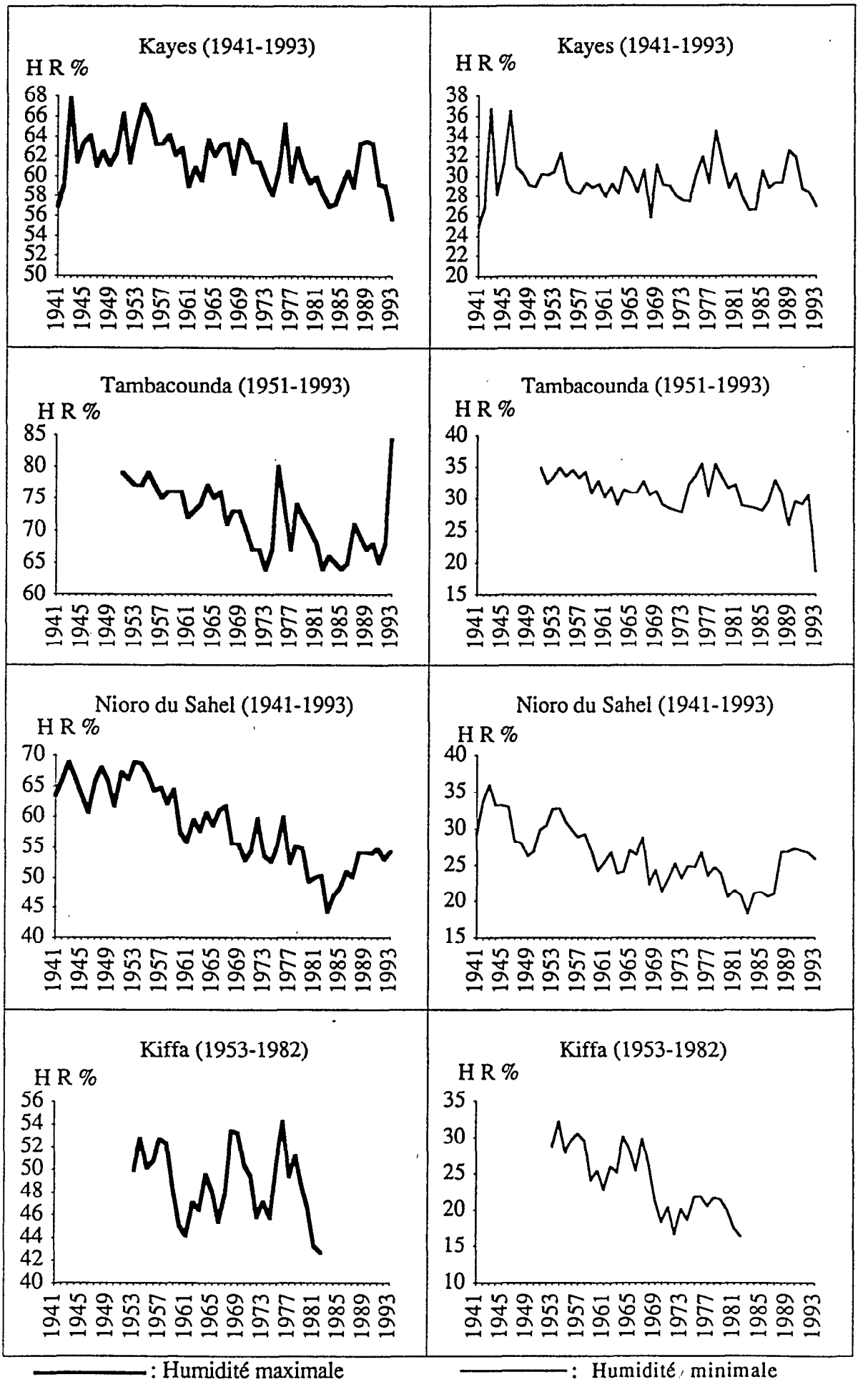


Figure 73 : Evolution de l'humidité relative maximale et minimale annuelle pour certaines stations des hauts bassins

- Pour des périodes sensiblement identiques, l'humidité relative est plus élevée pour la période 1951-1970 que pour la période 1972-1993.
- Cette baisse des valeurs moyennes pour la période 1972-1993 est très nette pour les stations des domaines nord-soudanien et sahélien comme Tambacounda, ou Nioro du Sahel. Par contre en domaine sud-soudanien, cette baisse est moins accentuée, notamment à Kénieba et Bamako.
- L'humidité relative augmente du sud au nord des hauts bassins, comme pour les autres éléments thermiques déjà évoqués. Cette augmentation est corollaire de la remontée de la mousson.
- L'écart entre les valeurs maximales et minimales peut être moindre à très fort à travers toutes les stations.

En définitive, les fluctuations interannuelles observées montrent que l'humidité relative est aussi sujette à des variations spatiales et temporelles. Ces fluctuations interannuelles sont concomitantes avec celles d'autres éléments climatiques comme l'insolation et les températures qu'elles déterminent.

2. L'INSOLATION DANS LES HAUTS BASSINS

Les mesures de l'insolation dans les hauts bassins sont irrégulières et assez récentes, ce qui limite considérablement l'étude du phénomène. En dehors de la station de Bamako, la durée d'observation des autres stations est relativement courte. Le tableau 37 présente les données disponibles aux différentes stations. Les données d'insolation des hauts bassins sont mesurées grâce à un héliographe.

Tableau 37 : Etat des données d'insolation

Stations	Période observée	Domaine climatique
Kiffa	1953-1982	sahélien
Nara	1977-1993	
Nioro du Sahel	1967-1993	
Kayes	1967-1993	nord-soudanien
Kita	1955-1993	
Kénieba	1967-1993	sud-soudanien
Bamako	1941-1993	

2.1. La distribution mensuelle de l'insolation

Les variations de la durée de l'insolation mensuelle sont exprimées en heures et dixièmes, et représentés sur le tableau 38. L'hétérogénéité des données d'insolation des différentes stations nous amène dans l'analyse à retenir plusieurs périodes (fig. 74).

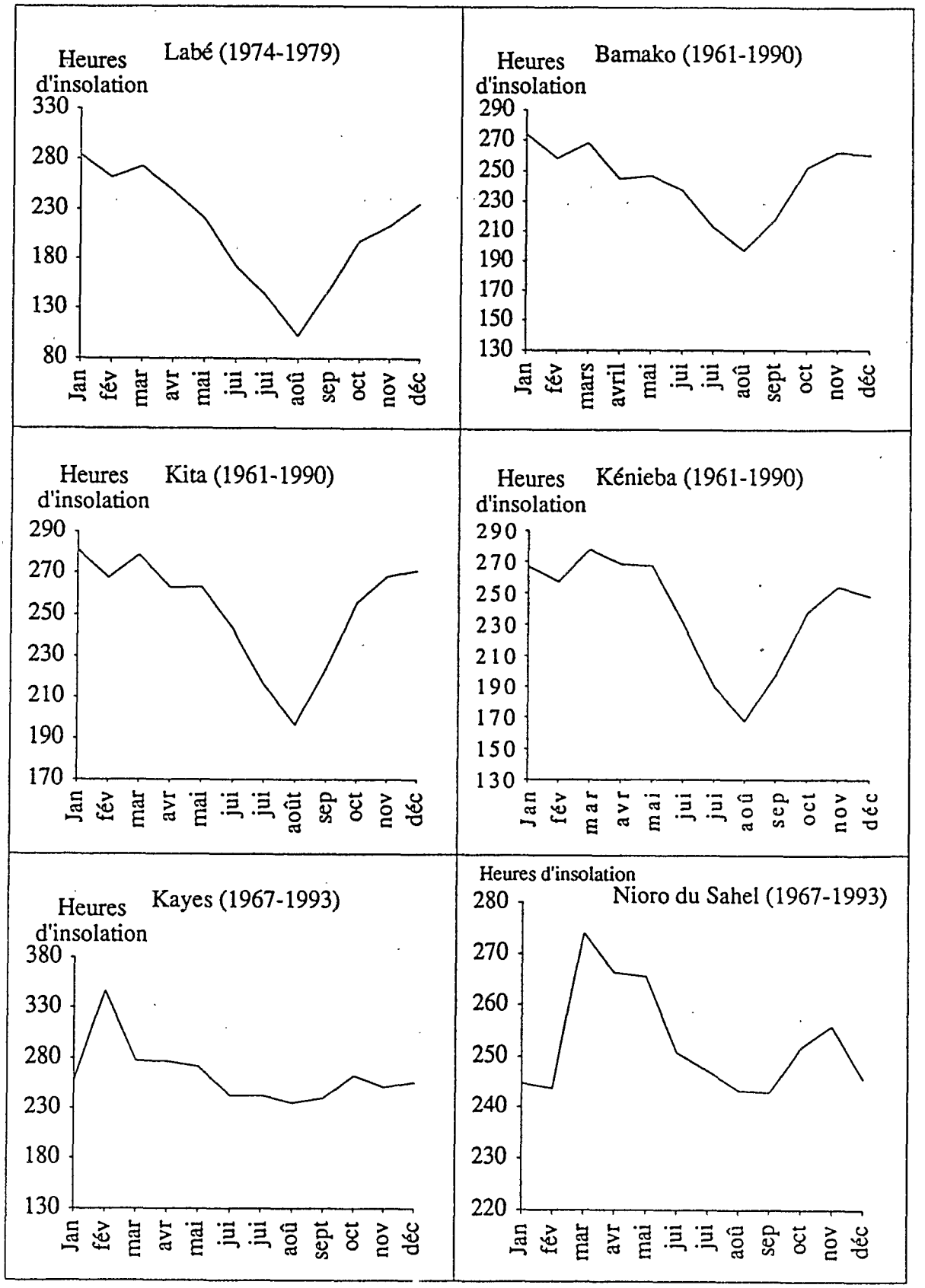


Figure 74 : Insolation mensuelle dans différentes stations des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

Ainsi, seules trois stations (Bamako, Kénieba, Kita) disposent d'informations mensuelles complètes pour la période 1961-1990. Les données mensuelles des stations de Kayes et de Nioro du Sahel sont étudiées pour la période 1967-1993. Les informations concernant la station de Nara ne sont disponibles que de 1977 à 1993 tandis que celles de Labé n'englobent que cinq années d'après les relevés de C. Rochette, (1974) et J. Y. Gac, (1987). Toutefois, l'analyse des variations mensuelles permet de voir à une échelle plus fine comment se répartit le rayonnement solaire dans les hauts bassins.

Tableau 38 : Insolation mensuelle en heures et dixièmes d'heures dans certaines stations des hauts bassins

	Labé	Bamako	Kénieba	Kita	Kayes	Nioro du Sahel	Nara
janvier	284	274	267,1	281,1	257,6	244,7	257,2
février	262	258	256,8	267,6	346,1	243,7	241,9
mars	273	268,2	277,5	278,7	277,8	274,1	268,6
avril	249	244,7	268,3	262,9	276,6	266,3	256,4
mai	221	246,7	266,9	263,1	271,6	265,5	256,3
juin	173	237,4	230,7	243	242,6	250,7	218,9
juillet	142	212,2	189,5	215,8	242,6	247,3	241,2
août	102	196,7	167,2	196,2	234,7	243,3	252
septembre	148	217,7	197,1	224	239,7	242,9	246
octobre	198	252,3	237,4	255,7	262,3	251,9	267,1
novembre	213	261,8	253,7	268,3	250,8	255,8	266,9
décembre	236	260,4	248	271	255,8	245,6	254,7
An	2501	2697,1	2842,2	2927,4	3158,2	252,6	252,3

Ainsi en domaine guinéen, l'insolation atteint son maximum mensuel durant la saison sèche. A la station de Labé, le maximum est noté au mois de janvier (284 h) ; le minimum absolu est noté au coeur de la saison pluvieuse au mois d'août avec 102 h. Il existe un maximum secondaire à cette station qui intervient au mois de mars (276 h).

En domaine sud-soudanien, la station de Bamako enregistre son maximum en janvier (274 h) comme Labé. Par contre, le maximum de Kénieba est tardif et survient en mars (277 h).

Le minimum survient en août aux deux stations avec respectivement 196,7 h à Bamako et 167,2 h à Kénieba. On observe un minimum secondaire à Bamako qui intervient au mois de décembre avec 260,4 h. Les totaux annuels de la période sont respectivement de 2697,1 h à Bamako et 2842,2 h à Kénieba.

En domaine nord-soudanien, la place de l'insolation maximale est plus dispersée : elle est précoce à Kita et survient en janvier (281,1 h). La station de Kayes enregistre son maximum en février avec 346,1 h. Le minimum aux deux stations intervient au mois d'août avec respectivement 196,2 h à Kita et 234,7 h à Kayes. On note à cette dernière station un maximum secondaire en octobre (262,3 h). Ce maximum secondaire correspond avec le début de la saison sèche. Les totaux annuels aux deux stations sont respectivement de 2927,4 h à Kita et 3158,2 h à Kayes.

Pour le domaine sahélien, les stations de Nioro du Sahel et de Nara enregistrent leur maximum en mars avec respectivement 247,1 et 268,6 h. Le minimum est noté en août à Nioro du Sahel (243,3 h) alors qu'il est précoce à Nara et survient en juin (218,9 h). Un minimum secondaire est noté à cette station au mois de septembre avec 246 h.

La diminution précoce de l'insolation au mois de juin à Nara est sûrement liée aux vents de poussière assez fréquents dans cette région. Le maximum secondaire est noté en novembre à Nioro du Sahel (255,8 h) et en octobre à Nara (267,1 h).

2.2. L'insolation annuelle dans les hauts bassins

La figure 75 présente l'évolution de l'insolation annuelle des hauts bassins dans différentes stations classées suivant leur domaine climatique. Tous les graphiques étant tracés à la même échelle, on s'aperçoit que l'insolation enregistre de fortes valeurs. Cependant, la variabilité interannuelle révèle certaines différences.

Tableau 39 : Insolation moyenne annuelle de la période 1967-1993

Stations	Insolation
Nioro du Sahel	6821
Kayes	7106,1
Kita	6853
Bamako	6567
Kénieba	6353
Labé	2501

Les stations de Tambacounda et de Kita sont ainsi sujettes à une certaine hausse, alors que Bamako dans les années 1970 et Kénieba à partir des 1980 voient leur insolation baisser.
Le recoupement de ces informations à partir de l'année 1967 qui englobe le maximum de stations fonctionnelles (tab. 39) permet de nuancer ou d'affiner ces caractéristiques.

- L'insolation annuelle évolue du sud au nord des hauts bassins.
- Entre Bamako en domaine sud-soudanien et Nioro du Sahel station du domaine sahélien, l'écart est de 464 h en faveur de cette dernière station.
- La station de Kayes, en domaine nord-soudanien, enregistre pour la période la valeur d'insolation la plus élevée (7106 h).

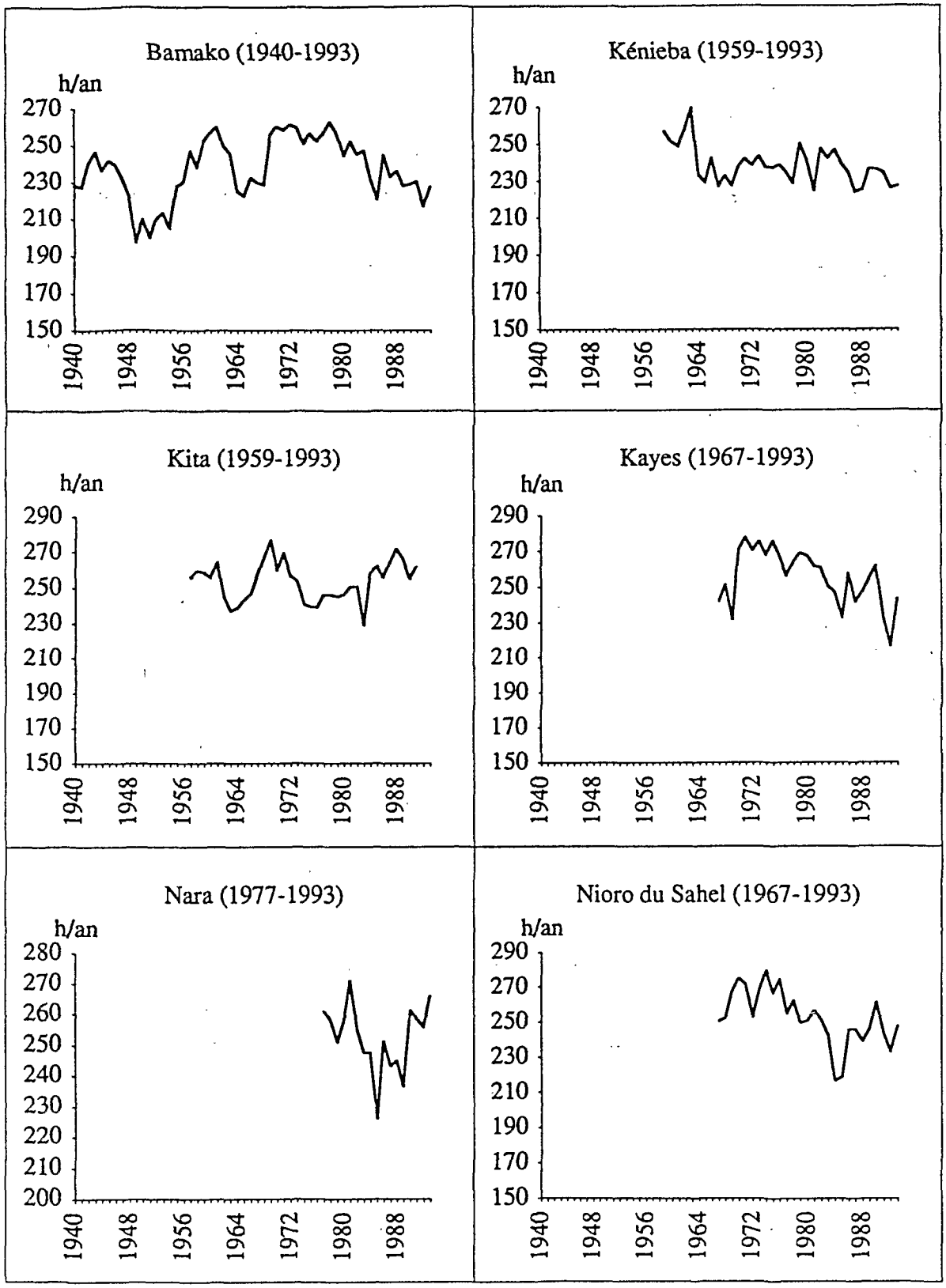


Figure 75 : Evolution de l'insolation annuelle dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

- En dehors de la variation latitudinale, l'insolation annuelle varie peu à l'intérieur d'un même domaine climatique.

Ces caractéristiques se retrouvent à travers les variations de l'insolation décennale. Comme l'indique le tableau 40, seules les deux dernières années permettent de se faire une idée de l'insolation décennale sur l'ensemble des hauts bassins. On note ainsi qu'à l'exception de la station de Kita l'insolation décennale de la période 1971-1980 est plus élevée que celle de la décennie 1981-1990.

La station de Bamako qui dispose du maximum d'informations, permet de mieux entrevoir cette évolution. On remarque en effet que c'est la période 1951-1960 qui enregistre la plus faible insolation. De 1961 à 1990, l'évolution de ces trois décennies est marquée par une nette tendance à la hausse. Le maximum correspond à la période 1971-1980.

Les stations de Kita et de Tambacounda, enregistrent toutefois leur maximum décennal au cours de la période 1981-1990.

Tableau 40 : Variation de l'insolation décennale à quelques stations des hauts bassins

	1941-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990
Nioro du Sahel	-	-	-	3156	2906
Kayes	-	-	-	3488	3015
Tambacounda	-	850,1	910,7	1010	1040
Kita	-	-	3013	3031	3049
Kénieba	-	-	2886	2869	2825
Bamako	2747	2731	2887	3066	2838

Cependant, ces variations de l'insolation annuelle et décennale sont trop générales pour traduire les caractéristiques principales des hauts bassins. Ce sont donc les variations mensuelles qui indiquent le mieux ces fluctuations.

L'insolation dans les hauts bassins connaît des variations annuelles qui résultent elles-mêmes des fluctuations saisonnières. Dans la répartition mensuelle, l'insolation connaît une évolution bimodale à toutes les stations. Les maxima principaux sont notés en janvier en domaine guinéen et en mars-avril en domaine soudanien et sahélien. Les maxima secondaires interviennent en mars à Labé et en octobre-novembre aux autres stations. Les minima principaux surviennent au cœur de la saison des pluies surtout en août. Les minima secondaires liés aux pluies extratropicales sont enregistrés au mois de décembre ou février.

La diminution de ces valeurs au-delà de ces mois en domaine sahélien ne peut être expliquée par une humidité plus importante de l'air. L'importance des poussières atmosphériques fréquentes à cette latitude en est sans doute responsable. Les totaux annuels d'insolation

augmentent selon un axe sud-nord du domaine guinéen vers le domaine nord-soudanien. Enfin de l'importance de l'insolation, dépendent les conditions d'évaporation des hauts bassins.

3. LES CONDITIONS D'EVAPORATION ET D'EVAPOTRANSPIRATION DES HAUTS BASSINS

Les données d'évaporation ne sont pas mesurées à toutes les stations des hauts bassins, ce qui limite considérablement leur exploitation. Les réseaux météorologiques malien, sénégalais et dans une moindre mesure guinéen opèrent des relevés, mais ceux-ci sont encore irréguliers et de chronologie différente.

Tableau 41 : Etat des données d'évaporation dans neuf stations des hauts bassins.

Stations	Période observée	Domaine climatique
Nioro du Sahel	1950-1993	sahélien
Nara	1951-1993	
Kayes	1941-1993	nord-soudanien
Tambacounda	1951-1993	
Kita	1955-1993	
Kédougou	1968-1993	sud-soudanien
Kénieba	1948-1993	
Bamako	1941-1993	
Labé	1961-1990	guinéen

Les données ainsi disponibles (tab. 41) correspondent aux stations de base déjà retenues et sont mesurées à l'évaporimètre de Piche. Il s'agit d'une éprouvette remplie d'eau distillée, alimentant une surface évaporante étalonnée d'un centimètre carré. L'évaporation ainsi mesurée ne dépend en théorie que de la température de l'air sous abri et de l'humidité atmosphérique. Elle est exprimée en mm et concerne surtout l'évaporation potentielle. Dans les hauts bassins, certaines stations connaissent des mois de latence totale pour l'évaporation réelle.

3.1. L'évaporation saisonnière et ses variations

Les fluctuations saisonnières de l'évaporation sont liées à d'autres éléments du climat dont la pluviométrie et les températures principalement. Ainsi, dans la distribution mensuelle de l'évaporation, les valeurs extrêmes notées sont largement corollaires de l'évolution de la pluviométrie et des températures (fig. 76). L'analyse du tableau 42 qui présente l'évolution mensuelle de l'évaporation permet de retenir certaines caractéristiques (fig. 77) :

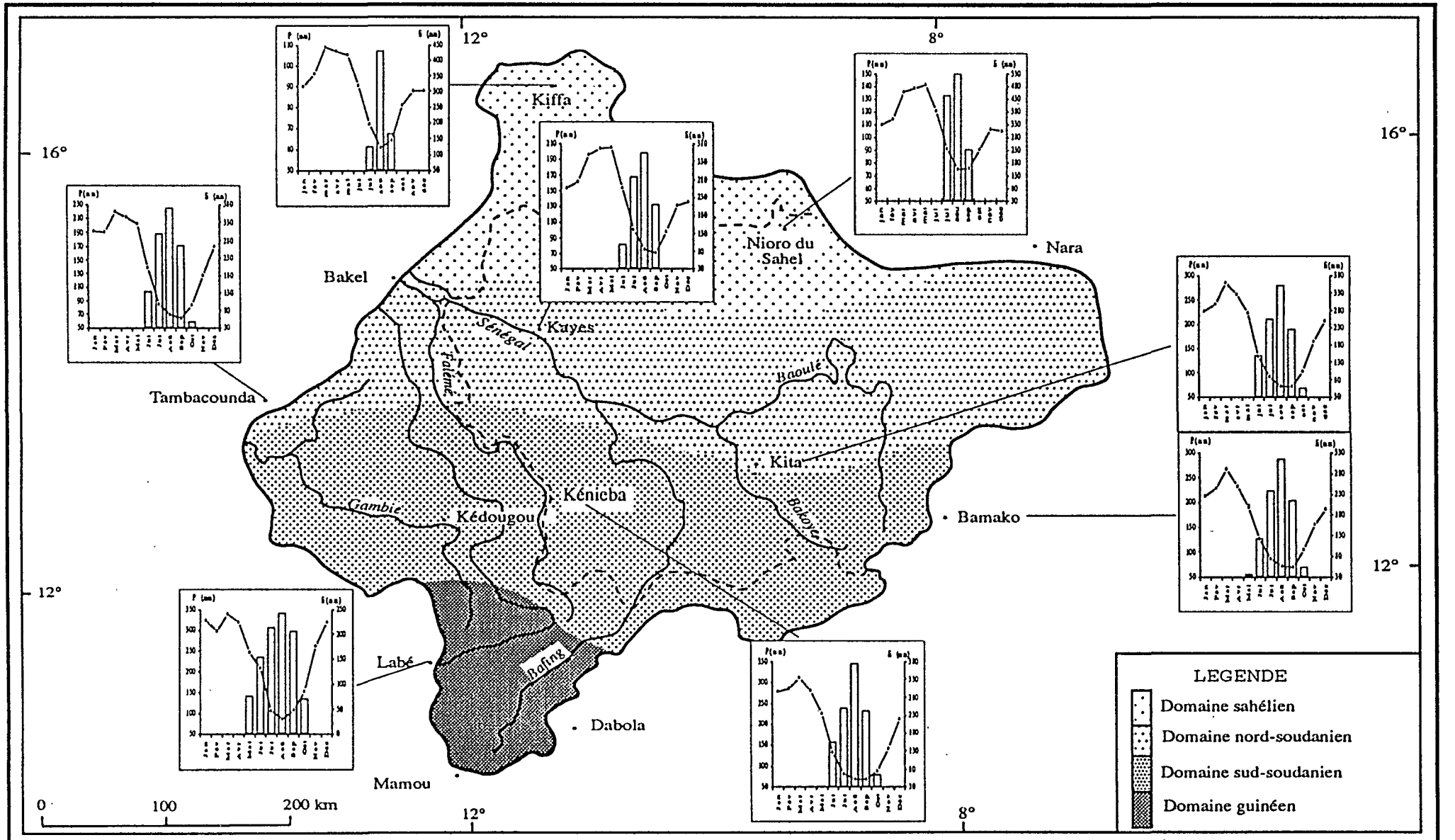


Figure 76 : Régimes d'évaporation et des précipitations des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

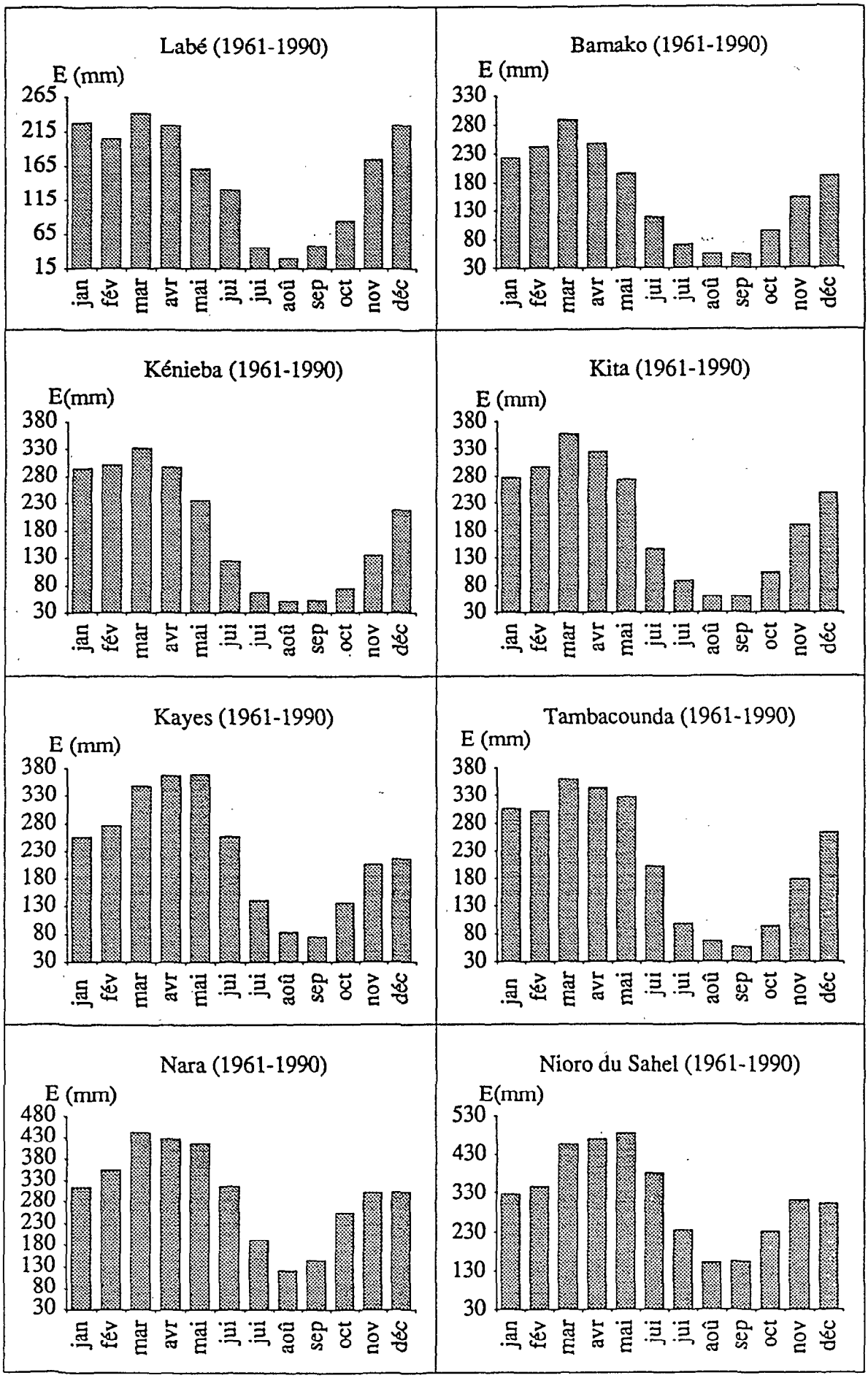


Figure 77 : Evolution mensuelle de l'évaporation dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

Tableau 42 : Variation de l'évaporation mensuelle en mm à différentes stations (période 1961-1990)

	Labé	Bamako	Kénieba	Kita	Tamba	Kayes	Nara	Nioro
janvier	228	224	295	278,2	306,4	256,3	316	327,6
février	206	245	302,1	297,8	302	276	355	348,6
mars	241	290	332,1	357,8	359,8	347,9	443	455,9
avril	223,5	249	297,8	325	344,6	367,1	429	471,9
mai	162	197	235,3	273	326,4	368,9	416	485,4
juin	131	120	124,8	145,9	202,2	258	318	383,4
juillet	46	72,2	68	88,3	98,2	140,8	193	236,9
août	30	54,6	51,2	59,8	68,2	84,8	123	153,2
septembre	49	54,4	52,8	59,7	56,6	76	146	156,2
octobre	85	95	75,4	103,7	94,5	136,2	254	233,3
novembre	175	155	135,4	189,7	178,8	206,1	300	311,1
décembre	224	192	218,8	248,7	263,5	216,4	301,7	303,3
Total	1800,5	1948,2	2188,7	2427,6	2601,6	2738,4	3600	3865,2

- les taux d'évaporation sont beaucoup plus forts en saison sèche où les différentes stations atteignent leur maximum. Ils s'amenuisent au cours de la saison pluvieuse, période pendant laquelle se produisent les minima (fig. 78, 79, et 80) ;
- Les maxima d'évaporation interviennent surtout au mois de mars. Mais, ils peuvent être tardifs comme à Kayes et Nioro du Sahel où ils sont notés au mois de mai et correspondent au maximum des températures (fig. 78, 79) ;
- Les minima sont observés au cœur de la saison pluvieuse et fluctuent entre août et septembre du fait de l'évolution de la mousson et du faible pouvoir évaporant à toutes les stations durant cette période (fig. 79) ;
- Cette évolution des maxima et des minima montre partout une allure unimodale de l'évaporation ;
- La variabilité de l'évaporation peut être faible entre les mois d'une même saison ce qui traduit une évolution régulière du phénomène ;
- L'augmentation des taux d'évaporation du sud au nord des hauts bassins reste la règle générale, même si les valeurs observées diminuent au cours de la saison des pluies.
- Les totaux annuels connaissent la même évolution et vont du simple au double entre Labé et Nioro du Sahel. Ils sont cependant très élevés dans toutes les stations.

Cette évolution saisonnière de l'évaporation est cependant dépendante de certains facteurs locaux (végétation notamment) qui peuvent influencer les taux enregistrés. C'est le cas du vent,

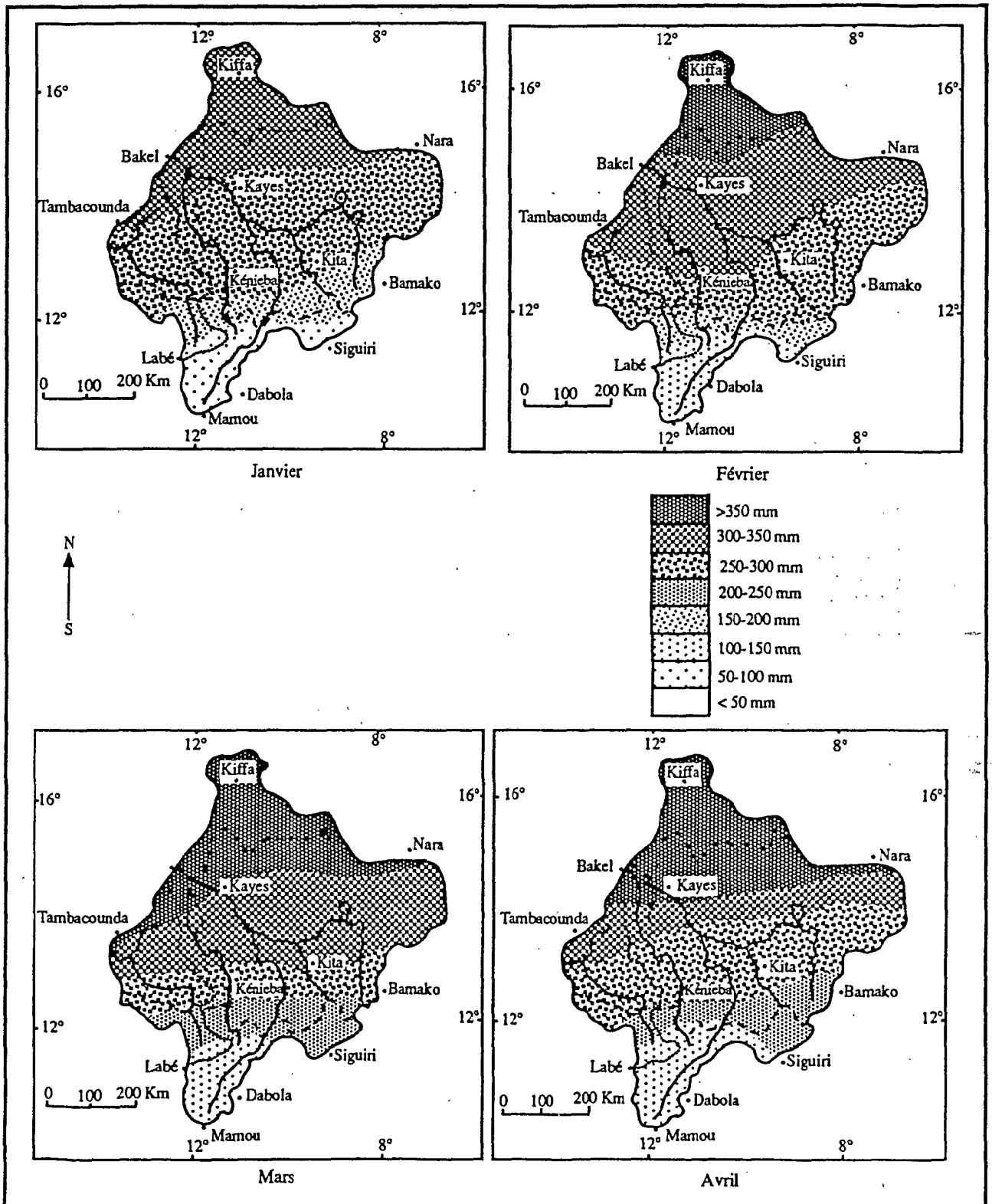


Figure 78 : Variation de l'évaporation mensuelle dans les hauts bassins (période 1961-1990)

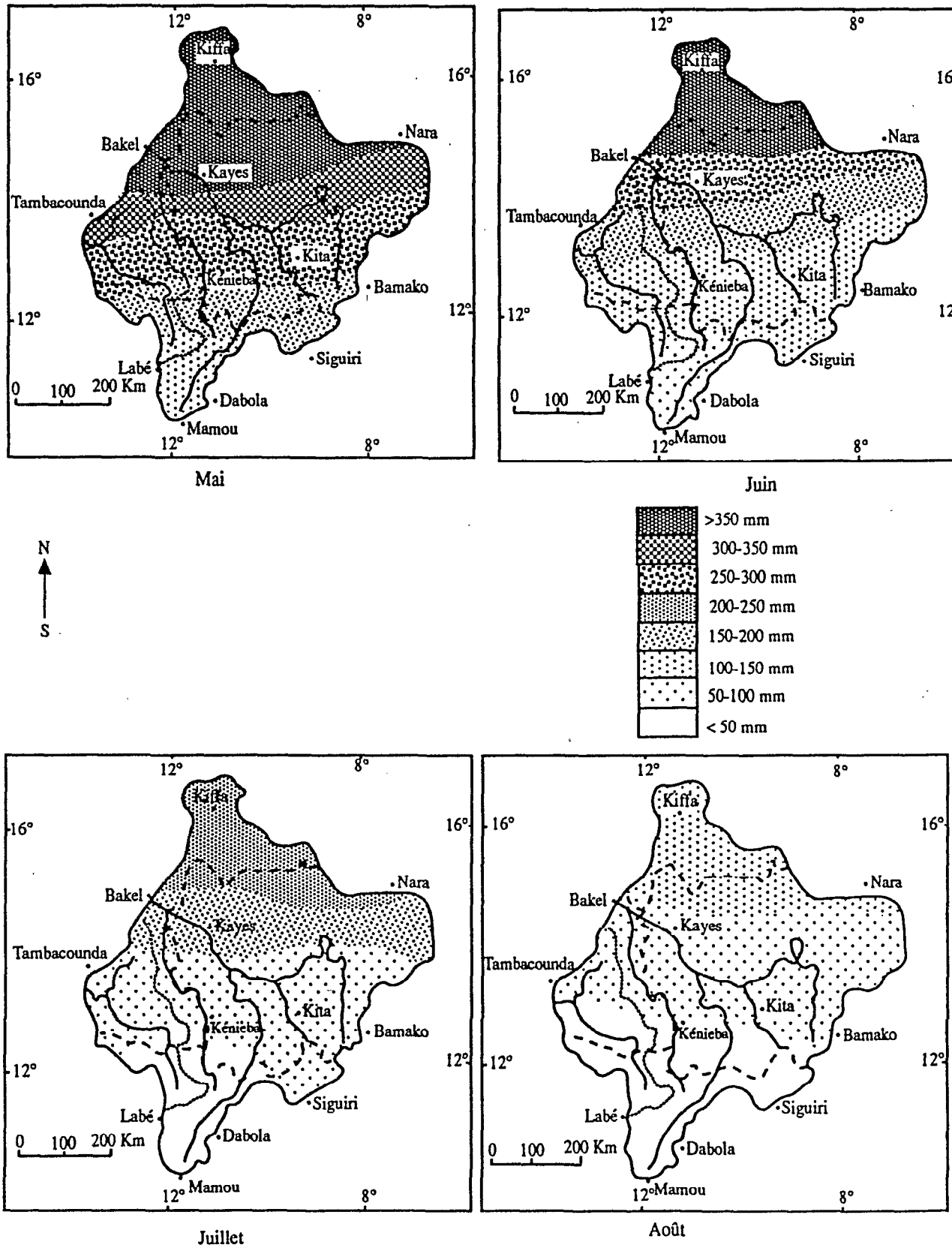


Figure 79 : Variation de l'évaporation mensuelle dans les hauts bassins (période 1961-1990)

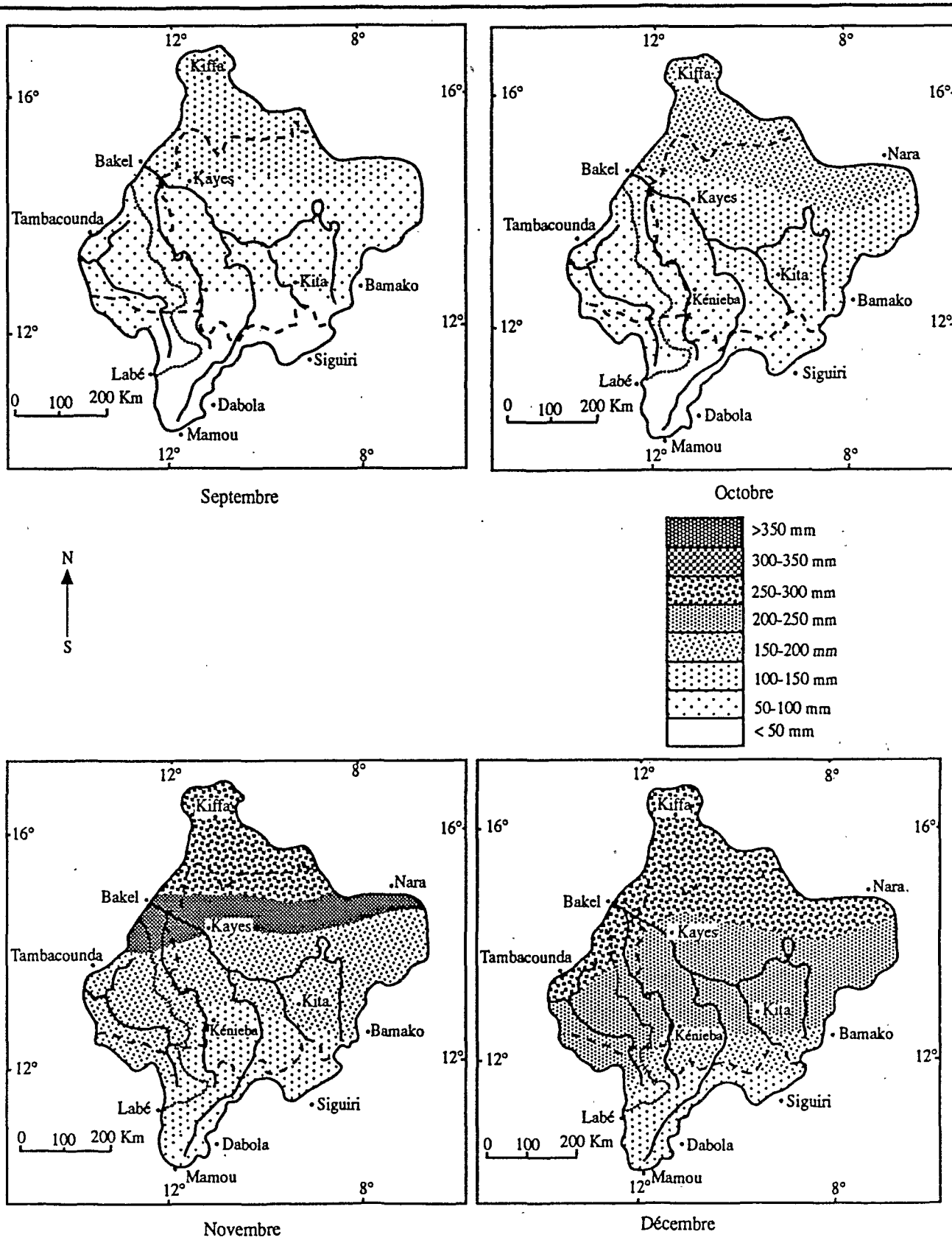


Figure 80 : Variation de l'évaporation mensuelle dans les hauts bassins (période 1961-1990)

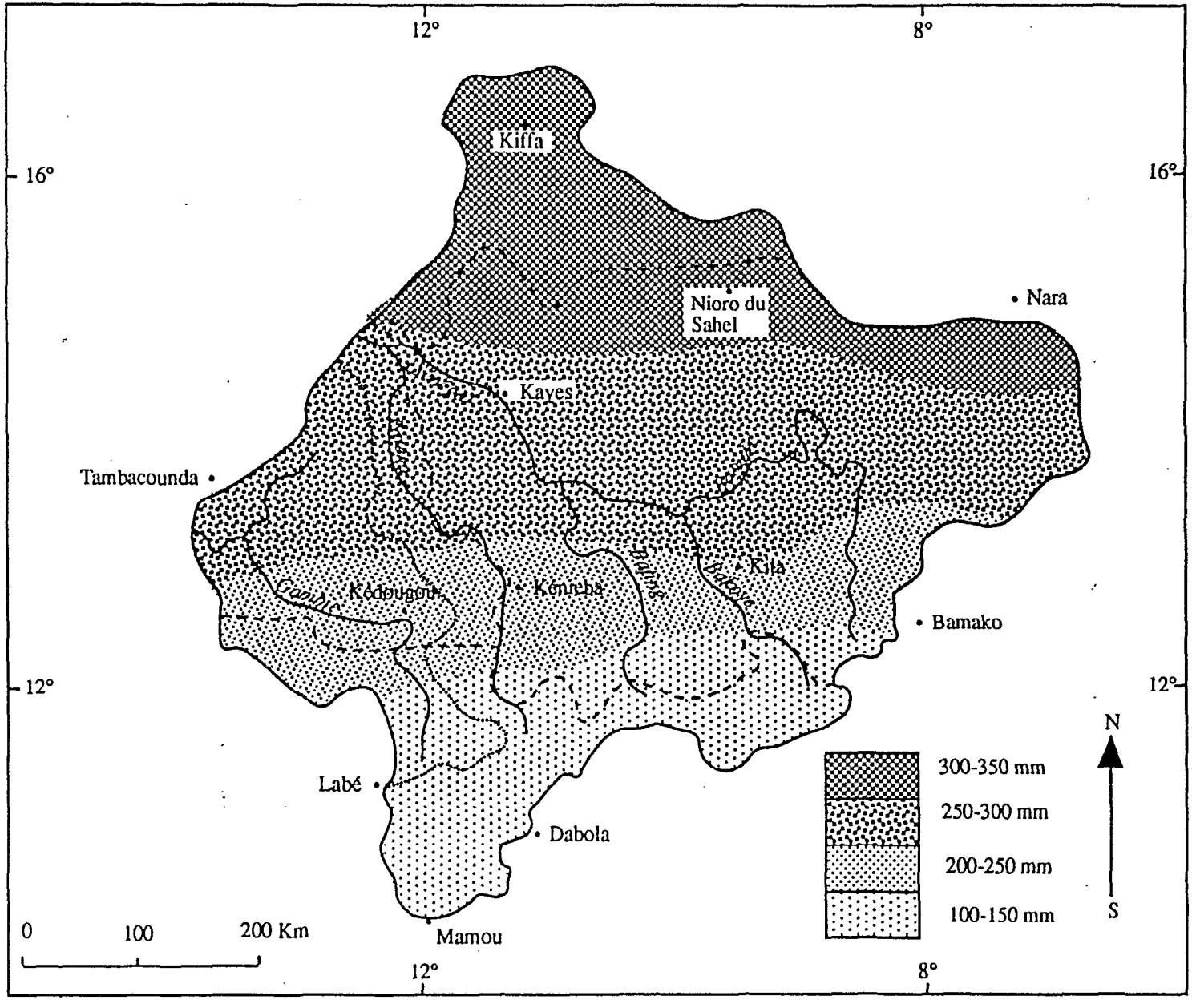


Figure 81 : Variation de l'évaporation moyenne annuelle dans les hauts bassins (période 1961-1990)

dont le rôle contribue à accentuer l'évaporation. En saison sèche, l'harmattan qui est chaud et sec renforce les taux d'évaporation surtout dans les régions septentrionales.

Cependant, aux heures chaudes, les valeurs du vent sont insignifiantes à cause de la concordance entre l'harmattan qui est très chaud et les fortes valeurs atteintes par l'évaporation. La figure 81 résume cette variabilité mensuelle de l'évaporation à l'échelle annuelle de la période 1961-1990 et montre que l'augmentation de l'évaporation se calque sur la dégradation zonale de la végétation et la prédominance de l'harmattan. Ces fluctuations sont aussi à imputer à l'assèchement des masses d'air, au rayonnement solaire et à l'état hygrométrique du milieu. On comprend alors aisément, une fois la réunion de ces différents éléments qui conditionnent la ponction faite, le souci de connaître le reste de "l'eau utile" notamment dans la retenue de Manantali qui constitue le vivier hydrique de l'ensemble de la région. L'analyse à une échelle plus longue grâce à l'évaporation annuelle permet de mieux se faire une idée sur la question.

3.2. L'évaporation annuelle

La figure 82 présente l'évolution de l'évaporation annuelle aux différentes stations depuis l'origine des mesures. Le tracé des graphiques à la même échelle permet d'entrevoir quelques traits caractéristiques :

- A l'exception de la station de Nioro du Sahel et dans une moindre mesure celle de Kénieba, l'évaporation annuelle connaît pour l'ensemble des stations une variation faible à modérée.
- Cette modération de l'évaporation est beaucoup plus accentuée pour les trois dernières décennies sur l'ensemble des hauts bassins.
- La station de Tambacounda connaît néanmoins une tendance à la régularité pour les trente dernières années.
- Si on reclasse les stations selon un gradient méridien, on remarque que l'évaporation croît du sud (Labé) au nord (Nioro du Sahel).

Tableau 43 : Comparaison de l'évaporation moyenne à différentes stations

Stations	Période 1951-1970	Période 1972-1993
Nioro du Sahel	227,4	351,7
Nara	242,9	321,4
Kayes	234,4	228,5
Tambacounda	235	212,6
Kita	-	210
Kénieba	163,2	192,2
Bamako	173,5	157,6
Labé	150	119,7

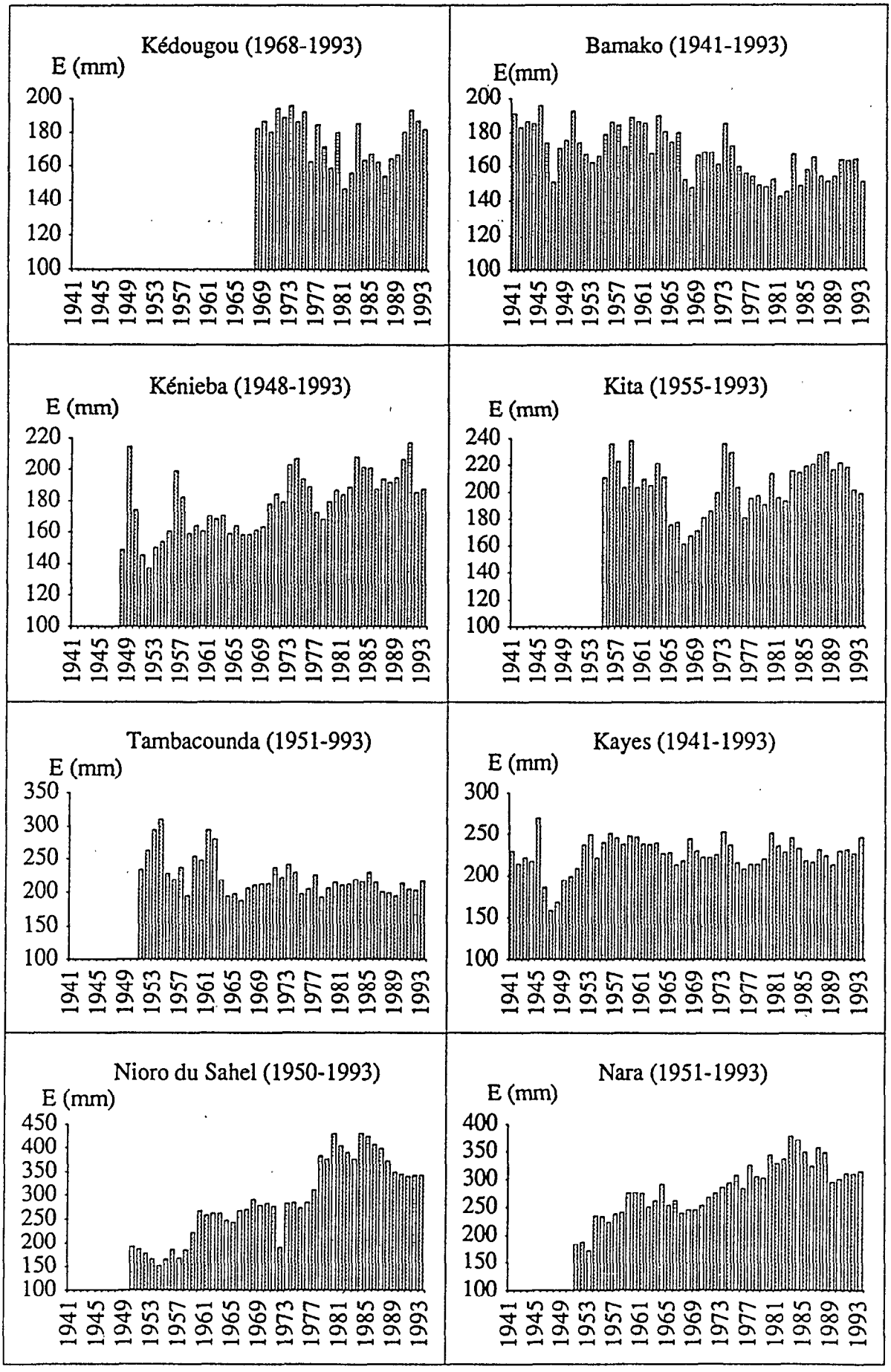


Figure 82 : Evaporation moyenne annuelle dans huit stations des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie.

Le recoupement des stations par période (tab. 43), montre que l'évaporation augmente partout du sud au nord des hauts bassins. De même l'écart est assez réduit entre les stations d'un même domaine climatique. Cependant, la comparaison de ces deux périodes ne traduit pas partout une hausse de l'évaporation surtout pour la dernière période.

Certaines stations comme Bamako, Tambacounda ou Kayes enregistrent une légère baisse de leur taux moyen d'évaporation au cours de la période 1972-1993.

L'évolution de l'évaporation est donc caractérisée par une faible variation interannuelle, même si elle est très nette à l'échelle spatiale. Cette évolution de l'évaporation annuelle masque néanmoins certaines caractéristiques qui se retrouvent à l'échelle décennale.

3.3. Les variations décennales de l'évaporation

Les variations de l'évaporation décennale dans les hauts bassins sont difficiles à cerner en raison des fluctuations qui sont observées surtout en domaine soudanien (tab. 44). En effet, si en milieu sahélien cette évolution est très nette et marquée par une hausse continue, le reste des hauts bassins connaît une évolution contradictoire des taux d'évaporation enregistrés.

Tableau 44 : Evaporation décennale à quelques stations des hauts bassins

	1941-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990
Bamako	180,5	175,8	171,2	160,6	155,1
Kénieba	-	163	165	186	198
Kédougou	-	-	-	181	165
Kita	-	219	188	204	216
Tambacounda	-	249	221	218	211
Kayes	155,3	227	247	229	227
Nioro du Sahel	-	187,7	267,2	309,7	389,3
Nara	-	227	259	300	340

Ainsi, pour la période 1941-1950, l'évaporation décennale n'est mesurée qu'en domaine soudanien, respectivement aux stations de Bamako et de Kayes. Les taux d'évaporation moyens sont de 180,5 mm à Bamako et 155,3 mm à Kayes. On note une certaine disparité entre les valeurs de ces deux stations, où l'évaporation est plus forte en domaine sud-soudanien.

La période 1951-1960 marque une baisse de l'évaporation à la station de Bamako (175,8 mm) par rapport à la période précédente. La station de Kénieba, située elle aussi en domaine sud-soudanien connaît un taux d'évaporation assez faible (163 mm). Cette baisse du taux d'évaporation en domaine sud-soudanien est liée à la forte pluviométrie de la période.

En domaine nord-soudanien, les stations de Kita, Tambacounda et Kayes connaissent un taux d'évaporation élevé. Celui-ci est de 219 mm à Kita, il est de 249 mm à Tambacounda puis se réduit à 227 mm à Kayes. Le taux à cette dernière station est toutefois plus élevé que celui de la période 1941-1950. Ceci n'est pas surprenant, eu égard aux pluies de la décennie 1951-1960 à Kayes qui sont inférieures à celles de 1941-1950 (chap. 4).

En domaine sahélien, le taux d'évaporation aux stations de Nioro du Sahel et de Nara est relativement faible pour cette latitude. Il est respectivement de 187,7 mm à Nioro du Sahel, valeur légèrement supérieure à celle du domaine sud-soudanien alors que Nara enregistre un taux d'évaporation similaire à celui de Kayes (227 mm).

La période 1951-1960 montre que la tendance méridienne de l'évaporation n'est pas constante. De même, les variations enregistrées aux différentes stations dépendent surtout de la pluviométrie et de la ponction que subit chaque station. Cette situation s'applique parfaitement à la station de Bamako, où pour la période 1961-1970, on note une baisse de son taux d'évaporation (171,2 mm) par rapport à la période précédente. Toutefois, cette baisse est faible et semble refléter le faible écart de la pluviométrie de ces deux décennies qui sont sensiblement égales (1110 mm en 1951-1960 contre 1093 mm en 1961-1970). Ce faible écart est aussi observé à la station de Kénieba qui enregistre une évaporation décennale de 165 mm, valeur sensiblement identique à celle de la période 1951-1960 (tab. 45).

En domaine nord-soudanien, l'évaporation décennale de la période diminue à Kita (188 mm) et à Tambacounda (221 mm). Par contre à Kayes on assiste à une hausse de l'évaporation avec 247 mm. Celle-ci se confirme en domaine sahélien avec respectivement 267,2 mm à Nioro du Sahel et 259 mm à Nara.

Cette hausse de l'évaporation s'affirme pour la période 1971-1980 à l'exception des stations de Bamako, Tambacounda et de Kayes où l'on enregistre une tendance à la baisse.

Les taux d'évaporation à ces stations sont de 160,6 mm à Bamako, 218 mm à Tambacounda et 229 mm à Kayes. Par rapport à la période précédente, on note une légère baisse de l'évaporation à Bamako (-10,6 mm), elle est de -7 mm à Tambacounda et de -18 mm à Kayes.

Les autres stations accusent une hausse crescendo.

En domaine sud-soudanien, les taux de Kénieba et de Kédougou sont assez voisins (186 et 181 mm respectivement). Par rapport à la décennie 1961-1970, Kénieba enregistre une hausse de +21 mm alors que Kédougou en est à son premier relevé décennal. La station nord-soudanienne de Kita, la seule de ce domaine à voir son taux d'évaporation à la hausse (+16 mm), totalise 204 mm. En milieu sahélien, cette hausse est franche ; Elle est de +42,5 mm à Nioro du Sahel et +41 mm à Nara (tab. 43).

Pour la décennie 1981-1990, la répartition de l'évaporation décennale est encore sujette à des disparités. Les stations de Bamako et de Kédougou connaissent une évaporation à la baisse (155,1 mm à Bamako et 165 mm à Kédougou). La station de Kénieba, quant à elle, voit son taux d'évaporation s'accroître (198 mm) par rapport à la période 1971-1980. Cette évolution se perpétue en domaine nord-soudanien. Les stations de Tambacounda et de Kayes enregistrent à cet

effet une légère baisse (211 et 227 mm) respectivement. La station de Kita connaît en même temps une hausse sensible de son évaporation (216 mm). Cette hausse est beaucoup plus visible en domaine sahélien. Elle est de 340 mm à Nara et culmine à Nioro du Sahel avec 389,3 mm. Par rapport à la période 1951-1960, ces deux stations enregistrent une augmentation respective de leur taux d'évaporation de +201,6 mm à Nioro du Sahel et +113 mm à Nara.

L'évolution interannuelle n'indiquant pas de renseignement significatif, l'analyse de l'évaporation décennale dans les hauts bassins permet de retenir certaines caractéristiques :

- L'évaporation décennale connaît des variations très voisines entre le domaine sud-soudanien et nord-soudanien.
- D'autre part, l'évolution des taux décennaux en milieu soudanien montre que l'évaporation est surtout fonction des variations de chaque station qui peuvent être contraires à une autre, qui lui est pourtant proche (Kénieba et Bamako). Mais la position de cette dernière station sur les rives du fleuve Niger tout comme celle de Kayes sur le Sénégal explique la modération de leurs valeurs d'évaporation. La tendance à la baisse progressive de l'évaporation décennale à Bamako peut être aussi imputée au brouillard fréquent dans la vallée du Niger, surtout au cours de la saison des pluies.
- L'évaporation est maximale en domaine sahélien où l'évolution décennale montre partout une hausse. La faible pluviométrie dans ce domaine jointe aux caractères thermiques en hausse sont du reste largement responsables de cette situation.

3.4. L'évapotranspiration dans les hauts bassins

Les difficultés inhérentes à l'exploitation des données d'évaporation sont encore plus évidentes lorsqu'il s'agit d'évoquer l'évapotranspiration. En fait, cette dernière est calculée et les différentes formules (C. W. Thornthwaite, 1939 ; L. Turc, 1953 ; et H. L. Penmann, 1956) contribuent à accroître la diversité des informations recueillies à travers les réseaux de mesures.

La formule de Turc très empirique repose essentiellement sur les températures et la durée de l'insolation. Elle ne fait intervenir l'humidité relative que pour les mois où elle est inférieure à 50 %. Or, en milieu tropical, les températures varient peu, ce qui limite l'application de cette méthode.

Par contre, la formule de Penmann repose sur une évaluation rigoureuse du bilan énergétique de la surface évaporante. Elle reflète mieux ainsi la réalité de l'évapotranspiration potentielle en intégrant plusieurs paramètres parmi lesquels en plus de ceux de Turc, la radiation solaire globale, l'albédo, la vitesse du vent....

Malheureusement, pour les hauts bassins, l'évapotranspiration de Penmann n'est pas calculée faute de données complètes. Les informations, dont on dispose grâce aux services météorologiques, sont certes calculées à partir de cette formule, à l'exception de la station de Labé estimée par la formule de Turc.

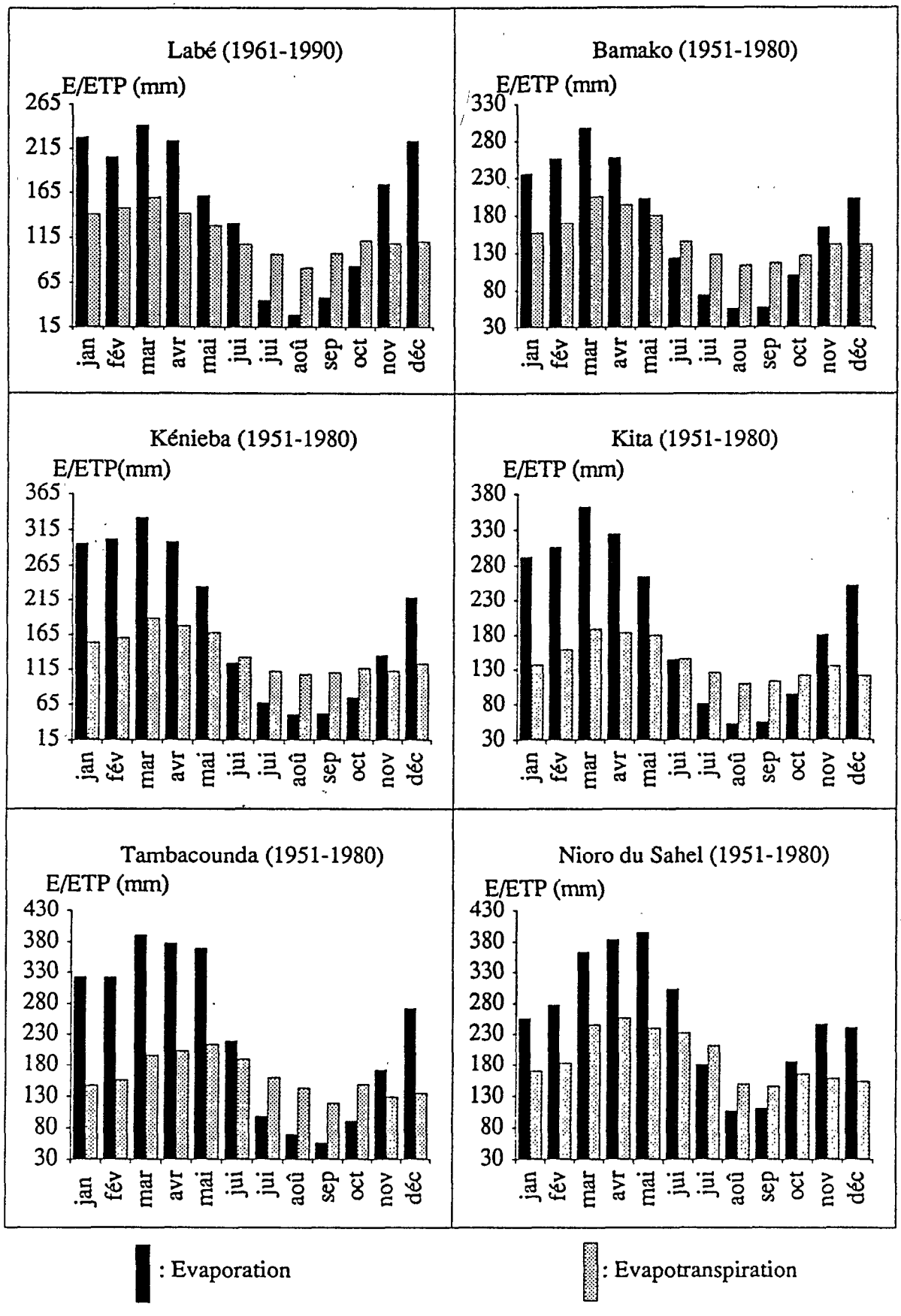


Figure 83 : Comparaison entre évaporation et évapotranspiration mensuelle dans les hauts bassins (période 1951-1980)

Néanmoins, ces données sont assez anciennes et ne nous permettent pas de dégager des conclusions absolues sur les conditions actuelles de l'évapotranspiration des hauts bassins. Le tableau 45 montre ainsi à l'échelle mensuelle une comparaison entre l'évaporation et l'évapotranspiration sur la période 1951-1980.

Tableau 45 : Comparaison entre évaporation et évapotranspiration mensuelle dans les hauts bassins

	Labé		Bamako		Kénieba		Kita		Tamba		Nioro	
	E	ETP	E	ETP	E	ETP	E	ETP	E	ETP	E	ETP
janvier	228	141	236	156	295,5	154	292,2	137	323,3	147	255	170
février	206	148	257	170	302,1	161	305,6	159	322,2	156	277,9	184
mars	241	160	298	205	332,2	161	362,3	189	390,1	196	363	245
avril	224	142	258	194	297,8	178	325	183	377,4	205	383,3	256
mai	162	128	203	180	235,3	168	265	180	369,4	215	395,5	240
juin	131	108	123	145	124,8	132	144,6	145	219,4	191	303,7	232
juillet	46	97	74,3	128	68	113	81,5	126	99,3	160	181,3	212
août	30	82	56	114	51,2	108	53,6	110	69,6	144	107,6	150
septembre	49	98	57,5	117	52,8	111	55,4	114	56,3	120	112	146
octobre	85	112	101	127	75,4	117	96	122	91,1	149	186,2	165
novembre	175	109	164	141	135,4	113	180,5	135	172,3	129	246	158
décembre	224	111	202	141	218,8	123	252,1	121	272,3	135	240,7	154
An	1801	1436	2031	1818	2190	1667	2414	1721	2763	1944	3052	2312

L'analyse de ce tableau montre que les variations mensuelles de l'évapotranspiration suivent celles de l'évaporation surtout en saison sèche où les maxima sont enregistrés. Toutefois, de légers différés peuvent être observés entre le maximum de l'évaporation et celui de l'évapotranspiration.

Ainsi à Kénieba, l'évaporation maximale intervient en mars (332,2 mm) alors que le maximum de l'évapotranspiration est noté en avril (178 mm).

A Tambacounda, ce différé est de deux mois puisque l'évaporation est maximale en mars (390,1 mm) tandis que l'ETP maximale intervient en mai (214,6 mm). En revanche, à Nioro du Sahel, le maximum de l'évapotranspiration est précoce (256 mm en avril) pour une évaporation maximale en mai (395,5 mm). Pour les autres stations (Labé, Bamako et Kita), le maximum de l'évapotranspiration concorde avec celui de l'évaporation et survient au mois de mars. Cependant, on remarque que les valeurs de l'évaporation sont supérieures à celles de l'évapotranspiration durant les mois de saison sèche. Par contre, celles-ci sont inférieures durant la saison des pluies où les conditions de l'évapotranspiration sont optimales (fig. 83). En dehors de ces remarques, l'évolution de l'évapotranspiration est similaire à celle de l'évaporation.

L'analyse de l'humidité relative, de l'insolation et de l'évaporation dans les hauts bassins permet de mieux comprendre le rôle de ces éléments. Les caractéristiques de l'humidité relative et de l'insolation, dépendent de masses d'air qui circulent dans les hauts bassins et des saisons

climatiques qu'elles déterminent. Lorsque les masses d'air en provenance du sud intéressent la région, l'humidité de l'air qui l'accompagne s'accroît avec l'épaisseur de la mousson et sa remontée vers le nord des hauts bassins. Au maximum de la translation du flux de mousson au mois d'août, l'humidité relative et l'évapotranspiration, elles aussi enregistrent leurs plus forts taux.

Les conditions météorologiques imposent une couverture nuageuse qui contribue à diminuer la radiation solaire et l'évaporation. Les plus faibles valeurs de ces deux éléments sont ainsi enregistrées au mois d'août. Le retrait de la mousson rétablit dans la région une circulation d'alizé. L'humidité relative liée aux vents de secteur nord-est est très faible en raison de l'origine de ces vents vecteurs de poussières (brume sèche). Les taux d'humidité relative sont alors très faibles. Par contre, l'insolation et l'évaporation s'accroissent durant cette période pour atteindre leurs plus fortes valeurs.

La combinaison de ces différents éléments avec les facteurs climatiques principaux que sont la pluviométrie et les températures conditionne ainsi l'écoulement. Lorsque cette combinaison est favorable, les modalités de l'écoulement fluvial s'en trouvent accrues. En revanche lorsque celle-ci est défavorable, elle impose une forte indigence aux cours d'eau. C'est l'impact de ces différents facteurs climatiques sur l'écoulement fluvial des hauts bassins que nous résumons.

SYNTHESE DES PARAMETRES CLIMATIQUES, FACTEURS CONDITIONNELS DE L'ECOULEMENT

L'étude du climat des hauts bassins montre à travers l'analyse de la pluviométrie et des autres éléments climatiques les caractéristiques et manifestations principales de la zone intertropicale. Néanmoins en raison de la variabilité de ces phénomènes, des nuances spatiales peuvent apparaître. Nous rappelons ainsi pour chaque bassin les conditions climatiques qui lui sont propres.

- Le haut bassin du Sénégal

Le haut bassin du Sénégal s'étend entre les latitudes 10°20' N et 14°54' N. Sa diversité climatique en fait un milieu à extrêmes climatiques. Il comprend quatre domaines climatiques : guinéen, sud-soudanien, nord-soudanien et sahélien.

Du point de vue pluviométrique, le haut bassin du Sénégal est compris entre les isohyètes 300 et 1900 mm (période 1931-1993). La pluviométrie qui diminue du sud au nord est très variable.

Les températures et l'évaporation, faibles en domaine guinéen, augmentent en domaine soudanien et atteignent leur maximum en domaine sahélien.

Le Bafing et le Bakoye, branches mères du fleuve Sénégal ainsi que la Falémé, prennent naissance en domaine guinéen. Ils bénéficient ainsi de conditions climatiques favorables.

Dans le domaine soudanien, les rigueurs climatiques sont déjà manifestes. Le Baoulé, affluent venu de ce domaine (sud-soudanien) et le Sénégal qui s'y forme (nord-soudanien) connaissent déjà de fortes indigences climatiques. Celles-ci sont maximales en domaine sahélien où les cours d'eau ne reçoivent plus d'apports significatifs. Les affluents venus de ce dernier domaine climatique (Kolimbiné et Karakoro) sont astreints aux conditions climatiques les plus rudes.

- Le haut bassin de la Gambie

Le bassin amont de la Gambie est entièrement compris entre les domaines soudanien et guinéen. Il est limité par les isohyètes 700 et 1900 mm et connaît des conditions climatiques plus clémentes.

Le domaine guinéen, assez restreint, est la source des cours d'eaux principaux. Le fleuve Gambie et de nombreux affluents dont la Koulountou naissent ici, ce qui leur confère une certaine abondance. Vers l'aval, l'alimentation des cours d'eau décroît. Cette décroissance est modérée en domaine sud-soudanien où les cours d'eau comme le Diarha, Thiokoye et Diaguiry sont encore importants.

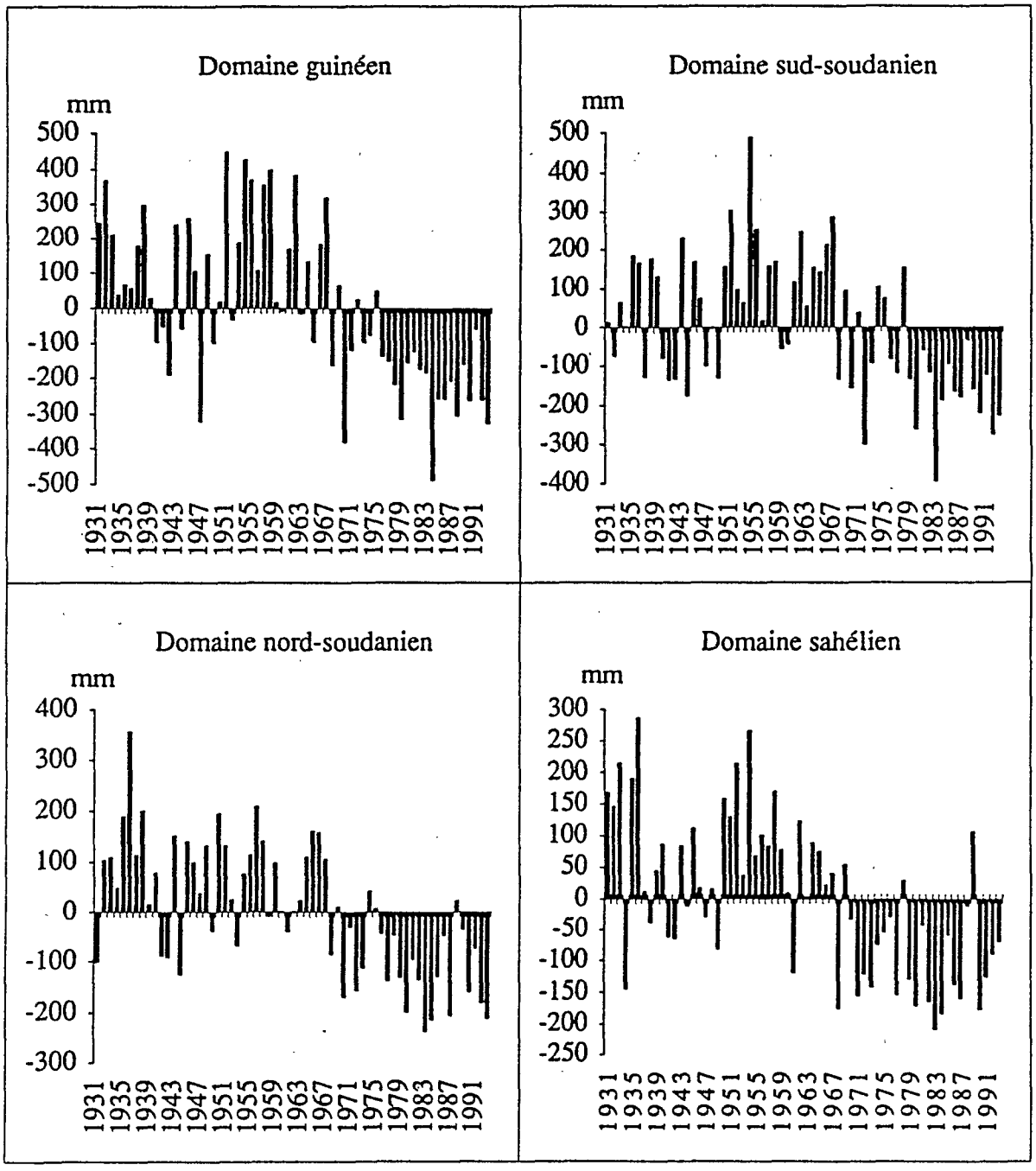


Figure 84 : Indice pluviométrique des différents domaines climatiques des hauts bassins (période 1931-1993)

Elle est forte en domaine nord-soudanien où la baisse de la pluviométrie combinée aux ponctions locales confère au Niokolo-Koba et au Niériko des caractères de cours d'eau sahéliens.

La synthèse des différents paramètres climatiques qui termine cette partie montre la relation entre ces différents éléments. De leurs combinaisons, découlent aussi les diverses manifestations qui influencent les modalités de l'écoulement fluvial des hauts bassins.

Les précipitations, par leur importance, restent sans conteste le principal facteur de différenciation climatique. Elles font du climat le principal dispensateur de l'eau écoulée. Dans les hauts bassins, les rivières sont d'autant plus alimentées que les précipitations sont abondantes, ce qui leur confère des caractéristiques particulières, en fonction des domaines climatiques traversés, et du rythme saisonnier des précipitations. La caractéristique principale des précipitations des hauts bassins est leur irrégularité mensuelle et annuelle ainsi que leur hétérogénéité spatiale. Cette caractéristique se double d'une baisse de la pluviométrie qui s'est généralisée dans toute la région (chap. 4).

La figure 84 présente, à partir des stations de base de chaque domaine climatique, l'indice pluviométrique obtenu par le rapport entre la pluviométrie annuelle de chaque domaine et la moyenne de la période 1931-1993. Ce schéma met en évidence que l'ampleur de la péjoration pluviométrique est sans précédent. Or, ce sont ces pluies en forte réduction qui alimentent les cours d'eau. Ces précipitations se combinent à d'autres éléments climatiques dont les apports ou les ponctions contribuent à expliquer l'évolution climatique actuelle.

1- Les précipitations et l'humidité relative

Leur relation est très étroite même si l'abondance de l'une ne détermine pas de facto l'importance de l'autre. La figure 85 matérialise cette relation à travers les différentes stations. On remarque que les variations de l'humidité relative sont concomitantes avec l'évolution de la pluviométrie.

Pour la période 1961-1993 qui caractérise l'évolution récente, la tendance de la pluviométrie, nous l'avons évoqué est marquée par une baisse généralisée. Celle-ci se répercute sur l'humidité relative qui présente des valeurs moyennes assez faibles, parfois inférieures à 50%. Ceci se traduit par une variation interannuelle commune, où les années à faible pluviométrie sont marquées par une humidité relative en baisse (1973, 1984). Cependant, la tendance générale de la période inscrit encore l'évolution de ces facteurs dans une baisse continue.

2- Les précipitations et l'évaporation

L'infiltration et les prélèvements exclus, les pertes par évaporation représentent la plus importante ponction des précipitations qui tombent dans les hauts bassins. En dehors des réserves de la retenue de Manantali, l'essentiel des pertes de la pluviométrie sont à inscrire à l'actif de l'évaporation physique.

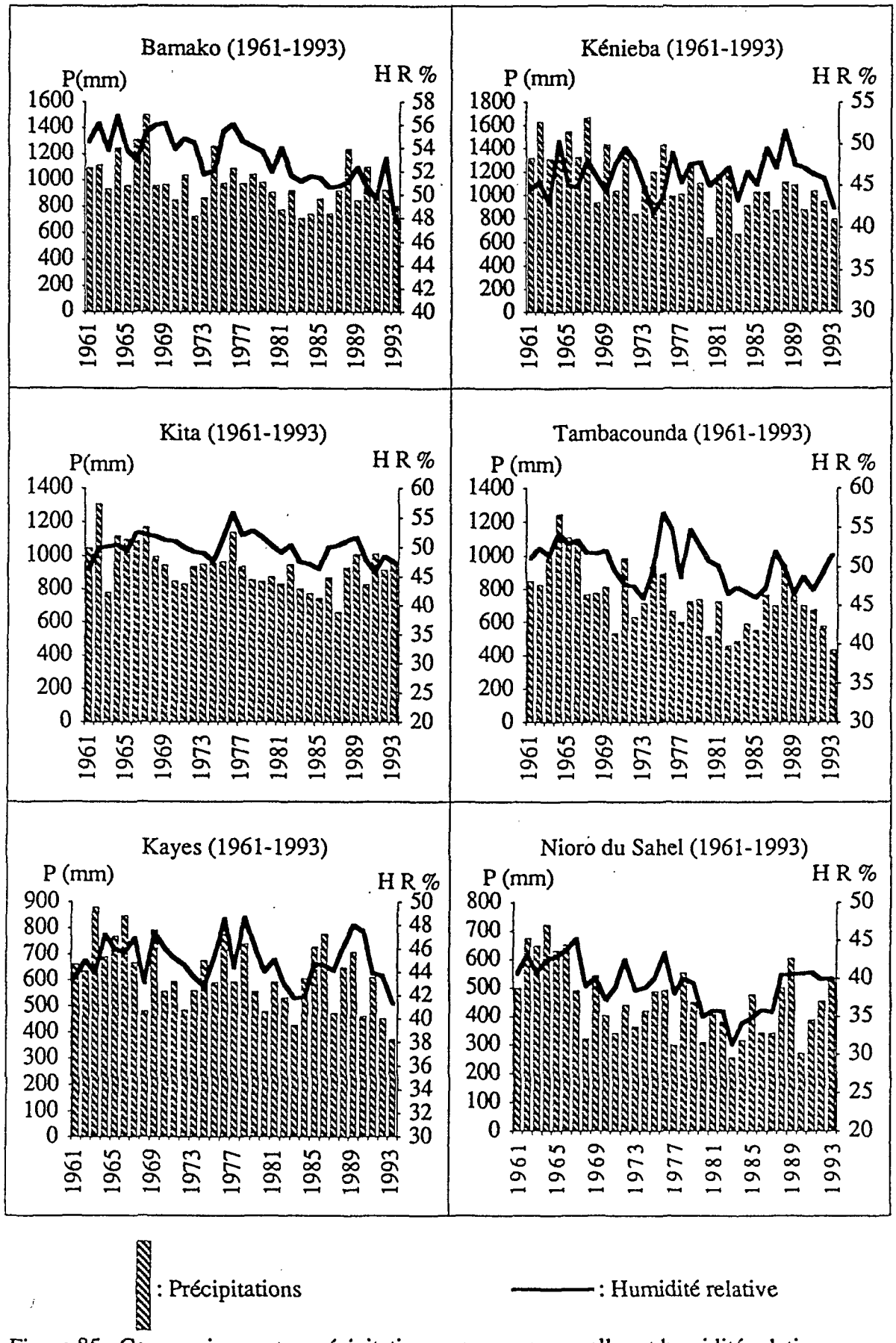


Figure 85 : Comparaison entre précipitations moyennes annuelles et humidité relative moyenne annuelle dans les hauts bassins

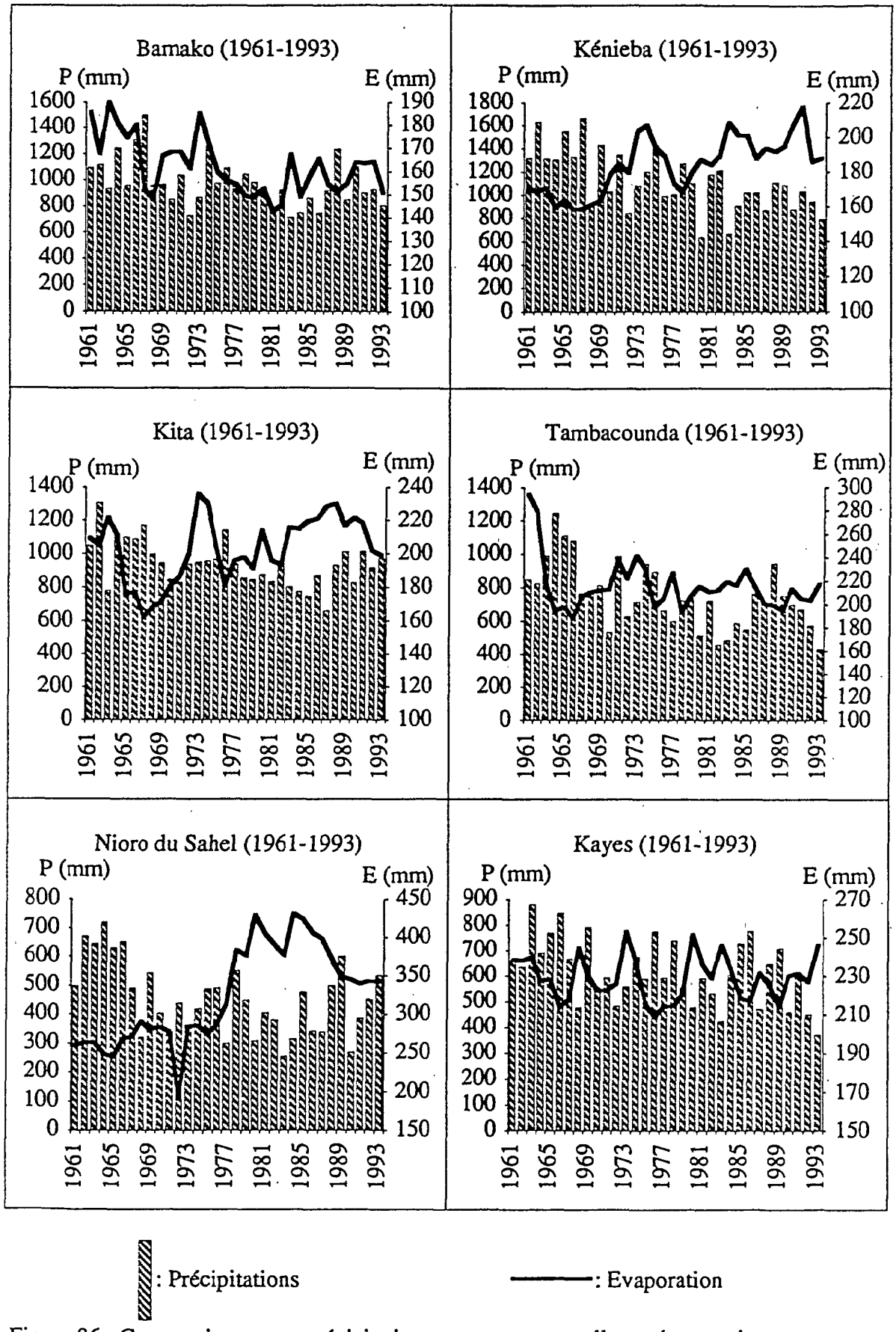


Figure 86 : Comparaison entre précipitations moyennes annuelles et évaporation moyenne annuelle dans les hauts bassins

La figure 86 retrace une comparaison entre la pluviométrie et l'évaporation des hauts bassins. Dans le domaine guinéen où la pluviométrie est encore la plus importante quoiqu'en baisse, la faible infiltration et la végétation assez dense, le rapport pluviométrie-évaporation n'est pas aisé à déterminer en raison du rôle de l'évapotranspiration. Malheureusement, le manque d'informations continues surtout pour l'évaporation ne nous permet pas de déterminer avec exactitude cette relation à l'échelle annuelle. Pour le reste des hauts bassins, on remarque que la relation entre la pluviométrie et l'évaporation s'inscrit en terme inverse.

La figure 86 montre partout une baisse de l'évaporation corrélativement aux années à pluviométrie importante et inversement. Le tracé à la même échelle des stations appartenant au même domaine climatique indique que cette relation est variable d'une station à l'autre.

En domaine sud-soudanien, l'évaporation est beaucoup plus importante à Kénieba qu'à Bamako surtout à partir de 1980. Pourtant, au rapport de la pluviométrie de ces deux stations sur la période 1961-1993, Kénieba avec 1125,4 mm l'emporte largement sur Bamako (979 mm).

En domaine nord-soudanien, l'évaporation à la station de Kita l'emporte assez largement sur celle de Tambacounda, tandis que pour le domaine sahélien, c'est la station de Nioro du Sahel qui montre le mieux la relation pluie-évaporation du milieu sahélien.

Toutefois, il convient de noter que cette relation est fonction de la disponibilité d'eau à évaporer, qui varie d'une station à l'autre. Cependant sur l'ensemble des hauts bassins on note une augmentation depuis 1968 de l'évaporation (fig. 86), ce qui nous amène à établir le bilan climatique.

Tableau 46 : Bilan par domaine climatique dans les hauts bassins (période 1961-1993)

Domaines climatiques	pluviométrie moyenne	Evaporation moyenne
sahélien	369,7 mm	3731,7 mm
nord-soudanien	702 mm	2587,6 mm
sud-soudanien	1149,2 mm	2070 mm
guinéen	1647,8 mm	1500 mm

Le tableau 46 indique partout un déficit à l'exception du domaine guinéen. Ce déficit s'accroît du sud au nord des hauts bassins où les conditions climatiques sont déjà insupportables.

Du domaine guinéen au sahélien, l'écoulement des hauts bassins est ainsi soumis à des degrés divers à ces conditions d'où la nécessité de rappeler la combinaison des autres éléments climatiques qui sont eux aussi déterminants.

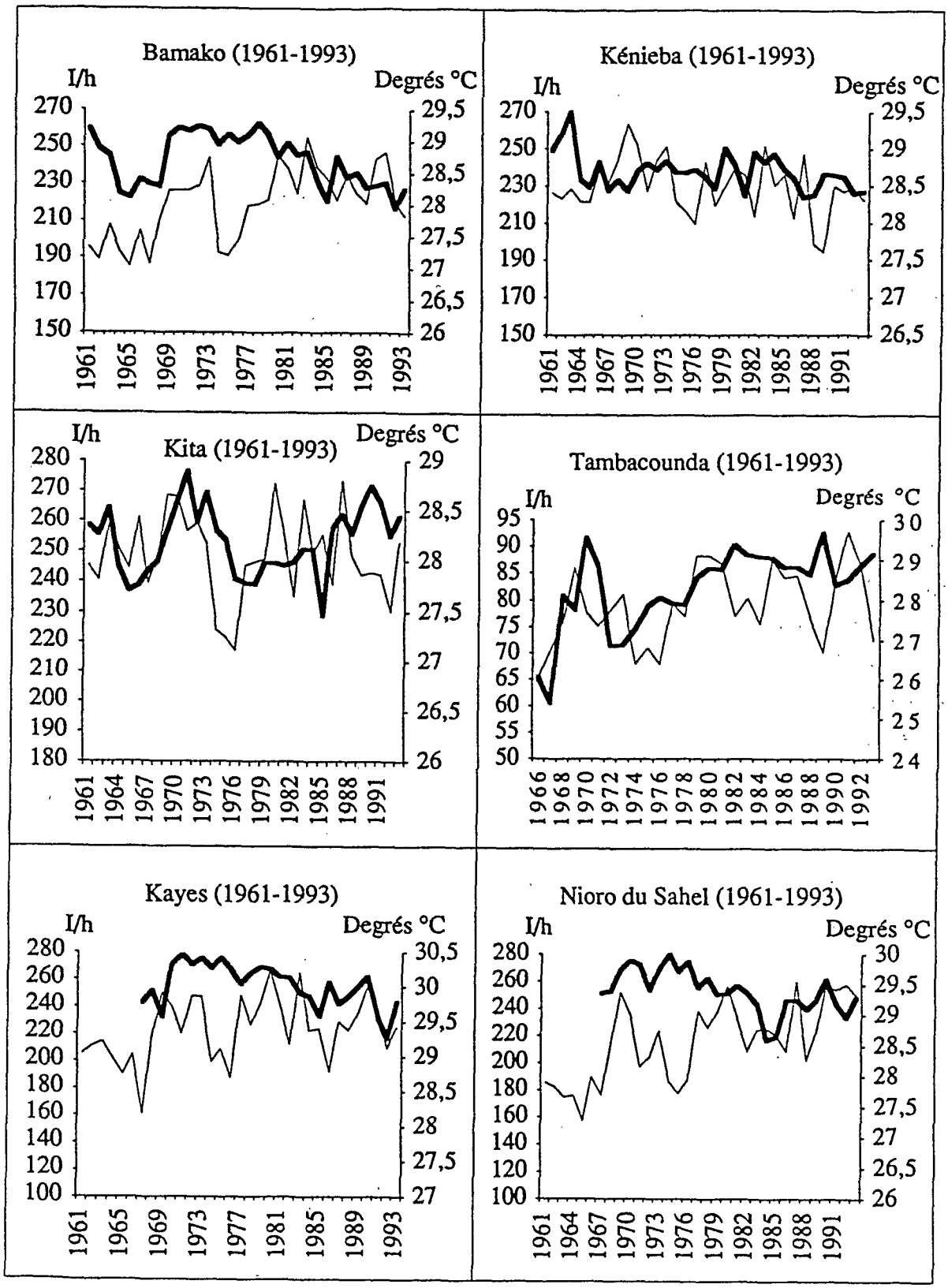


Figure 87 : Comparaison entre insolation moyenne annuelle et températures moyennes annuelles dans les hauts bassins

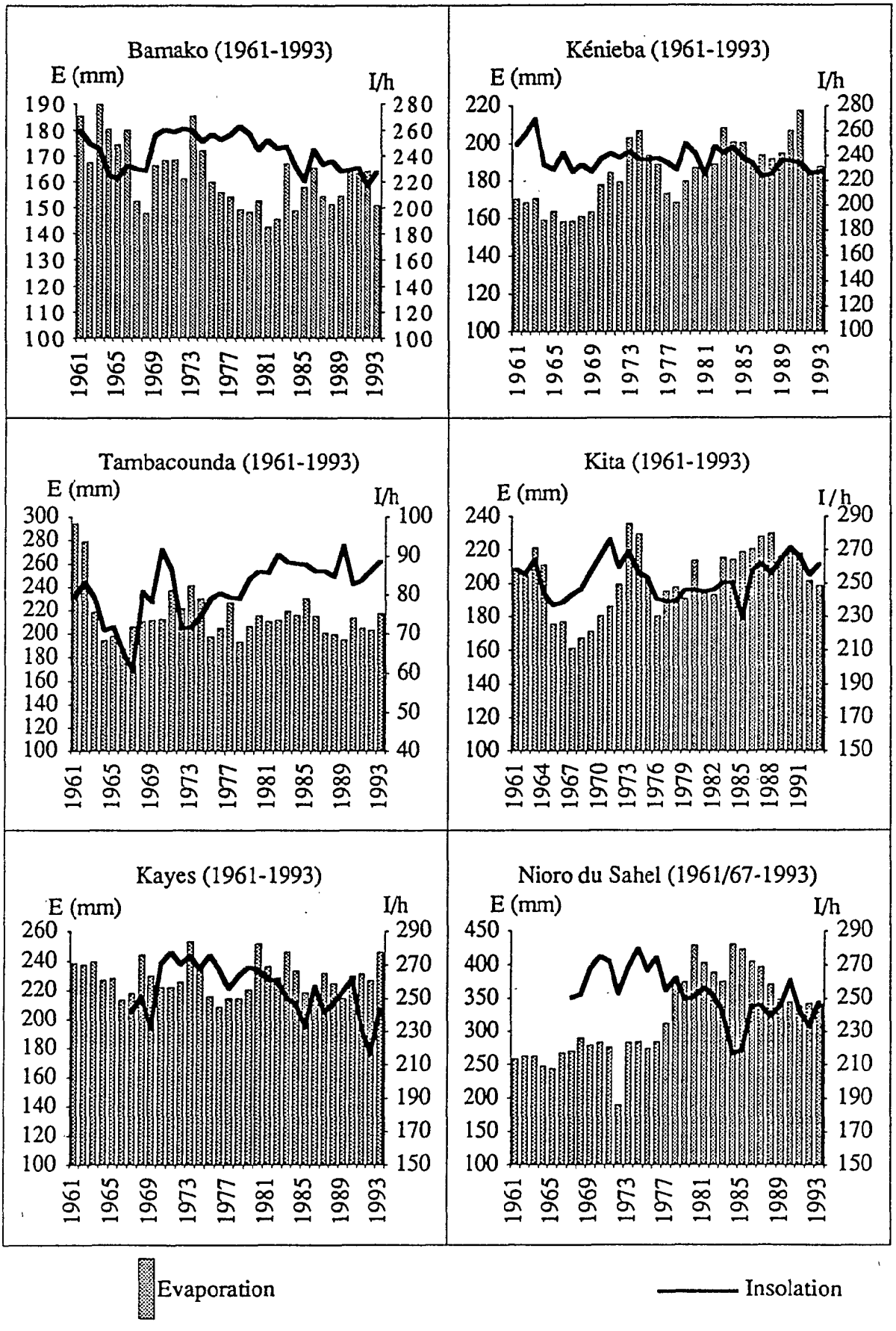


Figure 88 : Comparaison entre insolation moyenne annuelle et évaporation moyenne annuelle dans les hauts bassins

3- L'insolation et les températures

L'insolation et les températures représentent des éléments de ponction d'autant plus importants que leur action combinée détermine l'évaporation. La figure 87 montre l'évolution entre l'insolation et les températures pour la période 1961-1993.

En tenant compte de la position méridienne des stations (sud-nord) et de leur position longitudinale, cette évolution montre que la relation entre l'insolation et les températures n'est pas toujours établie.

Néanmoins, on assiste à une certaine conformité de l'évolution de ces deux éléments à toutes les stations à partir de 1968. Cette conformité se traduit par une tendance à la hausse des valeurs d'insolation et des températures observées.

4- L'insolation et l'évaporation

L'insolation conditionne en partie l'évaporation, puisque du degré du rayonnement solaire dépend la capacité du pouvoir évaporant de l'atmosphère. La figure 88 montre une relation nette entre ces deux paramètres. L'accroissement de l'insolation comme de l'évaporation s'effectue du sud au nord des hauts bassins. Il est aussi plus évident à partir de 1968. Les baisses ponctuelles de l'insolation, à contrario des hausses de l'évaporation notées, sont imputables à l'intrusion de certains éléments climatiques comme la nébulosité. Cependant, les températures elles aussi jouent sur l'évaporation.

5- Les températures et l'évaporation

L'évolution de l'évaporation est fortement liée à celles des températures. En effet, plus ces dernières sont élevées, renforcées par l'insolation, mieux les taux d'évaporation auront tendance à s'accroître. Pour la période 1961-1993 où l'insolation et les températures sont en hausse, la tendance de l'évaporation est corollaire à celle de ces deux éléments précités.

La figure 89 schématise la relation entre les températures et l'évaporation dans les hauts bassins. On remarque que cette relation est manifeste à Bamako en domaine sud-soudanien. Par contre, elle est moins nette pour la station de Kénieba où on assiste parfois à une baisse des températures alors que l'évaporation est en hausse.

Pour le reste des hauts bassins, cette relation traduit une tendance à la hausse de l'évaporation et des températures à travers les domaines nord-soudanien et sahélien.

La comparaison des différents paramètres climatiques apporte ainsi des éléments de réponse à l'évolution de la période récente. Du point de vue pluviométrique, on constate une baisse temporelle et spatiale continue des totaux de pluies enregistrés. Dans l'analyse thermique, c'est l'augmentation des températures qui s'observe le mieux. Cette augmentation est spatiale du sud au nord.

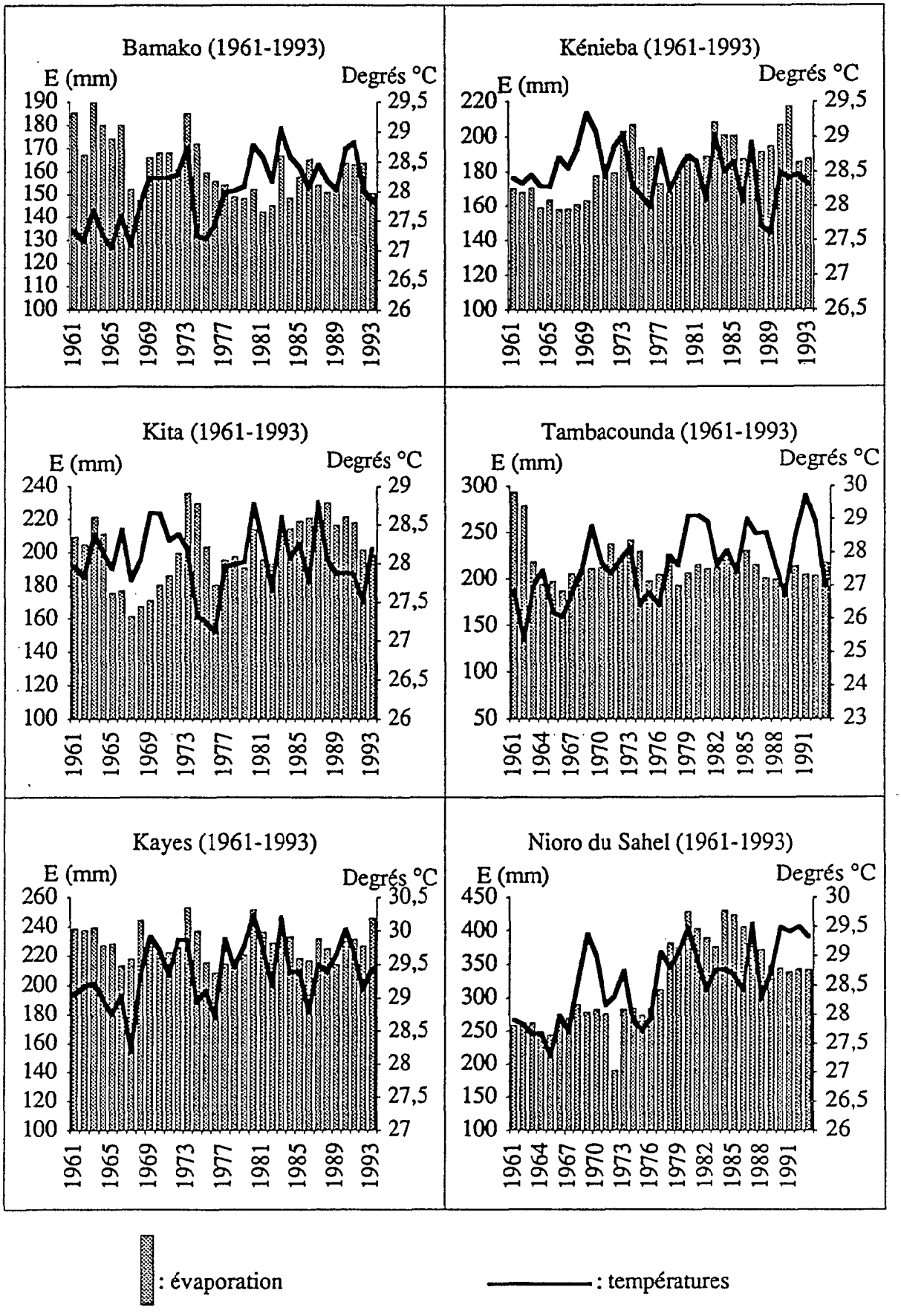


Figure 89 : Comparaison entre températures moyennes annuelles et évaporation moyenne annuelle dans les hauts bassins

Elle est aussi temporelle comme l'attestent les manifestations de la période récente qui traduisent partout une tendance à la hausse des températures et des phénomènes induits comme l'évaporation. L'augmentation de celle-ci dépend du pouvoir évaporant de l'atmosphère, lié au déficit hygrométrique. Elle est aussi liée à la température de l'air, à la quantité d'eau à évaporer et à la nature de la surface évaporante. Quand la végétation est importante, elle est relayée par la transpiration.

Ces constats se traduisent dans les hauts bassins par une augmentation de l'évaporation du sud au nord. Elle est modérée en domaine guinéen où la transpiration est parfois active, puis elle augmente en domaine soudanien et devient très élevée en domaine sahélien. Sa ponction est plus importante ici en raison des caractères extrêmes du milieu.

Une pluviométrie en déficit croissant, des éléments climatiques (températures, insolation, évaporation) en hausse progressive, telles sont les conditions climatiques auxquelles sont soumises les hauts bassins. Il est donc logique que la situation pluviométrique des hauts bassins évolue vers un effondrement des ressources en eau. Ceci a sans doute des répercussions graves sur l'écoulement des hauts bassins d'autant plus que les pluies, seul mode d'alimentation des cours d'eau, sont soumises à une forte ponction, à la fois naturelle et anthropique.

De même les caractéristiques physiques évoquées précédemment (lithologie, pédologie) ne favorisent pas la formation de nappes pour l'écoulement, autant de facteurs susceptibles de freiner les modalités hydrologiques des hauts bassins.

C'est donc le cadre climatique à travers les précipitations et les facteurs thermiques qui détermine les modalités de l'écoulement fluvial. Cela est d'autant plus réel que, dans le domaine tropical auquel appartient les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie, l'hydrologie fluviale apparaît comme la plus simple, du fait de l'absence de saisons thermiques marquées et du rôle exclusif des précipitations (R. Frécaut, 1982). La troisième partie de ce travail étudie les modalités de cet écoulement fluvial et l'influence des différents facteurs climatiques en cette période de sécheresse.

TROISIEME PARTIE

LES MODALITES DE L'ECOULEMENT FLUVIAL DES HAUTS BASSINS

CHAPITRE 1

LES CARACTERISTIQUES DE L'ECOULEMENT DES HAUTS BASSINS

Les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie représentent des unités de taille modeste comparées aux autres grands organismes fluviaux africains comme le Zaïre, le Nil, et dans une moindre mesure leur voisin immédiat le fleuve Niger. Cependant, par leur superficie, leur abondance et la mise en valeur qu'ils suscitent au niveau régional, ils forment de véritables structures hydrologiques.

1. PRESENTATION DES UNITES HYDROLOGIQUES

Les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie forment deux unités hydrologiques bien distinctes. Mais à travers leurs caractéristiques physiques, et les particularités de leurs affluents respectifs, se discernent plusieurs similitudes.

1.1. Le réseau hydrologique des hauts bassins

Le réseau hydrographique du Sénégal et de la Gambie est assez bien hiérarchisé avec un chevelu dense dans la partie amont des cours d'eau, région montagneuse et très arrosée (fig. 90). Cette densité décroît au fur et à mesure que l'on va vers l'aval du fait de la diminution pluviométrique et de l'abaissement du relief. Les cours du Sénégal et de la Gambie très semblables montrent une nette dualité entre leurs affluents de rive gauche descendus du Fouta Djalon et ceux de rive droite nés sur les plateaux soudaniens.

A partir de Bakel et de Gouloumbou où l'on passe sur les cours inférieurs, les bassins s'amincissent et les affluents ont très peu d'apports, avec de vastes zones d'endoréisme pour le Sénégal.

1.1.1. Le Sénégal

La branche mère du fleuve Sénégal est constituée par le Bafing. Le fleuve Sénégal naît de la jonction du Bafing et du Bakoye à Bafoulabé au Mali (fig. 91). Il prend alors une direction sud-sud-ouest à nord-nord-est et coule dans les grès infracambriens. Il franchit des bancs de roches dures, par des rapides (seuil de Talari) ou des chutes (Gouïna et Félou), passant respectivement de 62 à 47 m, puis de 39 à 23,5 m.

Son parcours décline légèrement nord-nord-ouest, et entre Bafoulabé et Kayes distant de 125 km, le Sénégal perd 68 m. En aval de Kayes, le Sénégal reçoit sur sa droite la Kolimbiné descendue du plateau de l'Affolé.

Figure 90 : Réseau hydrographique des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

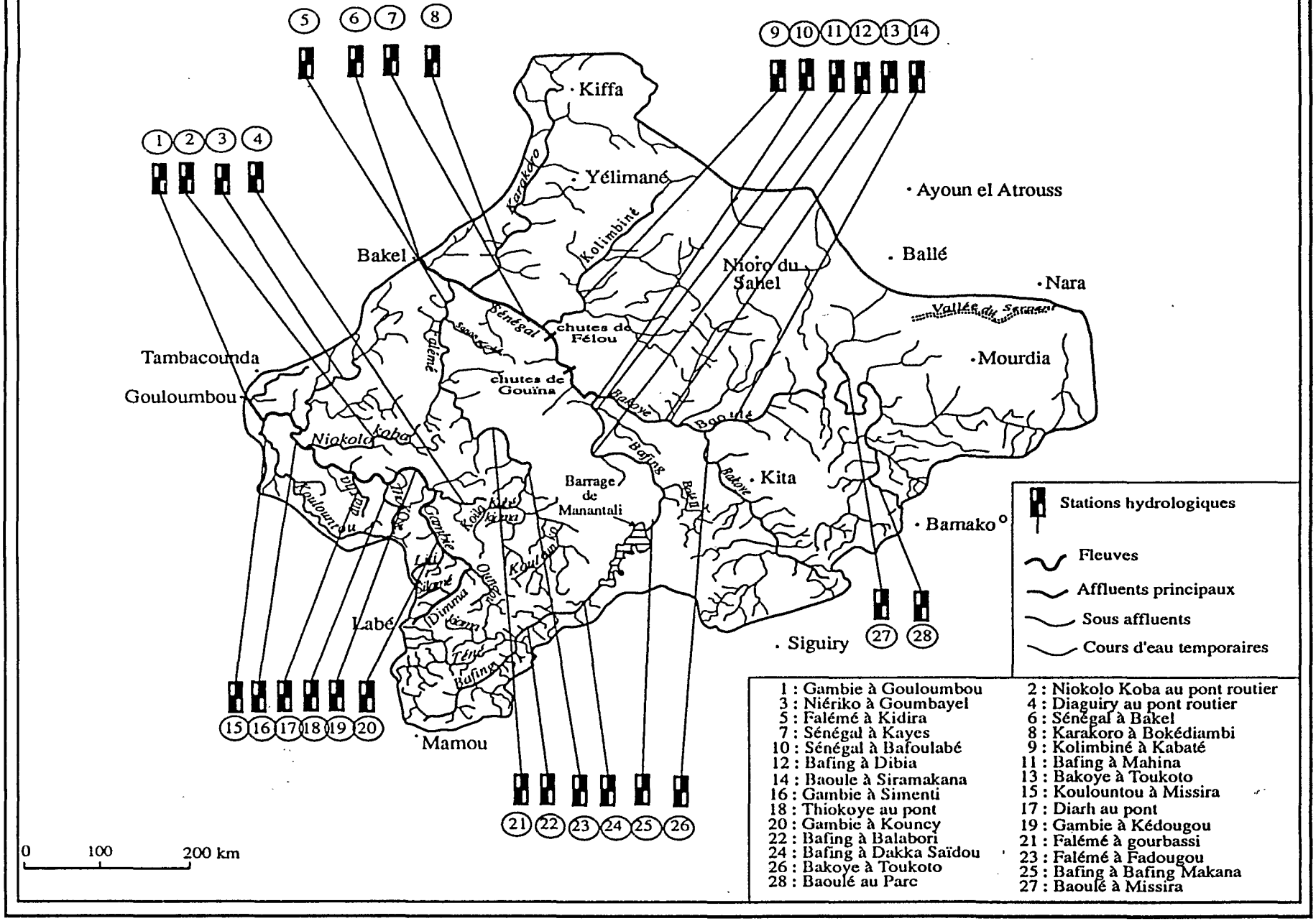


Tableau 47 : Caractéristiques du réseau hydrographique des hauts bassins du Sénégal et de la Gambie

	Fleuves et Affluents	Longueur (km)	Alt. Max. (m)	Alt. au confluent (m)	Dénivelée (m)	Pente Moyenne (m/km)
HAUT BASSIN DU SENEGAL	Sénégal (Bakel)	1006	800	11	789	0,78
	Bafing (Bafoulabé)	750	800	88	712	0,95
	Téné	136	1200	510	690	5,07
	Kioma	93	1000	500	500	5,37
	Balé 1	114	725	240	485	4,25
	Balé 2	138	500	190	310	2,24
	Balinn Ko	164	600	135	465	2,83
	Bakoye	561	760	88	672	1,19
	Djinnko	73	650	305	345	4,72
	Kokoro	82	375	307	68	0,83
	Faragama	87	630	300	330	3,79
	Baoulé	638	500	155	345	0,55
	Falémé	625	800	18	782	1,25
	Kouloun Ko	56	500	225	275	4,91
	Balinn Ko	165	750	115	635	3,85
	Kiola Kabé	182	680	110	570	3,13
	Doundi	70	450	100	350	5
	Kolombiné-Wadou	450	300	22	278	0,62
	Karakoro	310	130	15	115	0,37
HAUT BASSIN DE LA GAMBIE	Gambie (Gouloumbo)	658	1538	0	1538	1,7
	Gambie (Kédougou)	209	1538	105	1433	4,2
	Oundou	75	700	250	450	6
	Liti	84	900	200	700	8,33
	Diaguery	50	449	120	329	0,29
	Thiokoye	87	600	55	545	8,3
	Diarha	60	300	44	256	5
	Niokolo-Koba	203	300	11	289	2,3
	Niériko	281	110	7	113	0,47
	Koulountou	345	800	1	189	2,4

Un peu en amont de Ségala, le Sénégal reçoit son deuxième affluent de droite, le Karakoro venu du massif de l'Assaba, puis à Kidira, il forme la jonction avec son principal affluent de gauche, la Falémé. Mais, dès Kayes situé à 900 km de la mer, l'altitude du plan d'eau en étiage n'est plus que de 20 m. La navigation en période de hautes eaux n'est entravée par aucune chute, ni rapide. Entre Kayes et Bakel, la pente moyenne devient faible et ne dépasse pas 0,7 %.

Six stations de mesure contrôlent le bassin :

- Bafoulabé : 124 700 km² soit 57,2 % du bassin,

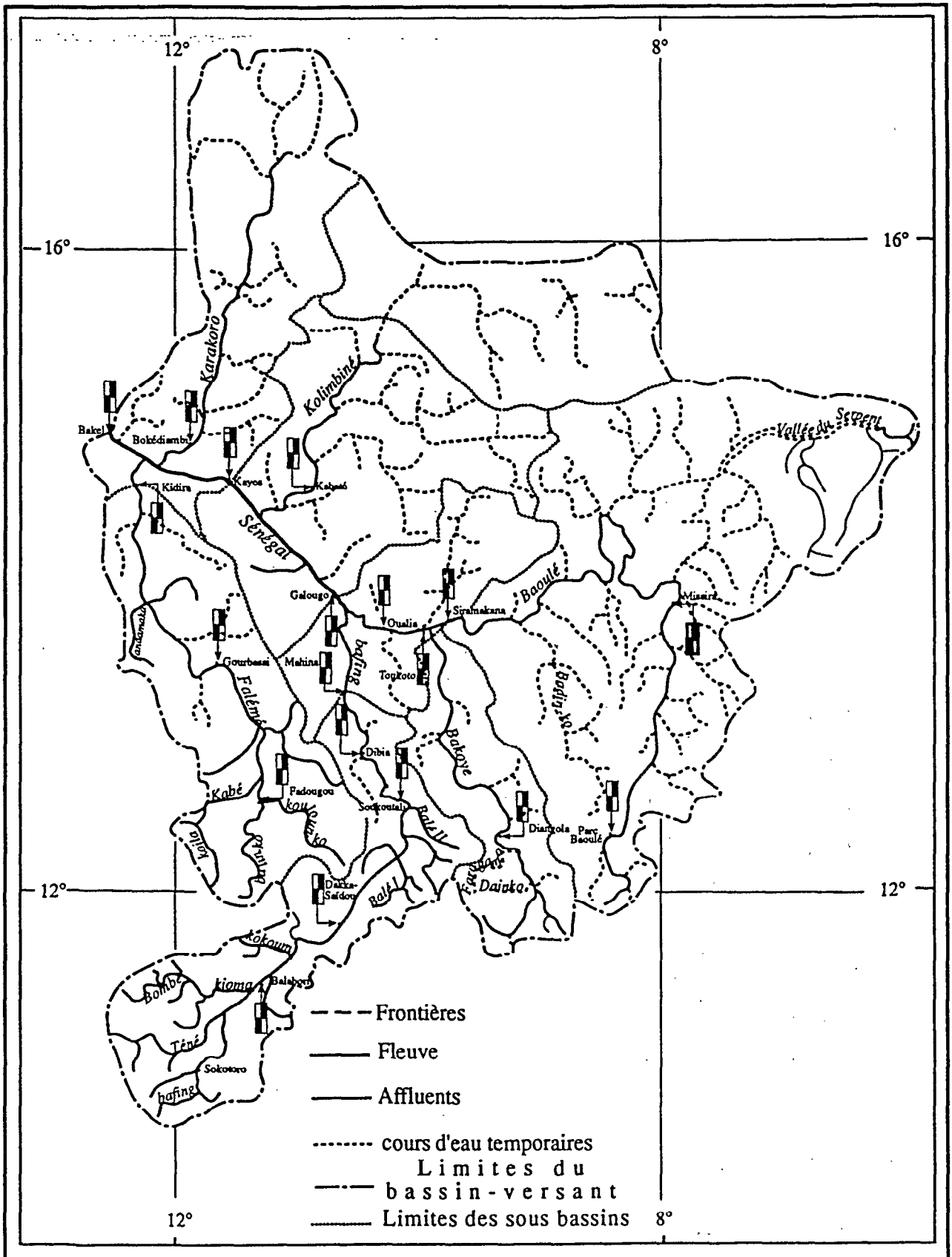
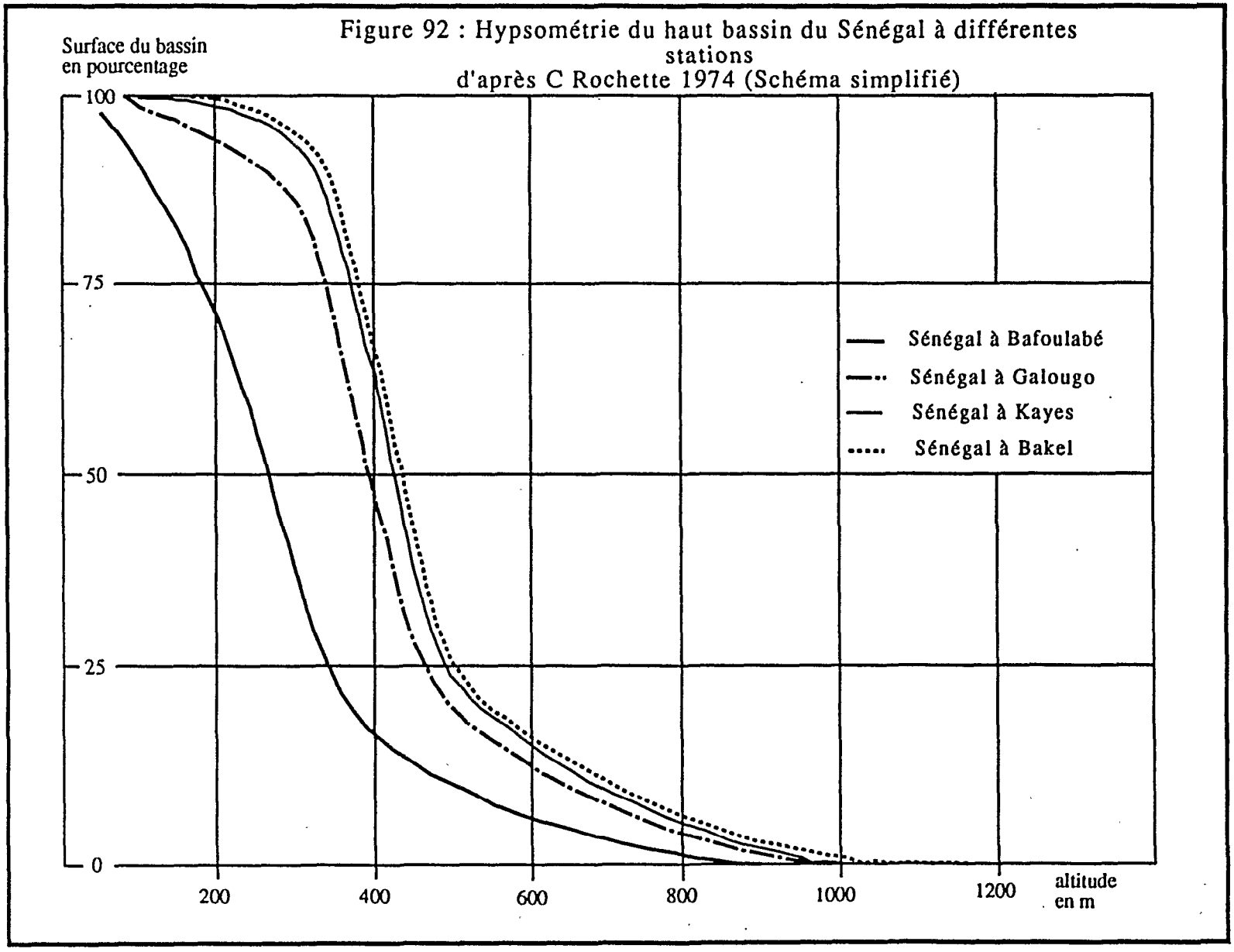


Figure 91 : Réseau hydrographique et sous-bassins du haut bassin du Sénégal

Figure 92 : Hypsométrie du haut bassin du Sénégal à différentes stations
d'après C Rochette 1974 (Schéma simplifié)



- Galougo : 128 000 km² soit 58,7 % du bassin,
- Gouïna : 128 600 km² soit 59 % du bassin,
- Félou : 131 500 km² soit 60,3 % du bassin,
- Kayes 157 400 km² soit 72,2 % du bassin.

La station de Bakel, située à l'exutoire, contrôle tout le dit bassin soit 218 000 km². La courbe hypsométrique, obtenue par le pourcentage de la superficie à chaque station sur les différentes tranches d'altitudes (fig. 92) indique le reflet de l'état d'équilibre potentiel du bassin (Strahler, 1970). La figure 92, relative aux différentes stations du cours principal du Sénégal jusqu'à Bakel, traduit une phase de vieillesse caractéristique des bassins sédimentaires (J. Llamas, 1992). Elle agit sur la densité de drainage qui est le rapport entre la longueur des canaux d'écoulement et la superficie du bassin. Cette densité de drainage reflète la stabilité du réseau hydrographique et le ruissellement de surface. Elle est faible pour le Sénégal à Bakel puisqu'elle n'est que de 0,04.

1.1.1.1. Les affluents de gauche du Sénégal

Leurs origines géographiques (Fouta Djalon) et leurs caractères morphométriques (pentes fortes) font d'eux les principaux tributaires du fleuve Sénégal. Il s'agit du Bafing-Téné et de la Falémé.

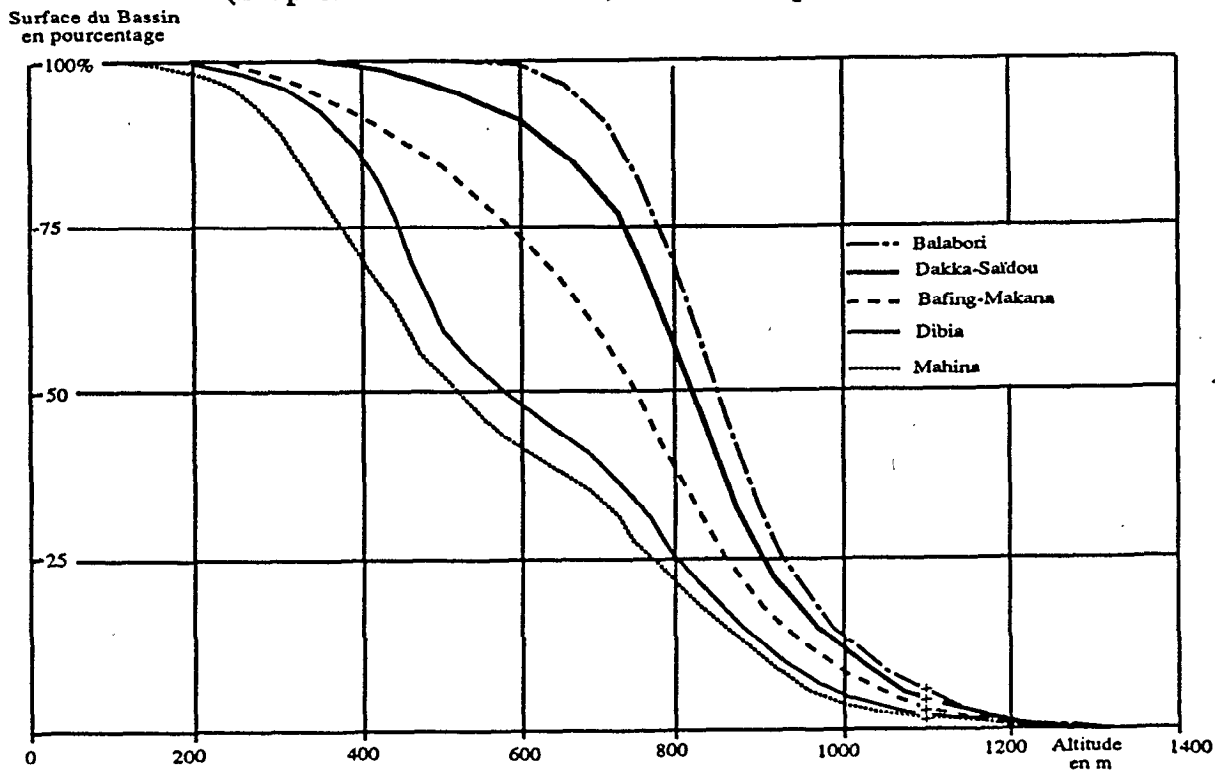
- Le Bafing-Téné (rivière noire en Malinké)

Le Bafing prend sa source à 800 m d'altitude à 16 km au nord-ouest de Mamou dans les montagnes du Fouta Djalon, où se trouve la moitié de son bassin versant. Il se dirige alors vers le nord-est et reçoit après un parcours de 150 km un affluent de débit presque égal, la Téné. Cette rivière prend sa source à 1200 m près de Dalaba. Elle se jette dans le Bafing après un parcours de 130 km et draine un bassin de 4 400 km².

Le Bafing se faufile ensuite dans les contreforts orientaux du Fouta Djalon ; son cours supérieur, très tourmenté, prend des orientations diverses. Dans la zone doléritique à l'ouest de Dinguiraye, il traverse une série de rapides et son cours devient accidenté avec une pente de 20 ‰ jusqu'à la station de Dakka-Saïdou. Le Bafing entaille ensuite les grès du plateau Mandingue, traverse des reliefs peu accusés en décrivant de nombreux méandres. Son parcours suit alors un axe est-ouest et il reçoit le Balé I, son premier affluent de rive droite. Dans cette partie de son cours et jusqu'à Dibia, il se stabilise, reçoit le Balé II, et seuls des bancs de grès obstruent çà et là son parcours par des seuils. De Dibia à Bafoulabé, soit 750 km, sa pente n'est plus que de 18 ‰ ; le Bafing prend une direction nord-sud pour y rejoindre le Bakoye et former le fleuve Sénégal (fig. 90).

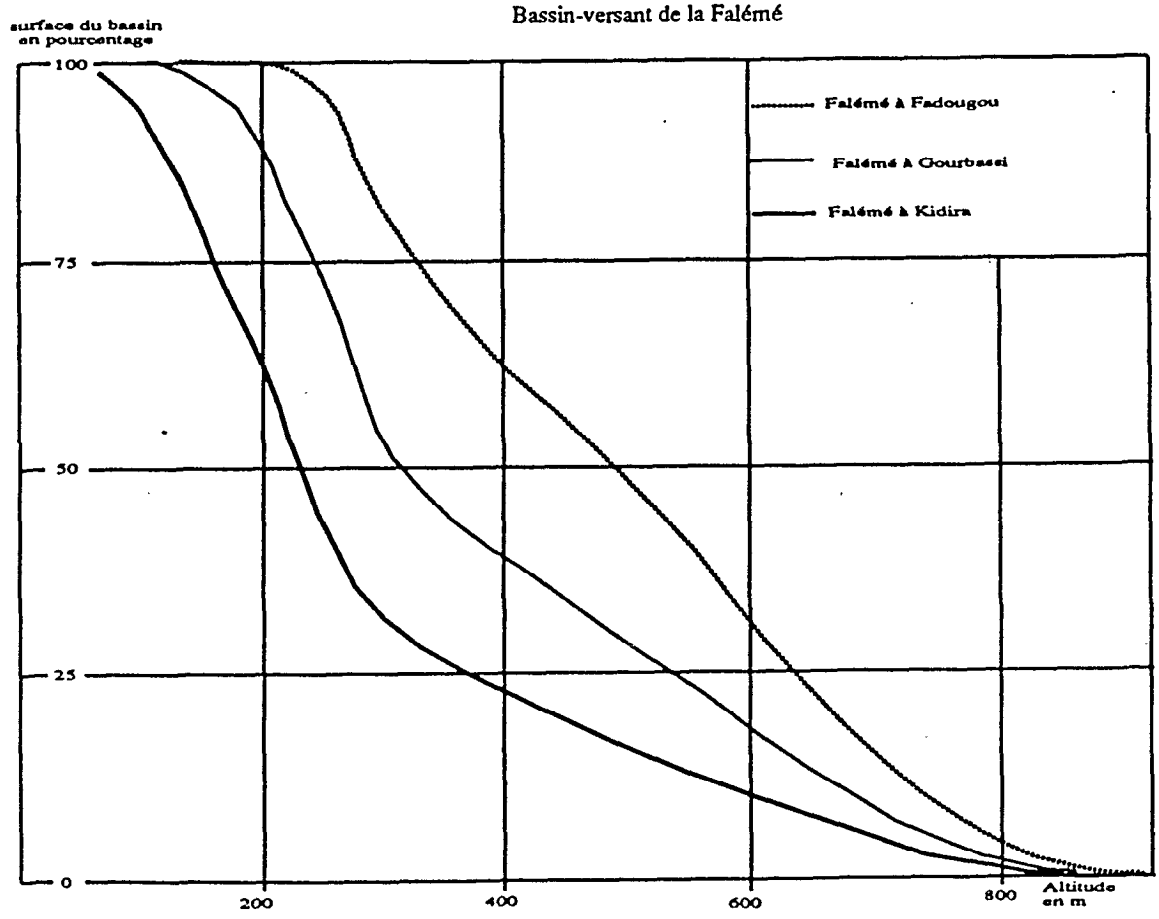
Six stations de mesure contrôlent ce sous-bassin dont Dakka-Saïdou à la sortie du domaine guinéen et Dibia qui contrôle tout le bassin, soit 38 400 km² (fig. 91).

Figure 93 : Hypsométrie du bassin-versant du Bafing et de la Falémé à différentes stations
(D'après C. Rochette 1974, schéma simplifié)



Bassin-versant du Bafing

Bassin-versant de la Falémé



Les courbes hypsométriques des différentes stations de ce bassin (fig. 93) traduisent une phase de non-équilibre (jeunesse) caractéristique d'un grand potentiel érosif. La densité de drainage est de 0,03 ; et bien que représentant le huitième du haut bassin du Sénégal, le Bafing amène plus de la moitié du débit de ce dernier.

- La Falémé (petite rivière en Malinké)

Dernier affluent de gauche du Sénégal avant le cours moyen, elle prend sa source dans les plateaux latéritiques du Fouta Djalon, où elle est formée à 800 m d'altitude par la jonction du Balinn Ko et de la Koila Kabé (fig. 90). Sur son cours supérieur, elle reçoit des affluents importants comme la Koulounko et le Daléma. Elle contourne des sills de dolérites importants, et dessine de grands méandres dans une plaine parsemée d'inselbergs. La Falémé franchit des seuils de grès durs, de roches vertes et de micro-granites. Elle a un tracé irrégulier nord-sud passant par est-ouest avant de se stabiliser sud-est à nord-ouest entre Fadougou et Gourbassi. Puis, le cours de la Falémé s'infléchit vers l'ouest et prend une direction sud-nord jusqu'à Kidira. A la confluence avec le Sénégal, la Falémé a déjà parcouru 625 km et déterminé un bassin versant de 28 900 km² (fig. 91).

Les principales stations de contrôle sont Fadougou, Gourbassi et Kidira. Les courbes hypsométriques à ces trois stations (fig. 93) traduisent des caractères analogues à ceux du Sénégal (phase de vieillissement). La densité de drainage est de 0,02.

1.1.1.2. Les affluents de droite du Sénégal

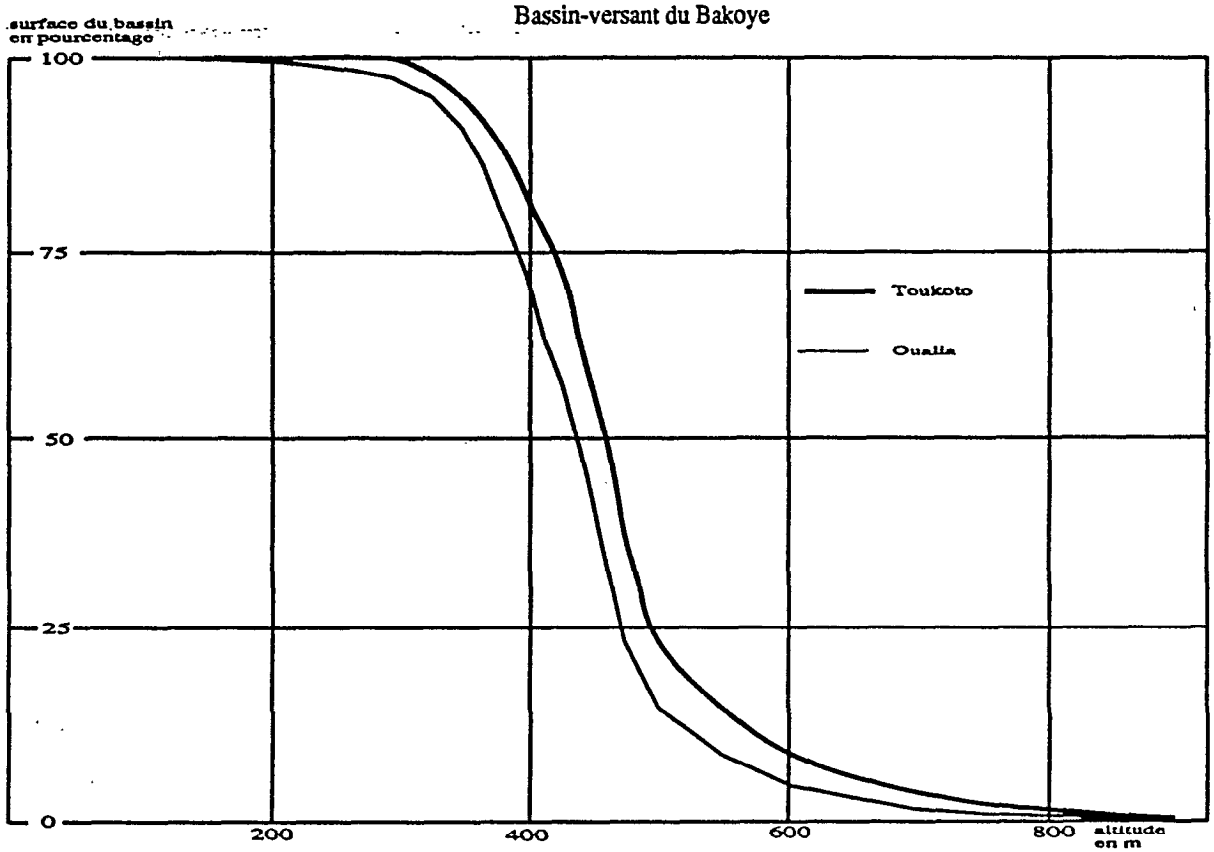
A l'exception du Bakoye qui présente une nuance guinéenne, ils sont tous soudaniens, et revêtent les principales caractéristiques de ces régions. Cependant, leur morphométrie peut être similaire à certaines rivières guinéennes. Ce sont le Bakoye, la Baoulé la Kolimbiné et le Karakoro.

- Le Bakoye (rivière rouge en Malinké)

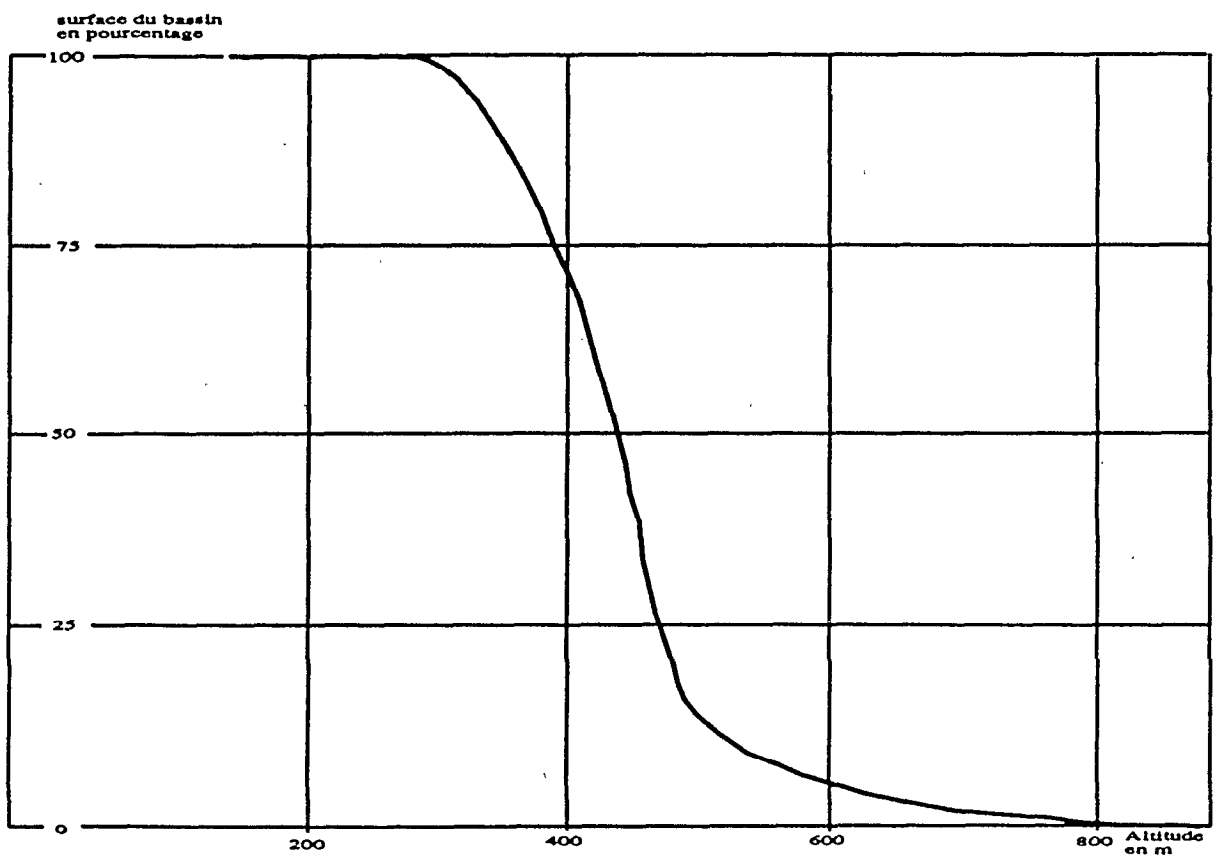
Le Bakoye vient de la bordure septentrionale du bassin de Siguiri, à 760 m d'altitude dans la région des Monts Méniens. Il s'encaisse dans le plateau Mandingue en de nombreuses chutes et rapides, prend ensuite une direction nord-ouest, traverse une région sans relief accusé, formée de schistes et grès infracambriens. Le Bakoye décrit alors de nombreux méandres, la direction générale de son cours étant orientée nord-sud. En aval de Toukoto, dernière station de contrôle de son bassin-versant, le Bakoye est grossi sur sa droite par la Baoulé avant de rejoindre, près de Bafoulabé, le Bafing. Il a une longueur de 560 km et draine un bassin versant de 85 600 km² (fig. 91). Les courbes hypsométriques du Bakoye à Oualia et Toukoto (fig. 94) indiquent une évolution d'un bassin en phase d'équilibre (maturité). La densité de drainage, évaluée sur l'ensemble du bassin est de 0,03.

Figure 94 : Hypsométrie du Bakoye et du Baoulé d'après C. Rochette 1974
(schéma simplifié)

Bassin-versant du Bakoye



Bassin-versant du Baoulé



Toutefois, pour mieux quantifier les apports du Bakoye, nous retenons en plus de Toukoto, la station de Oualia qui contrôle les apports du Bakoye et de son sous-bassin le Baoulé que nous spécifions.

- Le Baoulé

Le Baoulé se forme à 750 m d'altitude, à l'extrémité sud-est du plateau Mandingue à une trentaine de kilomètres seulement de la vallée du Niger. Elle traverse dans la partie supérieure de son cours des reliefs doléritiques et présente un tracé assez curieux. Débouchant par un parcours plein nord sur le plateau Mandingue, sa faible pente et le manque de relief lui font décrire une série de méandres. Puis elle prend une direction nord-sud, et au-delà du 14^{e} parallèle, elle dessine deux immenses boucles et rejoint le Bakoye par une orientation nord-est-sud-ouest. Les stations du Parc Baoulé, de Missira et de Siramakana que nous retenons contrôlent ce sous-bassin.

Ses principaux affluents sont le Kénié, le Kénieba-ko, et le Badinn-ko sur sa rive gauche, le Dla, ainsi que le Dlaba et la Vallée du Serpent sur sa rive droite. L'apport de cette dernière rivière est presque nulle du fait du climat sahélien et surtout de l'endoréisme qui couvre environ 30 000 km^2 de son bassin. A Siramakana, le Baoulé a une longueur de 600 km et un bassin versant de 59 500 km^2, soit 27,3 % du haut bassin du Sénégal (fig. 91). L'hypsométrie à cette station (fig. 94) est semblable à celle de son voisin le Bakoye. La densité de drainage est de 0,01.

- La Kolimbiné

Cours d'eau composite dont les différentes branches sortent du massif compris entre Bafoulabé et Niolo du Sahel, elle est formée par la rivière Wadou dont le cours supérieur est à 300 m d'altitude. Cette rivière draine une région plate, ensablée et constituée de schistes et de grès précambriens. Son bassin versant rattaché topographiquement à celui de la Kolimbiné forme cependant une unité hydrologique distincte du fait de l'endoréisme. Sur son cours inférieur, la Kolimbiné traverse une suite de dépressions marécageuses dont la plus impressionnante est la mare Magui (120 km^2). Du fait de l'aridité constante, son débit diminue considérablement avant qu'elle ne se jette dans le Sénégal un peu en amont de Kayes.

La superficie exacte de son bassin versant est difficile à apprécier du fait du caractère sub-désertique de sa partie nord. Elle varie entre 20 et 30 000 km^2. La station de Kabaté contrôle tout le bassin versant de la Kolimbiné.

- Le Karakoro

Le Karakoro vient de la région de Kiffa et se dirige vers le sud en suivant un couloir limité par les massifs de l'Affolé et de l'Assaba. Sa pente est faible et il traverse des zones marécageuses. Il se jette dans le Sénégal à Lami-Tounka, un peu en aval de Ambidédi après avoir drainé 15 à 25 000 km². La station de Bokédiambi contrôle tout le bassin-versant du Karakoro. Les apports du Karakoro sont mal connus, et du fait de son caractère sahélien, sont estimés entre 10 et 15 $m^3.s^{-1}$ (Sénégal-Consult, 1970).

1.1.2. La Gambie

Le fleuve Gambie naît sous le nom guinéen de Dimma à 1125 m sur les hauteurs du Fouta Djalon au Nord de Labé, capitale de la moyenne Guinée. Elle coule d'abord vers le nord-est, puis prend une direction marquée sud-ouest-nord-est, et reçoit de nombreuses rivières au bassin modeste, mais importantes par leurs apports. Sur la gauche, se conjuguent la Silamé, la Kouloufi, le Matiepou et la Liti, toutes venues du Fouta Djalon qui se joignent à l'Oundou affluent de droite descendu des contreforts orientaux.

La Dimma coule alors nord-ouest dans les contreforts du Fouta Djalon et arrive à la station de Kouncy. Dans sa traversée montagnarde, le cours de la Dimma, comme le Sénégal, est accidenté par des chutes. Avant le confluent de la Silamé, elle dévale une dénivellation de 40 m (de 460 à 420 m), puis perd 50 m en amont du confluent de l'Oundou. A la lisière de la frontière sénégalaise où se trouve la station de Kédougou, elle prend le nom de Gambie.

Elle reçoit sur sa droite le Koumoutourou puis le Diaguéry qui draine la région sud de Saraya, et commence la traversée des contreforts septentrionaux du Fouta Djalon. A sa sortie des massifs guinéens, sa pente moyenne avoisine 1 à 2 ‰. A l'orée de Mako, la Gambie décrit une grande boucle, traverse de nombreux seuils rocheux (Yamoussa), passant de 980 à 480 m.

La Gambie sillonne ensuite les collines Bassari où le Thiokoye et le Diarha, affluents de rive gauche lui apportent leur tribut. Peu avant Simenti, elle reçoit sur sa droite à 13° de latitude le Niokolo Koba, puis après Wassadou, la Gambie reçoit encore le Niériko. La Gambie pénètre ensuite dans les plateaux du continental terminal, reçoit le Niaoulé et prend une direction nord-nord-ouest jusqu'à Gouloumbou (fig. 90). Un peu en amont de cette station, la Gambie reçoit sur sa gauche son plus important tributaire par le débit, la Koulountou née sur les massifs septentrionaux du Fouta Djalon sous le nom de Kouréniaki.

A Gouloumbou, l'altitude de la station est très proche de 0, ce qui fait que la marée se fait sentir. Entre temps, la Gambie a été contrôlée sur le cours moyen aux stations de Simenti, Fass, et des Wassadou (amont et aval).

La superficie du bassin de la Gambie à chacune de ces stations est la suivante :

- Kouncy : 5 015 km² soit 12 % du bassin;

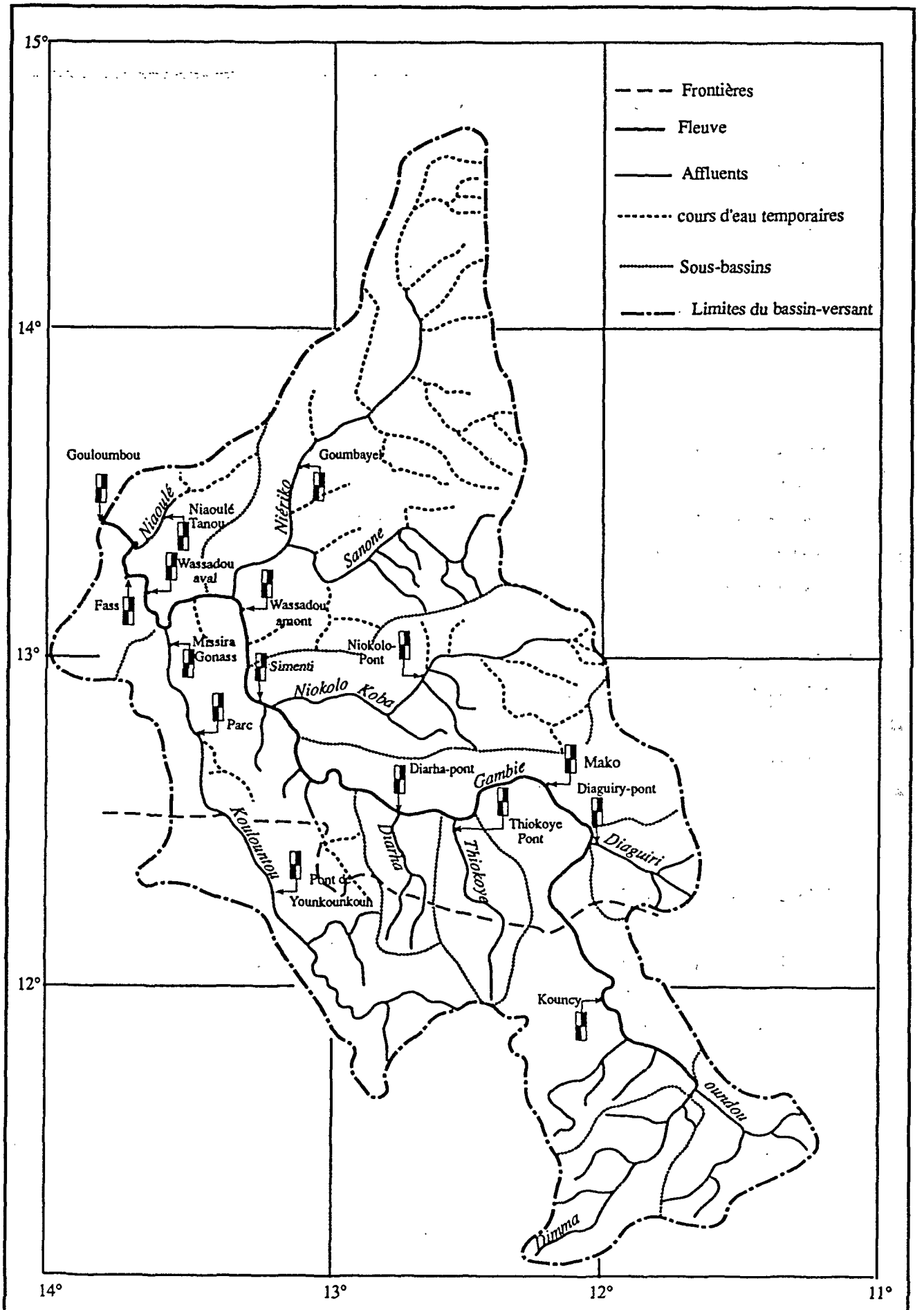
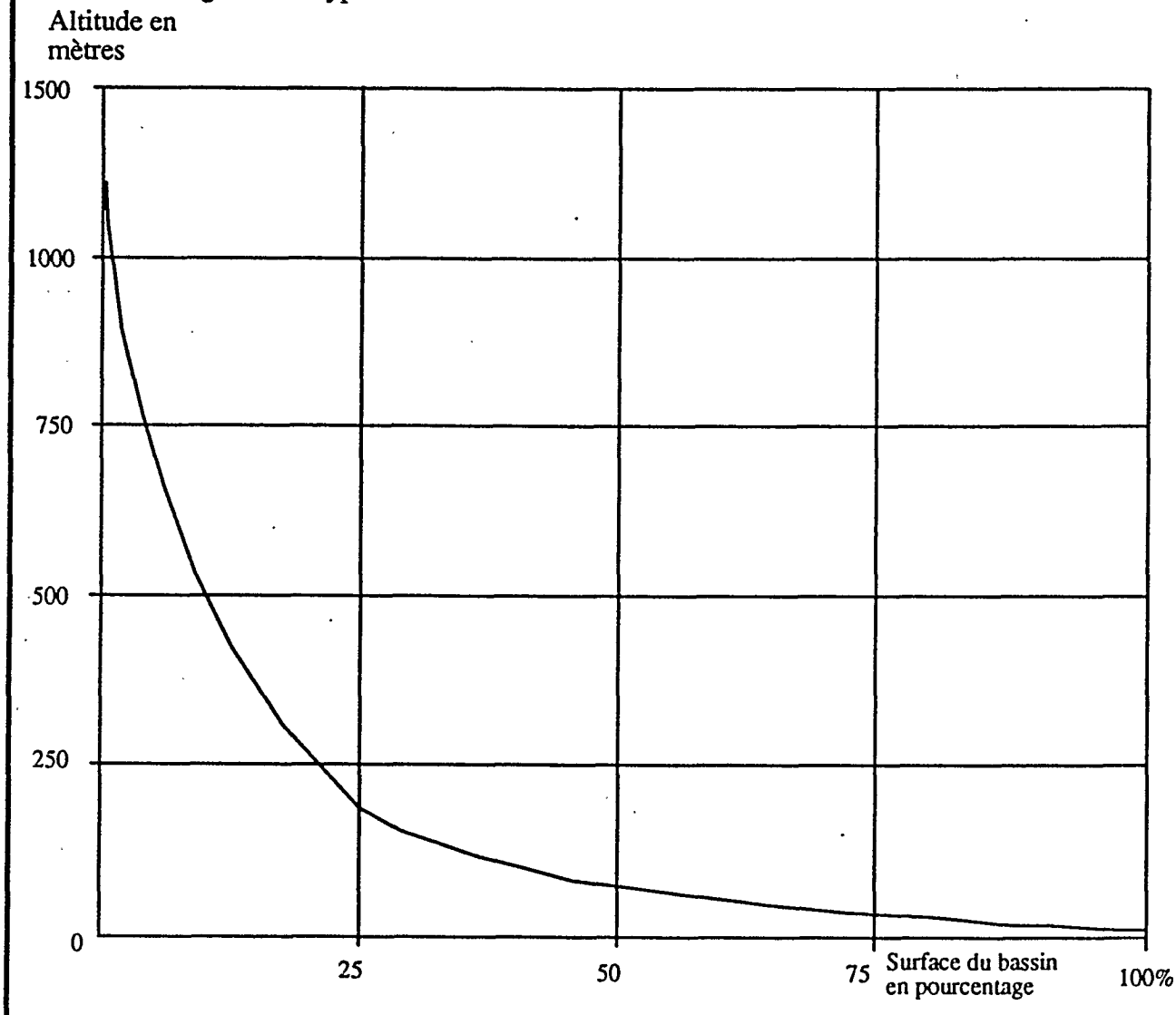


Figure 95 : Réseau hydrographique et sous bassins du haut bassin du fleuve Gambie

O. Dione 1996

Figure 96: Hypsométrie du haut bassin de la Gambie à Gouloumbou



- Kédougou : 7 750 km² soit 18,4 %;
- Mako : 10 450 km² soit 25 %;
- Simenti 20 500 km² soit 49 %;
- Wassadou amont : 21 200 km² soit 50,4 %;
- Wassadou aval : 33 500 km² soit 80 % ;
- Fass : 41 800 km² soit 99,5 % ;

La station de Gouloumbou, située à l'exutoire, contrôle tout le haut bassin soit 42 000 km² (fig. 95). La courbe hypsométrique de la Gambie à Gouloumbou (fig. 96) reflète celle d'un bassin sédimentaire. La densité de drainage est de 0,01.

1.1.2.1. Les affluents de rive gauche de la Gambie

Chenaux uniques après avoir reçu leurs principaux tributaires, les affluents de la Gambie présentent comme pour ceux du Sénégal une originalité assez perceptible, par leur origine et leur abondance, entre affluents de gauche venus du Fouta Djalon et ceux de droite descendus des plateaux soudaniens. Il s'agit pour les affluents de rive gauche, de la Koulountou, du Thiokoye et du Diarha.

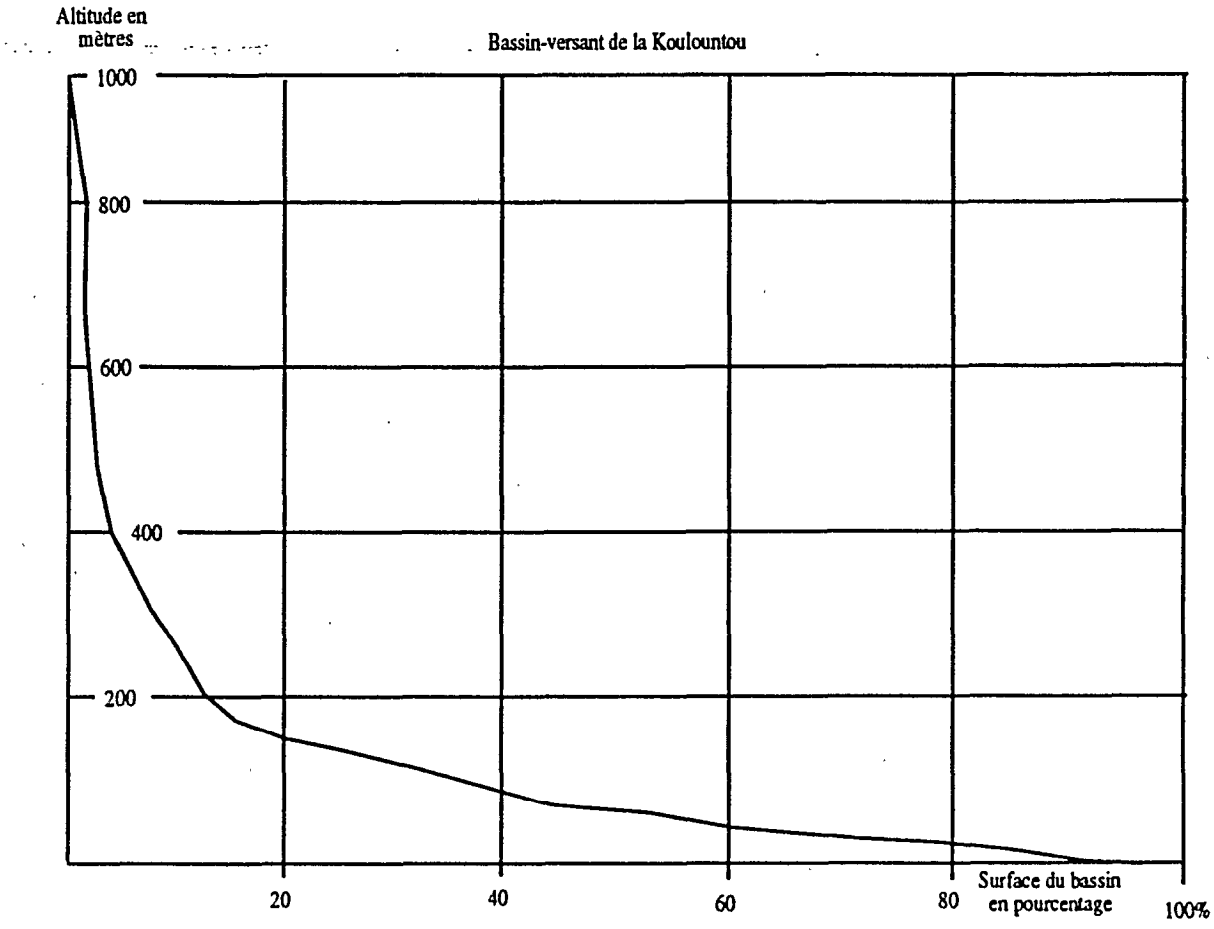
- La Koulountou

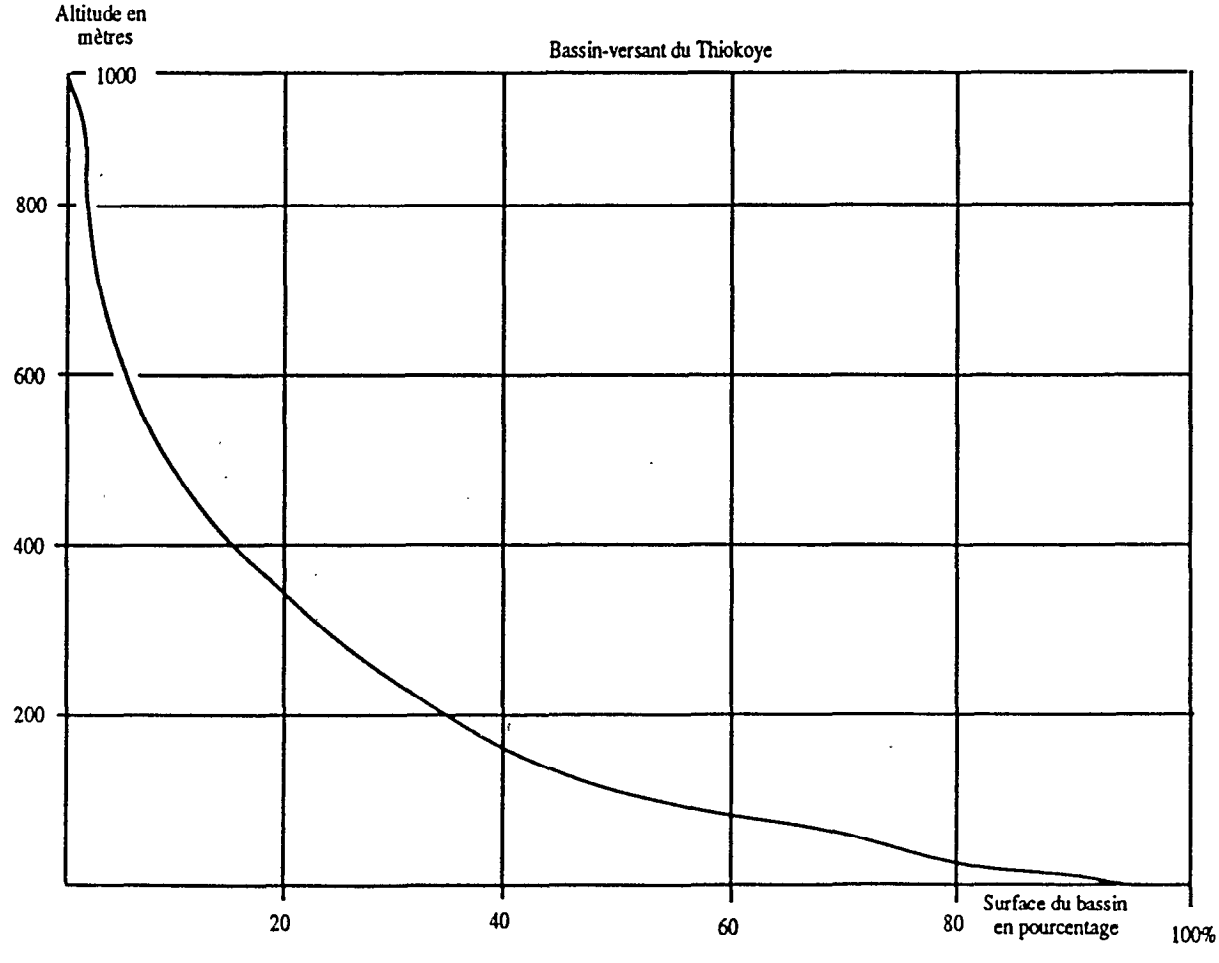
Elle prend sa source à l'ouest du massif de Mali à environ 800 m d'altitude sous le nom de Kouréniaki. Son cours suit une orientation sud-ouest puis nord-ouest dans le bassin de Youkounkoun où elle prend le nom de Koulountou. Son parcours est assez accidenté, du fait des nombreux seuils qu'elle traverse, d'où son étymologie Malinké "rivière où chavirent les pirogues". A la confluence avec la Gambie à Médina Gonass, la Koulountou a déjà parcouru 345 km et drainé un bassin de 6421 km² (fig. 95). La courbe hypsométrique à cette station (fig. 97) est caractéristique d'un vieux bassin sédimentaire avec une densité de drainage de 0,05.

- Le Thiokoye et le Diarha

Ils viennent des contreforts septentrionaux du Fouta Djalon que forment les Monts Bassari. Ce sont des affluents importants malgré leur petit bassin versant (respectivement 1264 et 846 km²). Ils ont un parcours assez sinueux et traversent de petits rapides. Peu avant leur jonction avec la Gambie, le Thiokoye et le Diarha sont contrôlés aux stations de Thiokoye-pont et de Diarha-pont.

Figure 97 : Hypsométrie du bassin versant de la Koulountou et du Thiokoye





Le Thiokoye à Thiokoye-pont représente 3 % du bassin avec une hypsométrie semblable à celle de la Koulountou (fig. 97). La densité de drainage est de 0,1.

Le Diarha à Diarha-pont, avec 2 % du haut bassin de la Gambie présente des caractéristiques d'un bassin sédimentaire comme l'indique son hypsométrie.

Le Diarha au pont :

+ de 500 m = 1,3 %

+ de 200 m = 10,3 %

+ de 100 m = 80,8 %

+ de 40 m = 100 %

La densité de drainage est de 0,07.

1.1.2.2. Les affluents de rive droite de la Gambie

Ils viennent tous du domaine soudanien à l'exception de l'Oundou qui revêt des nuances guinéennes. Ce sont le Diaguéry, le Niokolo-Koba, le Niériko et le Niaoulé.

- L'Oundou

Venu des contreforts orientaux du Fouta Djalon, il prend une direction plein nord, puis s'infléchit en un coude nord-ouest pour rejoindre le Dimma déjà grossi par la Silamé. Son parcours est peu accidenté hormis quelques rapides qui agitent ses flots. Deux stations de mesures sont installées sur son cours, au bac de Borokomé et au kilomètre 990. Long de 75 km, il draine un bassin-versant de 1657 km² soit 4 % du haut bassin de la Gambie (fig. 95).

- Le Diaguiry

Le Diaguiry descend des collines Bassari qu'il parcourt en un lacis sinueux. Sa direction légèrement orientée ouest-sud-est s'oriente dans le sens nord-est jusqu'à sa confluence en aval de Kédougou (fig. 98). La station de Diaguéry-pont située à son exutoire contrôle un bassin-versant de 846 km².

- Le Niokolo-Koba

Le Niokolo-Koba prend sa source dans les collines métamorphiques du Sénégal oriental à 300 m d'altitude. Il traverse alors le parc à qui il donne son nom Malinké "rivière des éléphants". A sa confluence avec la Gambie aux environs de Simenti, le Niokolo Koba a déjà parcouru 203

km (fig. 98). Ses apports sont faibles car les pentes sont peu accentuées et l'alimentation modeste. Ceci lui confère un drainage assez faible de 0,04. Niokolo-pont, situé à mi-parcours de son tracé, est l'unique station de contrôle, dont nous donnons l'hypsométrie.

Le Niokolo-Koba à Niokolo-pont : bassin-versant 4732 km² soit 11,3 % du haut bassin de la Gambie.

+ de 200 m = 6,4 %

+ de 100 m = 58,1 %

+ de 40 m = 96,7 %

0 m = 100 %

- Le Niériko et le Niaoulé

Le Niériko et le Niaoulé constituent avec le Karakoro les variantes hydrologiques soudano-sahéliennes des hauts bassins (fig. 98).

Né à 110 m d'altitude dans la région de Goudiri, le Niériko est l'affluent principal de la Gambie par l'importance de son bassin versant (11 900 km²), soit 28,3 % du haut bassin. Long de 265 km, son cours ne reçoit comme tributaire que le Sanone (132 km). La densité de drainage est de 0,02. Il traverse de bas plateaux peu arrosés avant de se jeter dans la Gambie en aval de Simenti. Le Niaoulé présente une envergure moindre, et est soumis lui aussi aux mêmes rigueurs de la siccité.

Le Niériko à Goumbayel : hypsométrie

+ de 100 m = 18,6 %

+ de 40 m = 89,2 %

0 m = 100 %

2. LES TRAITS PHYSIQUES DE L'ECOULEMENT DES HAUTS BASSINS

Les conditions de ruissellement et de drainage des eaux des hauts bassins sont largement dépendantes de la morphométrie. L'importance de celle-ci se traduit par la façon dont les pentes (fortes ou faibles) favorisent ou freinent l'écoulement. Elle peut aussi être appréciée par la forme du bassin, dans ses aptitudes à canaliser les eaux. La nature de l'écoulement qui en résulte, rapide ou lente, temporaire ou permanente affecte le lit des rivières et permet de définir leur profil en long.

2.1. La pente et la forme des hauts bassins

La pente et la forme d'un bassin versant dépendent des caractéristiques de la morphométrie. En définitive, la pente est le principal facteur du ruissellement qui est d'autant plus

rapide que le relief est vigoureux. Les indices de pente d'un bassin versant peuvent être appréciés de différentes manières. La pente du bassin, ou indice de pente générale (I.G.) c'est à dire les surfaces le composant se différencie de celle du cours d'eau principal ou de ses tributaires.

La pente d'un bassin est calculée à partir de son histogramme de fréquence. Cependant, c'est la pente moyenne qui est la plus ancienne (A. Benson, 1959) et la plus utilisée pour déterminer la pente longitudinale d'un cours d'eau. La pente moyenne est donnée par le rapport entre la dénivellation maximale du cours d'eau (différence de niveau entre le point le plus éloigné et l'embouchure) et sa longueur totale.

La pente moyenne des cours d'eau des hauts bassins est donnée dans le tableau 47. Ces valeurs sont assez significatives au rapport des tranches de reliefs observées dans les secteurs guinéen et guinéo-soudaniens où la pente peut atteindre 30 à 50 m/km. Elle s'atténue cependant vers l'aval du bassin, et aux stations de Bakel et Gouloumbou, elle est presque nulle. La pente moyenne est d'autant plus importante que la longueur du cours d'eau est faible et sa dénivelée forte. Elle est de 4 à 5 m/km pour le Djinnko, le Doundi et la Téné, affluents perchés de la Falémé et du Bafing. Elle atteint 6 à 8 % pour l'Oundou et la Liti, branche montagnarde de la Gambie. Mais dés que l'on va vers l'aval, elle s'atténue considérablement et n'est plus que de 0,6 à 0,3 % pour la Kolimbiné et le Karakoro, et de 0,4 % pour le Niériko, tous affluents venus des régions de plaines.

La forme du bassin permet de déterminer le comportement hydrologique d'un bassin et de le comparer à un autre. Elle est définie à partir du rectangle équivalent assimilé au bassin-versant. Elle est donnée par le coefficient de Gravelius (K_C) obtenu par la relation :

$$C = 0{,}28 \times P / \sqrt{a}$$

Ce coefficient est obtenu par le rapport du périmètre (P) du bassin versant sur la superficie du cercle ayant même surface que le bassin. Il définit la plus ou moins grande compacité d'un bassin et décrit ses aptitudes à concentrer l'écoulement. Pour les hauts bassins, ce coefficient se situe à 1,81 et traduit leur forme losangée, favorable à un écoulement rapide. Cependant, les sous-bassins qui constituent les hauts bassins ont des formes composites dont certaines peuvent freiner l'écoulement.

Les caractéristiques physiques conditionnent donc l'écoulement des hauts bassins (tab. 48). Le système des pentes, par sa diversité, détermine le drainage et influence l'allure du ruissellement. La forme du bassin, par sa compacité définit la nature de concentration des flux. Ces différents facteurs déterminent le tracé du réseau hydrographique.

2.2. Les profils en long des rivières des hauts bassins

Les profils en long sont très irréguliers, surtout dans les cours supérieurs en raison de l'absence d'un sapement latéral des berges (tab. 48).

Tableau 48 : Paramètres hydrologiques des différentes stations des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie.

	Cours d'eau	Long	Stations	B.V. km^2	Lat.	Long.	P (km)	Rect. Equi. long.	Rect. Equi. larg.	I.P. %	Dd.	I.G.	K.c
Haut bassin du Sénégal	Bafing	701	Mahina	38 000	13°14	10°48	1514	701	55	0,037	0,018	1,01	2,16
	Bakoye	560	Oualia	84 700	13°36	10°23	1645	697	123	0,025	0,006	1,03	1,52
	Baoulé	632	Siramakana	59500	13°35	9°53'	1210	482	123	0,55	0,01	0,52	1,39
	Falémé	625	Kidira	28900	14°27	12°13	938	396	73	0,039	0,021	1,5	1,54
	Sénégal	750	Bafoulabé	124 700	13°48	10°50	2520	1152	108	,025	0,006	0,48	1,99
	Sénégal	985	Kayes	157 400	14°27	11°27	2680	1210	130	0,025	0,004	0,49	1,89
	Sénégal	1006	Bakel	218 000	14°54	12°27	3144	3144	154	0,022	0,004	0,43	1,88
Haut bassin de la Gambie	Diaguiry	50	Pont-routier	1010	12°43	12°07	37,82	37,8	26,7	0,029	0,049	0,3	1,37
	Diarha	60	Pont-routier	846	12°43	12°51	129	46,1	18,3	3,88	0,07	0,08	1,24
	Niériko	281	Goumbayel	11 757	14°45	13°30	517	187	62,8	0,5	0,023	0,43	1,33
	Niokolo Koba	203	Niokolo-pont	4 732	13°25	12°00	347	140	33,9	1,52	0,02	1,46	1,3
	Thiokoye	87	Pont-routier	1 264	12°45	12°29	182	73,9	17,1	5,74	0,068	8,65	1,32
	Koulountou	345	Missira	6 421	11°52	12°45	523	234	27,4	2,4	0,053	0,05	1,82
	Gambie	209	Kédougou	7 550	12°33	12°11	490	208	36	4,21	0,027	3,9	1,58
	Gambie	552	Wassadou	33 500	13°21	13°23	1225,2	552	60,6	2	0,01	1,15	1,9
	Gambie	658	Gouloumbou	42 000	14°45	13°30	1285	569	88,4	1,71	0,015	1,7	1,75

Lat. : Latitude

Long. : Longitude

P (km). : Périmètre

Rect. équi. : Rectangle équivalent

I.G. : Indice général de pente

Dd. : Densité de drainage

K$_C$: Coefficient de compacité de Graveluis

I.P. : Indice de pente de Roche

Des biefs inégalement répartis et des seuils rocheux parsèment tous les axes des cours d'eau (figures 98 et 99). Les cours d'eau dans le domaine guinéen sont caractérisés par une infirmité du creusement linéaire, du fait du rôle exclusif de la végétation. Ce rôle de tampon de la végétation diminue considérablement à cause de la dégradation végétale, due aux conditions climatiques et à l'action anthropique. Dans les cours supérieurs où se combinent une forte pluviosité, des versants à pentes fortes et une perméabilité faible, la densité de drainage est élevée. Cependant, les densités de drains obtenues ne reflètent pas l'état actuel des rivières. La sécheresse actuelle se traduit par une lâcheté du chevelu hydrographique, les rivières alternant un écoulement permanent, ou temporaire d'une année à l'autre.

Ainsi les densités de drainage dans les hauts bassins sont beaucoup plus fortes dans les secteurs amont (tab. 48), principalement en domaine guinéen, favorisées par le caractère torrentiel des rivières. A cela se joint une lithologie favorable (granites, quartzites et dolérites) qui accroît la vitesse des drains. Dans le haut-Bafing, la pente moyenne varie de 2 ‰ à 0,5 ‰. Plus à l'aval cette pente n'est plus que de 0,25 ‰ entre Dibia et Bafoulabé. La pente moyenne du Bakoye supérieur est de 1 à 2 ‰, mais celle-ci s'adoucit considérablement et n'est plus que de 0,4 ‰ entre Oualia et Bafoulabé.

Dans le domaine soudanien, qui englobe les cours moyens des deux fleuves et de nombreux affluents, les profils en long sont peu accentués. Le Sénégal montre encore un profil irrégulier entre Bafoulabé et Kayes, où les vallées sont constituées par une succession de bassins séparés par des seuils rocheux qui forment des chutes et des rapides (Talari, Félou, Gouïna). Mais sur une longueur de 130 km, le Sénégal n'a qu'une pente de 0,55 ‰. Le profil du Sénégal faiblit progressivement, et entre Kayes et Bakel, soit 130 km, la pente moyenne n'est plus que de 0,06 ‰. Le fleuve se stabilise sur un lit bien marqué large d'environ 40 m avec des berges de 10 à 12 m de hauteur (fig. 100). En domaine guinéen, la Dimma sur 7 km a une pente moyenne de 25‰. Celle-ci baisse considérablement vers l'aval, et de la bordure nord du Fouta Djalon aux collines Bassari, soit 250 km, la Gambie a une pente moyenne d'environ 2 ‰ à 0,35 ‰. Celle-ci n'est plus que de 0,05 ‰ à Gouloumbou (fig. 101).

Ainsi, sur les cours moyens, l'ampleur des actions mécaniques permet aux versants de fournir aux cours d'eau une charge grossière solide. La discontinuité ou l'absence de galerie forestière fait que les profils sont ici mieux régularisés, les seuils rocheux sont entaillés et les "marmites de géants" en évolution. Ces régions, formées par des roches sédimentaires, sont donc marquées par une faible densité de drainage et un profil en long des cours d'eau plus régulier. Cette faiblesse de la densité de drainage est cependant relative surtout dans les Pays de la Falémé et de la Moyenne Gambie où le caractère des précipitations, le système des pentes et l'imperméabilité du substrat confèrent aux drains un cachet particuliers d'une année à l'autre.

Les caractéristiques physiques de l'écoulement des hauts bassins montrent une nette opposition entre la partie amont des hauts bassins ou *cours supérieurs* et la partie aval ou *cours moyen*..

Figure 98 : Profil en long du Bakoye et du Baoulé

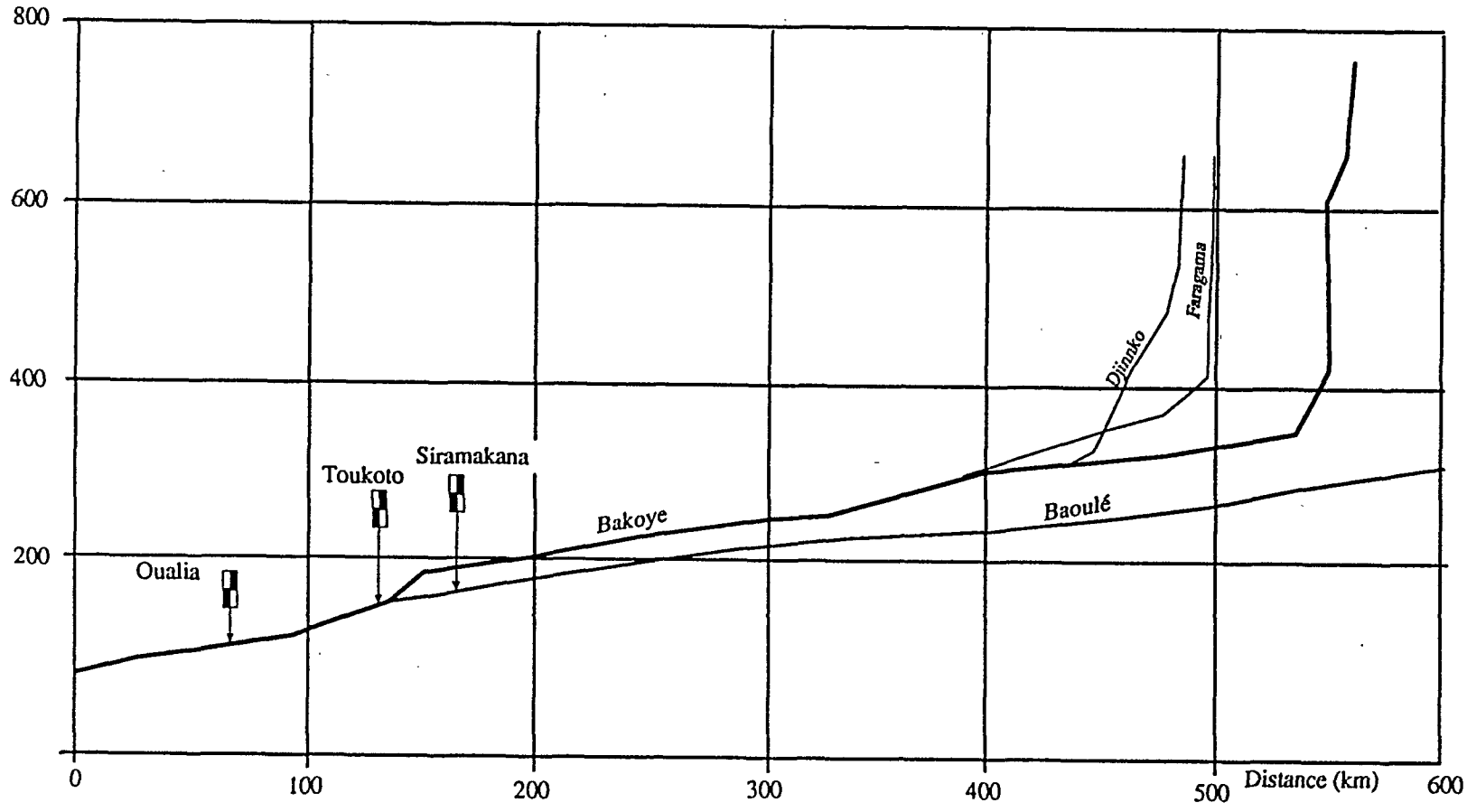
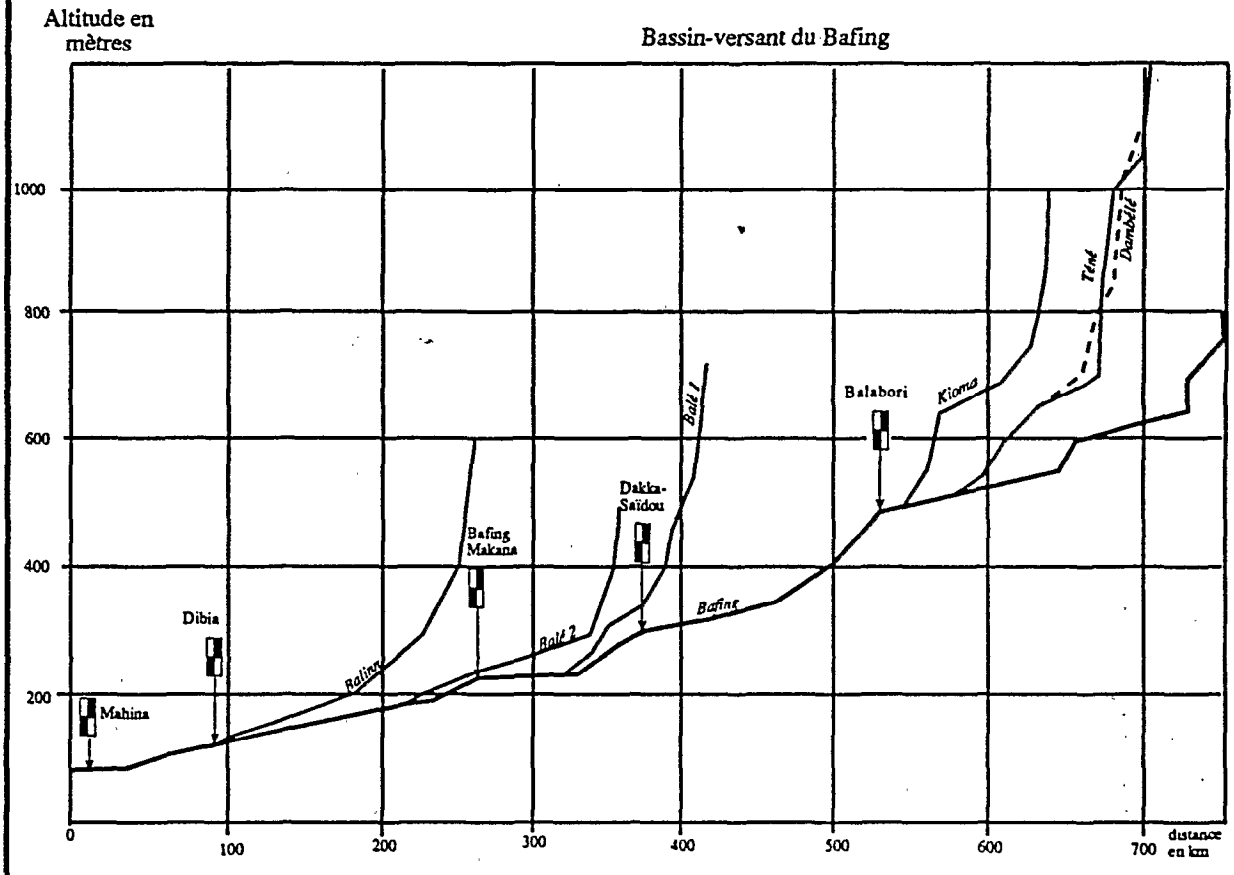
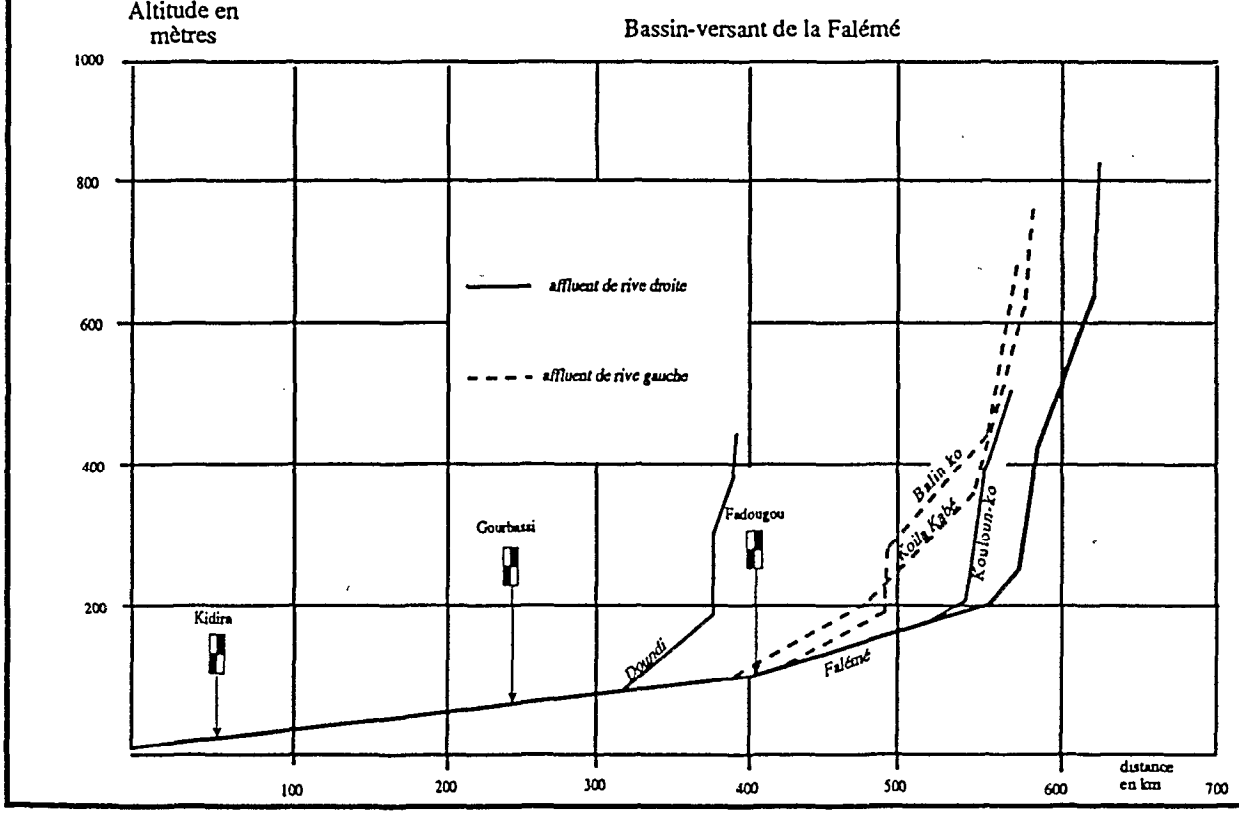


Figure 99 : Profil en long du Bafing, de la Falémé et de leurs principaux affluents





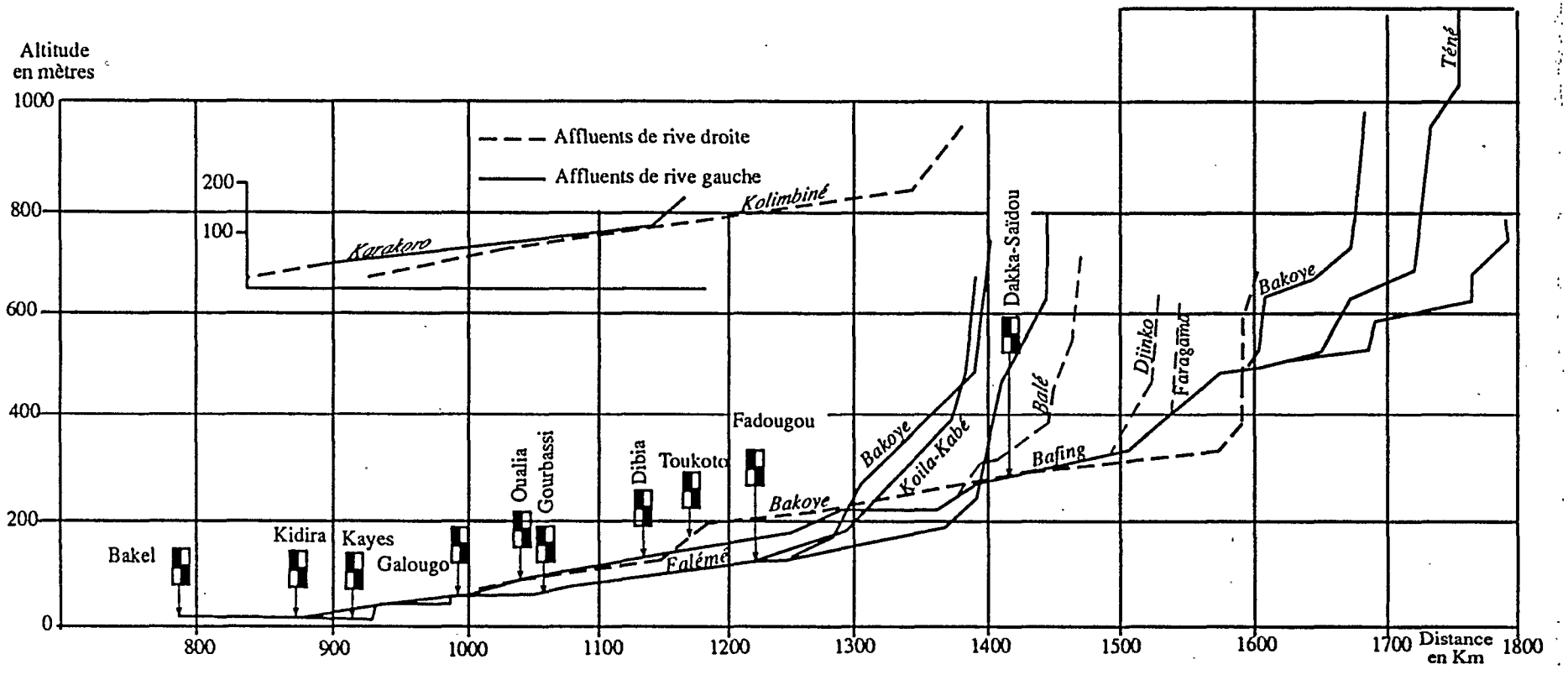
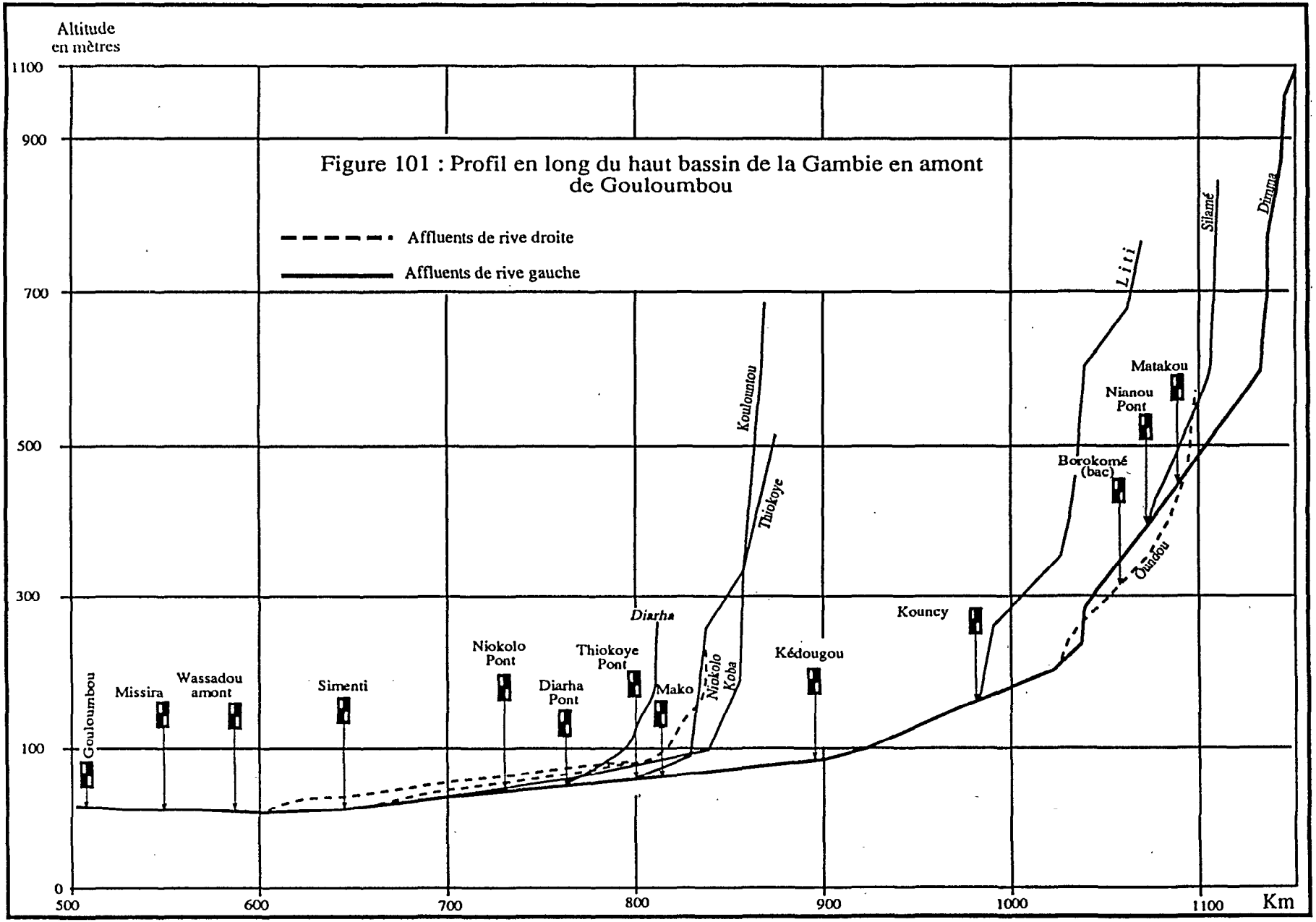


Figure 100 : Profil en long du Sénégal et de ses affluents en amont de Bakel.


Altitude
en mètres
1100
900
700
500
300
100
0
Figure 101 : Profil en long du haut bassin de la Gambie en amont de Gouloumbou
Affluents de rive droite
Affluents de rive gauche
Gouloumbou
Missira
Wassadou amont
Simenti
Niokolo Pont
Diarha Pont
Thiokoye Pont
Mako
Diarha
Koulountou
Niokolo Koba
Thiokoye
Kédougou
Kouncy
Liti
Borokomé (bac)
Nianou Pont
Matakou
Oundou
Silamé
Dimma
500
600
700
800
900
1000
1100
Km

Sur les cours supérieurs, le relief très accidenté engendre des pentes assez fortes, favorables à un ruissellement rapide, d'autant plus que les précipitations du domaine guinéen sont plus significatives.

Mais c'est également là que le profil en long des cours d'eau est le plus perturbé. L'inadaptation du réseau hydrographique à la structure est quasi-visible. Inadaptation par antécédence comme sur les branches mères du Sénégal (fig. 98 et 99) et dont témoignent les paléoformes telles que les surfaces d'aplanissement, les glacis, les tracés coudés des rivières, l'existence des seuils et des gorges. Inadaptation aussi par surimposition comme l'attestent les branches mères de la Gambie (fig. 101) qui "n'ont guère changé d'emplacement depuis le quaternaire ancien d'après le système de terrasse étagée" (P. Michel, 1973).

Par contre, sur les cours moyens, les précipitations deviennent moins abondantes. L'alimentation des cours d'eau en est affectée, et les conditions de ponction plus vives. Le relief est plus monotone. Ceci se traduit par des profils en long plus réguliers et un ruissellement beaucoup moins dense. Tous ces contrastes évoqués d'amont en aval traduisent un écoulement varié à travers les différentes stations de mesures.

3. ETAT DES DONNEES DE L'ECOULEMENT DES HAUTS BASSINS

Les données de l'écoulement des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie sont mesurées à différentes stations. Comme pour les données climatiques, les informations concernant les hauts bassins proviennent de sources diverses que constituent les réseaux hydrologiques nationaux.

3.1. Présentation et critique statistique des données hydrologiques

Les informations hydrométriques des hauts bassins sont sujettes à une hétérogénéité à travers les différents réseaux de mesures. Pour le haut bassin du Sénégal, ces informations remontent au début du siècle en relation avec la navigation fluviale.

Le tableau 49 présente d'amont en aval l'évolution de l'équipement hydrométrique de chaque bassin. Au cours des années, ces observations furent interrompues au point qu'en 1949 des lectures régulières n'étaient plus assurées dans le haut bassin qu'à Kayes et Bakel.

Les informations disponibles pour le haut bassin du Sénégal proviennent ainsi des réseaux hydrologiques de la D.N.H.E.[10] à Bamako et à la D.E.H.[11] à Dakar qui ont hérité de la gestion des anciennes structures coloniales. Comme pour les données climatiques, les informations hydrologiques concernant le réseau guinéen sont souvent rares et peu fiables. Les mesures opérées sur le Bafing en territoire guinéen ainsi que sur ses affluents sont ainsi mal connues, malgré l'inventaire du tableau 49.

---

[10] D.N.H.E. : Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie, Bamako (Mali)
[11] D.E.H. : Division des Etudes Hydrauliques, Dakar (Sénégal)

Tableau 49 : Caractéristiques de l'équipement hydrologique du haut bassin du Sénégal

Fleuves et affluents	Stations	Latitude	Longitude	Superficie km²	Mise en service	Organisme
Sénégal	Bafoulabé	13°49	10°50	124 700	1921 1951	S.H.O.N. U.H.E.A.
Sénégal	Galougo	13°51	11°03	128 400	1904	D.N.
Sénégal	Kayes	14°27	11°26	157 400	1892	S.H.M.
Sénégal	Bakel	14°54	12°27	218 000	1901	M.A.S.
Bafing	Balabori	11°20	11°17	11 600	1954	S.H.G.
Bafing	Boureya	11°12	11°25	14 800	1969	S.H.G.
Bafing	Dakka -Saïdou	11°57	10°37	15 700	1952	S.H.M.
Bafing	Makana	12°33	10°16	22 000	1955	S.H.M.
Bafing	Manantali	13°12	10°27	27 800	1986	D.N.H.E.
Bafing	Dibia	13°14	10°48	33 500	1956	S.H.M.
Bafing	Mahina	13°45	10°51	38 500	1904	D.N.
Bakoye	Diangola	12°47	09°28	12 100	1967	S.H.M.
Bakoye	Toukoto	13°27	09°53	16 500	1904 1951	D.N. S.H.M.
Bakoye	Oualia	13°36	10°23	84 700	1954	S.H.M.
Baoulé	Parc-Baoulé	12°53	08°38	5 400	1968	S.H.M.
Baoulé	Missira	13°45	08°30	13 700	1968	S.H.M.
Baoulé	Siramakana	13°34	09°53	59 500	1954 1967	M.A.S. S.H.M.
Falémé	Fadougou	12°31	11°23	9 300	1953	S.H.M.
Falémé	Gourbassi	13°23	11°38	17 100	1954	S.H.M.
Falémé	Kidira	12°13	14°27	28 900	1930 1951	M.E.F.S. M.A.S.
Kolimbiné	Kabaté	14°31	11°13	22 900	1967	S.H.M.
Karakoro	Bokédiambi	14°54	11°07	25 000	1969	S.H.M.

D.N. : Chemin de fer Dakar-Niger

M.A.S. : Mission d'Aménagement du fleuve Sénégal

S.H.M. : Service de l'Hydraulique du Mali

S.H.O.N. : Service de l'Hydraulique de l'Office du Niger

U.H.E.A. : Union Hydro-Electrique Africaine

M.E.F.S. : Mission d'Etude du Fleuve Sénégal

S.H.G. : Service Hydrologique de Guinée

La succession des différents organismes de gestion de ces stations a souvent mené à des difficultés dans le choix du zéro de l'échelle définie (Sénégal-Consult, 1970).

Quatre échelles de nivellement ont été successivement utilisées par :

- 1906, la mission Thibault,
- 1930-1934 le Service Hydraulique de l'Office du Niger (S.H.O.N.),
- 1935-1939 la Mission d'Etude du fleuve Sénégal (M.E.F.S.),
- le système conventionnel de l'I.G.N. ayant été finalement retenu en 1956.

Pour le haut bassin de la Gambie, l'équipement hydrométrique est assez récent. L'accès aux informations hydrométriques de la partie guinéenne est néanmoins possible grâce aux stations de mesures installées par l'ORSTOM et la S.H.G.[12] depuis 1975.

Tableau 50 : Caractéristiques de l'équipement hydrologique dans le haut bassin de la Gambie

Fleuves et affluents	stations	Latitude	Longitude	Superficie km²	Mise en service	Organisme
Dimma	Nianou	11°40	11°57	775	1975	S.H.G.
Gambie	Kouncy	12°06	12°00	5015	1975	S.H.G.
Gambie	Kédougou	12°33	12°11	7550	1970	ORSTOM
Gambie	Mako	12°52	12°21	1 0450	1970	ORSTOM
Gambie	Simenti	13°02	13°18	20 500	1970	ORSTOM
Gambie	Wassadou amont	13°21	13°22	21 200	1970	ORSTOM
Gambie	Wassadou aval	13°21	13°23	33 500	1973	ORSTOM
Gambie	Fass	13°17	13°39	41 800	1972	ORSTOM
Gambie	Gouloumbou	13°28	13°44	42 000	1953	D.E.H.
Silamé	Matakou	11°42	11°57	380	1975	S.H.G.
Oundou	Bac de Borokomé	11°46	11°34	1 415	1975	S.H.G.
Koulountou	Youkounkoun	12°28	13°10	2 540	1978	S.H.G.
Koulountou	Gué du parc	12°47	13°29	5 350	1972	ORSTOM
Sili	Pont-routier	12°32	12°16	90	1974	D.E.H.
Thiokoye	Pont-routier	12°34	12°32	950	1971	D.E.H.
Diarha	Pont-routier	12°36	12°37	760	1972	D.E.H.
Diaguery	Pont-routier	12°38	12°05	1 010	1974	D.E.H.
Niériko	Goumbayel	13°41	13°10	6 800	1977	D.E.H.
Niériko	Pont-routier	13°22	13°22	11 900	1970	ORSTOM
Niokolo-Koba	Pont-routier	13°04	12°44	3 000	1970	D.E.H.
Niaoulé	Pont	13°29	13°41	1 230	1970	D.E.H.

[12] S.H.G. : Société Hydraulique de Guinée, Conakry (Guinée)

L'exploitation et la gestion du reste du réseau du bassin amont est assuré par la section de la D.E.H. de la Brigade-Ecole de Tambacounda qui a repris en 1978 les stations autrefois contrôlées par l'ORSTOM. Le tableau 50 retrace l'historique de l'équipement hydrométrique disponible pour ce bassin.

Ainsi, les sources d'informations hydrologiques des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie sont très diverses. Elles sont aussi de chronologie différente, et opposent les longues séries d'observations du haut bassin du Sénégal à celles du haut bassin de la Gambie relativement courtes. Ces différents constats nous amènent dans notre démarche à réaliser une critique statistique de ces données, comme pour les séries pluviométriques.

La méthode des doubles cumuls de P. Dubreuil, (1974) nous a ainsi permis de s'assurer d'une homogénéité des données et de les ajuster à une loi normale. Cependant, un comblement des lacunes n'a pas été opéré pour reconstituer les séries du haut bassin de la Gambie par rapport à celles du bassin amont du Sénégal. De telles opérations ont déjà été faites notamment par J. C. Olivry, (1983), pour combler les lacunes de la station de Gouloumbou en les corrélant avec celles de Kidira sur la Falémé.

Le même procédé a été repris par H. Dacosta, (1985), qui à partir d'une corrélation avec la station de Gourbassi sur la Falémé, a pu étendre la série de Kédougou sur la Gambie jusqu'en 1953. Dans des travaux plus récents, D. Orange, (1992) a reconstitué les débits annuels de la Gambie à Kédougou jusqu'en 1903.

3.2. Les stations hydrométriques et les périodes d'étude retenues

Les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie disposent au total de 55 stations limnimétriques et limnigraphiques :

- 35 stations pour le haut bassin du Sénégal,
- 20 stations pour le haut bassin de la Gambie.

La répartition de ces différentes stations à travers les réseaux hydrologiques montre que c'est le bassin amont du Sénégal qui est le plus marqué par la diversité des sources. Les stations de mesures sont ainsi réparties entre les réseaux des quatre pays qui se partagent son bassin versant.

Le réseau malien dispose du plus grand nombre de stations (23). Le réseau hydrométrique guinéen contrôle 9 stations tandis que le réseau sénégalais ne comprend que les stations de Kidira et de Bakel, exutoires respectifs de la Falémé et du haut bassin du fleuve Sénégal. Le réseau mauritanien ne dispose sur les hauts bassins que de la station de Bokédiambi sur le Karakoro.

Pour le bassin amont de la Gambie, les différentes stations sont comprises entre les réseaux guinéen et sénégalais qui se partagent son bassin versant (fig. 95). Le réseau guinéen contrôle ainsi 6 stations tandis que le réseau sénégalais compte 15 stations.

Dans les hauts bassins, certaines stations connaissent des problèmes d'étalonnage ou de tarage, ce qui limite considérablement l'exploitation de leurs données. Ces difficultés sont surtout observables en domaine guinéen et sur le cours moyen du Bafing notamment à Mahina.

Les travaux des hydrologues de l'ORSTOM (Guiguen et Lerique, 1977 ; C. Rochette, 1974 ; J. C. Olivry, 1982, 1983) ont conduit à affiner considérablement l'étalonnage de la station de Bakel, en précisant la non univocité de la courbe de tarage (les différentes relations entre les hauteurs d'eau et de débits en crue et en décrue) à cette station.

Ceci explique le choix des stations hydrométriques retenues pour l'étude de l'écoulement des hauts bassins. Il s'agit pour le haut bassin du Sénégal :

- De la station de Kayes qui totalise les apports des affluents venus du cours supérieurs et de celle de Bakel située à l'exutoire du fleuve Sénégal.
- De la station de Dakka-Saïdou qui contrôle les apports du Bafing à sa sortie du domaine guinéen et de Dibia avant sa confluence avec le Bakoye.
- Toukoto, dernière station de mesure du Bakoye, Siramakana exutoire du Baoulé avant sa jonction avec le Bakoye et de la station de Oualia qui contrôle les apports de ces deux cours d'eau.
- De Fadougou, station de mesure des apports guinéens de la Falémé et de Kidira, exutoire du bassin.

Concernant le bassin du fleuve Gambie, la station de Kédougou qui contrôle les apports du cours supérieur ainsi que celle de Gouloumbou à l'exutoire sont étudiées.

3.2.1. Les périodes d'étude retenues

Les données de l'écoulement des hauts bassins connaissent une inégalité dans la chronologie des séries entre le haut bassin du Sénégal et celui de la Gambie. En général, l'essentiel des mesures de l'écoulement du haut bassin du fleuve Sénégal remonte à 1903.

La reconstitution des données pour le haut bassin de la Gambie a permis à la station de Kédougou d'obtenir une série de valeurs égales à celles des stations du fleuve Sénégal (J. C. Olivry, 1983 ; H. Dacosta, 1985 ; D. Orange, 1992). Par contre, à la station de Gouloumbou, cette reconstitution s'est arrêtée en 1953 (J. C Olivry, 1983 ; H. Dacosta, 1985). Les données concernant les autres stations de ce bassin sont relativement récentes puisqu'elles datent de 1970. En outre elles coïncident avec une période à forte péjoration pluviométrique qui affecte considérablement l'hydraulicité. Ces données sont toutefois utilisées dans l'esquisse cartographique et les bilans décennaux.

Cette hétérogénéité des mesures de l'écoulement incite à définir des périodes d'étude pour l'analyse hydrologique. Trois périodes sont ainsi retenues pour affiner notre analyse :

- La période 1903-1993 à partir de laquelle nous analysons l'évolution de l'écoulement des hauts bassins.

- La période 1961-1990 est utilisée pour l'analyse des régimes hydrologiques, du calcul des bilans moyens de la période récente et de la corrélation entre précipitations et écoulement.
- La période 1980-1993, centrée sur la péjoration pluviométrique, permet à travers l'analyse des débits extrêmes de mesurer les modifications de l'écoulement récent des hauts bassins.

Cependant, il convient de souligner que depuis 1987, les débits enregistrés aux stations de Dibia, Kayes et Bakel sur l'axe Bafing-Sénégal sont soumis au régime artificiel du barrage de Manantali. L'absence des débits corrigés à ces trois stations nous obligent à intégrer dans nos différentes analyses les débits bruts, tout en indiquant les années influencées par le régime artificiel.

C'est donc grâce à l'emprunt de ces données à leurs auteurs respectifs ainsi qu'à l'appui des observations faites par les services spécialisés que nous pouvons étudier la dynamique de l'écoulement des hauts bassins du Sénégal et de la Gambie.

CHAPITRE 2

LES REGIMES ET LES BILANS HYDROLOGIQUES DES HAUTS BASSINS

Les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie s'étendent du domaine guinéen au sud au domaine sahélien au nord. Les cours d'eau qui les drainent connaissent ainsi à travers les différents domaines climatiques qu'ils traversent diverses influences. Celles-ci sont dictées par les conditions climatiques et imposent aux cours d'eau des caractères hydrologiques variables, suivant les apports et les indigences de chaque milieu.

1. LES REGIMES HYDROLOGIQUES DES HAUTS BASSINS

La diversité des domaines climatiques des hauts bassins impose des répercussions à l'échelle spatiale, sur l'écoulement. Cependant, il n'existe pas à priori de conformité entre domaines climatiques et domaines hydrologiques, même si ces derniers revêtent des nuances.

1.1. L'année hydrologique

Le choix de l'année hydrologique en domaine tropical est fonction du déroulement de la saison pluvieuse, en raison du mode d'alimentation essentiellement pluvial des cours d'eau. Ainsi l'année hydrologique peut être différente de l'année civile ou de l'année climatique (janvier à décembre). D'habitude, on retient le mois de mai comme étant le début de l'année hydrologique, puisqu'il coïncide avec le début de la saison des pluies. L'année hydrologique se termine en avril au cœur de la saison sèche durant laquelle les cours d'eau sont à leur plus bas niveau.

Dans les hauts bassins, comme l'ensemble des bassins tropicaux à alternance de saison pluvieuse et sèche, l'année hydrologique prend huit mois de l'année légale et quatre mois de l'année suivante.

A l'échelle temporelle comme spatiale, les variations de l'écoulement des hauts bassins à travers l'année hydrologique permettent alors de distinguer différents régimes.

1.2. Les régimes hydrologiques des hauts bassins

Dans le monde tropical où seules les précipitations rythment la vie des cours d'eau, ces derniers sont exclusivement dépendants des aléas de cet élément climatique. Comme le note R. Frécaut, (1974, 1982), la diversité climatique de ces régions engendre une telle variabilité à des degrés divers, que le rôle des précipitations est exclusif pour expliquer les modalités de l'écoulement pluvial. Ainsi, chaque domaine climatique englobe un régime fluvial qui est une nuance du régime pluvial.

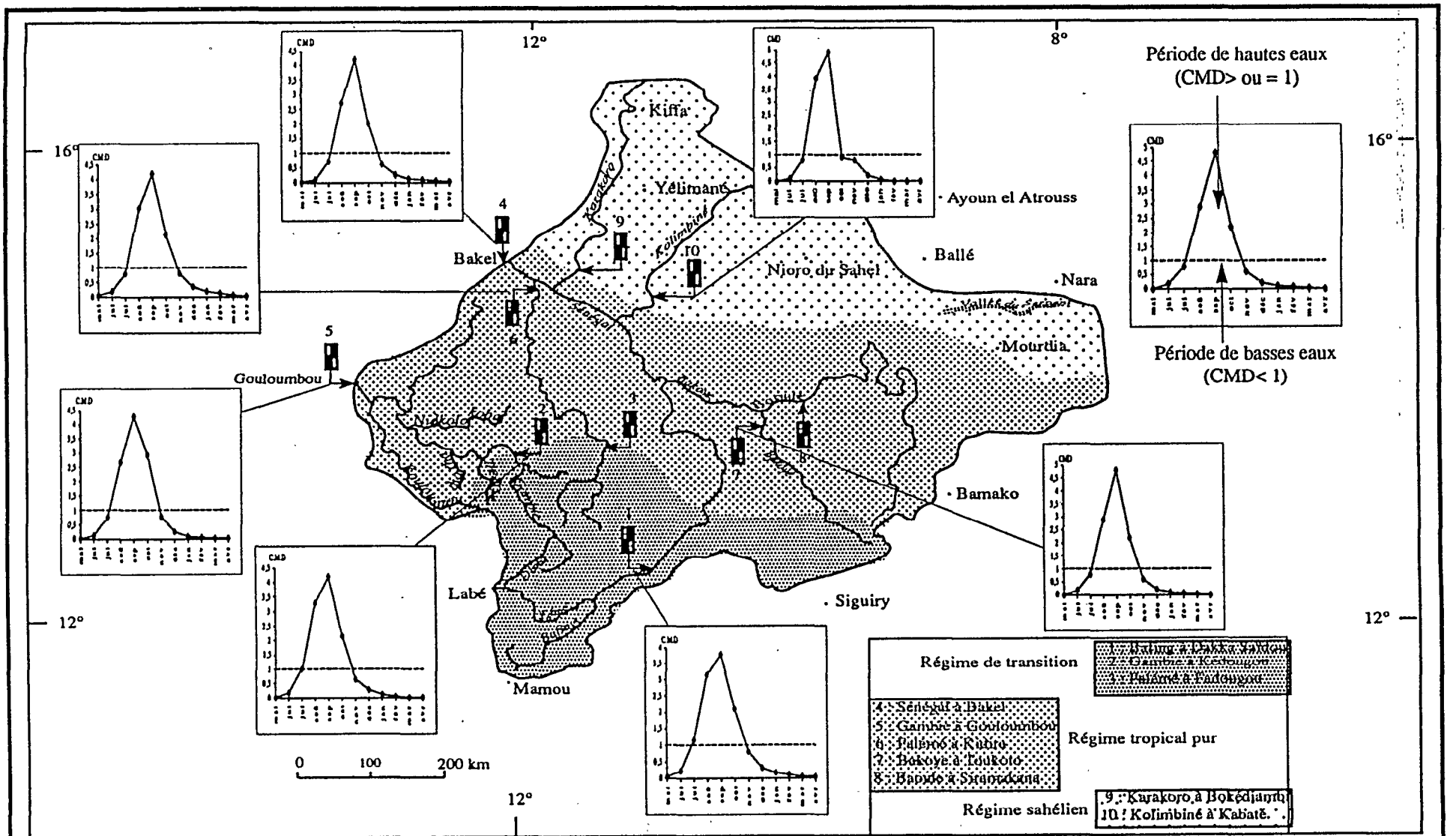


Figure 102 : Régimes hydrologiques des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

Ces nuances, aussi diverses que les domaines climatiques amènent les hydrologues à parler de régimes fluviaux tropicaux. Aussi, du point de vue hydrologique, trois régimes se distinguent dans les hauts bassins (fig. 102). Il s'agit :

- Du régime tropical de transition qui assure la transition avec les régimes subéquatoriaux et équatoriaux,
- Du régime tropical pur,
- Du régime sahélien, dont la référence sur les hauts bassins est strictement limitée aux sous-bassins de la Kolimbiné, du Karakoro et à la Vallée du Serpent pour le Baoulé. Ce dernier régime n'est étudié qu'à la station de Kabaté sur la Kolimbiné, d'autant plus que ces apports sont négligeables et que l'écoulement est sporadique. Nous retenons la période 1968-1993, début des mesures à cette station pour étudier le régime sahélien.

L'étude des régimes hydrologiques prend en compte les moyennes mensuelles des différentes stations depuis l'origine des mesures, comparativement à celles de la période 1961-1990. Les coefficients mensuels de débits (CMD) qui expriment le rapport du débit moyen mensuel à celui de la série sont aussi retenus. Ces coefficients permettent de définir les périodes de hautes et de basses eaux des deux périodes étudiées.

Ces nuances sont les suivantes du sud au nord depuis les montagnes du Fouta Djalon aux stations de Bakel et de Gouloumbou (fig. 102).

1.2.1. Le régime fluvial de transition

Le régime fluvial de transition représente la nuance la plus abondante des hauts bassins. Il couvre 28 000 km² dans le haut bassin du Sénégal et seulement 7 550 km² dans celui de la Gambie. Ce régime combine deux nuances qui représentent environ 13,6 % de la superficie des hauts bassins :

- Le régime fluvial guinéen,
- Le régime fluvial sud-soudanien à transition vers le régime tropical pur.

C'est bien sûr la première nuance que nous étudions dans ces caractéristiques principales, en sachant qu'à un degré moindre, elle intègre la seconde nuance. La station de Dakka-Saïdou sur la branche du Bafing-Sénégal est la seule nuance de ce régime avec Fadougou sur la Falémé. L'absence de données suffisamment longues pour la station de Kouncy sur la Dimma ne nous permet malheureusement pas d'étudier le cas du bassin de la Gambie.

Le régime fluvial de transition se caractérise par une période de hautes eaux qui dure quatre mois. Le tableau 51 présente les débits moyens mensuels ainsi que les coefficients mensuels de débits[13] pour les périodes 1903-1993 et 1961-1990. On remarque que, quelle que soit la période,

---

[13] Le coefficient mensuel de débit (CMD) permet de définir les périodes de hautes et de basses eaux, selon la classification de M. Pardé (1968) :
CMD supérieur ou égal à 1 correspond à la période de hautes eaux,
CMD inférieur à 1 correspond à la période de basses eaux.

les mois de juillet, août, septembre et octobre correspondent à la période de hautes eaux. Le régime tropical de transition combine deux phases de l'écoulement :

- Une période de montée des eaux de mai à septembre qui coïncide avec la crue annuelle.

L'accroissement des débits entre ces deux mois est de + 885,8 $m^3.s^{-1}$ pour la période 1903-1993, + 785,7 $m^3.s^{-1}$ en 1961-1990. L'écart entre ces deux périodes est de 73,1 $m^3.s^{-1}$ en faveur de la première période.

- Une période de basses eaux de septembre à mai qui détermine la période d'étiage. La montée des eaux est d'abord lente. De mai à juin, cette augmentation est de + 69,6 $m^3.s^{-1}$ soit 7,8 % pour la période de référence contre + 38,4 $m^3.s^{-1}$ soit 4,8 % en 1961-1990. La saison des pluies a déjà débuté en domaine guinéen, mais le premier maximum thermique de mars-avril dans cette région (24,6°C), les ponctions faites par l'ETP (160 mm en mars) expliquent encore la faiblesse des débits.

Tableau 51 : Débits moyens mensuels et coefficients mensuels de débits à Dakka-Saïdou (période 1903-1993 ; 1961-1990)

	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	An	R
Q $m^3.s^{-1}$ 1903-1993	19,2	88,8	313	820	905	514	217	95,4	50,2	32,6	19,9	12,2	257	
CMD	0,07	0,35	1,21	3,18	3,52	2	0,84	0,37	0,20	0,12	0,07	0,04	-	88
Q $m^3.s^{-1}$ 1961-1990	13,3	51,7	244	668	799	447	171	68,3	36	21,4	13,4	8,8	212	
CMD	0,06	0,24	1,15	3,16	3,78	2,11	0,81	0,32	0,17	0,1	0,06	0,04	-	95

R = coefficient d'immodération

De juin à juillet, l'accroissement devient plus sensible. Les débits passent à +224,6 $m^3.s^{-1}$ soit 25,3 % pour la période 1903-1993 contre + 173,9 $m^3.s^{-1}$ soit 22,1 % en 1961-1990. La saison des pluies est définitivement installée en domaine guinéen mais les délais de rétention du sol et l'organisation du drainage limitent encore l'écoulement. De juillet à août, l'augmentation brutale des débits est liée aux conditions climatiques favorables en domaine guinéen. Les températures et l'évaporation sont minimales tandis que le maximum pluviométrique intervient en août (355 mm) à Labé. Les sols sont saturés et les pentes élevées favorisent un écoulement dense.

La progression des débits est ainsi de + 506,1 $m^3.s^{-1}$ soit 57,1 % pour la période 1903-1993 alors qu'elle est de + 424 $m^3.s^{-1}$ soit 53,9 % pour 1961-1990. Les coefficients mensuels de débits pour ces deux mois varient de 1,21 à 3,18 pour 1903-1993 et sont de 1,15 à 3,16 en 1961-1990 (tab. 51). La pointe de crue est atteinte en septembre avec 904,9 $m^3.s^{-1}$ pour la période de référence.

Elle est de 799 $m^3.s^{-1}$ en 1961-1990. Les coefficients mensuels de débits les plus élevés surviennent à ce moment. Ils sont respectivement de 3,52 pour 1903-1993 contre 3,78 en 1961-1990.

A partir de ce mois, s'amorce la descente des eaux. Celle-ci est très brusque, puisque de septembre à octobre les débits diminuent de moitié. C'est la décrue qui se prolonge jusqu'en novembre. Cette baisse est de - 391 $m^3.s^{-1}$ soit 44 % pour la période de référence.

Elle passe à -352 soit 45 % pour la période 1961-1990. C'est la période du ruissellement de décrue. Mais les pluies d'octobre (155 mm à Labé) qui relancent les débits assurent encore un écoulement important. Le mois d'octobre, avec un coefficient mensuel de débit 2 et 2,11 respectivement en 1903-1993 et 1961-1993, est encore un mois de hautes eaux. Les mois d'octobre à novembre annoncent la fin de la décrue avec une forte baisse des débits.

La décroissance de ceux-ci est respectivement de - 297,6 $m^3.s^{-1}$ soit 33,5 % pour la période de référence contre une baisse de - 276 $m^3.s^{-1}$ soit 35,1 % en 1961-1990. Le mois de novembre avec des coefficients mensuels de débits supérieurs à 0,80 est presque assimilable à de hautes eaux. Dès ce mois, les cours d'eau du domaine guinéen entrent en régime non influencé et presque aucun apport ne vient perturber la baisse des débits. Les précipitations qui tombent durant cette période en domaine guinéen (36,8 mm en novembre et 8,7 mm en décembre à Labé) sont trop faibles pour engendrer un écoulement important. C'est la phase de ressuyage qui se prolonge jusqu'en février.

Pour la période 1903-1993, la baisse des débits est de - 121,6 $m^3.s^{-1}$ soit 13,7 % entre novembre et décembre, elle est de - 45 $m^3.s^{-1}$ soit 5 % de décembre à janvier et n'est plus que de - 17,6 $m^3.s^{-1}$ soit 1,9 % entre ce dernier mois et février.

La période 1961-1990 connaît le même rythme de baisse avec - 102,7 $m^3.s^{-1}$ de novembre à décembre soit 13 %. Elle n'est plus que de - 14,6 $m^3.s^{-1}$ de décembre à janvier soit 1,8 %. La fin du ressuyage est atteinte de janvier à février avec une baisse des débits de - 8 $m^3.s^{-1}$ soit 2,7 %.

De février à mars, l'écoulement est marqué par la phase de tarissement. Mais celle-ci est progressivement ralentie par la réaction des nappes qui tempère la diminution des débits. Ainsi, de février à mars les débits décroissent de - 12,7 $m^3.s^{-1}$ soit 1,4 %, ils passent à - 7,7 % soit 0,8 % de mars à avril pour la période 1903-1993. Le minimum est atteint en avril avec 12,2 $m^3.s^{-1}$. Par rapport au maximum de septembre les débits accusent en huit mois une baisse de - 892,8 $m^3.s^{-1}$. Le coefficient d'immodération R qui est le rapport entre les débits mensuels extrêmes est égal à 88.

Ce tarissement est similaire pour la période 1961-1990. La décroissance des débits est de -8 $m^3.s^{-1}$ soit 1 % entre février et mars et n'est plus que de - 4,6 $m^3.s^{-1}$ de mars à avril soit 0,5%. Le mois d'avril enregistre le plus faible débit avec 8,87 $m^3.s^{-1}$. L'écart entre les deux mois extrêmes est de - 807,8 $m^3.s^{-1}$. Le coefficient R d'immodération qui traduit l'irrégularité entre les valeurs extrêmes pour la période est de 95.

La seconde nuance de ce régime tropical de transition ne présente pas de différence fondamentale. Le tableau 52 qui retrace ces caractéristiques à la station de Kédougou sur la

Gambie, indique des débits moins élevés qu'à l'amont, ainsi qu'un minimum qui s'étale d'avril à mai. Cette période, marquée par une importante péjoration se reflète sur le régime tropical de transition avec de hautes eaux amoindries en juillet (CMD = 0,99).

La période de hautes eaux se réduit ainsi à 3 mois à Kédougou. Toutefois, l'ordre de montée et de descente des eaux ne change pas, même si l'immodération s'est fortement accrue (R = 418) contre 95 à Dakka-Saïdou pour la même période.

Tableau 52 : Débits moyens mensuels et coefficients mensuels de débits à Kédougou (période 1961-1990)

	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	An	R
Q $m^3.s^{-1}$	0,57	16,8	89,5	296	376	193	58,9	25,1	12,9	6,29	2,95	1,07	89,9	
CMD	0,01	0,19	0,99	3,29	4,18	2,14	0,66	0,28	0,14	0,07	0,03	0,01	-	418

Le régime tropical de transition analysé aux stations de Dakka-Saïdou (1903-1993 ; 1961-1990) et de Kédougou (1961-1990) présente les nuances suivantes :

C'est un régime pluvial (la pluie étant le seul mode d'alimentation), combinant une nuance guinéenne et sud-soudanienne. Il est immodéré avec un coefficient qui s'accroît d'amont (Dakka-Saïdou) en aval (Kédougou). Enfin, le régime tropical de transition est un régime unimodal avec un maximum de septembre et un minimum d'avril pour la nuance fluviale guinéenne, alors qu'il est de septembre et de mai pour le tropical de transition (sud-soudanien).

1.2.2. Le régime tropical pur

Le régime tropical pur se caractérise par une période de hautes eaux qui dure trois mois et une période de basses eaux qui s'étale sur neuf mois. Par rapport au régime tropical de transition, il perd ainsi un mois de hautes eaux en juillet. Les coefficients mensuels de débits supérieurs ou égaux à 1 sont compris entre août, septembre et octobre. Dans les hauts bassins, le régime tropical pur occupe une superficie de 108 000 km² pour le bassin amont du Sénégal et environ 34 450 km² pour celui de la Gambie. Il représente environ 54,7 % de la superficie des hauts bassins (fig. 105).

Le régime tropical pur est analysé à la station de Bakel, exutoire du bassin amont du Sénégal, pour la période 1903-1993. Nous évoquons ensuite les caractéristiques du régime pour la période (1961-1990) à cette station, comparativement à celle de Gouloumbou exutoire du bassin amont de la Gambie.

Comme pour le régime tropical de transition, le régime tropical pur combine deux phases de l'écoulement. La période de montée des eaux se déroule de mai à septembre, puis s'en suit une descente des eaux qui se prolonge jusqu'en avril.

Pour la période 1903-1993, la montée des eaux va de mai à septembre. Le débit passe de 13 $m^3.s^{-1}$ en mai à 2965 $m^3.s^{-1}$ en septembre soit une augmentation brute de + 2952 $m^3.s^{-1}$.

La station de Bakel, par sa position, totalise tous les apports du bassin, ce qui explique les débits atteints à cette dernière station. Toutefois l'augmentation des débits est d'abord lente puisque de mai à juin, elle n'est que de 81,6 $m^3.s^{-1}$ soit + 2,7 %. La saison des pluies qui a déjà débuté en domaine guinéen envahit progressivement le domaine soudanien. Mais à Bakel, à la lisière du domaine sahélien les précipitations sont encore faibles. Les différentes ponctions liées aux irrégularités climatiques (évaporation, évapotranspiration, températures) ainsi que les pertes par rétention expliquent la faiblesse des débits (maximum thermique et d'évaporation de mai). De même la nature des terrains dans cette région favorise une infiltration importante.

Tableau 53 : Débits moyens mensuels et coefficients mensuels de débits à Bakel (période 1903-1993 ; 1961-1990)

	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	An	R
Q $m^3.s^{-1}$ 1903-1993	13	94,6	529	2035	2965	1432	496	214	119	71,5	44	21,7	727	
CMD	0,01	0,13	0,72	2,80	4,08	1,97	0,68	0,29	0,16	0,09	0,06	0,03	-	408
Q $m^3.s^{-1}$ 1961-1990	8,12	48,4	417	1572	2380	1132	376	145	78,3	45,6	25,5	11,3	566	
CMD	0,01	0,09	0,74	2,77	4,2	2	0,66	0,26	0,14	0,08	0,05	0,02	-	420

De juin à juillet, l'augmentation des débits est plus significative puisqu'elle atteint + 434,4 $m^3.s^{-1}$ soit + 15 %. La saison des pluies a gagné les 2/3 des hauts bassins. Les pentes fortes observées en amont des cours d'eau accélèrent le ruissellement. Les facteurs de ponctions (températures, évaporation) commencent à baisser ce qui favorise un écoulement plus important. Pour autant, juillet n'est pas un mois de hautes eaux (CMD = 0,72). Le ruissellement devient abondant entre juillet et août, et l'accroissement atteint +1506 $m^3.s^{-1}$ soit + 51 %.

La rapidité de l'onde de propagation des eaux de ruissellement, les minima des températures et de l'évaporation, le maximum pluviométrique du mois d'août sont à l'origine des débits notés lors de ces deux mois. D'ailleurs le mois d'août, avec un coefficient mensuel de débit de 2,80 indique une nette montée des eaux (tab. 53). Le maximum hydrologique est noté en septembre avec 2965 $m^3.s^{-1}$ soit un CMD de 4,08. Ce maximum hydrologique est déphasé par rapport au maximum pluviométrique d'août.

Ce déphasage est lié aux facteurs de coalescence des flots, au tassement des eaux entre août et septembre et à la réduction de l'onde de propagation de crue surtout dans les cours moyens entre Kayes et Bakel.

La période de descente des eaux s'amorce une fois la pointe de crue dépassée. Celle-ci est très brusque et coïncide avec le reflux de la trace au sol de l'Equateur Météorologique qui entraîne la baisse des pluies.

De septembre à octobre, les débits diminuent de moitié avec -1533 $m^3.s^{-1}$ soit - 52 %. C'est la phase de ruissellement de décrue qui s'étale jusqu'en fin octobre. Ce mois est encore assimilable à de hautes eaux (CMD = 1,97).

D'octobre à novembre, cette baisse est de - 936,1 $m^3.s^{-1}$ soit - 31,7 %. Le second maximum thermique d'octobre, et le rétablissement des conditions favorables à la ponction traduisent un ressuyage assez rapide. Mais dès le mois de novembre, cette baisse est plus régulière (tab. 53). La vidange des nappes débute entre novembre et décembre (- 828 $m^3.s^{-1}$ soit 9,5 %). Elle se termine par le tarissement et le débit minimal est atteint en mai avec 13 $m^3.s^{-1}$.

La période 1961-1990 n'apporte aucun changement notable dans l'allure du régime. En dehors des débits qui connaissent une baisse plus sensible, l'hydrogramme ne change pas dans l'ordre de montée ou de descente des eaux. Ce constat s'impose aussi pour la Gambie à Gouloumbou (tab. 54). Le débit minimal à cette station intervient au mois d'avril.

Tableau 54 : Débits moyens mensuels et coefficients mensuels de débits à Gouloumbou (période 1961-1990)

	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	An	R
Q $m^3.s^{-1}$	8	24,6	140	513	831	563	151	46,7	18,2	11,5	7,12	5,44	194	
CMD	0,04	0,13	0,73	2,65	4,29	2,91	0,78	0,24	0,09	0,06	0,04	0,03	-	143

L'évolution des débits et des coefficients mensuels de débits permet de définir les caractéristiques du régime tropical pur des fleuves Sénégal et Gambie aux stations de Bakel et de Gouloumbou.

Il s'agit d'un régime pluvial, unimodal avec un maximum de septembre (2965 $m^3.s^{-1}$ en 1903-1993 ; 2380 $m^3.s^{-1}$ en 1961-1990) à Bakel et 831 $m^3.s^{-1}$ à Gouloumbou pour la période 1961-1990. Le minimum survient en mai avec 13 $m^3.s^{-1}$ (1903-1993) et 8,12 $m^3.s^{-1}$ (1961-1990) à Bakel. Il est précoce à Gouloumbou et est noté en avril avec 5,59 $m^3.s^{-1}$. C'est un régime immodéré mais stable. Le rapport entre les coefficients mensuels de débits extrêmes indique une immodération beaucoup plus prononcée pour le fleuve Sénégal. Celle-ci est de 408 pour la période 1903-1993 alors qu'elle atteint 420 pour la période 1961-1990. Comparativement, le bassin de la Gambie enregistre pour la même période un coefficient d'immodération de 143.

Les paramètres physiques, climatiques et hydrologiques mis à part, le fort coefficient d'immodération du Sénégal pour la période récente s'explique par la péjoration hydropluviométrique actuelle. En effet, au-delà de Dakka-Saïdou, à la sortie du domaine guinéen où l'écoulement du Bafing représente déjà 37 % du total annuel du fleuve Sénégal, l'irrégularité de

l'écoulement devient, une caractéristique immuable du régime tropical pur. Malgré l'artificialisation du fleuve depuis 1987 sur l'axe du Bafing et l'effet de régulation qui devait s'en suivre, les écarts entre les valeurs extrêmes restent encore très élevés. Ceci atteste déjà des difficultés de fonctionnement correct du barrage-réservoir de Manantali et de sa probabilité à remplir les objectifs qui lui sont assignés. Nous reviendrons plus en détails sur notre propos dans l'étude des aménagements.

1.2.3. Le régime sahélien

Le régime sahélien se caractérise par des hautes eaux qui durent 2 mois et une période de basses eaux qui s'étalent sur dix mois. Le régime sahélien constitue ainsi la nuance hydrologique la moins abondante des hauts bassins. La période de hautes eaux se réduit d'un mois par rapport au tropical pur et atteint deux mois pour le régime tropical de transition. Dans les hauts bassins, le régime sahélien couvre environ 82 450 km² soit 31,7 % des hauts bassins. Le régime sahélien est analysé à la station de Kabaté sur la Kolimbiné. Le tableau 56 présente les caractéristiques du régime sahélien sur la période 1968-1993.

Tableau 55 : Débits moyens mensuels et coefficients mensuels de débits à Kabaté (période 1968-1993)

	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	An	R
Q $m^3.s^{-1}$	0,0	0,8	5,2	23,1	28,6	5,6	4,7	1,7	0,3	0,0	0,0	0,0	5,8	95,3
CMD	-	0,1	0,8	3,9	4,9	0,9	0,8	0,2	0,05	-	-	-	-	

La montée des eaux se fait en trois mois, de juillet à Septembre. Elle est très brusque, puisque de juin à juillet les débits, presque intermittents, augmentent subitement de + 4,4 $m^3.s^{-1}$ soit 15,3 %. Ils se renforcent entre juillet et août avec + 17,9 $m^3.s^{-1}$ soit 62,5 %. Cette période coïncide avec la position la plus septentrionale de l'Equateur Météorologique Incliné (EMI). Les précipitations importantes en domaine sahélien favorise alors la montée des eaux (CMD du mois d'août = 3,9). Le débit maximum est atteint en septembre avec 28,6 $m^3.s^{-1}$ soit un CMD de 4,9.

La période de hautes eaux dure ainsi 2 mois et s'étend d'août à septembre. A partir de ce mois, s'amorce une baisse rapide des eaux qui correspond au retrait de l'Equateur Météorologique Incliné. La diminution des débits est très forte entre septembre et octobre et atteint - 23 $m^3.s^{-1}$ soit -80,4 %. Les débits de novembre et de décembre sont presque insignifiants et l'étiage absolu est atteint dès la fin du mois de janvier (0,3 $m^3.s^{-1}$).

Le régime sahélien se caractérise donc par la faiblesse de ces débits (tab. 55). Ce caractère indigent du régime sahélien se perçoit mieux à travers les mois sans écoulement (4 mois pour la Kolimbiné) et les valeurs atteintes par les CMD en période de hautes eaux font qu'une forte averse

se transforme souvent en une crue. Ce contraste du régime sahélien et la faiblesse de son écoulement peuvent être saisis à partir du coefficient d'immodération R qui est égal à 95,3. Le régime sahélien est unimodal avec un maximum de septembre et un minimum qui survient dès le mois de janvier.

L'étude des régimes hydrologiques permet de saisir les nuances spatiales de l'écoulement du sud au nord des hauts bassins. Ces nuances indiquent trois régimes principaux qui sont fonction de l'origine des cours d'eau et des différentes ponctions qu'ils subissent.

On distingue ainsi le régime tropical de transition en domaine guinéen et sud-soudanien. Le régime tropical pur se localise en domaine nord-soudanien et le régime sahélien occupe les franges sahéliennes nord et nord-orientales des hauts bassins. Mais si la conformité entre domaine climatique et hydrologique n'est pas établie, il n'en demeure pas moins qu'à travers des années extrêmes les régimes connaissent certaines perturbations. Les années 1924, 1957 et 1955 marquées par une forte pluviométrie ont donné 5 mois de hautes eaux (juillet à novembre) à Dakka-Saïdou. Il en est de même pour les années 1955 et 1964 à Kédougou. De même pour ces années, le régime tropical pur revêt les caractéristiques du régime de transition. C'est le cas de l'année 1924 à Bakel, des années 1954, 1955 et 1966 à Gouloumbou qui ont vu quatre mois de hautes eaux à cette station.

Mais, le fait le plus important est la tendance à la modification des régimes lors des années à faible écoulement. Le régime tropical de transition prend alors des connotations du tropical pur tandis que celui-ci à tendance à se "sahéliser". En même temps, le régime sahélien (cas de la Kolimbiné) s'apparente de plus en plus au régime subdésertique.

Les années 1980, notamment 1982, 1986, 1987 et 1989 et les dernières années de la période récente (1992, 1993) n'ont vu que trois mois de hautes eaux à Dakka-Saïdou. Pendant ce temps, les années 1971, 1973, 1980, 1981, 1983 et 1984 n'ont donné que deux mois de hautes eaux à la station de Kédougou. Ce fait est devenu presque habituel depuis la péjoration pluviométrique de 1968. Le régime tropical pur enregistre régulièrement deux mois de hautes eaux notamment à Gouloumbou. Par contre à la station de Bakel, les lâchures de retenue de Manantali rendent moins évident l'observation de ces phénomènes. Ces fluctuations nous autorisent à évaluer l'abondance annuelle des régimes hydrologiques et leur variabilité dans les hauts bassins.

2. L'ABONDANCE ANNUELLE ET SA VARIABILITE

L'abondance moyenne annuelle et sa variabilité sont étudiées à travers les modules annuels, spécifiques et fréquentiels sur la période 1903-1993.

2.1. Les modules annuels

Les modules annuels bruts constituent le premier paramètre d'abondance d'un cours d'eau. Le Bafing, branche mère du fleuve Sénégal, constitue après la formation de celui-ci à Bafoulabé l'axe hydrographique principal du haut bassin du Sénégal. Nous considérons ainsi à travers nos différentes analyses l'axe Sénégal-Bafing comme un chenal unique. Les différents affluents qui viennent le grossir au fil de sa progression vers le nord nous permettent ensuite de mieux quantifier les divers apports.

Pour le haut bassin de la Gambie, seule la station de Kédougou nous sert de référence pour cette période. Les valeurs de la station de Gouloumbou sont données sur la période 1953-1993. Le tableau 56 donne les valeurs caractéristiques de l'écoulement moyen annuel des hauts bassins pour la période 1903-1993.

Tableau 56 : Ecoulement moyen annuel des hauts bassins (période 1903-1993)

Fleuves et affluents	Stations	Superficie km²	Débits Q $m^3.s^{-1}$	Ecart type	Coef. de variation	Ds $l.s^{-1}.km^{-2}$
Sénégal	Bakel	218 000	726,5	303,4	0,41	3,3
	Kayes	157 400	539,1	219,4	0,40	3,4
Bafing	Dibia	33 500	366	134,9	0,36	10,9
	Dakka-Saïdou	15 700	256,9	73,2	0,28	16,3
Bakoye	Oualia	84 700	140,1	63,9	0,45	1,6
	Toukoto	16 500	71,8	40,6	0,56	4,3
Baoulé	Siramakana	59 500	59,3	39,8	0,67	0,92
Falémé	Kidira	28 900	165,9	78,7	0,47	5,7
	Fadougou	9 300	103	40,9	0,39	11
Kolimbiné	*Kabaté**	*30 000*	*5,8*	*9,2*	*1,5*	*0,19*
Gambie	Kédougou	7 550	98,1	38,6	0,39	12,9
	*Gouloumbou**	*42 000*	*210*	*104*	*0,49*	*5*

La figure 103 reprend le tracé schématique de chaque cours d'eau et permet ainsi de voir l'évolution d'amont en aval des modules annuels. Les stations de Galougo sur le Sénégal et de Gourbassi sur la Falémé ne sont pas étudiées mais leurs modules sont toutefois donnés pour mieux connaître les apports.

Les modules du Bafing en région guinéenne ne sont pas connus avec précision. La station de Dakka-Saïdou, au sortir du milieu guinéen, renseigne pour autant sur l'écoulement dans la région. Mais le Bafing est déjà grossi par la Téné, son affluent principal, qui lui fournit un débit presque égal. Le module annuel enregistré à Dakka-Saïdou est ainsi de 256,9 $m^3.s^{-1}$. Il passe à 366 $m^3.s^{-1}$ à Dibia, exutoire du Bafing, soit un apport de 30 %. Entre ces deux stations, le Bafing est grossi par le Balé 1 et le Balé 2 (fig. 93).

* Les débits de la Kolimbiné à Kabaté ainsi que ceux de la Gambie à Gouloumbou sont donnés à titre indicatif sur leur période respective 1968-1993 et 1953-1993.

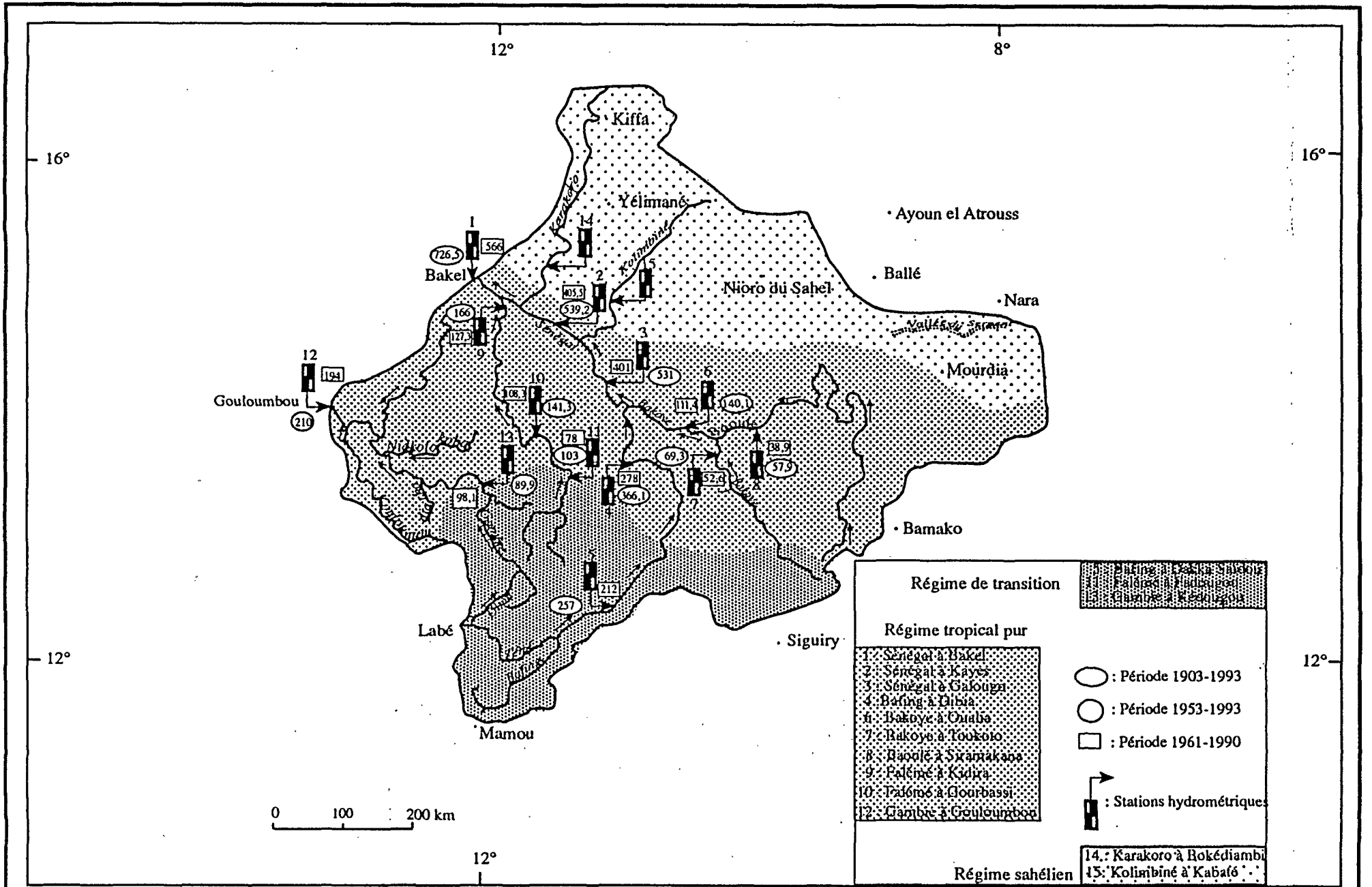


Figure 103 : Schéma de la variation des modules annuels des hauts bassins

Les apports du Bafing-Téné arrivent alors à la station de Bafoulabé, où ils se conjuguent à ceux du Bakoye. A son exutoire à Toukoto, ce cours d'eau totalise pour la période 1903-1993 un module de 71,8 $m^3.s^{-1}$ tandis que le Baoulé à Siramakana a un module de 59,3 $m^3.s^{-1}$, soit près de 83 % du module du Bakoye. Les apports de ces deux cours d'eau se joignent à la station de Oualia qui enregistrent un module de 140,1 $m^3.s^{-1}$. A Bafoulabé, les apports du Bakoye-Baoulé et du Bafing-Téné donnent naissance au fleuve Sénégal. Le module annuel du Sénégal à la station de Galougo pour la période 1903-1993 est de 531 $m^3.s^{-1}$. Il passe à 539,19 $m^3.s^{-1}$ à la station de Kayes soit un apport de 1,5 %. Entre ces deux stations, le Sénégal ne reçoit que les apports de la Kolimbiné (5,8 $m^3.s^{-1}$ sur la période 1968-1993), dont l'écoulement très modeste ne donne pas de tribut significatif. A. A. Sow, (1984) attribue la faible augmentation des débits entre ces deux stations à l'importance de l'évaporation et à la faiblesse des pentes. Le module du fleuve Sénégal est ensuite mesuré à la station de Bakel où il est de 726,5 $m^3.s^{-1}$. A cette station, le module du Sénégal gonfle subitement et atteint une augmentation de + 26 %. Pourtant, entre Bakel et Kayes, sur sa rive droite, l'apport principal du Sénégal, constitué par le Karakoro, est insignifiant. En fait, cette brusque augmentation est imputable aux apports de la Falémé qui rejoint le Sénégal peu après Kidira. Le module de ce cours d'eau est de 103 $m^3.s^{-1}$ à Fadougou, première station de contrôle des rivières sorties du domaine guinéen. Le module passe ensuite à 141,3 $m^3.s^{-1}$ à Gourbassi soit une augmentation moyenne de 27 %. A la station de Kidira, exutoire du bassin-versant de la Falémé le module annuel est de 165,9 $m^3.s^{-1}$. La Falémé affiche ainsi une hausse brute de son module de 15 % entre Kidira et Gourbassi et 38 % entre Kidira et Fadougou.

Les apports du fleuve Gambie pour la période 1903-1993 sont peu connus puisque, seule la station de Kédougou en donne une idée (chap. 1). La taille du bassin à cette station et l'état des données ne permettent cependant pas d'obtenir des résultats qui puissent soutenir une comparaison fiable avec les modules du haut bassin du Sénégal. Le module de la période 1903-1993 est ainsi de 98,09 $m^3.s^{-1}$. Ce module est supérieur à celui du Bakoye à Toukoto pour une superficie qui en est pourtant le double. Toutefois, pour une superficie presque similaire il se rapproche du module de la Falémé à Fadougou.

L'abondance moyenne annuelle exprimée à partir des modules annuels montre une augmentation des débits de l'amont à l'aval, conformément à l'augmentation de la superficie du bassin. Cette augmentation résulte aussi des conditions climatiques favorables (domaine guinéen) où naissent les principaux affluents avant de rejoindre le cours principal. Cependant, l'abondance d'un cours d'eau peut aussi être saisie à travers les débits spécifiques.

2.2. Les débits spécifiques

Les débits spécifiques augmentent à l'inverse des modules annuels d'aval en amont, corrélativement avec la diminution de la superficie des bassins et à l'abondance pluviométrique. Les débits spécifiques des différentes stations retenues sont présentés dans le tableau 56.

D'emblée, on s'aperçoit que les modules spécifiques des hauts bassins sont très variables et assez faibles dans l'ensemble. Le débit spécifique le plus élevé revient au Bafing à la station de Dakka-Saïdou (16,3 $l.s^{-1}.km^{-2}$). Ceci est normal vu la superficie du bassin (tab. 56) et l'origine des rivières qui roulent ici leurs débits. Vers l'aval, le débit spécifique du Bafing décroît rapidement et n'est plus que de 10,9 $l.s^{-1}.km^{-2}$ à Dibia.

Vient ensuite la Gambie à Kédougou après le Bafing par l'importance de son module spécifique (12,9 $l.s^{-1}.km^{-2}$). Toutefois, l'aire contrôlée par cette station est plus faible que celle de Dakka-Saïdou (tab. 51). Cependant, Kédougou se trouve à la sortie du domaine sud-soudanien et les ponctions induites par les différents facteurs thermiques commencent à peser.
Le module spécifique de cette station est d'ailleurs assez voisin de celui de la Falémé à Fadougou (11,07 $l.s^{-1}.km^{-2}$). A Fadougou, le bassin-versant de la Falémé a une superficie de 9 300 km^2. Les cours d'eau qui arrivent à cette station ont tous une origine "guinéenne". La faiblesse relative du débit spécifique ne peut ainsi être inscrite que par rapport à la morphométrie (faiblesse des pentes).

Ainsi, selon la classification de M. Pardé, (1968) le Bafing à Dakka-Saïdou et Dibia, la Gambie à Kédougou et la Falémé à Fadougou présentent des modules spécifiques honorables.

Pour le reste des hauts bassins les débits spécifiques sont très faibles. A l'exception de la Falémé à Kidira (5,7 $l.s^{-1}.km^{-2}$) qui dispose encore d'un module spécifique moyen, tous les autres modules des cours d'eau se classent dans la catégorie des modules faibles à très faible (M. Pardé, 1968)[14]. Cependant, la faiblesse des valeurs atteintes pose le problème de la validité de ces critères de classification, surtout en cette période d'indigence. Ainsi, à Kayes, le Sénégal-Bafing a un débit spécifique de 3,4 $l.s^{-1}.km^{-2}$. Par rapport aux stations amont, la diminution du module spécifique est de l'ordre de -69 % par rapport à Dibia alors qu'il atteint -79 % à Dakka-Saïdou. A la station de Bakel, le module du Sénégal-Bafing n'est plus que de 3,3 $l.s^{-1}.km^{-2}$. Par rapport aux stations amont la diminution est de -70 % par rapport à Dibia et de -80 % à par rapport à Dakka-Saïdou.

Les autres affluents de rive droite du Sénégal n'enregistrent guère un module spécifique plus élevé. Le Bakoye à Toukoto n'a qu'un module spécifique de 4,3 $l.s^{-1}.km^{-2}$. Celui-ci faiblit à Oualia et n'est plus que de 1,6 $l.s^{-1}.km^{-2}$. Entre ces deux stations, la superficie du Bakoye s'est accrue de 68 200 km^2. La diminution du module spécifique est alors de -63 %. Le Baoulé, quant à lui possède le module spécifique le plus faible du régime tropical pur. Celui-ci est estimé pour la période 1903-1993 à 0,92 $l.s^{-1}.km^{-2}$. La Kolimbiné qui caractérise le régime sahélien détient le module spécifique le plus faible des hauts bassins. Celui-ci est estimé à 0,19 $l.s^{-1}.km^{-2}$ à la station de Kabaté (période 1968-1993).

---

[14] M. Pardé, (1968) distingue 4 classes de modules spécifiques en milieu tropical humide :
- valeurs énormes pour un débit spécifique de + 100 $l.s^{-1}.km^{-2}$,
- valeurs élevées pour un débit spécifique compris entre 35 et 100 $l.s^{-1}.km^{-2}$,
- valeurs honorables pour un débit spécifique compris entre 10-15 et 30-35 $l.s^{-1}.km^{-2}$,
- valeurs faibles pour un débit spécifique inférieur à 5 $l.s^{-1}.km^{-2}$.

On peut donc retenir que sur les cours moyens, les modules spécifiques sont très faibles au rapport de la classification de M. Pardé (1968). Toutefois, si l'extension de la superficie des bassins-versants est le paramètre premier à expliquer cette faiblesse, d'autres facteurs ne peuvent en être exclus. Ce sont les vastes zones pseudo-endoréiques comme la Vallée du Serpent pour le Baoulé, les plaines du nord-est et les abords du Karakoro et de la Kolimbiné pour le Sénégal. La forte évaporation de ces régions favorise de surcroît la faiblesse des modules spécifiques.

2.3. La variabilité des modules interannuels

Les modules interannuels connaissent une fluctuation spatiale et temporelle sur l'ensemble des hauts bassins. Les variations spatiales, nous l'avons évoqué, se traduisent par une augmentation des modules bruts de l'amont à l'aval. Par contre, les variations temporelles sont beaucoup plus difficiles à cerner, puisque les modules annuels fluctuent d'une année à l'autre. Depuis 1903, les débits du Bafing-Sénégal ont varié dans le rapport de 1 à 3,6 à Dakka-Saïdou et de 1 à 6,3 à Bakel. Ce rapport est de 1 à 5,4 sur la même période pour la Gambie à Kédougou. La figure 104 présente la variation des modules annuels sur la période 1903-1993 ainsi que les moyennes mobiles sur cinq ans de la période d'observation. L'observation de la courbe de ces moyennes mobiles montre à toutes les stations une évolution en six périodes :

Tableau 57 : Paramètres statistiques et modules extrêmes à quelques stations des hauts bassins (période 1903-1993).

	Maximum Maximorum			Minimum Minimorum			I.V	R
Stations	Année	Q $m^3.s^{-1}$	$l.s^{-1}.km^{-2}$	Année	Q $m^3.s^{-1}$	$l.s^{-1}.km^{-2}$		
Bakel	1924	1353	6,20	1987	212,4	0,97	1140,6	6,3
Kayes	1936	950,9	6,04	1984	174,8	1,11	776,1	5,4
Dibia	1936	599,7	17,90	1984	128,9	3,84	470,8	4,6
Dakka-Saïdou	1924	419,2	26,7	1984	113,3	7,21	305,9	3,6
Oualia	1935	257,3	3,03	1987	19,6	0,23	237,7	13,1
Toukoto	1954	135	8,18	1983	9,7	0,58	125,3	13,9
Siramakana	1957	137,8	2,31	1979	0	-	137,8	-
Fadougou	1954	198,8	21,37	1984	18,9	2,03	179,9	10,5
Kidira	1935	338,3	11,70	1983	23,3	0,80	315	14,5
Kabaté	*1969*	*13,8*	*0,46*	*1983*	*1,23*	*0,041*	*12,57*	*11,21*
Kédougou	1955	192,5	25,4	1984	35,3	4,67	157,2	5,3
Gouloumbou	*1966*	*396*	*9,42*	*1983*	*66,4*	*1,57*	*329,6*	*5,9*

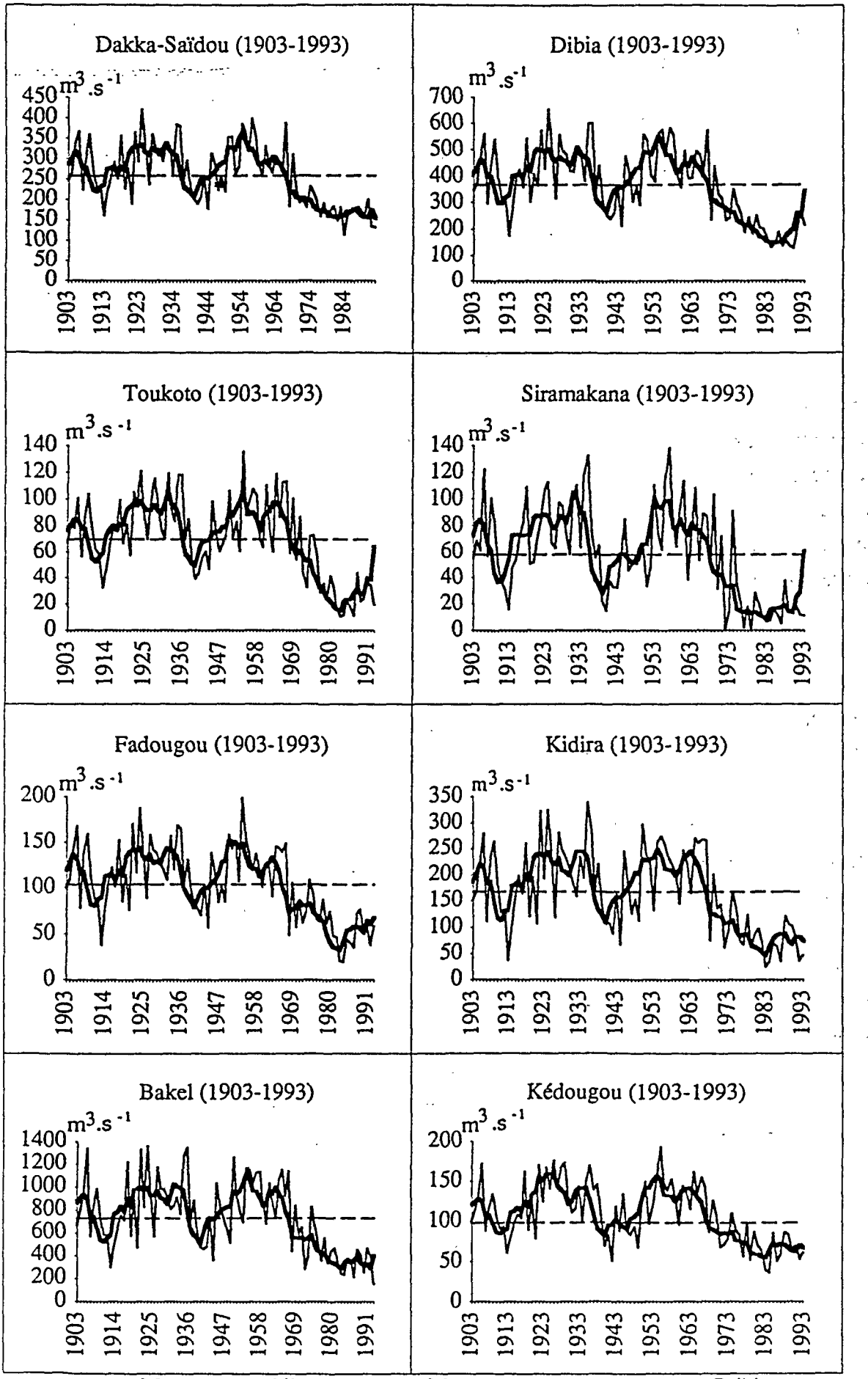


Figure 104 : Variation interannuelle et moyennes mobiles de l'écoulement des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

Trois périodes à fort écoulement sont comprises entre 1903-1910, 1915-1939 et 1951-1967. Elles sont séparées par des périodes déficitaires de 1910 à 1915, de 1940 à 1950, la dernière est continue depuis 1968. Cette variabilité est aussi mesurée à travers l'intervalle de variation donné par la différence entre les modules extrêmes de la période, et le coefficient R, obtenu par le rapport de ces valeurs extrêmes.

Les paramètres statistiques classiques comme le coefficient de variation, le coefficient d'irrégularité K_3 ainsi que les modules fréquentiels apportent des compléments sur la variabilité de modules interannuels.

Les valeurs caractéristiques des coefficients de variation aux différentes stations sont données dans le tableau 56. On constate que ces coefficients augmentent d'amont en aval des bassins. Il est de 0,28 à Dakka-Saïdou, première station du Bafing, atteint 0,36 à Dibia et est compris entre 0,40 et 0,41 de Kayes à Bakel. A la station de Kédougou sur le fleuve Gambie, le coefficient de variation est assez proche de celui de Kayes (0,39). Le coefficient le plus élevé est noté à la station de Siramakana sur le Baoulé (0,67). Il est suivi de celui de Toukoto (0,56). Les stations de Fadougou et de Kidira sur la Falémé enregistrent des coefficients de variation respectifs de 0,39 et 0,47. Cependant, ces coefficients sont dans l'ensemble faibles malgré la dispersion des valeurs annuelles autour des moyennes à chaque station (fig. 104).

L'analyse de ces valeurs extrêmes annuelles (tab. 57) traduit la même tendance de cette variabilité où les modules maximaux extrêmes se situent tous lors des deux grandes périodes à fort écoulement. Par contre, les modules minimaux extrêmes sont notés après 1968. Tout ceci confirme la grande variabilité au regard de l'intervalle de variation et du coefficient d'immodération R qui donnent partout des valeurs élevées.

Le tableau 58 présente les modules fréquentiels sur la période 1903-1993. Les périodes de retour sur 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans en période humide comme sèche sont ainsi retenues. Elles sont assorties du coefficient de variation ainsi que de l'indice K_3 d'irrégularité.

L'analyse de ce tableau montre qu'à l'exception de la station de Siramakana, exutoire du Baoulé, les modules ne s'annulent jamais. Par contre, ceux-ci peuvent être très faibles surtout en période sèche. Pour la récurrence centennale, le module le plus faible revient à la station de Toukoto sur le Bakoye avec 8,7 $m^3.s^{-1}$. La station de Bakel, exutoire du bassin amont du Sénégal, enregistre pour la même fréquence un module de 190,6 $m^3.s^{-1}$, alors que celui de Kédougou sur la Gambie est de 35,7 $m^3.s^{-1}$. Pour des récurrences plus proches (20 ans ou 5 ans) toujours en période sèche, on s'aperçoit que les modules des différentes stations demeurent encore faibles. Ceux-ci sont 302,7 et 468,3 $m^3.s^{-1}$ à Bakel et ne sont plus que 11,7 et 26,1 $m^3.s^{-1}$ à Siramakana.

En période humide en revanche, on se rend compte que plus le module est élevé, mieux il correspond à une récurrence lointaine. Les modules maximaux annuels des différentes stations ne reviennent ainsi qu'une année sur cent.

Tableau 58 : Débits moyens fréquentiels à huit stations des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie (période 1903-1993).

	Période sèche					Moy.	C.V	K_3	Période humide				
	0,01	0,02	0,05	0,10	0,20				0,01	0,02	0,05	0,10	0,20
Stations	100 ans	50 ans	20 ans	10 ans	5 ans				5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Bakel	190,6	232,7	302,7	372,7	468,3	737,3	0,43	3,1	978	1159,9	1329,4	1543,9	1702,4
Dibia	97,4	119,2	155,9	192,6	242,1	366	0,39	2,8	482,3	558,4	625,4	705,4	761,2
Dakka-Saïdou	120,7	129,4	145,9	164,1	190,2	255,7	0,28	2,1	317,5	354,6	385,8	421,4	445,2
Oualia	13,6	23,4	41,09	59,4	84,4	140,4	0,44	0,26	194,3	224,1	248,6	276	294,1
Toukoto	8,7	13,4	21,4	29,1	40,07	71,9	0,53	0,23	100,1	122,1	142,9	169,4	189,2
Siramakana	6,1	7,8	11,7	17	26,1	60,9	0,65	0,14	91,3	115,7	137,9	164,8	183,9
Kidira	25,3	34,6	52,2	71,6	99,2	167,9	0,45	3,79	232,8	271,6	304,1	341	365,8
Kédougou	35,7	38,7	45	52,6	64,3	98,9	0,39	0,34	130,6	152,1	170,8	192,6	207,5

Moy. = Moyenne de la période
C.V = Coefficient de Variation
K_3 = Coefficient d'irrégularité

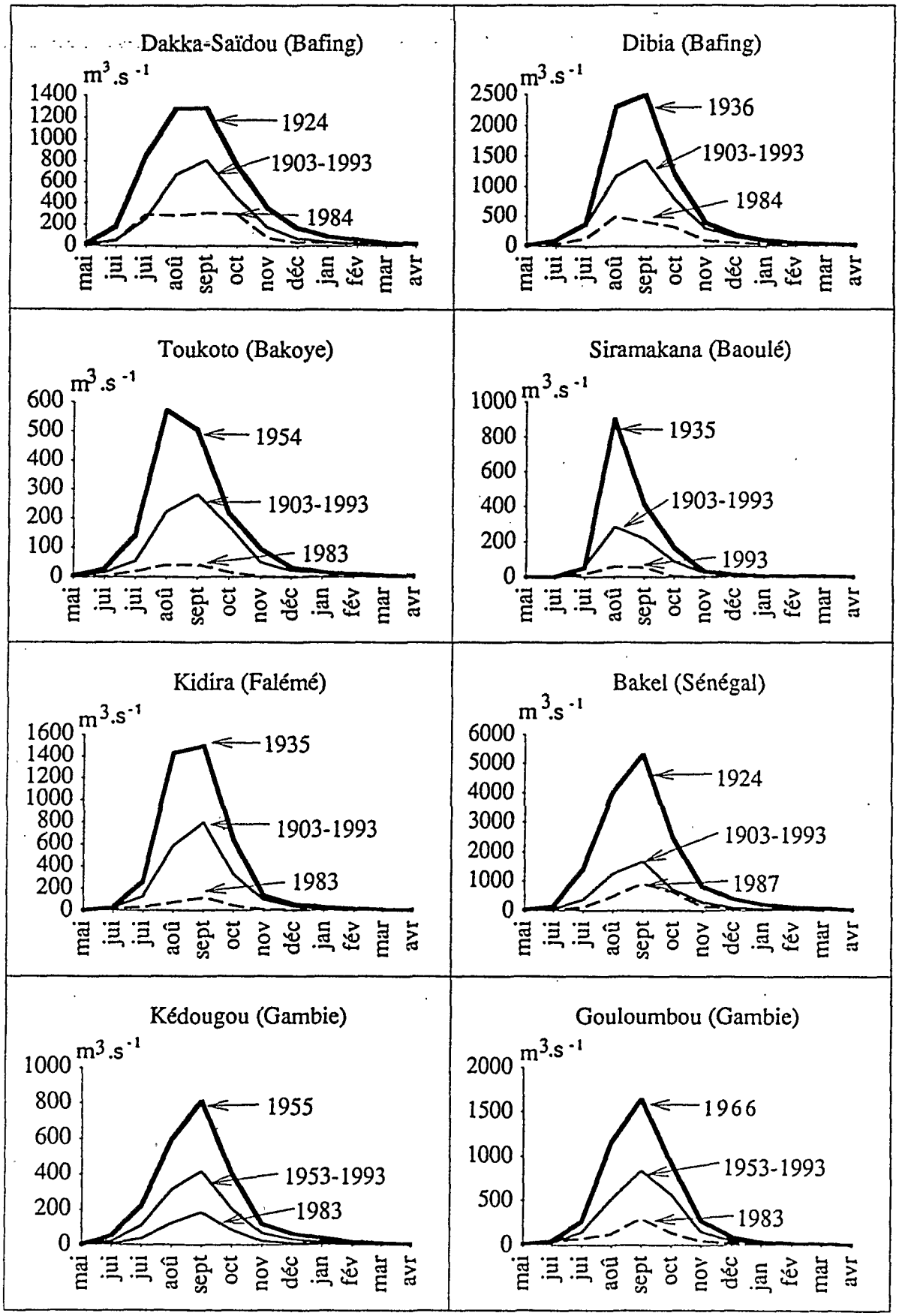


Figure 105 : Hydrogrammes d'années humide, moyenne et sèche à dix stations des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie.

Par contre dès que l'on se rapproche des récurrences proches, les débits annuels deviennent faibles (tab. 58). Cela traduit la grande irrégularité de l'écoulement des hauts bassins qu'indique par ailleurs l'indice K_3. Sur l'axe Bafing-Sénégal, l'index le plus faible revient à la station de Dakka-Saïdou (0,46). Il passe ensuite 2,8 à Dibia et est de 3,1 à Bakel. Pour le bassin amont de la Gambie, cet indice est 0,34 à Kédougou, alors qu'il n'est que de 3,77 à Oualia sur le Bakoye. Mais les indices de Toukoto (4,19) et de Siramakana (6,8) montrent assez nettement comment l'on passe d'un extrême à l'autre sur les affluents.

Les coefficients de variation augmentent eux aussi de l'amont vers l'aval. Sur le cours principal de l'axe Bafing-Sénégal, le coefficient de variation est de 0,28 à Dakka-Saïdou, il passe à 0,39 à Dibia, valeur similaire à Kédougou sur la Gambie et atteint 0,43 à Bakel. La station de Siramakana sur le Baoulé enregistre le coefficient de variation le plus élevé (0,65).

Les modules annuels connaissent donc dans les hauts bassins une variation tant spatiale (évolution des modules annuels, spécifiques et fréquentiels) que temporelle (fluctuation de la place du maximum mensuel). L'analyse des différents paramètres statistiques (coefficient de variation, indice d'irrégularité K_3 ainsi que l'indice du rapport R) confirme des fluctuations d'une année à l'autre. Cependant, ces variations interannuelles résultent des fluctuations saisonnières observées à travers les régimes hydrologiques.

La figure 105 présente les hydrogrammes des différentes stations à travers les années extrêmes humides moyennes et sèches. Les graphiques de cette figure montrent partout une même configuration de l'évolution de l'écoulement. Seules, les amplitudes varient en fonction des années humides, moyennes ou sèches. Les hydrogrammes de crues aux différentes stations sont monomodaux avec un seul épaulement en août-septembre, et une longue courbe de tarissement d'octobre à mai. Ces variations saisonnières et interannuelles sont d'autant plus importantes qu'elles déterminent les quantités d'eau écoulées chaque année et que nous quantifions.

3. LES BILANS HYDROLOGIQUES DES HAUTS BASSINS

Les bilans hydrologiques des hauts bassins sont associés aux différents domaines hydro-climatiques. Mais à l'intérieur de chaque domaine, des nuances sont décelables d'une station à l'autre. Cependant, par leur position géographique, les stations situées à l'exutoire rendent mieux compte des différentes caractéristiques de chaque bassin. L'analyse du bilan hydrologique moyen, retient comme période la référence 1903-1993. Puis nous calculons le bilan de la période récente 1961-1993 pour mieux évaluer le comportement hydrologique des cours d'eau.

3.1. Les termes du bilan moyen

Le bilan moyen annuel s'exprime sous la forme d'une équation :

$$Q\ (mm) = P\ (mm) - E \pm \Delta^r$$

Dans cette équation,

P (mm) représente les précipitations moyennes reçues par le bassin versant,

Q (mm) est la lame d'eau écoulée par le bassin,

E (mm) représente la lame d'eau retournée à l'atmosphère ou déficit d'écoulement,

Δr est la différence entre l'eau mis en réserve par les nappes et celle restituée à l'atmosphère. Elle représente donc la variation de la réserve. Il est généralement admis, lorsque la série d'observations est longue ou que le bassin versant est grand, que cette réserve tend à s'équilibrer et s'annule au bout du compte. Ainsi, on ne tient plus compte de Δr au bout de 15 ans. Rappelons aussi que Q (mm) ou lame d'eau écoulée est obtenue par le rapport :

$$\mathbf{Q\ (mm) = Q\ m^3.s^{-1} \times t\ (s) / A\ (km^2) \times 1000}$$

Dans ce rapport,

Q $m^3.s^{-1}$ est le débit moyen annuel,

t(s) représente le nombre de secondes de l'année pour un bilan d'un an avec :

- Pour une année de 365 jours, t (s) = 31 536 000 secondes,
- Pour une année de 366 jours, t (s) = 31 622 000 secondes,

A (km^2) est la superficie du bassin versant.

Cette équation du bilan moyen est assortie de certains paramètres hydrologiques qui permettent de mieux connaître la nature de l'abondance moyenne. Ce sont :

- Le coefficient d'écoulement (C. E.) ou quotient d'écoulement qui traduit les aptitudes d'un cours d'eau à évacuer l'eau fournie par les précipitations. Il est exprimé par le rapport :

$$\mathbf{C.\ E. = Q\ (mm) \times 100/P\ (mm)}$$

Le coefficient d'écoulement varie ainsi de 0 à 100 et permet de classer les cours d'eau selon leur appartenance à une zone aride, ou humide.

- L'indice d'écoulement (V $m^3\ an^{-1}$) qui donne le volume moyen écoulé par un cours d'eau et sa disponibilité en eau de surface est obtenu suivant l'expression :

$$\mathbf{V\ m^3\ an^{-1} = Q\ m^3.s^{-1} \times t(s)}$$

où Q $m^3.s^{-1}$ représente le débit moyen,

et t (s) est le multiplicateur de débit.

- Le débit spécifique (Ds) qui s'exprime en $l.s^{-1}.km^{-2}$. Il est donné par le rapport :

$$\mathbf{Ds = Q\ m^3.s^{-1} \times 1000 / A\ (km^2)}$$

Ces différents paramètres nous permettent de quantifier pour chaque affluent son bilan moyen sur les périodes 1903-1993 et 1961-1993.

A travers ces différents paramètres, le coefficient d'écoulement (C.E.) qui détermine les capacités de ruissellement de chaque bassin ainsi que le déficit d'écoulement (DE) qui traduit l'évapotranspiration réelle (ETR) sont les plus fondamentaux. La non extension de la série de Gouloumbou jusqu'à l'année 1903 nous amène à analyser son bilan sur la période 1953-1993.

3.2. Le bilan moyen du haut bassin du Sénégal

Le bilan moyen du bassin amont du Sénégal est d'abord évoqué à la station de Dakka-Saïdou pour quantifier les apports du domaine guinéen. Puis nous calculons pour chaque affluent principal le bilan à son exutoire. La station de Bakel qui enregistre tous les apports des hauts bassins réalise le bilan d'ensemble et rend compte des réalités hydrologiques sur l'ensemble du bassin. Toutefois, l'hétérogénéité entre les séries hydrométriques, beaucoup plus longues et celles pluviométriques moins étendues rend difficile une évaluation rigoureuse du bilan moyen.

3.2.1. Le bilan moyen du Bafing à Dakka-Saïdou

A la station de Dakka-Saïdou, le Bafing sort du domaine guinéen. Les précipitations y sont abondantes, les pentes fortes, la végétation dense et les terrains quasi-imperméables. En plus, le Bafing est renforcé par la Téné qui bénéficie des mêmes conditions.

Toutes ces caractéristiques confèrent au cours d'eau à la dite station des allures d'un régime tropical humide de type guinéen. Les valeurs caractéristiques et les termes du bilan à Dakka-Saïdou sont mentionnées dans le tableau 59.

Tableau 59 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Dakka-Saïdou

Superficie B V (km^2)	Débits Q $m^3.s^{-1}$	Ecart type	C.V	Termes du bilan				D s ($l.s^{-1}.km^{-2}$)
				P (mm)	E (mm)	D E (mm)	C E %	
15 700	257	73,2	0,28	1673	516,2	1156,7	31	16,3

Le débit moyen, avec 257 $m^3.s^{-1}$ est donné sur la période 1903-1993. Les précipitations estimées sur la période 1923-1993 sont de 1673 mm. Ceci détermine une lame d'eau écoulée de 516,2 mm. Ceci est normal vu l'influence des facteurs cités plus haut. Le déficit d'écoulement 1156,7 mm s'explique par la densité de la végétation qui impose une forte évapotranspiration de plus de 69 %.

Le coefficient d'écoulement (C.E.), le plus important des hauts bassins est de 31 %, valeur acceptable en domaine guinéen, en raison de l'importance du relief. Le débit spécifique, est aussi le plus fort des hauts bassins avec 16,3 $l.s^{-1}.km^{-2}$.

3.2.2. Le bilan moyen du Baoulé à Siramakana

La station de Siramakana constitue l'exutoire du Baoulé peu avant sa jonction avec le Bakoye. A cette station, le bassin du Baoulé roule un débit moyen de 59,3 $m^3.s^{-1}$ et est vaste de 59 500 km^2 (tab. 60). La lame d'eau écoulée avec 31,4 mm représente la plus faible des hauts bassins. Cette faiblesse est due à la baisse des précipitations par rapport au domaine guinéen. En outre ce bassin enregistre de vastes régions d'endoréisme notamment la Vallée du Serpent. Ces différentes connotations traduisent un déficit d'écoulement de 1111,4 mm. Mais, ici, plus qu'ailleurs, ce déficit est lié à l'infiltration et à l'évaporation (perméabilité du sable et endoréisme oblige). Le quotient d'écoulement est très faible (2,7), classant le Baoulé parmi les cours d'eau à caractère aride (M. Pardé, 1968). Le débit spécifique avec 0,99 $l.s^{-1}.km^{-2}$ confirme l'indigence de l'écoulement du Baoulé (M. Pardé, 1968).

Tableau 60 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Siramakana

Superficie B V (km^2)	Débits Q $m^3.s^{-1}$	Ecart type	C.V	Termes du bilan				D s ($l.s^{-1}.km^{-2}$)
				P (mm)	E (mm)	D E(mm)	C E %	
59 500	59,3	39,8	0,6	1142,8	31,4	1111,4	2,7	0,99

3.2.3. Le bilan moyen du Bakoye à Toukoto

Toukoto, est la dernière station de mesure du bras principal du Bakoye avant qu'il ne reçoive sur sa droite son principal affluent le Baoulé. Les valeurs caractéristiques et le bilan moyen à cette station sont représentés dans le tableau 61.

A Toukoto, le Bakoye a un débit moyen annuel de 71,8$m^3.s^{-1}$. La lame d'eau écoulée est de 137,2 mm soit plus du quadruple du Baoulé. Le déficit d'écoulement (DE) est légèrement moins élevé que celui du bassin voisin avec 1005,6 mm.

Tableau 61 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Toukoto

Superficie B V (km^2)	Débits Q $m^3.s^{-1}$	Ecart type	C.V	Termes du bilan				D s ($l.s^{-1}.km^{-2}$)
				P (mm)	E (mm)	D E(mm)	C.E. %	
16 500	71,8	40,6	0,5	1142,8	137,2	1005,6	12	4,3

Mais dans sa traversée soudanienne, le Bakoye est déjà soumis à des indigences parfois vives, ce qui explique les valeurs atteintes par le déficit. Le coefficient d'écoulement (C.E.) est moyen avec 12 %, ce qui traduit la tendance à la platitude dans ce bassin, surtout dans son cours moyen.

3.2.4. Le bilan moyen de la Falémé à Kidira

La station de Kidira se situe peu avant la confluence de la Falémé avec le Sénégal. Le tableau 62 indique le bilan moyen d'ensemble de ce bassin. A Kidira, la Falémé débite sur la période de référence 165,9 $m^3.s^{-1}$ soit 23 % des apports au fleuve Sénégal.

Tableau 62 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Kidira

Superficie B V. (km^2)	Débits Q $m^3.s^{-1}$	Ecart type	C.V	Termes du bilan				D s ($l.s^{-1}.km^{-2}$)
				P (mm)	E (mm)	D.E(mm)	C.E %	
28 900	165,9	78,7	0,4	1142,8	181	961,8	15,8	5,7

La lame d'eau écoulée (181 mm) est la seconde du bassin après celle du Bafing. Ceci est normal vu que le bassin est à cheval sur trois domaines climatiques dont le guinéen qui lui fournit une large partie de son écoulement. Le déficit d'écoulement de 961,8 mm s'explique par la diversité climatique qui réalise une sorte de compensation mutuelle. Le coefficient d'écoulement est de 15,8 % et situe le cours d'eau parmi ceux à écoulement moyen. Le débit spécifique confirme cette caractéristique puisqu'il est de 5,7 $l.s^{-1}.km^{-2}$.

3.2.5. Le Sénégal à Bakel

L'extension géographique du haut bassin du fleuve Sénégal est limitée à la station de Bakel, qui est son exutoire avant l'entrée du fleuve dans le bassin inférieur. A cette station, le Sénégal possède un bassin-versant de 218 000 km^2. Il a traversé les domaines climatiques guinéen, sud-soudanien, nord-soudanien et entame le domaine sahélien.

Le bilan moyen à cette station retrace donc l'essentiel de toutes ces conditions générales auxquelles l'écoulement est soumis. Le tableau 63 nous donne les caractéristiques pour la période de référence 1903-1993.

Tableau 63 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Bakel.

Superficie B V. (km^2)	Débits Q $m^3.s^{-1}$	Ecart type	C.V	Termes du bilan				D s ($l.s^{-1}.km^{-2}$)
				P (mm)	E (mm)	D.E(mm)	C.E %	
218 000	726,5	303,4	0,41	835,5	105,1	730,4	12,5	3,3

A Bakel, le fleuve Sénégal dispose d'un débit moyen de 726,5 $m^3.s^{-1}$. Les précipitations évaluées à cette station sont de 835,5 mm. Le bassin enregistre dans cette zone une partie du domaine sahélien, notamment dans sa frange nord-est. La lame d'eau écoulée pour la période est de 105,1 mm. Elle représente la troisième par son importance après Dakka-Saïdou et Kidira, mais se classe loin derrière la lame d'eau de la Gambie à Kédougou. En outre, le haut bassin du Sénégal

compte de nombreuses zones d'endoréisme comme la partie nord-est et la Vallée du Serpent ce qui réduit fortement l'écoulement arrivant à Bakel. Le déficit d'écoulement est de 730,4 mm, ce qui représente une évapotranspiration réelle de 87 %. Cette valeur est légèrement inférieure à celle de Toukoto (88 %) et de Siramakana (97 %).
Cependant, elle est supérieure à l'ETR de Kidira (84 %), de Kédougou (71 %) et se trouve très au-dessus de celle de Dakka-Saïdou (69 %). Cette situation est logique puisqu'aucune de ces dernières stations, ne compte un domaine sahélien.

Le coefficient d'écoulement qui reflète ici l'ensemble des conditions de l'écoulement du haut bassin est de 12,5 %. Bien évidemment, c'est le débit spécifique qui renseigne sur les différentes nuances, et indique une valeur faible (3,3 $l.s^{-1}.km^{-2}$).

Mais à Bakel, nous le rappelons, il s'agit du bilan moyen de l'ensemble du haut bassin du fleuve Sénégal.

3.3. Le bilan moyen du haut bassin de la Gambie

Le bilan moyen du bassin amont de la Gambie est estimé aux stations de Kédougou et de Gouloumbou. En raison de l'inégalité des séries entre ces deux stations, nous présentons successivement le bilan moyen à la station de Kédougou sur la période 1903-1993 ; tandis que celui de Gouloumbou est évoqué pour la période 1953-1993. Bien sûr, les valeurs de ces deux périodes ne peuvent appeler à une comparaison quelconque. Cependant, elles permettent d'entrevoir les conditions générales avant l'évolution charnière des années 1960.

3.3.1. Le bilan moyen de la Gambie à Kédougou

La station de Kédougou constitue le principal point de mesure des eaux de la Gambie à sa sortie du domaine guinéen. Le tableau 64 renseigne sur les valeurs caractéristiques et les termes du bilan à cette station.

A Kédougou, le bassin de la Gambie est vaste de 7550 km^2 et englobe les domaines guinéen et sud-soudanien. Les précipitations estimées à cette station représentent 1398,4 mm et la Gambie roule ici un débit de 98 $m^3.s^{-1}$.

Tableau 64 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Kédougou.

Superficie B V (km^2)	Débits Q $m^3.s^{-1}$	Ecart type	C.V.	Termes du bilan				D s ($l.s^{-1}.km^{-2}$)
				P (mm)	E (mm)	D E (mm)	C E %	
7550	98	38,6	0,39	1398,4	409,3	989,1	29,2	12,9

Cela détermine une lame d'eau écoulée de 409,3 mm. Par rapport à l'ensemble des hauts bassins, cette lame d'eau se situe juste derrière celle du Bafing à Dakka-Saïdou. Cette lame écoulée

à Kédougou est logique vu la superficie du bassin, mais surtout par rapport au relief élevé et aux valeurs importantes qu'enregistre la pluviométrie.

La différence entre lame d'eau reçue et lame d'eau écoulée détermine un déficit d'écoulement de 989,1 mm. Cette valeur est légèrement inférieure à celle de Dakka-Saïdou (1156,7 mm), mais à Kédougou, le cours de la Gambie se trouve déjà en domaine soudanien. Les sols sont encore peu perméables pour justifier des aquifères importants ce qui implique que la valeur du déficit correspond à la tranche d'eau évaporée soit 71 %. Toutefois, cette valeur est largement en deçà de l'évapotranspiration calculée par la formule de Turc (1922 mm) ou de Penman (1561 mm) selon H. M. Lô, (1984).

Le quotient d'écoulement de la période est de 29,2 % juste après celui de Dakka-Saïdou et montre l'abondance de la Gambie à cette station. Le débit spécifique est de 12,9 l/s/km² et confirme les principales caractéristiques du cours d'eau.

3.3.2. Le bilan moyen de la Gambie à Gouloumbou

La station de Gouloumbou se trouve juste avant l'entrée du fleuve Gambie dans le bassin estuairien. C'est donc cette station qui mesure l'ensemble des réactions du bassin amont de la Gambie soit 42 000 km². Le tableau 65 présente les valeurs caractéristiques ainsi que le terme du bilan moyen sur la période 1953-1993.

Tableau 65 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Gouloumbou

Superficie B V. (km²)	Débits Q $m^3.s^{-1}$	Ecart type	C.V.	Termes du bilan				D s ($l.s^{-1}.km^{-2}$)
				P (mm)	E (mm)	D.E. (mm)	C.E. %	
42 000	210	104	0,49	1154,2	157,7	996,5	14	5

Pour la dite période, le module de la station est 210 $m^3.s^{-1}$, alors que les précipitations sont estimées à 1154,2 mm, ce qui détermine une lame d'eau écoulée de 157,7 mm. Le déficit d'écoulement est 996,5 mm. Gouloumbou se trouve en domaine soudanien. Les pertes par évaporation physique du fait des fortes températures l'emportent sur celles de l'évapotranspiration. En plus, l'existence d'une structure géologique (fig. 3) susceptible de favoriser l'infiltration renforce les pertes de l'écoulement. Le coefficient d'écoulement qui traduit l'ensemble des conditions du bassin est de 14 %, alors que le débit spécifique se situe à 5 $l.s^{-1}.km^{-2}$.

L'analyse du bilan moyen montre les disponibilités hydrologiques de chaque bassin-versant. Ainsi, sur la période de référence 1903-1993, ce qui se traduit le mieux sur ces bilans reste la variabilité. Celle-ci est spatiale, et affecte d'amont en aval les lames d'eau écoulée qui se réduisent, conformément aux précipitations. Mais cette variabilité spatiale se retrouve aussi dans les valeurs des quotients d'écoulement au fur et à mesure que le relief s'adoucit, et dans les débits

spécifiques lorsque les bassins-versant s'agrandissent. Les coefficients de variation qui indiquent ces fluctuations autour de la moyenne croissent selon un axe sud-nord. Cependant, le bilan moyen est aussi sujet à des variations temporelles comme les modules annuels qui les déterminent entre autres.

3.4. La variabilité du bilan moyen dans les hauts bassins

- La variabilité du bilan moyen est étudiée à travers les coefficient d'hydraulicités de chaque station. Nous analysons à sa suite les bilans décennaux afin de mieux cerner cette variabilité sur une échelle de dix ans. Enfin nous faisons les bilans de la période 1961-1993 afin de voir le comportement actuel des cours d'eau.

3.4.1. L'hydraulicité des hauts bassins

L'hydraulicité est obtenue par le rapport du module d'une année à celui de la période de référence. La figure 106 présente, sous forme de courbes, l'hydraulicité en pourcentage de la période 1903-1993 à dix stations des hauts bassins. Les coefficients de la station de Gouloumbou ont été calculés sur la période 1953-1993.

L'analyse de ces courbes confirme les observations déjà faites sur la variabilité des modules annuels à savoir : des périodes à fortes hydrauliciens entrecoupées par des années à hydrauliciens faibles. On retient ainsi :

- Entre 1903 et 1910, l'hydraulicité est partout supérieure à la moyenne à l'exception de l'année 1907 marquée par une baisse à toutes les stations. A cette période, succède une hydraulicité faible de 1910 à 1915. Les coefficients d'hydraulicités sur neuf stations retenues sont alors tous en dessous de la moyenne (fig. 106).
- De 1915 à 1930, l'évolution de l'hydraulicité est supérieure à la normale. Mais celle-ci retombe dans une phase de pénurie entre 1940 et 1950.
- A partir de 1951, l'hydraulicité connaît à nouveau un regain d'importance, mais moins fort que celui de la période 1915-1930. Néanmoins, cette tendance se maintient jusqu'en 1967. Au delà de cette année, l'évolution générale à toutes les stations est marquée par une baisse continue. Les rares années de rémission comme 1974 qui voit de nouveau l'hydraulicité revenir à la normale n'y change rien. Le creux est atteint en 1983-1984, année durant laquelle la plupart des stations enregistrent leur coefficient d'hydraulicité le plus faible.

Mais si les coefficients d'hydraulicités montrent la variabilité des bilans moyens, ils révèlent aussi à travers les fluctuations interannuelles l'existence de périodes d'abondances séparées par des années de pénurie. C'est à travers la continuité de ces années de pénurie depuis 1968, que nous étudions l'évolution de la période récente.

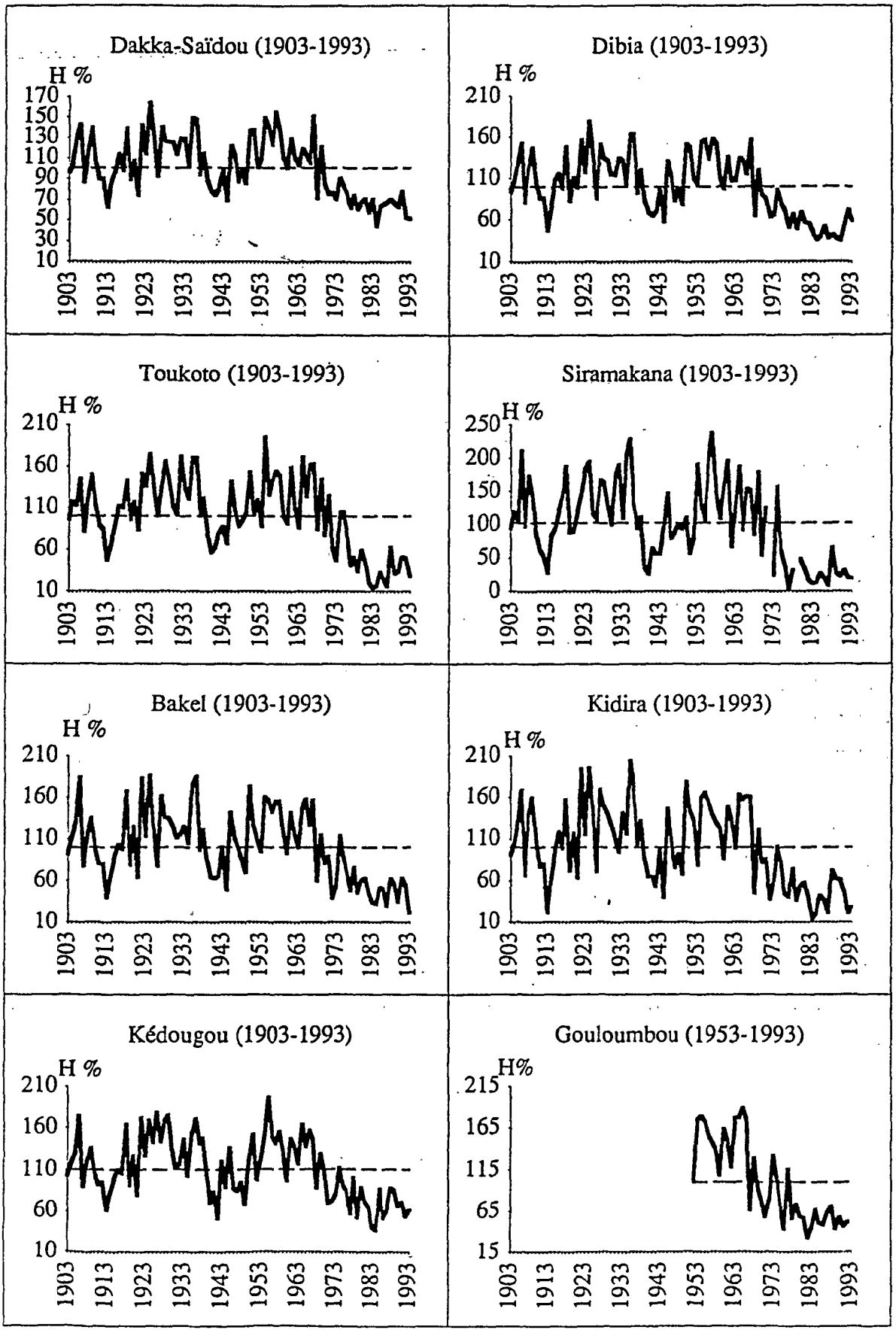


Figure 106 : Evolution de l'hydraulicité (%) à huit stations des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

3.4.2. Les bilans décennaux des hauts bassins.

Les bilans décennaux des hauts bassins sont étudiés à partir de la période 1931-1990 afin de mieux faire correspondre l'écoulement des hauts bassins avec la pluviométrie décennale.

3.3.2.1. La période 1931-1940

Les valeurs caractéristiques de cette période sont données dans le tableau 66. On remarque d'emblée que le débit moyen décennal est assez élevé dans toutes les stations.

Il varie de 857 $m^3.s^{-1}$ à Bakel, exutoire du haut bassin du Sénégal, à 75,7 $m^3.s^{-1}$ à Siramakana, exutoire du Baoulé. Ces forts débits s'expliquent par la pluviométrie satisfaisante de la décennie où les modules des différentes stations sont supérieurs à 1100 mm. Il en résulte une forte lame d'eau écoulée.

Celle-ci est de 590,5 et 520 mm, en domaine tropical de transition, respectivement à Dakka-Saïdou et Kédougou. Elle varie de 222,2 mm à Kidira à 40,1 mm à Siramakana en passant par 162 et 123,9 mm respectivement à Toukoto et Bakel pour le régime tropical pur.

Les déficits d'écoulement sont moins importants puisqu'ils n'atteignent pas 1200 mm alors que le coefficient d'écoulement aux différentes stations connaît des valeurs supérieures à la moyenne 1903-1993.

En somme, on peut retenir que la période 1931-1940 est marquée par un écoulement important comme le montrent les différents indicateurs du bilan. Cette situation est liée à une pluviométrie importante, confirmée en partie par une précédente décennie à écoulement important.

Tableau 66 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan de la période 1931-1940

Stations	Superficie B V (km^2)	Débits Q $m^3.s^{-1}$	C.V.	Termes du bilan				D s $l.s^{-1}.km^{-2}$
				P (mm)	E (mm)	D E (mm)	C E %	
Dakka-Saïdou	15 700	294	0,20	1786,6	590,5	1196,1	33	18,7
Siramakana	59 500	75,7	0,49	1190,6	40,1	1150,5	3,3	1,2
Toukoto	16 500	84,8	0,30	1257	162	1095	13	5,1
Kidira	28 900	203,7	0,32	1276,3	222,2	1054,1	17,4	7
Bakel	218 000	857	0,29	1181,9	123,9	1058	10,4	4
Kédougou	7550	124,5	0,34	1510,1	520	990,1	34,4	16,4

Les débits décennaux des différentes stations pour la période 1921-1930 (294 $m^3.s^{-1}$ à Dakka-Saïdou ; 82,7 $m^3.s^{-1}$ à Siramakana ; 92,5 $m^{3\,s-1}$ à Toukoto ; 228 $m^3.s^{-1}$ à Kidira ; 949 $m^3.s^{-1}$

à Bakel et 146,1 $m^3.s^{-1}$ à Kédougou) ont favorisé sans doute pour la décennie 1931-1940 une réserve susceptible de redonner un écoulement fort.

3.4.2.2. La période 1941-1950

Cette période est marquée par une baisse de l'écoulement des hauts bassins. Le tableau 67 montre partout des débits décennaux inférieurs à ceux de la période 1931-1940. La lame d'eau écoulée ainsi que le coefficient d'écoulement indiquent aussi une abondance moindre par rapport à la période précédente (tab. 66). En fait, cette période marque la première phase d'une baisse décennale de l'écoulement jamais encore enregistrée depuis le début des mesures. Cette baisse s'effectue parallèlement à celle des totaux pluviométriques décennaux recueillis dans les différentes stations.

Tableau 67: Valeurs caractéristiques et termes du bilan de la période 1941-1950

Stations	Superficie B V. (km^2)	Débits Q $m^3.s^{-1}$	C.V.	Termes du bilan				D s $l.s^{-1}.km^{-2}$
				P (mm)	E (mm)	D.E. (mm)	C.E %	
Dakka-Saïdou	15 700	247	0,21	1653	496,1	1156,9	30	15,7
Siramakana	59 500	51,1	0,29	1051	27	1024	3	0,8
Toukoto	16 500	67,9	0,28	1017	129,7	887,3	12,7	4,1
Kidira	28 900	154	0,43	1233,5	168	1065,5	13,6	5,3
Bakel	218 000	696	0,37	1095,7	100,6	995,1	9,1	3,1
Kédougou	7550	91,6	0,25	1340,2	382,6	957,6	28,5	12,1

3.4.2.3. La période 1951-1960

Elle est marquée par une reprise de l'abondance fluviale après la pénurie observée pour la décennie 1941-1950. A l'exception de la station de Kidira dont le maximum décennal se situe lors de la période 1921-1930, toutes les autres stations enregistrent au cours de cette période leur débit moyen décennal extrême. La lame d'eau écoulée ainsi que le coefficient qui détermine son abondance enregistrent eux aussi des valeurs élevées. Pour le régime tropical de transition, la lame d'eau écoulée est ainsi de 650,8 mm à Dakka-Saïdou et de 570,5 mm à Kédougou.

Les coefficients d'écoulement sont de 34,7 % et 36,3 % respectivement à Dakka-Saïdou et Kédougou. Les débits spécifiques à ces deux stations avec 20,6 $l.s^{-1}.km^{-2}$ à Dakka-Saïdou et 18 $l.s^{-1}.km^{-2}$ à Kédougou sont ainsi honorables.

En régime tropical pur, les indicateurs de l'abondance présentent aussi des valeurs en hausse. La lame d'eau écoulée est de 43,5 mm à Siramakana, elle passe à 137,4 mm à Bakel. Elle est estimée à 167,6 mm à Toukoto et atteint 237,5 mm à Kidira sur la Falémé.

Tableau 68 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan de la période 1951-1960

Stations	Superficie B V. (km²)	Débits Q $m^3.s^{-1}$	C.V.	Termes du bilan P (mm)	E (mm)	D.E (mm)	C.E %	D s $l.s^{-1}.km^{-2}$
Dakka-Saïdou	15 700	324	0,15	1875,4	650,8	1224,6	34,7	20,6
Siramakana	59 500	82,2	0,37	1155,3	43,5	1111,8	3,7	1,3
Toukoto	16 500	87,7	0,25	1306	167,6	1138,4	12,8	5,3
Kidira	28 900	217,7	0,20	1356,2	237,5	1118,7	19,3	7,5
Bakel	218 000	949,1	0,19	1228,7	137,4	1091,3	11,1	4,3
Kédougou	7550	136,6	0,20	1567,6	570,5	997,1	36,3	18

Les coefficients d'écoulement connaissent une franche amélioration par rapport à la période 1941-1950 tandis que les débits spécifiques à l'exception de Siramakana ne sont pas considérés comme faibles. Toutefois, cette abondance de l'écoulement des hauts bassins pour cette période s'accompagne d'une pluviométrique exceptionnelle.

3.4.2.4. La période 1961-1970

La période d'abondance fluviale notée au cours de la décennie 1951-1960 s'estompe progressivement au cours de cette période.

Tableau 69 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan de la période 1961-1970

Stations	Superficie BV (km²)	Débit Q $m^3.s^{-1}$	C.V .	Termes du bilan P (mm)	E (mm)	D E(mm)	C E %	D s $l.s^{-1}.km^{-2}$
Dakka-Saïdou	15 700	283	0,19	1736	568,4	1167,6	32,7	18
Siramakana	59 500	74,6	0,38	1066,4	39,5	1026,9	3,7	1,2
Toukoto	16 500	111,6	0,68	1195,4	213,3	982,1	17,8	6,7
Kidira	28 900	210	0,30	1262	229,1	1032,9	18,1	7,2
Bakel	218 000	870,1	0,25	868,4	125,8	742,6	14,4	4
Kédougou	7550	130,1	0,21	1509,4	543,4	966	36	17,2
Gouloumbou	42 000	301	0,27	1204,9	226	978,9	18,7	7,1

Certes, cette baisse n'est pas brutale comme le montre le tableau 69, mais les valeurs obtenues sont toutes en dessous de celles observées pour la période précédente. Les lames d'eau écoulées aux différentes stations, les coefficients d'écoulement et les débits spécifiques accusent tous une tendance à la baisse. Cette baisse progressive suppose que l'écoulement important de la décennie 1951-1960 a pu constituer une réserve assez importante, permettant de soutenir les déficits de cette dernière période.

3.4.2.5. La période 1971-1980

L'écoulement de cette période est fortement réduit à toutes les stations. Par rapport à la période 1951-1960, la plus abondante des décennies, les débits diminuent presque de moitié. Les lames d'eaux écoulées se réduisent considérablement. En régime de transition, elle dépassent à peine 300 mm tandis qu'en régime tropical pur, seule la station de Gouloumbou enregistre plus de 120 mm.

Tableau 70 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan de la période 1971-1980

Stations	Superficie B V. (km^2)	Débits Q $m^3.s^{-1}$	C.V.	Termes du bilan				D s ($l.s^{-1}.km^{-2}$)
				P (mm)	E (mm)	D E(mm)	CE %	
Dakka-Saïdou	15 700	188	0,12	1506,3	377,6	1128,7	25	11,9
Siramakana	59 500	28,3	1	958	15	943	1,5	0,4
Toukoto	16 500	48,9	0,41	1010,8	93,4	917,4	9,2	2,9
Kidira	28 900	100,7	0,36	1067,9	109,8	958,1	10,2	3,4
Bakel	218 000	498,1	0,32	902	72	830	7,9	2,2
Kédougou	7550	78,6	0,22	1336,8	328,3	1008,5	24,5	10,4
Gouloumbou	42 000	168,8	0,33	1059,5	126,7	932,8	11,9	4

Les coefficients d'écoulement s'amenuisent eux aussi alors que les débits spécifiques situent les stations du régime de transition au seuil des valeurs honorables alors que celles du régime tropical pur ont toutes des valeurs faibles.

Cette baisse prononcée de l'écoulement tient d'une part à la forte diminution pluviométrique de la période, durant laquelle fut noté le premier paroxysme de la sécheresse (1972). D'autre part, la tendance à la baisse déjà notée lors de la décennie précédente a entamé le potentiel de réserve des différents fleuves, ce qui accentue la baisse lors de la période 1971-1980.

3.4.2.6. La période 1981-1990

Elle est marquée par une forte réduction de l'écoulement fluvial des hauts bassins. Les débits des différents fleuves atteignent au cours de cette décennie leur plus bas niveau. Cela se ressent sur la lame d'eau écoulée qui devient pratiquement dérisoire sur l'ensemble du bassin.

Ainsi, la station de Dakka-Saïdou en régime tropical de transition n'a écoulé durant cette période que 327,4 mm, soit un peu moins de 50 % de la lame d'eau écoulée lors de la décennie 1951-1960. En même temps, la lame d'eau écoulée à la station de Siramakana n'est plus évaluée qu'à 7,2 mm. Les coefficients d'écoulement, les plus faibles de toutes les périodes dépassent à peine 20 % en régime de transition tandis qu'ils varient entre 0,8 et 6,5 % en régime tropical pur (tab. 70).

Les débits spécifiques n'enregistrent plus qu'un seul module honorable (Dakka-Saïdou) alors que toutes les stations du régime tropical pur ont des valeurs dites faibles (en dessous de 5 l/s/km²). Le bilan moyen de la période 1981-1990 montre ainsi une très forte baisse de l'écoulement des hauts bassins. Mais l'intérêt de ce bilan se ressent à travers la relation entre les précipitations reçues et l'écoulement enregistré. La forte péjoration pluviométrique de cette décennie affecte vivement l'écoulement des différents fleuves qui enregistrent au cours de ces années leurs minimums minimorums.

Tableau 71 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan de la période 1981-1990

Stations	Superficie B V (km²)	Débits Q $m^3.s^{-1}$	C.V	Termes du bilan				D s ($l.s^{-1}.km^{-2}$)
				P (mm)	E (mm)	D E(mm)	C.E %	
Dakka-Saïdou	15 700	163	0,12	1418,1	327,4	1090,7	23	10,3
Siramakana	59 500	13,7	0,64	864,5	7,2	857,3	0,8	0,2
Toukoto	16 500	17,8	0,57	958,6	34	924,6	3,5	1
Kidira	28 900	61,5	0,57	1029,7	67,1	962,6	6,5	2,1
Bakel	218 000	331	0,26	802	48	754	6	1,5
Kédougou	7550	63,1	0,27	1246,1	263,5	982,6	21,1	8,3
Gouloumbou	42 000	96	0,21	957,2	72	885,2	7,5	2,2

Cependant, l'analyse des bilans décennaux nous permet de retenir certaines considérations sur la variabilité des bilans moyens :

- Quelle que soit la situation de la période (abondante ou déficitaire), le régime de transition reçoit et écoule toujours la plus forte lame des hauts bassins. Mais, en comparant les deux nuances de ce régime (Dakka-Saïdou et Kédougou), on se rend compte que cette dernière station a un coefficient d'écoulement plus élevé lors des périodes d'abondance. C'est donc, le haut bassin de la Gambie qui présente les meilleurs aptitudes à l'écoulement que celles du bassin supérieur du Sénégal.

- La comparaison des lames d'eaux écoulées aux stations de Bakel et de Gouloumbou montre qu'en période déficitaire ou excédentaire, c'est la seconde station nommée qui totalise toujours la plus forte lame d'eau. Ainsi, si les principaux cours d'eau des deux bassins prennent naissance dans le même domaine hydroclimatique (guinéen), c'est cependant le bassin de la Gambie par sa lame d'eau à l'exutoire et son coefficient d'écoulement lors des périodes d'optimum qui traduit le mieux l'abondance.

3.4.3. Les bilans moyens de la période récente (1961-1993)

Ils sont présentés sur le tableau 72 pour les exutoires des différents affluents ainsi qu'à Bakel et Gouloumbou qui contrôlent l'ensemble des hauts bassins. L'analyse des valeurs de ce tableau révèle un constat unanime pour l'ensemble des stations : c'est la forte baisse du potentiel en eau, corroborée toutefois d'un déficit d'écoulement aussi important.

Ainsi, pour Dakka-Saïdou et Kédougou qui caractérisent le régime fluvial de transition, on observe une baisse importante de la lame d'eau écoulée par rapport à celle de la période de référence. Cette baisse est de 101 mm à Dakka-Saïdou et 42,2 mm à Kédougou. Cette baisse est concomitante avec la diminution de la pluviométrie (tab. 72). Par contre, le déficit d'écoulement, se réduit faiblement par rapport à la référence 1903-1993 ce qui laisse supposer l'intensité de la pénurie en eau. Ceci se vérifie par les coefficients d'écoulement qui sont en baisse de -4 % à Dakka-Saïdou et -2,1 % à Kédougou.

Tableau 72 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan de la période 1961-1993 dans les hauts bassins.

Stations	Superficie B V (km^2)	Débit Q $m^3.s^{-1}$	Ecart type	C.V	Termes du bilan			
					P (mm)	E (mm)	D.E. (mm)	C.E %
Dakka-Saïdou	15 700	207	62,7	0,30	1539	415,7	1123,2	27
Siramakana	59 500	36,5	34,6	0,94	959,3	19,3	939,9	2
Toukoto	16 500	50,3	33	0,66	959,3	96,5	862,7	10
Kidira	28 900	120,5	75,1	0,62	855,1	131,5	723,5	15,3
Bakel	218 000	545	278,6	0,51	528	78,8	449,2	15
Kabaté	*30 000*	*5,8*	*9,2*	*1,5*	*378*	*6,09*	*372*	*1,6*
Kédougou	7550	87,9	33,9	0,38	1356	367,1	988,8	27
Gouloumbou	42 000	186	97,8	0,51	926,6	139,6	822,9	14,5

Les autres stations, toutes caractéristiques du régime tropical pur connaissent les mêmes défaillances. La lame d'eau écoulée à Bakel durant cette période est ainsi de 78,8 mm. Elle accuse

une baisse de -26,3 mm par rapport à la période de référence. Le faible écart entre ces deux valeurs est imputable aux lâchures de la retenue de Manantali qui régule depuis 1987 l'écoulement du fleuve Sénégal. Le coefficient d'écoulement de la période (15 %), supérieur à celui de la référence 1903-1993 (12,5 %) en est la parfaite illustration. Les stations de Siramakana, Toukoto, Kidira et Gouloumbou affichent toutes les mêmes baisses. Les écarts entre les déficits d'écoulements des deux périodes sont cependant moins prononcés. Les coefficients de variation des différentes stations (tab. 7) indiquent tous une hausse synonyme d'une forte irrégularité.

Quant au régime sahélien évalué à Kabaté sur la Kolimbiné (période 1968-1993), le bilan moyen montre un effondrement des ressources en eau. La lame d'eau écoulée, la plus faible des hauts bassins, est de 6,09 mm. Le déficit d'écoulement (372 mm) le moins élevé traduit plus un manque d'eau à évaporer qu'une baisse des conditions d'évaporation. Cela se confirme à travers la valeur du coefficient d'écoulement (C E = 1,6) qui est très médiocre.

L'étude des régimes hydrologiques nous a permis de déterminer les différentes nuances fluviales des hauts bassins. Mais si, du point de vue climatique, la zone d'étude est comprise entre quatre domaines (guinéen, sud-soudanien, nord-soudanien et sahélien), les régimes hydrologiques n'en retiennent que trois principaux :

Le régime fluvial de transition qui regroupe les domaines guinéen et sud-soudanien, le régime tropical pur qui englobe le domaine nord-soudanien et le régime sahélien. Cette subdivision hydrologique répond plus aux spécificités physiques qui influencent l'écoulement comme les pentes, la lithologie, les sols et la végétation. Il en résulte des bilans différents d'un régime à l'autre, mais aussi à travers les stations, du fait de la diversité des facteurs physiques tantôt évoqués. Cependant, en règle générale, ce qui retient l'attention dans l'analyse des bilans, au-delà de la variabilité de l'écoulement et des facteurs qui la déterminent, est la baisse des ressources en eau. Celle-ci est conforme à la péjoration pluviométrique surtout pour la période récente. Ceci n'est guère surprenant dans un domaine fluvial essentiellement tributaire des aléas de la pluviométrie. Déficit pluviométrique et hydrologique procèdent donc de la relation pluie-débit ce qui appelle à évoquer l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau de surface.

CHAPITRE 3

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET RESSOURCES EN EAU DE SURFACE DANS LES HAUTS BASSINS

L'étude de la pluviométrie a mis en évidence une tendance générale à des déficits chroniques dans les hauts bassins. L'évolution des autres paramètres climatiques contribue à exacerber la diminution des ressources en eau. Or, ce sont les différents apports météoriques reçus par les hauts bassins qui conditionnent l'écoulement de ces rivières.

1. INDICES CLIMATIQUES ET ECOULEMENT

Les précipitations restent parmi les indices climatiques, ceux qui déterminent le mieux les ressources en eau d'un bassin versant, puisqu'elles en sont les pourvoyeuses principales. Mais "s'il n'y a pas de paramètre idéal pour traduire une évolution des conditions climatiques" (J. C. Olivry, 1982), sur le vaste ensemble géographique des hauts bassins, les précipitations représentent un élément essentiel pour expliquer la relation entre eau et climat. Non pas parce qu'on obtient de facto une corrélation hydropluviométrique satisfaisante, fait d'ailleurs rare dans un grand bassin fluvial.

En plus, il est fréquent que l'évolution naturelle d'un phénomène soit occultée par les résultats des campagnes agricoles. C'est néanmoins ce paramètre qui traduit le mieux les séquences humides et sèches comme celles observées dans l'évolution pluviométrique et hydrologique.

1.1. Nature des précipitations et écoulement dans les hauts bassins

La nature des précipitations peut être plus importante que la quantité des pluies reçues par les hauts bassins, ce qui nous permet de différencier cinq types de pluies qui sont un apport pour l'écoulement :

- Les précipitations d'interception (P_β) : elles dépendent de l'épaisseur et de la densité du couvert végétal. Elles sont faibles et ne font que mouiller le sol, ce qui est intercepté est perdu pour l'écoulement. Ce type de précipitations n'est enregistré que dans le domaine guinéen et dans une moindre mesure dans le domaine sud-soudanien. C'est donc le régime tropical de transition qui est intéressé par ces pluies.
- Les précipitations d'humection (P_h) : elles sont inutiles pour l'écoulement car elles sont absorbées par la capacité de rétention du sol. Elles sont notées particulièrement en domaine nord-soudanien et sahélien où l'aspect pédologique et les aléas thermiques favorisent bien ce fait.
- Les précipitations d'infiltration (P_i) : leur arrivée au sol est sujette à deux possibilités :

* sur un sol humecté avec une capacité de rétention capillaire saturée, elles s'infiltrent, percolent à travers les vides, ou elles vont directement alimenter les nappes si le sol et le manteau sont

perméables. C'est surtout pour le régime tropical pur que cette situation peut se présenter, favorisée en certains endroits par une structure sédimentaire.

* dans le cas inverse (sol imperméable), ces pluies deviennent un écoulement hypodermique et participent à l'écoulement, fait plus plausible en régime tropical de transition.

- Les précipitations d'averses ruisselantes (P_a) : elles se présentent sous deux formes qui intéressent l'écoulement :

* leur intensité est supérieure à la capacité d'infiltration du sol, ce qui se traduit par un écoulement abondant. Cette situation est fréquente, surtout en domaine guinéen du fait de la nature des sols et de l'importance des pluies.

* le sol est déjà saturé et toutes les précipitations qui tombent ruissellent. Ce fait est observé particulièrement au mois d'août qui correspond au maximum pluviométrique dans les hauts bassins.

- Les condensations : leur importance est très limitée pour l'écoulement puisqu'on ne peut même pas les enregistrer. Il s'agit du brouillard et de la rosée dont l'influence sur les hauts bassins se limitent singulièrement au domaine guinéen. Leur rôle n'est perçu qu'à travers la réduction de l'échauffement des plantes et de l'évaporation du sol.

Ainsi, si les conditions physiques demeurent incontournables, l'importance des débits et la nature de l'écoulement restent tributaires des types de pluies reçus. C'est donc par une nature de cause à effet que s'apparente la relation entre précipitations et débits.

1.2. La relation précipitations et débits

Nous illustrons cette relation à travers les modules pluviométriques et hydrologiques des différentes stations des hauts bassins. Comme le souligne G. Mahé, (1993), le débit mesuré en un point donné d'un cours d'eau est représentatif de l'activité pluviométrique moyenne sur toute la surface du bassin-versant correspondant. La relation entre les précipitations et les débits revêt un intérêt particulier car elle permet d'élaborer une période d'alerte pour les débits arrivant dans les stations de mesures. Ces prévisions sont d'autant plus nécessaires lorsque des ouvrages comme Manantali sont édifiés sur les cours d'eau.

Les informations obtenues permettent alors l'amortissement des crues extrêmes qui arrivent lorsque la retenue est à sa cote normale, en modulant le débit de pointe en aval. La période d'alerte obtenue dépend toutefois de la taille et des caractéristiques du bassin versant.

Dans les hauts bassins, cette relation souffre de la discontinuité entre les séries pluviométriques, relativement récentes par rapport aux séries hydrologiques très anciennes.

Ainsi, seule la station de Kayes présente des modules pluviométriques plus anciens que les modules hydrologiques. Toutes les autres stations présentent des informations postérieures ce qui restreint considérablement une évaluation rigoureuse de l'évolution entre la pluviométrie et l'écoulement. Par ailleurs, cette relation n'est pas de facto déterminée par la proximité entre une

station pluviométrique et hydrologique. La propagation des flots d'amont en aval et les retards qui en résultent induisent parfois des décalages entre les totaux pluviométriques et les débits. Cette difficulté à obtenir une corrélation satisfaisante entre les précipitations et le ruissellement est dû reste soulignée par les différentes études réalisées en Afrique de l'Ouest (Sénégal-Consult, 1970). Dans les hauts bassins, les meilleures corrélations hydro-pluviométriques ont été réalisées entre les stations pluviométriques et hydrologiques situées à l'amont. La taille réduite des cours supérieurs et surtout la rapidité du ruissellement favorisent alors cette relation. Le tableau 73 qui suit présente les différents coefficients de corrélations obtenus sur l'ensemble des hauts bassins.

Tableau 73 : coefficients de corrélation entre stations pluviométriques et hydrologiques

Stations pluviométriques	Stations hydrologiques	coefficients de corrélation
Kayes	Bakel	0,35
Kayes	Kayes	0,37
Tambacounda	Gouloumbou	0,33
Tambacounda	Kidira	0,41
Kita	Siramakana	0,50
Kita	Toukoto	0,68
Kita	Dibia	0,41
Labé	Dakka-Saïdou	0,61
Labé	Kédougou	0,76
Labé	Fadougou	0,58

Le meilleur coefficient de corrélation est obtenu entre Labé et Kédougou (0,76). Au delà de cette valeur, on remarque que les meilleures corrélations sont obtenues en domaine guinéen notamment entre la station pluviométrique de Labé et les principales stations de contrôle du régime tropical de transition. Néanmoins, au regard des coefficients qui indiquent une très bonne corrélation (0,80 à 0,90), on peut nuancer les résultats obtenus (tab. 73).

Les corrélations les moins satisfaisantes sont notées en domaine tropical pur, surtout pour les stations de Bakel et de Kayes (tab. 73). Cette particularité est sans doute liée aux caractéristiques des précipitations à ces stations qui sont du reste assez proches du domaine sahélien. L'observation de la figure 107 qui présente les indices pluviométriques combinés à l'hydraulicité (en pourcentage) renseigne le mieux sur la relation entre pluies et débits. L'analyse des graphiques successifs met en évidence une relation nette entre hausse pluviométrique et hydrologique et inversement, leur baisse.

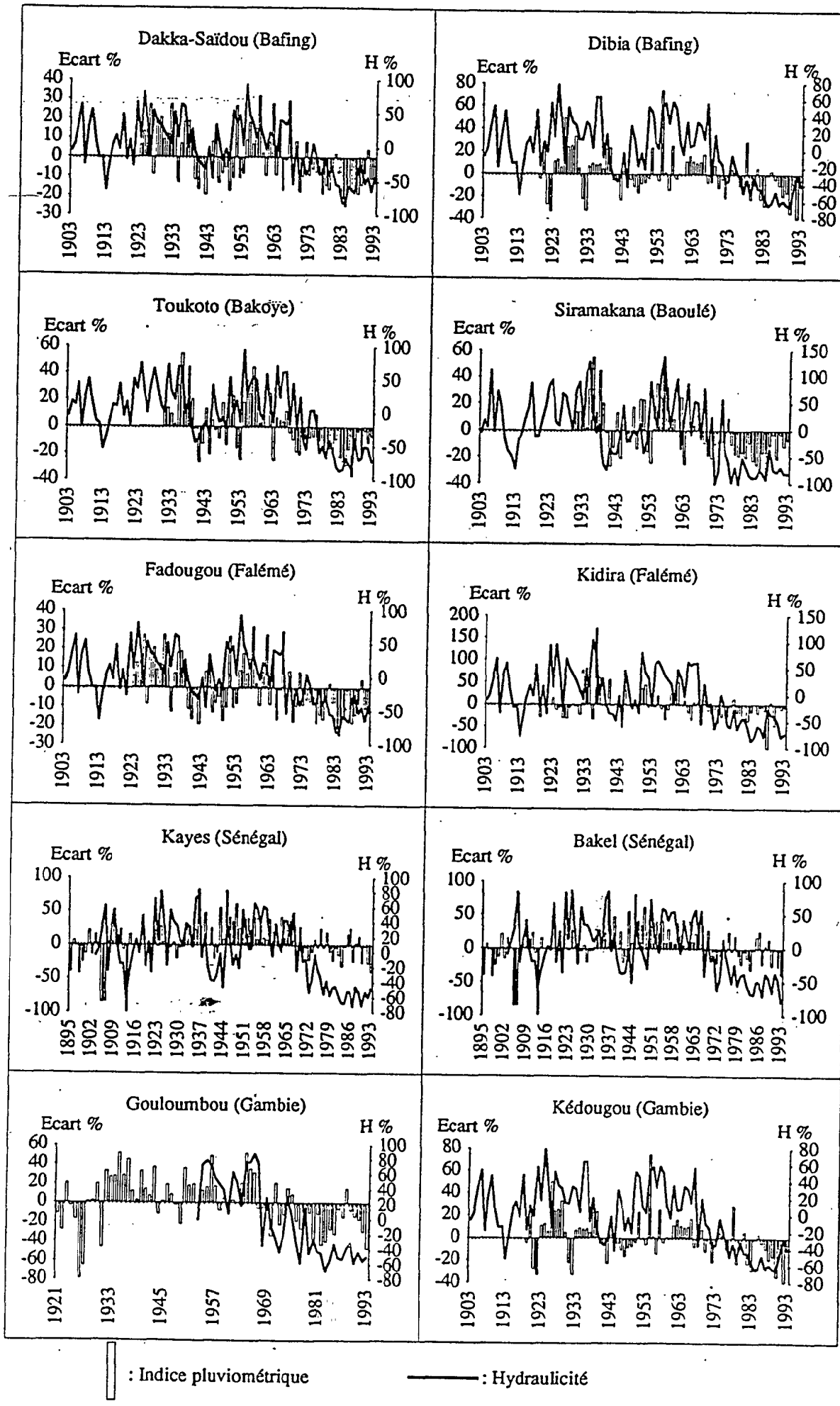


Figure 107 : Pluviométrie et hydraulicité dans dix stations des hauts bassins depuis le début des mesures

On retrouve ainsi une évolution similaire à celle déjà observée dans l'analyse des modules interannuels. Cette situation est confirmée par l'étude des bilans décennaux qui montrent que les décennies à forte pluviométrie correspondent parfaitement à celles à écoulement abondant.

Se fondant sur l'observation des courbes lissées des modules du fleuve Sénégal, J. C. Olivry, (1982), note "des phases ascendantes au cours desquelles l'augmentation des débits d'une année à l'autre décroît de manière exponentielle et des phases descendantes paraissant suivre une loi à décroissance exponentielle". Ces observations recoupent celles déjà faites (fig. 104, chap. 2) et confirmées par la relation des indices pluviométriques et de l'hydraulicité. C'est donc à partir des précipitations et des débits des cours d'eau que l'on peut avoir une évaluation précise de la réalité hydrologique de la sécheresse, et de ses fluctuations interannuelles.

Aussi, les faibles corrélations précipitations/ruissellement suggèrent à long terme une amélioration des données provenant du réseau des stations pluviométriques et au mieux le recours aux images satellitaires (M. Carn, 1987). L'étude qui suit, des formes extrêmes de l'écoulement nous édifie davantage sur la relation entre les pluies et les débits.

2. LES DEBITS EXTREMES DES HAUTS BASSINS

L'étude des débits extrêmes a été faite au niveau des valeurs maximales et minimales mensuelles et journalières atteintes par l'écoulement. Toutefois la genèse et la définition des crues et des étiages révèlent des ambiguïtés qui nécessitent une précision du vocabulaire.

En domaine tempéré, les crues peuvent intervenir à un moment où les précipitations qui alimentent l'écoulement sont absentes : crues de fonte de neige sur le Rhône.

Ainsi, certains auteurs considèrent la crue comme le débit correspondant à un certain multiple du module annuel. Pour d'autres, les crues sont des débits de fréquences ou de probabilité faible de 1 à 5 %, ou alors le plus fort débit observé dans l'année. La crue et les hautes eaux diffèrent par leur fréquence, leur durée et les valeurs de débits écoulés (R. Frécaut, 1974). Enfin, pour certains, les crues riment avec les débits instantanés.

Le terme étiage recouvre lui aussi des notions assez disparates. Ainsi, les étiages peuvent se ranger en deux catégories correspondant à deux conceptions du phénomène. Par symétrie à la notion de crue, l'étiage est considéré comme un phénomène extrême.
Certains auteurs considèrent ainsi que "les crues et les étiages sont des phénomènes exceptionnels et non annuels" (R. Frécaut, 1974 ; 1982).

La deuxième approche conçoit l'étiage comme une notion relative à la demande en eau, et caractérisée par une défaillance possible des débits par rapport aux besoins. Mais quelle que soit la conception retenue, la notion d'étiage se rapporte à terme, soit aux projets d'aménagements hydrauliques, soit à la gestion de ces ouvrages. L'étiage peut se situer au moment où l'alimentation des cours d'eau, si elle est solide, est la plus forte (Larve, Rhône-Suisse).

En domaine tropical, ces définitions se compliquent du fait que les crues et les étiages interviennent respectivement durant la période normale des hautes eaux et des basses eaux d'où l'assimilation entre crues et hautes eaux d'une part, et étiages et basses eaux d'autre part.

On retient avec A. A. Sow, (1984) que si les crues et les étiages en milieu tropical sont des formes extrêmes de l'écoulement des cours d'eau, leur importance et leur conception sont fortement liées à leurs fréquences (maximales et minimales) d'une partie à l'autre du bassin-versant.

2.1. Les crues dans les hauts bassins

Dans les hauts bassins, nous assimilons la crue à la valeur la plus élevée atteinte chaque année par l'écoulement, toujours dans la période des hautes eaux. Cette valeur en moyenne mensuelle représente le débit moyen mensuel maximum, autrement dit le débit mensuel le plus élevé ou débit maximal.

En valeurs journalières, elle correspond à la pointe de crue du débit journalier le plus élevé de l'année hydrologique. Les crues et les étiages sont étudiés à travers les différentes stations des hauts bassins pour les périodes 1903-1993 et 1961-1993.

2.1.1. Les crues mensuelles

L'étude des débits maximaux mensuels et journaliers de pointe montre que les crues sont liées à une alimentation durable dans le temps. L'apparition des crues dans les hauts bassins est liée aux conditions climatiques favorables qui prévalent durant la saison des pluies. Les crues surviennent ainsi au cœur de la saison des pluies, période durant laquelle l'air et les sols sont saturés d'humidité. Les valeurs de températures, d'évaporation et de transpiration sont minimales, les précipitations sont maximales, autant de conditions qui favorisent la montée des eaux et le déclenchement de la crue.

Mais, si les crues sont liées à la période de hautes eaux, leurs dates d'apparition et leurs fréquences mensuelles sont variables. Le tableau 74 donne le décompte et les fréquences d'apparitions mensuelles des crues pour la période 1903-1993 et 1953-1993 respectivement pour les bassins amont du Sénégal et de la Gambie. Ce tableau retient pour les débits maximaux certaines caractéristiques à travers les régimes hydrologiques :

Pour le régime tropical de transition, quelle que soit la nuance (guinéenne ou sud-soudanienne), le maximum se place fréquemment en septembre. Ce mois totalise 71 % des fréquences d'apparitions à Dakka-Saïdou, 64 % à Fadougou sur une période d'observation de 91 ans. A la station de Kédougou, le mois de septembre regroupe 71 % des apparitions du débit extrême sur une période 41 ans. Le mois d'août suit avec 25 % des fréquences à Dakka-Saïdou, 36 % à Fadougou et 24 % à Kédougou. L'importance du mois d'août s'explique par son maximum pluviométrique et la facilité de drainage de cette région aux pentes généralement fortes. La coalescence des différents flots se fait plus rapidement, ce qui engendre parfois des maxima

précoces. Le mois d'octobre n'enregistre pas de fréquences significatives puisqu'il ne totalise que 2 % à Dakka-Saïdou et 5 % à Kédougou. La place du maximum hydrologique est donc assez uniforme pour le régime tropical de transition.

Tableau 74 : Nombre et fréquences (en %) d'apparitions par mois des crues dans les hauts bassins du fleuve Sénégal (1903-1993) et Gambie (1953-1993).

	Stations	Référence	Août		Sept		Octobre	
Bassin	Bakel	91 ans	09	10 %	79	87 %	03	3 %
	Kayes	91 ans	15	16 %	73	80 %	03	3 %
	Dibia	91 ans	21	23 %	69	76 %	01	1 %
	Dakka-Saïdou	91 ans	23	25 %	65	71 %	02	2 %
du	Oualia	91 ans	23	25 %	67	74 %	01	1 %
	Toukoto	91 ans	22	24 %	61	67 %	8	9 %
	Siramakana	91 ans	48	53 %	42	46 %	1	1 %
	Kidira	91 ans	21	23 %	67	74 %	03	3 %
Sénégal	Fadougou	91 ans	33	36 %	58	64 %	-	-
Bassin de	Gouloumbou	41 ans	02	5 %	34	83 %	5	12 %
la Gambie	Kédougou	41 ans	10	24 %	29	71 %	02	5 %

L'analyse des huit stations retenues pour le régime tropical pur (tab. 75) conforte la place du maximum de septembre à l'exception de Siramakana sur le Baoulé. A cette station, le mois d'août totalise 53 % des fréquences d'apparitions. Ceci n'est pas surprenant vu le rôle de l'endoréisme dans ce sous-bassin (la Vallée du Serpent couvre environ 30 000 km²). En plus, l'importance des méandres contribue à ralentir la vitesse de l'écoulement, ce qui favorise la concordance du maximum pluviométrique avec la crue au mois d'août.

Pour les autres stations, la fréquence la plus élevée en septembre revient à la station de Bakel (87 %). Elle est suivie de Gouloumbou (83 %), viennent ensuite les stations de Kayes (80 %), Dibia (76 %), Oualia et Kidira (74 %) et Toukoto (61 %). La part du maximum au mois d'août est assez modeste, seules les stations situées à la limite nord du régime tropical de transition totalisent des fréquences supérieures à 23 % (Dibia, Oualia et Toukoto).

L'observation du tableau 75 qui reprend le décompte et les fréquences de ces apparitions pour la période 1961-1993 permet de confirmer ou non les observations de la période de référence. On remarque que c'est toujours en régime tropical de transition que les fluctuations de la place du maximum sont les plus nombreuses. Toutefois par rapport à la période de référence, on assiste à une légère inversion entre la nuance guinéenne (Dakka-Saïdou, Fadougou) et sud-soudanienne (Kédougou) qui enregistre des fréquences en août supérieures à celles des stations citées auparavant (tab. 75).

Tableau 75 : Nombre et fréquences d'apparitions (en %) par mois des crues dans les hauts bassins (période 1961-1993).

	stations	Référence	Août		Septembre		Octobre	
Bassin	Bakel	33 ans	05	17 %	23	77 %	02	6 %
	Kayes	33 ans	06	20 %	23	77 %	01	3 %
	Dibia	33 ans	06	20 %	23	77 %	01	3 %
	Dakka-Saïdou	33 ans	05	17 %	24	80 %	01	3 %
du	Oualia	33 ans	10	33 %	20	67 %	-	-
	Toukoto	33 ans	08	27 %	19	63 %	03	10 %
	Siramakana	33 ans	13	43 %	17	57 %	-	-
	Kidira	33 ans	07	24 %	22	73 %	01	3 %
Sénégal	Fadougou	33 ans	09	30 %	21	70 %	-	-
Bassin de	Gouloumbou	33 ans	2	6 %	23	77 %	5	17 %
la Gambie	Kédougou	33 ans	8	27 %	20	67 %	2	7 %

Pour le régime tropical pur, la place du maximum en septembre reste prédominante, mais on assiste à une forte incursion des fréquences d'apparition au mois d'août. Celles-ci sont supérieures à 20 % à toutes les stations à l'exception de Gouloumbou et dans une moindre mesure Bakel. Tout se passe comme si la péjoration pluviométrique observée durant cette période (chap. 4 ; 2 e Partie), favorise une précocité des débits maximaux en août, contrairement à leur apparition normale en septembre.

Ces fluctuations de la date du maximum hydrologique peuvent aussi être saisies à travers l'examen des débits maximaux journaliers de la période 1980-1993. La distribution fréquentielle des dates d'apparition selon la fréquence au dépassement permet de retenir à travers ces trois mois la classification suivante (fig. 108) :

- Du 1er au 16 août apparaissent les crues précoces,
- Du 17 août au 28 août, les crues sont semi-précoces,
- Du 29 août au 15 septembre, les crues sont normales,
- Du 16 septembre au 29 septembre, les crues sont semi-tardives et,
- A partir du 1er octobre, les crues sont tardives.

Les valeurs contenues dans le tableau 76 permettent de mieux spécifier les caractéristiques des différentes crues. Dans le bassin amont de la Gambie, les crues précoces représentent respectivement 21 % des crues à Gouloumbou et 14 % de celles de Kédougou.

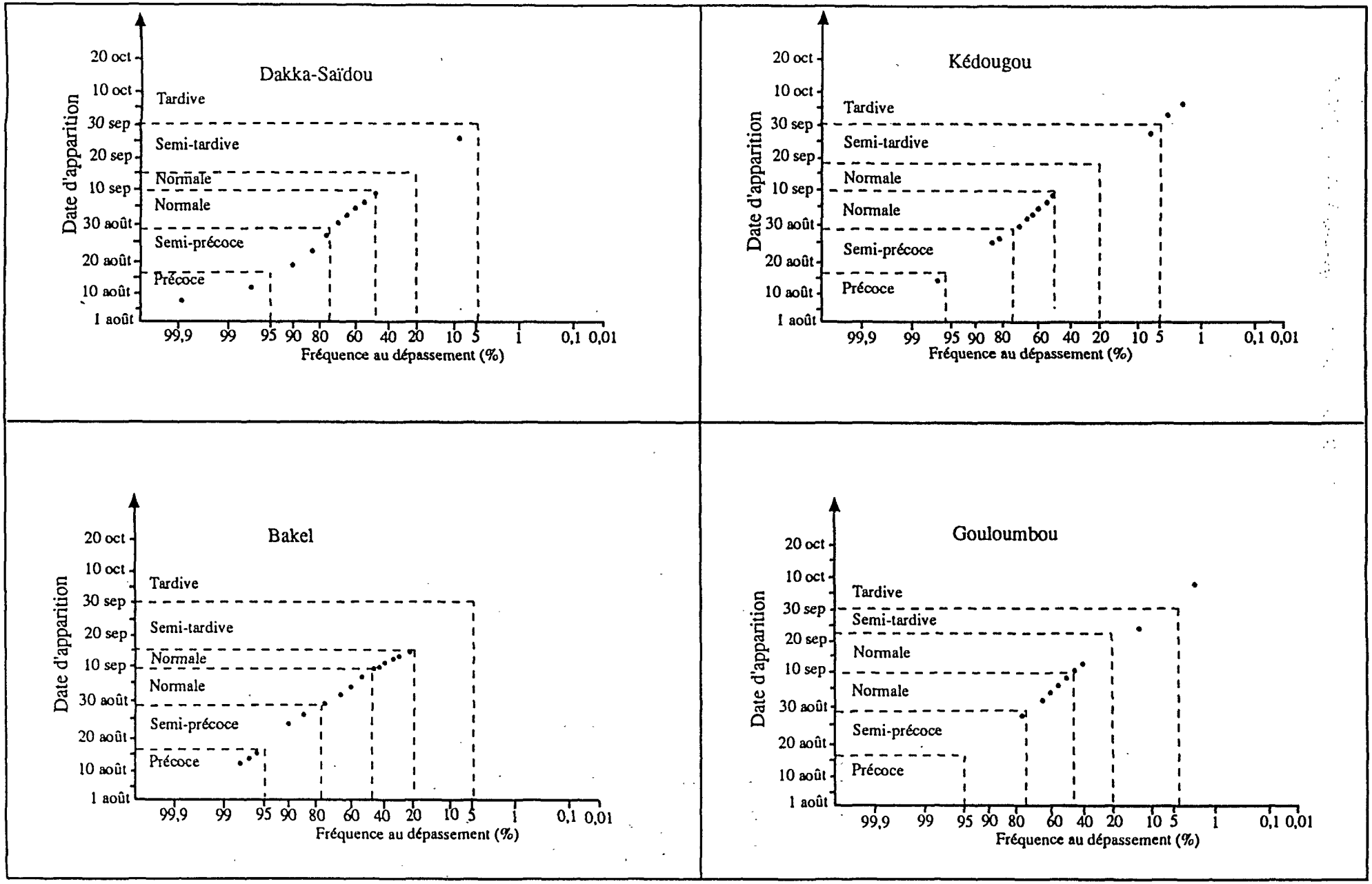


Figure 112 : Etude fréquentielle des dates d'apparition des crues dans quatre stations des hauts bassins.

L'importance du retard des crues à Gouloumbou est liée à l'amortissement de la crue dans le bassin moyen notamment entre Kédougou et Wassadou aval du fait des épandages. Les crues tardives sont rares dans le haut bassin du Sénégal, où seule la station de Dibia enregistre 7 %. Par contre, les crues précoces y sont plus fréquentes (tab. 76). A l'exception de la Falémé, l'ensemble des cours d'eau du bassin amont du Sénégal connaissent parfois des crues précoces. Mais, celles-ci ne dépassent guère 14 % des observations sauf à Siramakana où elles atteignent 30 %. Les crues tardives et semi-normales représentent 51 % des observations à cette station alors que 21 % des crues y sont normales.

Tableau 76 : Fréquences d'apparitions décadaires des débits instantanés à neuf stations des hauts bassins (période 1980-1993).

	Stations	Août			Septembre			Octobre	
		1er-10	11-20	21-31	1er-10	11-20	21-30	1er-10	11-20
Bassin	Bakel	14 %	-	21 %	21 %	30 %	14 %	-	-
	Dibia	14 %	-	-	36 %	7 %	36 %	7 %	-
	Dakka-Saïdou	14 %	7 %	14 %	51 %	7 %	7 %	-	-
du	Toukoto	14 %	14 %	14 %	44 %	7 %	7 %	-	-
	Siramakana	30 %	21 %	21 %	21 %	7 %	-	-	-
	Kidira	-	7 %	14 %	57 %	14 %	7 %	-	-
Sénégal	Fadougou	-	-	14 %	58 %	21 %	7 %	-	-
Bassin de	Gouloumbou	-	-	14 %	36 %	21 %	8 %	7 %	14 %
la Gambie	Kédougou	-	14 %	29 %	36 %	-	7 %	7 %	7 %

Ces observations confortent notre assertion sur la précocité des crues, évoquée sur ce cours d'eau. Cependant, l'analyse du tableau 76 met surtout en valeur l'importance du mois de septembre qui enregistre sauf sur le Baoulé le maximum de crues observées.

Ce mois totalise 86 % des crues notées à Fadougou, 79 % de celles enregistrées à Dibia, valeurs sensiblement identiques à Kidira (78 %). Pour les autres stations du bassin amont du Sénégal, le mois de septembre totalise 65 % des crues respectivement à Bakel et à Dakka-Saïdou, tandis que celles-ci ne sont plus que de 58 % à Toukoto et seulement 28 % à Siramakana. Dans le haut bassin de la Gambie, le mois de septembre totalise 65 % des crues notées à Gouloumbou, alors qu'à Kédougou, ce mois et celui d'août se partagent l'essentiel des crues avec 43 % des observations respectives.

Les maxima hydrologiques sont donc caractérisés par une certaine régularité de leur apparition surtout au mois de septembre. Mais cette stabilité mensuelle est relative, la place du

mois d'août et dans une moindre mesure celle du mois d'octobre sont parfois importantes (Siramakana et Gouloumbou notamment).

Ainsi, à travers les régimes, les crues des hauts bassins peuvent varier à travers les mois de hautes eaux, suivant que la saison des pluies soit précoce, normale ou tardive, influencées en même temps par les conditions physiques. Ces critères imposent à l'échelle interannuelle une variabilité des crues et de leur puissance.

2.1.2. La variabilité interannuelle des crues et leurs puissances

Elle est analysée à travers les paramètres statistiques comme le coefficient de variation ou l'irrégularité interannuelle donnée par le rapport des crues extrêmes R*. Cette variabilité des crues est aussi appréhendée à partir des fluctuations des volumes d'eau écoulés ou du coefficient de puissance de crue (A) obtenu par le rapport de la crue annuelle sur la racine carrée du bassin versant.

Tableau 77 : Caractéristiques moyennes des crues dans les hauts bassins des fleuves Sénégal (période 1903-1993) et Gambie (période 1953-1993)

	Stations	Crues moyennes	Volume* $m^3\ an^{-1}$	Coefficient de variation	Coefficient de puissance	R*
Bassin du Sénégal	Bakel	3011	$9,49\ 10^{10}$	0,46	6,45	9
	Kayes	2305	$7,26\ 10^{10}$	0,42	5,81	15
	Dibia	1668	$5\ 10^{10}$	0,32	8,02	7
	Dakka-Saïdou	943	$2,97\ 10^{10}$	0,26	7,5	5
	Toukoto	304	$9,58\ 10^{9}$	0,45	2,3	14
	Oualia	664	$2,09\ 10^{10}$	0,47	2,2	14
	Siramakana	346	$1,05\ 10^{10}$	0,63	1,3	35
	Kidira	519	$1,38\ 10^{10}$	0,32	4,5	5
	Fadougou	845	$2,66\ 10^{10}$	0,50	5	14
Bassin de la Gambie	Gouloumbou	947	$2,98\ 10^{10}$	0,49	4,6	6
	Kédougou	436	$1,38\ 10^{10}$	0,40	5	8

Les valeurs du tableau 78 présentent les différentes caractéristiques moyennes des crues des hauts bassins sur la période 1903-1993 et 1953-1993 respectivement pour le bassin amont du Sénégal et de la Gambie.

L'observation de ce tableau montre qu'à l'échelle spatiale, les crues varient énormément d'un cours d'eau à l'autre en fonction de l'abondance de chaque année. Elle sont aussi plus fortes d'amont en aval conjointement à l'augmentation de la superficie des bassins.

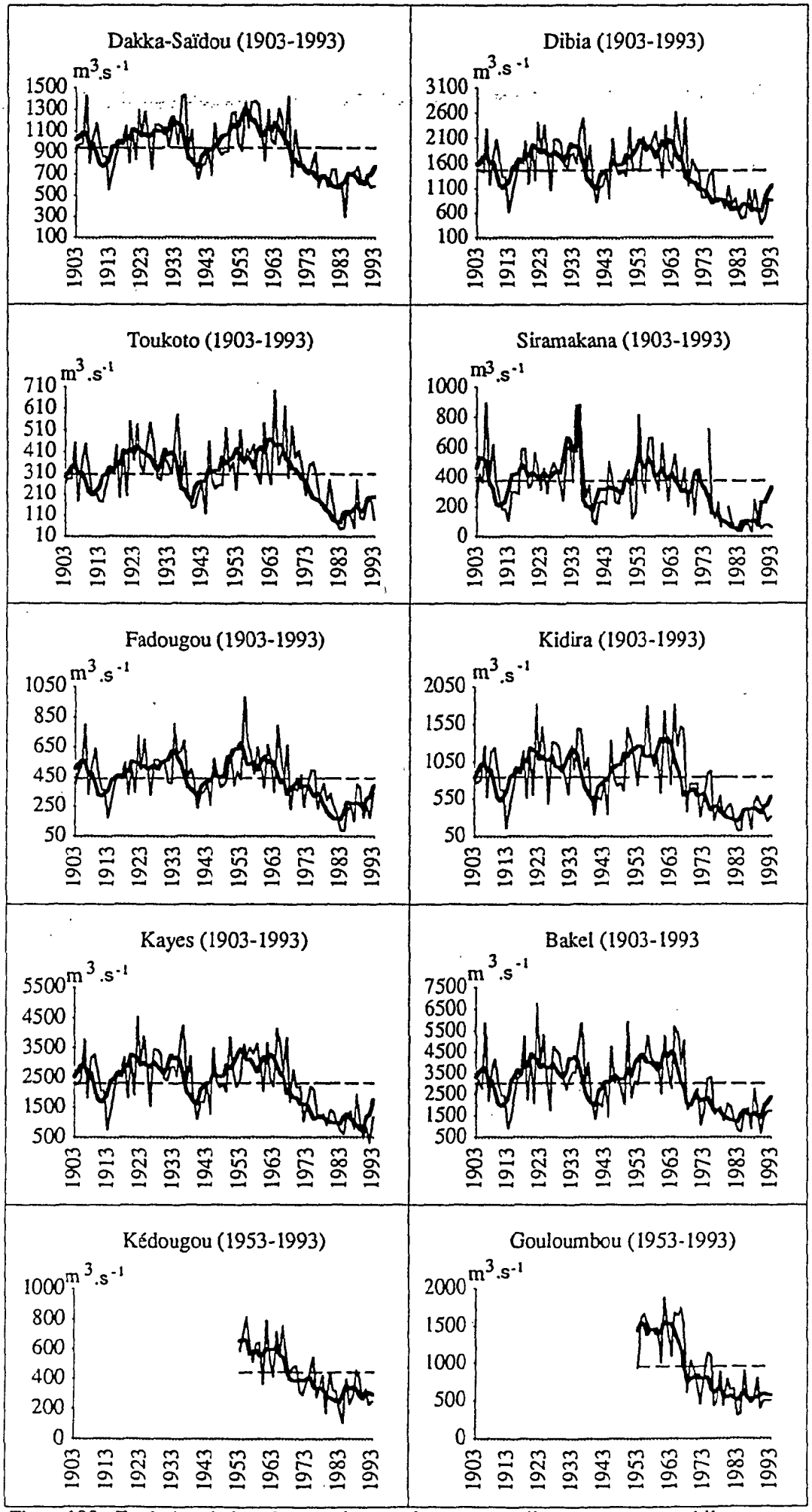


Figure109 : Evolution de la valeur atteinte par la crue annuelle et moyennes mobiles quinquennales dans les hauts bassins

La crue moyenne la plus forte revient à la station de Bakel avec 3011 $m^3.s^{-1}$, soit un volume écoulé de 9,49 10^{10} m^3 an^{-1}. La station de Toukoto sur le Bakoye enregistre le crue moyenne la plus faible de la période avec 304 $m^3.s^{-1}$, soit, un volume écoulé de 9,58 10^9 m^3 an^{-1}.

Pour le bassin de la Gambie, la station de Gouloumbou totalise une crue moyenne de 947 m^{3*-1} soit, un volume d'eau annuel de 29,8 10^{10} m^3 an^{-1}. La station de Kédougou pour la même période enregistre une crue moyenne 436 $m^3.s^{-1}$ soit un peu plus de la moitié de celle notée à Gouloumbou. Cette variabilité des crues est confirmée par les valeurs du coefficient de variation qui augmentent de l'amont vers l'aval.

La figure 109 reprend l'évolution interannuelle des crues et traduit la grande irrégularité qui prévaut d'une année à l'autre. Le lissage de ces graphiques par les moyennes mobiles quinquennales permet de mieux distinguer les phases à fortes et faibles crues. Ces phases sont analogues à l'évolution interannuelle des débits. Des périodes de fortes crues alternent avec des périodes a crues faibles. Ces dernières sont continues depuis 1968.

La distribution interannuelle des crues peut ainsi être très irrégulière (fig. 110) comme l'indique le coefficient d'irrégularité R*. Si certaines stations (Dakka-Saïdou, Fadougou et Gouloumbou) connaissent une faible irrégularité de leurs crues (R* = 5), à l'inverse d'autres stations comme Siramakana, Kayes ou Kidira sont sujettes à de fortes variations (tab. 77). Cette irrégularité transparaît dans les valeurs moyennes du coefficient de puissance de crue (tab. 77). L'observation des périodes de références montre que certaines années connaissent des crues exceptionnelles. C'est le cas de Bakel où les plus fortes crues sont notées en 1922, 1906 et 1936. Les modules de crues ces trois années sont respectivement de 6746, 5831 et 5825 $m^3.s^{-1}$ et correspondent à des coefficients de puissance de crues de 14,4 en 1922 et 12,4 en 1906 et 1936.

A Gouloumbou sur le bassin amont de la Gambie, les plus fortes crues sont notées en 1961 (1870 $m^3.s^{-1}$), en 1966 (1743 $m^3.s^{-1}$), et en 1964 (1670 $m^3.s^{-1}$). Les coefficients de puissance respectifs de ces crues sont de 9,1 en 1961 ; 8,5 en 1966 et 8,1 en 1964. Cependant, à partir des moyennes des périodes de référence des deux bassins, on peut retenir que les crues dans les hauts bassins sont toutes de puissances très médiocres à médiocres suivant la référence de M. Pardé, A. Coutagne, et A. Myer, (1968)[15] . Ce constat s'applique aussi pour le bassin supérieur du Niger où les coefficients de puissance de crue même pour les années exceptionnelles sont très en dessous de la crue moyenne fixée par M. Pardé, (1968). L'irrégularité interannuelle des crues montre aussi une atténuation des hautes eaux lors des années à faible écoulement. La persistance de ce phénomène depuis 1968 affecte considérablement la puissance des crues sur les hauts bassins. L'année 1913 qui était retenue dans les chroniques hydrologiques comme celle de la plus faible crue du Sénégal à Bakel (918 $m^3.s^{-1}$), soit un coefficient de puissance de 1,9, est largement supérieure à la crue de 1984. Au cours de cette année, la crue du Sénégal à Bakel (729 $m^3.s^{-1}$) connaît une puissance très médiocre (1,5).

---

[15] Selon la classification de M. Pardé, (1968), une crue est considérée comme moyenne à médiocre dès que son coefficient de crue (A) est inférieur à 60.

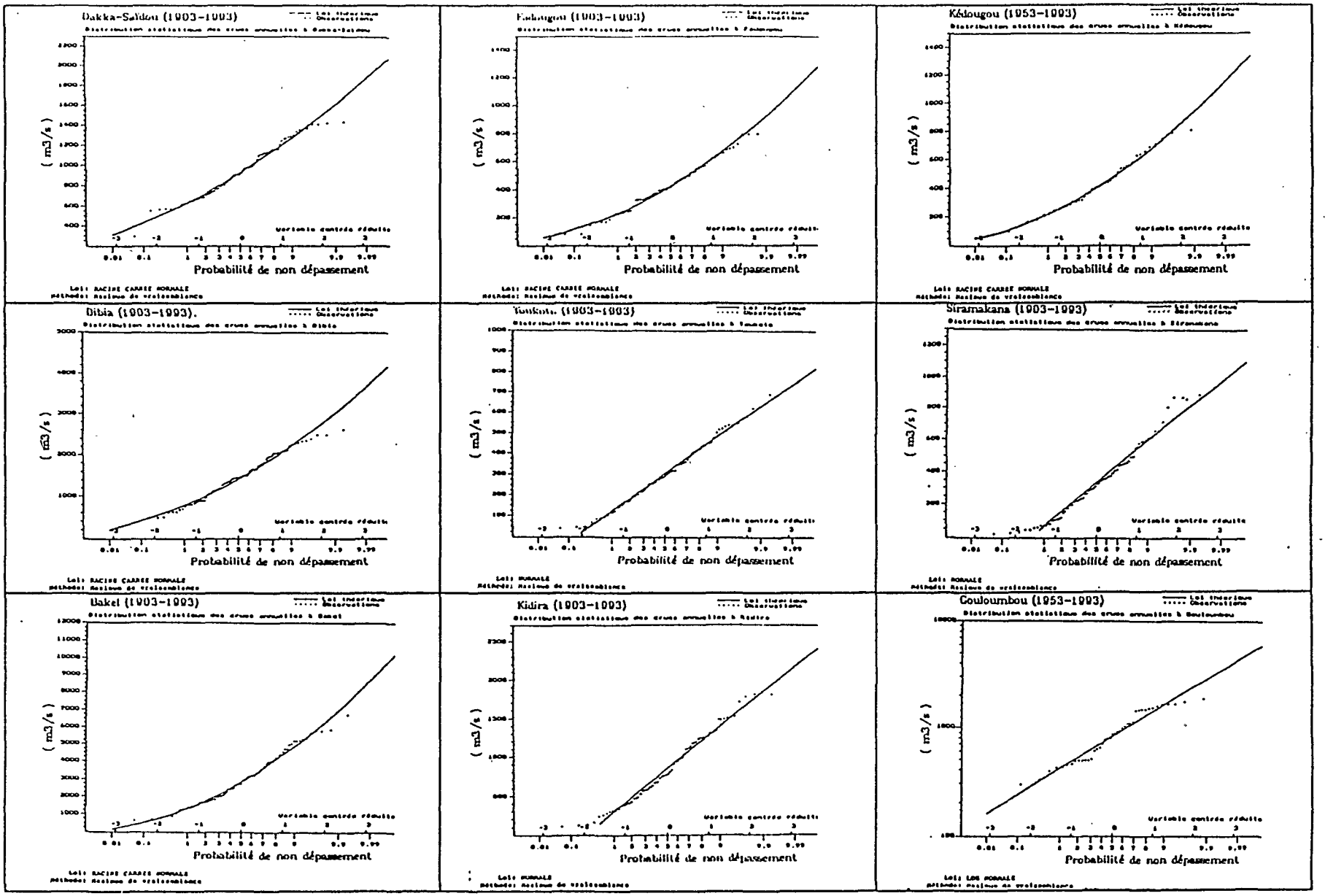


Figure 110 : Distribution statistique des modules de crues dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie (période 1903-1993)

La crue de 1990, avec 678 $m^3.s^{-1}$ soit une puissance de crue de 1,4 est encore plus faible. Mais l'année 1990 correspond au régime artificiel et la régulation des débits à partir de Manantali ne permet pas de déterminer la réalité de la crue naturelle de cette année qui est somme toute déficitaire.

La situation n'est guère meilleure sur la Gambie à Gouloumbou. Les coefficients de crue les plus faibles sont détenus par les crues de 1983 (295 $m^3.s^{-1}$), soit une puissance de 1,4 et de 1984 (327 $m^3.s^{-1}$), soit une puissance de 1,5. Ces pointes de crue minimales correspondent à des récurrences supérieures à 100 ans en période sèche. Leur prolongement pour les dernières années montre que les déficits hydrologiques observés depuis 1968 et corollaires de la péjoration pluviométrique perdurent et s'aggravent au fil des ans.

2.2. Les étiages dans les hauts bassins

Les étiages constituent un phénomène important dans la vie d'un bassin versant du fait de sa caractéristique principale, la modicité des débits. Ils sont liés à une pénurie d'alimentation en eau et interviennent au cours de la saison non pluvieuse, dans sa période la plus chaude de l'année. L'étude des étiages n'est pas aisée en raison de la difficulté de mesure des débits, surtout pour les cours d'eau qui s'assèchent pendant plusieurs mois. Lors des années à faible pluviosité, les étiages peuvent être très prononcés et atteindre des valeurs extrêmement faibles, parfois nulles. Pour les raisons que nous avons évoquées, les basses eaux sont alors assimilées aux étiages. Dans notre analyse, nous parlons alors de période d'étiage ou de basses eaux. Ainsi, l'étiage absolu correspond au débit minimal mensuel ou au débit journalier le plus bas de l'année hydrologique. C'est à partir de ces débits minimaux mensuels que nous étudions les caractéristiques principales des étiages des hauts bassins.

2.2.1. Les étiages mensuels

Les débits minima mensuels relèvent bien d'une pénurie d'alimentation en eau qui peut être étalée dans le temps. Ils interviennent au moment où les régimes des différents cours d'eau ne sont plus influencés. D'ailleurs, l'analyse des débits journaliers montre que c'est à partir de la dernière valeur de précipitations, où les débits ne sont plus réalimentés, que débute la période effective d'étiage qui se prolonge jusqu'à l'étiage absolu (fig. 111). Cependant, comme pour les crues, l'apparition de cette pénurie d'écoulement est variable aussi bien dans l'espace que dans le temps. Le tableau 78 rend compte du nombre d'observations et des fréquences d'apparition par mois des étiages à différentes stations. Les valeurs de ce tableau traduisent une dispersion des dates d'étiages même si certains mois enregistrent des fréquences maximales.

En domaine tropical de transition, les étiages sont précoces puisqu'ils sont notés dés le mois d'avril. Ce mois représente 82 % des fréquences à Dakka-Saïdou, et 57 % à Fadougou.

Ce mois ne totalise que 22 % des fréquences par mois des débits minimaux à Kédougou, (période 1953-1993). Le mois de mai n'enregistre que de faibles fréquences pour la nuance guinéenne avec 17 % à Dakka-Saïdou, 35 % à Fadougou.

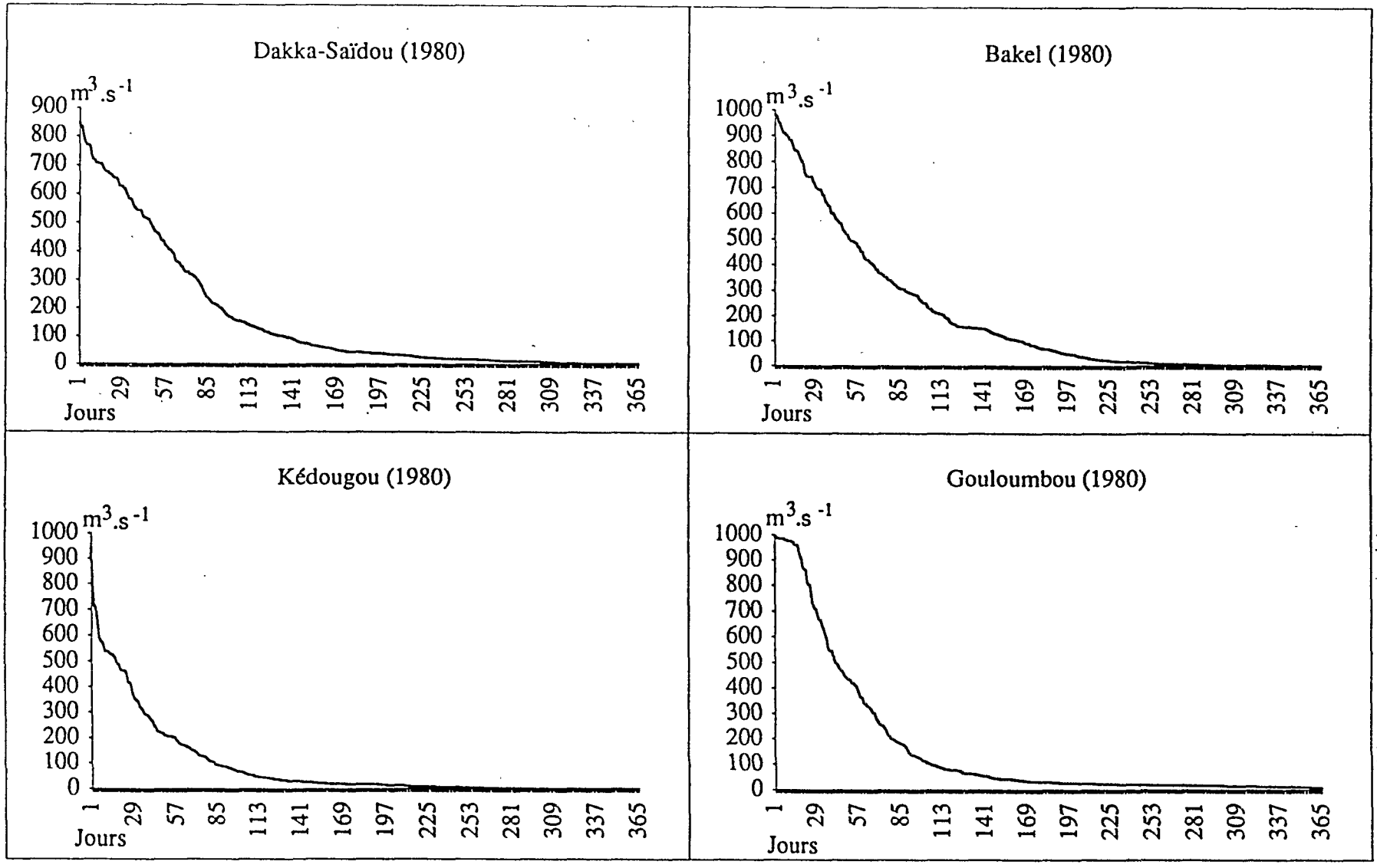


Figure 111 : Courbes des débits moyens journaliers classés à quatre stations des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

Par contre, la nuance sud-soudanienne du régime tropical de transition enregistre ses plus fortes fréquences d'apparition durant ce mois avec 76 % à Kédougou. La précocité des étiages en régime tropical de transition est surtout liée à la morphométrie et à la géologie du domaine guinéen.

En effet, l'importance du relief, l'aptitude des pentes à accélérer la vitesse des drains et la nature imperméable des terrains favorisent l'apparition des débits minimaux dès qu'un apport pluvial n'est plus enregistré.

Tableau 78 : Nombre et fréquences (en %) d'apparition par mois des étiages dans les hauts bassins (période 1903-1993, 1953-1993).

	Stations	Référence	Jan-Fév		Mars		Avril		Mai	
Bassin	Bakel	91 ans	-	-	-	-	14	15 %	77	85 %
	Kayes	91 ans	-	-	01	1 %	26	29 %	64	44 %
	Dibia	91 ans	-	-	05	5 %	47	52 %	39	43 %
	Dakka-Saïdou	91 ans	-	-	01	1 %	75	82 %	15	17 %
du	Oualia	91 ans	15	16 %	01	1 %	26	29 %	49	54 %
	Toukoto	91 ans	13	14 %	03	5 %	41	45 %	33	36 %
	Siramakana	91 ans	11	12 %	-	-	02	2 %	76	84 %
	Kidira	91 ans	5	5 %	07	8 %	19	21 %	60	66 %
Sénégal	Fadougou	91 ans	01	1 %	06	7 %	52	57 %	32	35 %
Bassin de	Gouloumbou	41 ans	-	-	04	10 %	30	73 %	07	17 %
la Gambie	Kédougou	41 ans	-	-	01	2 %	09	22 %	31	76 %

En régime tropical pur, la place du minimum hydrologique est aussi dispersée. Certes, celui-ci est noté le plus souvent en mai, mais aucune conformité spatiale ne peut être dégagée. Bakel situé à l'exutoire totalise une fréquence de 85 % en mai presque un peu plus qu'à Siramakana (84 %) et Kidira (66 %). Gouloumbou, exutoire du bassin amont de la Gambie, enregistre ses plus fortes fréquences en avril (73 %), valeurs supérieures à celles de Toukoto (45%) et de Dibia (53 %).

La précocité du minimum à ces deux dernières stations tient plus de la nature géologique des terrains (gréseux) dont les diaclases favorisent une infiltration localisée mais très forte.

En revanche, ni la géologie ni la morphométrie n'expliquent la précocité du minimum à Gouloumbou[16]. La discontinuité de la pluviométrie et sa forte péjoration est plus plausible comme facteur explicatif. Ceci, d'autant plus qu'en période de faible pluviosité, les étiages tendent à la précocité pour les années à venir.

[16] La station de Gouloumbou est la seule du régime tropical pur à enregistrer ses étiages en avril comme les stations du domaine tropical de transition (Dakka-Saïdou ou Fadougou).

Cela se confirme au regard de la place des débits minimaux pour la période 1961-1993 ou certains mois ont des fréquences élevées (tab. 79). C'est le cas en régime tropical pur où Oualia connaît 44 % de fréquences d'apparition de ses étiages en janvier ou février, Toukoto 33 %, Siramakana 27 %, Kidira et Gouloumbou 13 %. Pour la même période, Bakel connaît 20 % de fréquences d'apparition de son débit minimal en avril.

Le régime tropical de transition n'est pas épargné puisque pour la même période, Fadougou enregistre 3 % de ses étiages en janvier ou février.

Tableau 79 : Nombre et fréquences (en %) d'apparitions par mois des étiages dans les hauts bassins (période 1961-1993).

	Stations	Référence	Jan-Fév		Mars		Avril		Mai	
Bassin	Bakel	33 ans	-	-	-	-	06	20 %	24	80 %
	Kayes	33 ans	-	-	01	3 %	02	7 %	27	90 %
	Dibia	33 ans	-	-	05	17 %	13	43 %	12	40 %
	Dakka-Saïdou	33 ans	-	-	-		20	67 %	10	33 %
du	Oualia	33 ans	12	40 %	01	3 %	09	30 %	09	30 %
	Toukoto	33 ans	10	33 %	02	7 %	08	27 %	09	30 %
	Siramakana	33 ans	08	27 %	-	-	02	7 %	18	60 %
	Kidira	33 ans	04	13 %	07	23%	07	23 %	12	40 %
Sénégal	Fadougou	33 ans	01	3 %	06	20 %	11	37 %	12	40 %
Bassin de	Gouloumbou	33 ans	-	-	04	13 %	19	64 %	07	23 %
la Gambie	Kédougou	33 ans	-	-	01	3 %	08	27 %	21	70 %

Les étiages des hauts bassins sont ainsi soumis à des fluctuations mensuelles qui peuvent être précoces, normales ou tardives. Mais si l'analyse des périodes de référence montre une stabilité mensuelle des étiages qui surviennent en avril ou en mai (tab. 78), l'observation de la période récente (1961-1993) révèle surtout une tendance à la précocité des étiages des hauts bassins jusque là centrés sur une période normale (avril ou mai). Cette précocité, au-delà de la place inhabituelle des minima se traduit par un assèchement pendant plusieurs mois de certains cours d'eau. En 1984, le Bafing à Dakka-Saïdou n'a écoulé que 2,31 $m^3.s^{-1}$ au mois de mai. Depuis 1980, les écoulements du Bakoye à Oualia sont nuls de la mi-janvier à la mi-juin. Pour la même période à Siramakana sur le Baoulé et Kabaté sur la Kolimbiné, les écoulements nuls s'étendent de janvier à la première quinzaine de juillet. Pareils exemples sont nombreux sur les cours d'eau des hauts bassins.

Les étiages riment donc avec le cachet particulier de chaque année, où l'eau précipitée puis écoulée selon son abondance, détermine l'indigence des cours d'eau. Cependant, pour la période récente, le tarissement est devenu plus précoce et beaucoup plus long.

2.1.2. La variabilité interannuelle des étiages

Elle est d'abord spatiale, puisque comme leur apparition, les étiages, sont plus soutenus ou sévères d'un bassin à l'autre. Ces critères traduisent le caractère temporel car d'une année à l'autre, les étiages varient en fonction de l'écoulement moyen annuel enregistré. Les caractéristiques moyennes des étiages des hauts bassins sont données dans le tableau 80.

Tableau 80 : Caractéristiques moyennes annuelles des étiages dans les hauts bassins (période 1903-1993 et 1953-1993).

Stations	Débits Q $m^3.s^{-1}$	D s $l.s^{-1}.km^{-2}$	Coefficient de variation	Maximum	Minimum	Intervalle de variation
Bakel	*12,2*	*0,05*	*1,8*	*147*	*0,1*	*146,9*
1903-1986	7,6	0,03	0,64	32	0,1	31,9
Kayes	*11,5*	*0,07*	*2,1*	*190*	*0,6*	*189,4*
1903-1986	7,1	0,04	0,71	39	0,6	38,4
Dibia	*14,5*	*0,43*	*1,8*	*197*	*0,14*	*196,8*
1903-1986	9,3	0,28	0,74	61,1	0,14	60,9
Dakka-Saïdou	11,8	0,72	0,51	38,7	0,1	38,6
Oualia	0,61	0,007	0,85	3,2	0,04	3,16
Toukoto	0,61	0,007	1,78	7,2	0,01	7,1
Siramakana	1,2	0,02	0,50	4,3	0	4,3
Kidira	0,78	0,02	0,69	4,6	0,01	4,59
Fadougou	1,6	0,17	0,68	4,9	0,01	4,89
Gouloumbou	6,03	0,1	0,80	32,8	1,07	31,7
Kédougou	0,69	0,09	0,86	2,5	0,007	2,49

Les valeurs de ce tableau appellent quelques remarques :

- Quel que soit le régime hydrologique, les étiages restent marqués par un écoulement faible comme l'indiquent les modules interannuels et les débits spécifiques.
- Lors d'années à écoulement abondant, les étiages peuvent être soutenus comme le montrent les valeurs du maximum. Toutefois, il convient de nuancer cette hypothèse du fait de l'imprécision des mesures des débits minimaux, lesquels subissent fortement les perturbations dues aux ouvrages édifiés sur les cours d'eau. La comparaison des valeurs d'étiages moyens interannuels à Bakel, Kayes et Dibia avant et après la mise en eau du barrage de Manantali est assez éloquente (tab. 80). Ainsi sur la période de référence 1903-1993, on remarque que le débit à ces trois stations est bien soutenu. Ceci se confirme au regard du maximum très élevé pour un cours d'eau tropical soumis à la rigueur de la saison sèche.

Mais les valeurs de la période 1903-1986 qui précédent les lâchures de Manantali prouvent bien que ces trois stations sont sujettes comme le reste des hauts bassins à des étiages prononcés, parfois sévères en référence aux valeurs minimales.

Les étiages des hauts bassins sont donc très variables. Cette fluctuation ressort mieux à l'examen de l'intervalle de variation entre l'année de l'étiage le plus soutenu et le plus prononcé. Le coefficient de variation, qui confirme ces remarques, est partout élevé, ce qui atteste que la variation des étiages ne suit pas la zonation climatique des précipitations.

Ce coefficient varie entre 0,50 et 0,70 en domaine guinéen, ce qui est possible du fait d'une lithologie peu favorable et de la vitesse de tarissement des rivières. Le coefficient de variation à Kédougou 0,86 (période 1953-1993) reflète bien les incidences de ces facteurs sur la période d'étiage.

En régime tropical pur, ce coefficient reste élevé même si Bakel et Gouloumbou connaissent une variabilité moins forte (0,64 et 0,80). La faiblesse du coefficient de variation à ces deux stations est imputable à l'influence de l'ensemble des facteurs de l'écoulement. Par contre la faible variation de Siramakana ne peut s'inscrire que, sur la réaction favorable des terrains formés essentiellement de grès, et qui régularisent les étiages de ce bassin.

Les débits extrêmes traduisent deux caractères antinomiques mais conformes qui rythment l'écoulement des hauts bassins : une période à écoulement fort qui survient durant la saison des pluies et dont l'abondance est fonction de la pointe de crue, et une période d'indigence lors de la saison sèche marquée par des maigres prononcés.

Ces variations saisonnières des extrêmes hydrologiques illustrent à travers la place des maxima et des minima mensuels la grande irrégularité de ces régimes. Sur la période de référence respective des deux bassins (91 et 41 ans), ces fluctuations sont beaucoup plus quantitatives que temporelles. Elles sont aussi plus sensibles à travers les écarts entre le maximum et le minimum mensuel ce qui traduit une forte immodération. Le maximum mensuel se situe régulièrement en septembre tandis que le minimum intervient en mai, ce qui laisse supposer une relative stabilité de ces régimes. Cependant, l'observation de séries plus courtes (1961-1993) montre que la variabilité mensuelle peut bien être temporelle.

L'augmentation des fluctuations de la place du maximum en août plutôt qu'en septembre, la précocité des minima qui peut survenir même en novembre (1973 à Toukoto) montrent que la péjoration pluviométrique récente implique des modifications dans les régimes hydrologiques.

3. SECHERESSE ET MODIFICATION HYDROLOGIQUE

La relation entre précipitations et débits montre que les déficits de la pluviométrie ne vont pas sans incidences sur l'écoulement des hauts bassins. La pénurie d'écoulement des hauts bassins est étudiée à partir des débits et des modules de crues sur la période 1961-1993 déjà retenus pour l'étude de la péjoration pluviométrique.

3.1. Les aspects hydrologiques de la sécheresse

La sécheresse qui affecte les hauts bassins résulte de la conjonction de deux faits : un fait planétaire, qui expose une grande partie des hauts bassins à l'influence de l'agglutination saharienne pendant une bonne partie de l'année ; un fait régional, la continentalité, qui situe les hauts bassins à 300 km de la mer. Ainsi s'explique la puissance de la sécheresse : sécheresse climatique, que traduit l'indigence des modules pluviométriques, tous en baisse depuis 1968 (chap. 4, 2 e Partie).

Or, nous l'avons évoqué, une proportion variable, mais importante de ces pluies est perdue à différents stades et ne profite pas aux cours d'eau. Dans ce milieu à quatre domaines climatiques, l'évaporation et l'évapotranspiration sont exaltées par une chaleur intense et des vents desséchants en période hivernale. Il en résulte un bilan hydrique déficitaire sur une grande partie des hauts bassins et, par conséquent, une sécheresse édaphique qui renforce la pénurie en eau.

Mais, dans un milieu aussi vaste et aussi varié que les hauts bassins, la sécheresse ne présente pas partout le même caractère et la même gravité. Les nuances hydroclimatiques et la nature du sol se combinent pour diversifier les modalités spatiales et temporelles de la pénurie.

Dans un premier temps, nous analysons les aspects de cette sécheresse à partir des modules et des crues annuelles. L'évolution de l'hydraulicité à travers les médianes nous permet dans un second temps de mieux comprendre les caractères de la sécheresse récente.

3.1.1. La baisse des modules annuels

La baisse des modules annuels est étudiée à partir de l'évolution des 33 dernières années et leurs écarts par rapport à la normale 1961-1990. Quatre stations sont retenues pour affiner l'analyse de la sécheresse hydrologique : Dakka-Saïdou et Kédougou en domaine tropical de transition qui contrôlent les apports de la partie guinéenne des cours d'eau ; Bakel et Gouloumbou en régime tropical pur, exutoires des deux bassins. Comme pour la pluviométrie, nous convenons avec les différents auteurs que le début de la sécheresse actuelle se situe en 1968. Les valeurs des différentes stations contenues dans les tableaux 81 et 82 indiquent une baisse continue des modules depuis 1968, entrecoupée rarement par des années qui atteignent la normale.

Sur la période de référence 1903-1993, la moyenne à ces stations est de 726,5 $m^3.s^{-1}$ à Bakel ; 256,9 $m^3.s^{-1}$ à Dakka-Saïdou et 98 $m^3.s^{-1}$ à Kédougou. La moyenne de la station de Gouloumbou, calculée sur la référence 1953-1993, est de 210 $m^3.s^{-1}$.

On observe que pour la période récente (1961-1993), cette moyenne tombe à 552,2 $m^3.s^{-1}$ à Bakel, soit 3 % de moins que la normale 1961-1990 qui est de 566,4 $m^3.s^{-1}$. Ces déficits sont moins accrus en domaine tropical de transition, puisque la moyenne de la période récente est 207 $m^3.s^{-1}$ à Dakka-Saïdou soit seulement 2 % de moins que la normale (211,7 $m^3.s^{-1}$). A Kédougou, on obtient une moyenne de 87,9 $m^3.s^{-1}$ soit un déficit de -3 % par rapport à la normale 1961-1990 (90,6 $m^3.s^{-1}$).

Tableau 81 : Modules et écarts à la normale dans le haut bassin du Sénégal.

Bakel

Année	Débit $m^3.s^{-1}$	Ecart (%)	Année	Débit $m^3.s^{-1}$	Ecart (%)	Année	Débit $m^3.s^{-1}$	Ecart (%)	Année	Débit $m^3.s^{-1}$	Ecart (%)
1961	1028	81,5	1970	588,3	3,8	1979	330,4	-41,7	1988	*454,5*	*-19,8*
1962	837	47,8	1971	647,4	14,3	1980	437,1	-22,8	1989	*404,5*	*-28,6*
1963	752	28	1972	282,2	-50,2	1981	459,7	-18,8	1990	*250,2*	*-55,8*
1964	1058	86,7	1973	390,8	-31	1982	328,5	-42	1991	*459,5*	*-18,9*
1965	1143	102	1974	823,9	45,4	1983	239,5	-57,7	1992	*392*	*-30,8*
1966	916	61,7	1975	656,4	15,8	1984	230,3	-59,3	1993	*377,2*	*-33,4*
1967	1133	100	1976	509,4	-10	1985	374,5	-33,9			
1968	437,6	-22,7	1977	352,2	-37,8	1986	357,2	-36,9			
1969	834	47,2	1978	551,3	-2,6	1987*	*212,4*	*-62,5*			

Dakka-Saïdou

Année	Débit $m^3.s^{-1}$	Ecart (%)	Année	Débit $m^3.s^{-1}$	Ecart (%)	Année	Débit $m^3.s^{-1}$	Ecart (%)	Année	Débit $m^3.s^{-1}$	Ecart (%)
1961	329,5	55,6	1970	217,8	2,8	1979	155	-26,8	1988	180,6	-14,7
1962	281,9	33,1	1971	191,2	-9,7	1980	171,3	-19,1	1989	169,9	-19,7
1963	263,4	24,4	1972	197,3	-6,8	1981	182,3	-13,9	1990	160,1	-24,4
1964	304,1	43,6	1973	179,9	-15	1982	146,1	-31	1991	198,5	-6,2
1965	290,7	37,2	1974	230,8	8,9	1983	179,9	-15	1992	134,2	-36,6
1966	269,6	27,3	1975	216	2	1984	113,4	-46,4	1993	131,8	-37,7
1967	386,2	82,4	1976	195	-7,8	1985	160,4	-24,2			
1968	182,6	-13,7	1977	158	-25,4	1986	167,2	-21			
1969	309,3	46	1978	190	-10,3	1987	171,7	-18,9			

La station de Gouloumbou, pourtant caractéristique du régime tropical pur comme Bakel n'enregistre qu'un déficit de -4 % sur la moyenne des 33 ans (185,7 $m^3.s^{-1}$), par rapport à la dernière normale de référence (193,5 $m^3.s^{-1}$). Le cas de cette dernière station montre la prudence qu'il convient de prendre vis à vis des séries hydrologiques courtes. Car, il ne suffit pas de savoir que l'on est en période sèche pour appliquer la correction appropriée aux moyennes obtenues (J. C. Olivry, 1982).

Tableau 82 : Modules et écarts à la normale dans le bassin amont de la Gambie.

Gouloumbou

Année	Débit $m^3.s^{-1}$	Ecart (%)	Année	Débit $m^3.s^{-1}$	Ecart (%)	Année	Débit $m^3.s^{-1}$	Ecart (%)	Année	Débit $m^3.s^{-1}$	Ecart (%)
1961	343	77,2	1970	191	-1,2	1979	115	-40,5	1988	131,4	-32
1962	313	61,7	1971	161	-16,8	1980	153	-20,9	1989	146,5	-24,2
1963	248	28,1	1972	120	-37,9	1981	121,4	-37,2	1990	89,1	-53,9
1964	372	92,2	1973	168	-13,1	1982	116,4	-39,8	1991	120,3	-37,9
1965	371	91,7	1974	275	42,1	1983	66,4	-65,6	1992	95,8	-50,4
1966	396	104,6	1975	219	13,1	1984	93,3	-51,7	1993	107,3	-44,5
1967	368	90,1	1976	146	-24,5	1985	140,9	-27,1			
1968	138	-28,6	1977	89,1	-53,9	1986	104,1	-46,1			
1969	270	39,5	1978	242	25	1987	98,8	-48,9			

Kédougou

Année	Débit $m^3.s^{-1}$	Ecart (%)	Année	Débit $m^3.s^{-1}$	Ecart (%)	Année	Débit $m^3.s^{-1}$	Ecart (%)	Année	Débit $m^3.s^{-1}$	Ecart (%)
1961	143,4	58,3	1970	105,6	16,6	1979	51,3	-43,3	1988	86	-5
1962	134,4	48,3	1971	67,2	-25,7	1980	86,5	-4,4	1989	82,6	-8,8
1963	114,7	26,6	1972	69,7	-23	1981	69,2	-23,5	1990	63,9	-29,4
1964	160,9	77,6	1973	77,5	-14,3	1982	62,3	-31,1	1991	69,3	-23,4
1965	134,5	48,5	1974	109,7	21,1	1983	38,4	-57,6	1992	51,9	-42,6
1966	154	69,9	1975	88,7	-2	1984	35,3	-60,9	1993	60,4	-33,2
1967	141,8	56,4	1976	81,9	-9,5	1985	84,8	-6,3			
1968	85,6	-5,4	1977	55,2	-39	1986	49,6	-45,2			
1969	125,7	38,7	1978	98,2	8,4	1987	59	-34,8			

L'observation des tableaux 81 et 82 montre en outre que depuis 1976, aucune année n'enregistre un écoulement normal aux quatre stations. A Bakel, 13 années sur la période 1961-1993, ont des déficits supérieurs à -30 %, proportion identique à Gouloumbou. Pour la même série, 6 années (1972, 1983, 1984, 1987, 1990 et 1993) enregistrent des déficits supérieurs à -50% à Bakel tandis que la station de Gouloumbou totalise 5 années (1977, 1983, 1984, 1992 et 1993).

En régime tropical de transition, Dakka-Saïdou enregistre 4 années de déficits supérieurs à -30 % (1982, 1984, 1992 et 1993). A Kédougou, 9 années accusent des déficits supérieurs à -30 % alors que les déficits de 1983 et 1984 sont supérieurs à -50 %.

Le caractère exceptionnel de la sécheresse récente s'affirme plus encore lorsqu'on compare les modules récents à l'ensemble de la période de référence. Le classement des 20 modules les plus faibles sur la période de référence donne le classement suivant :

A Bakel, en régime tropical pur, sur les dix premiers modules les plus faibles (**1987, 1984, 1983, 1990, 1972,** 1913, **1982, 1979, 1977, 1986**) depuis le début de mesures , 9 années appartiennent à la période récente (1961-1993) ; (**1993,** 1944, **1985, 1973, 1992, 1989, 1980,** 1968, 1941, **1988**) soit 80 % des vingt modules les plus faibles appartiennent à la période 1961 et 1993. Ces remarques se renforcent à l'analyse de la série de Gouloumbou où tous les modules les plus faibles sont compris entre 1968 et 1993.

En régime de transition, Dakka-Saïdou présente le classement suivant :
(**1984, 1993, 1992, 1982, 1979, 1977, 1990,** 1913, **1985, 1986**) soit 9 années sur les dix premiers modules qui sont incluses dans la période actuelle ; (**1989, 1980, 1987,** 1944, **1973, 1983, 1988,** 1941, **1968,** 1921), soit au total 16 années sur vingt qui appartiennent à la période 1961-1993. A la station de Kédougou, le classement des vingt modules les plus faibles est identique à celui de Dakka-Saïdou.

L'observation des cinq premiers modules les plus faibles des quatre stations classe l'année 1984 au premier rang en régime de transition (Dakka-Saïdou et Kédougou), situation identique à Bakel en régime tropical pur. Le module minimum intervient toutefois en 1983 à Gouloumbou.

Mais, le fait le plus remarquable est, qu'à l'exception de Kédougou où l'année 1942 détient le quatrième module le plus bas, toutes les autres stations ont leurs plus faibles modules entre 1979 et 1993. Ceci est révélateur du caractère prématuré qui situait le cœur de la sécheresse en 1972. Dans le classement des plus faibles modules, cette année ne vient qu'au 5^{e} et au 11^{e} rang respectivement à Bakel, et à Gouloumbou. Par contre, l'année 1972 ne figure même pas au classement des vingt modules minimaux de Dakka-Saïdou. A Kédougou, cette année n'arrive qu'en 18^{e} position des plus faibles modules.

Lorsqu'on cumule les quatre années qui précèdent la mise en eau de la retenue de Manantali, le caractère de l'écoulement des hauts bassins est plus dramatique. Le total des années 1983, 1984, 1985 et 1986 à Bakel est de 1200 $m^3.s^{-1}$, soit l'équivalent d'une année à fort écoulement comme 1950 (1255 $m^3.s^{-1}$), qui ne vient pourtant qu'en 5^{e} place des plus forts modules annuels. Gouloumbou présente une situation similaire, même si le cumul de ces quatre années (404,7 $m^3.s^{-1}$) est légèrement plus fort que son débit maximum annuel (396 $m^3.s^{-1}$) en 1956. Mais, rappelons que l'échantillon de cette station est assez réduit, ce qui ne nous permet pas de le confronter aux écoulements antérieurs à 1953.

Les stations les plus méridionales des hauts bassins n'échappent pas non plus au caractère persistant des écoulements médiocres. A Dakka-Saïdou, le total des années 1983, 1984, 1985, et 1986 est juste de 620 $m^3.s^{-1}$ soit un peu plus de 1,4 l'écoulement de l'année la plus abondante à

cette station (419 $m^{3}.s^{-1}$ en 1924). Le total de ces quatre années à Kédougou (205 $m^3.s^{-1}$) dépasse à peine le débit annuel le plus élevé de l'échantillon 1903-1993 (192,5 $m^3.s^{-1}$ en 1955).

La sévérité de la sécheresse hydrologique des hauts bassins est encore plus manifeste quand on cumule les écoulements de ces dernières années. A Bakel, le total des deux dernières années 1992 et 1993 (769,2 $m^3.s^{-1}$) est légèrement supérieur au module d'une année moyenne comme 1975 (656 $m^3.s^{-1}$). Certes, ces années correspondent à un régime artificiel, mais la faiblesse des débits dénote la parcimonie avec laquelle les lâchures sont opérées en amont.

Pareils exemples sont aussi observables à Gouloumbou, où le total des deux années récentes (202,9 $m^3.s^{-1}$) est inférieur à celui de l'année 1975, pourtant très moyenne par son écoulement (219 $m^3.s^{-1}$).

En régime de transition, la station de Dakka-Saïdou enregistre un total de 266 $m^3.s^{-1}$ pour les années 1992 et 1993. Kédougou note pour sa part un cumul de 112,3 $m^3.s^{-1}$. Ces totaux sont inférieurs à l'écoulement d'une année moyenne comme 1966 à Dakka-Saïdou, ou 1969 à Kédougou.

L'écoulement des hauts bassins à donc été fortement réduit au cours des années qui ont précédé le fonctionnement de Manantali. Mais la suite des déficits, comme l'ont montré les dernières années pour les stations non influencées par le régime artificiel du barrage, prouve qu'on est encore loin d'une fin de l'épisode sec.

3.1.2. La faiblesse des crues annuelles

Les aspects de la sécheresse hydrologique, manifestes par une diminution des débits transparaissent aussi sur la puissance des crues annuelles. Sur la période 1903-1993, la crue moyenne est de 3011 $m^3.s^{-1}$ à Bakel. Rapporté à la période 1961-1993, le module moyen de crue se réduit à 2345 $m^{3}.s^{-1}$ soit 22 % de moins. A Gouloumbou, pour une période de 41 ans, le module de crue est de 946,5 $m^3.s^{-1}$, tandis que celui de la période récente tombe à 839,2 $m^3.s^{-1}$ soit une décroissance de -11 %. Pour les stations du régime tropical de transition, Dakka-Saïdou enregistre pour la période récente un débit moyen de crue de 794,9 $m^3.s^{-1}$. Par rapport à la période de 91 ans qui est de 942,9 $m^3.s^{-1}$, on note un déficit de -16 %. La station de Kédougou présente pour la période récente un module de crue de 394 $m^3.s^{-1}$ Celui de la référence 1953-1993 est évalué à 436,2 $m^3.s^{-1}$ soit une baisse du module récent de 10 % de moins.

Le classement annuel des 20 modules de crues les plus faibles sur l'ensemble des périodes de référence (1903-1993) à Bakel et Dakka-Saïdou, ainsi qu'à Gouloumbou et Kédougou (1953-1993) sont les suivants :

A Bakel : **1990, 1984, 1983, 1987**, 1913, **1972, 1979, 1982**, 1940, 1914, **1991**, 1944, **1976, 1985, 1973, 1993, 1992, 1989, 1977** et 1926, soit 75 % des observations qui appartiennent à la période récente. Le minimum absolu revient à l'année 1990 puis suivent 1984 et 1983 qui montrent bien que la succession des déficits est sans précédent.

Sur le fleuve Gambie la station de Gouloumbou dont l'échantillon est assez réduit conforte la position des modules de crues minimaux de la période récente. Ces derniers sont tous compris entre 1972 et 1993, à l'exception de 1968 qui est le 13e module de crue le plus bas.

Pour le régime de transition, le classement des modules de crue à la station de Dakka-Saïdou sur le Bafing se présente comme suit :
1984, 1913, **1982**, **1992**, **1976**, **1979**, **1993**, **1990**, **1983**, **1991**, soit, 9 modules sur 10 qui appartiennent à la période récente ; **1989**, 1940, **1977**, **1985**, **1968**, **1978**, 1944, **1973**, **1986** et **1972** soit 85 % de l'échantillon à affecter à la pénurie actuelle. La faiblesse des crues est plus marquée par la sécheresse de 1984 comme l'indique le cumul des crues de 1982 à 1986 (2859 $m^3.s^{-1}$) contre les cinq crues de la période déficitaire de 1911 à 1915 (3000 $m^3.s^{-1}$). D'ailleurs, le second module de crue le plus faible à Dakka-Saïdou (1913) se situe juste après l'année 1984. L'observation des modules de crues de Kédougou, seconde station du régime de transition aboutit aux mêmes conclusions. A cette station, les dix premiers modules les plus bas sont compris entre 1972 et 1993. Dans cet échantillon, 7 modules se situent entre 1984 et 1993. Sur les 20 modules de crues, 90 % de l'échantillon sont compris entre 1971 et 1993. Les deux modules qui complètent la série respectivement en 1960 et en 1963 n'arrivent qu'en 16e et 20e position.

On peut donc affirmer que la sécheresse actuelle qui sévit dans les hauts bassins est sans égale depuis le début du siècle. Cette pénurie de l'écoulement est spatiale, comme le montre la fluctuation des déficits à travers les régimes hydrologiques d'un bassin à l'autre. Elle est aussi temporelle à travers la succession, des années à faibles écoulements. Enfin, elle est commune à toute la région par sa sévérité, sa persistance et son intensité. L'année 1972 considérée comme le paroxysme de la sécheresse ne pèse plus par rapport aux déficits de la décennie 1980 dont les années charnières sont 1983 et 1984. L'année 1913 pourtant caractéristique par son indigence extrême n'est plus évoquée au regard de la faiblesse des écoulements actuels. Cette faiblesse est manifeste par la médiocrité des modules annuels et l'affaiblissement de la puissance des crues sur les différents cours d'eau. Les années 1984, 1983 et 1987 ont été particulièrement déficitaires sur les hauts bassins. La mise en eau du barrage de Manantali en 1987 survient donc dans un contexte de profond manque en eau. Si la tendance des précipitations ces dernières années montre un hypothétique retour à la normale, il n'en est par contre rien de l'écoulement qui semble refléter un effet mémoire du cumul de plusieurs années de déficits prononcés (J. C. Olivry, 1991).

3.2. Evolution de l'hydraulicité

L'évolution de l'hydraulicité de la période 1961-1993 est évoquée à partir des valeurs du tableau 83 qui donnent l'hydraulicité de chaque année pour la période 1961-1993.

Tableau 83 : Valeurs de l'hydraulicité des hauts bassins par rapport à la moyenne 1961-1993

Années	Bakel	Dakka-Saïdou	Gouloumbou	Kédougou	Kabaté
1961	1,86	1,59	1,84	1,63	
1962	1,51	1,36	1,68	1,52	
1963	1,31	1,27	1,33	1,30	
1964	1,91	1,46	2	1,83	
1965	2,07	1,40	1,99	1,53	
1966	1,65	1,30	2,1	1,75	
1967	2,05	1,86	1,9	1,61	
1968	0,79	0,88	0,74	0,97	0,53
1969	1,51	1,49	1,45	1,3	2,14
1970	1,06	1,05	1,02	1,20	1,13
1971	1,17	0,92	0,86	0,76	1,59
1972	0,51	0,95	0,64	0,79	0,18
1973	0,70	0,86	0,90	0,88	0,74
1974	1,49	1,11	1,48	1,24	0,04
1975	1,18	1,04	1,17	1	1,45
1976	0,92	0,94	0,78	0,93	0,02
1977	0,63	0,76	0,47	0,62	0,03
1978	0,99	0,91	1,30	1,11	1,94
1979	0,59	0,74	0,61	0,58	0,52
1980	0,79	0,82	0,82	0,98	0,03
1981	0,83	0,88	0,65	0,78	1,79
1982	0,59	0,70	0,62	0,70	0,88
1983	0,43	0,86	0,35	0,43	0,17
1984	0,41	0,54	0,50	0,40	0,01
1985	0,67	0,77	0,75	0,96	1,3
1986	0,64	0,80	0,56	0,56	1,2
1987	*0,38*	0,82	0,53	0,67	0,31
1988	*0,82*	0,87	0,70	0,97	0,33
1989	*0,73*	0,82	0,78	0,93	0,35
1990	*0,45*	0,77	0,47	0,72	0,23
1991	*0,83*	0,95	0,64	0,78	0,12
1992	*0,71*	0,64	0,51	0,59	0,20
1993	*0,68*	0,63	0,57	0,58	0,23

L'analyse de ce tableau montre que c'est à partir de 1975 que l'hydraulicité des hauts bassins devient franchement mauvaise. Pourtant, à priori, des différences existent entre les cours supérieurs et moyens des hauts bassins.

Dans les premières régions citées, la géologie est marquée par des roches imperméables. Le ruissellement prédomine largement sur les possibilités d'infiltration. Par contre sur les cours moyens, la géologie plus variée favorise la présence d'aquifères. Malgré tout, la période 1961-1993 est synonyme de la plus faible hydraulicité jamais observée dans les hauts bassins (tab. 83).

A la station de Bakel, l'hydraulicité la plus élevée revient à l'année 1967 (2,05). Mais dès 1968, se dessine déjà une faible hydraulicité (0,79) relayée toutefois par une situation normale jusqu'en 1971. Deux années à faible hydraulicité (1972 et 1973) succèdent à cette période, mais les années 1974 et 1975 apportent un intermède à la première phase aiguë notée deux ans auparavant. La suite de ces années est une succession d'années à hydraulicité de plus en plus faible. Le record absolu à cette station est détenu par l'année 1987 qui enregistre une hydraulicité de 0,35. La faiblesse de cette valeur est liée à la situation d'avant mise en eau du barrage de Manantali en amont. D'ailleurs au-delà de 1987, les coefficients d'hydraulicités à Bakel deviennent nettement plus élevés.

La station de Gouloumbou sur la Gambie ne présente guère une situation meilleure. L'évolution de l'hydraulicité à cette station s'inscrit presque en termes similaires à ceux de Bakel. A l'exception de l'année 1978 qui enregistre une hydraulicité de 1,3, la faible hydraulicité est aussi notée jusqu'en 1993. Les années les plus faibles à Gouloumbou sont respectivement 1983 et 1984 avec une hydraulicité de 0,3 et 0,5.

La station de Kabaté, caractéristique du régime sahélien enregistre elle aussi une très faible hydraulicité. Sur la période 1968-1993, seules huit années enregistrent une hydraulicité supérieure à 1 (tab. 83). L'année 1969 enregistre la plus forte hydraulicité avec 2,14 tandis que l'année 1984 avec 0,01 détient l'hydraulicité la plus faible.

Sur les cours supérieurs, l'hydraulicité est aussi faible même si par rapport aux cours moyens, on note un léger mieux. A Dakka-Saïdou, la baisse de l'hydraulicité notée en 1975 est continue malgré la variabilité interannuelle.

Les années à plus faible hydraulicité reviennent à 1984 et 1985 avec respectivement 0,54 et 0,77. A Kédougou, hormis l'année 1975 qui maintient une hydraulicité de 1,11 la tendance à la baisse reste la règle générale. L'hydraulicité la plus faible de la période intervient en 1983 (0,35) immédiatement suivie de l'année 1984 avec 0,50.

L'hydraulicité des hauts bassins montre une faiblesse persistante à toutes les stations depuis 1968. Mais si certaines années se particularisent par leur faiblesse, force est de constater que l'évolution d'ensemble n'en est pas pour autant unanime. Les valeurs du tableau 83 laissent entrevoir que c'est surtout dans les cours moyens pourtant susceptibles d'abriter des aquifères que la baisse de l'hydraulicité est la plus prononcée. La sécheresse, en privant les aquifères aval des apports d'infiltration a conduit à une réduction de l'extension de la nappe de versant.

L'épuisement de celle-ci est liée entre autre à la coupure des liaisons entre les aquifères des parties amont et aval.

L'hydraulicité de la période récente, calculée sur la moyenne des séries de références 1903-1993 illustre encore davantage cette faiblesse. On observe alors un véritable effondrement des réserves en eau des hauts bassins. Mais si les années 1980 ont été particulièrement médiocres, notamment 1983, 1984, 1985 et dans une certaine mesure 1987, années qui ont consacré les minima d'hydraulicité, c'est surtout sur "l'effet mémoire" (J. C. Olivry, 1992) des cours d'eau qu'il convient de s'inquiéter quant à un hypothétique retour à une hydraulicité normale.

L'étude du tarissement qui termine ce chapitre nous renseigne sur les capacités de chaque bassin à soutenir un écoulement en cette longue période de pénurie.

3.3. Le tarissement dans les hauts bassins

Si les crues ne se sont révélées ni spectaculaires ni trop contraignantes dans les hauts bassins, il n'en est pas de même des étiages. Par leur profondeur, leur durée, leurs conséquences à l'échelle régionale, ils apparaissent comme le fait majeur de l'hydrologie des hauts bassins. Aussi, il convient à travers l'étude du tarissement d'en faire une analyse détaillée afin d'en déterminer les causes et les modalités. Dans les hauts bassins, les débits des rivières en saison sèche proviennent de la vidange des nappes souterraines, et éventuellement de l'écoulement des rares précipitations qui tombent en cette période. Ainsi, l'étiage est conditionné par la répartition des pluies durant la saison sèche (s'il y en a), et, suivant que le débit initial de la vidange soit plus ou moins grand en fonction du niveau piézométrique. Dans le temps, le tarissement correspond pour M. Roche, (1963) "à la décroissance des débits correspondant à la vidange des nappes en dehors de toute précipitation". Au fur et à mesure qu'on avance dans le temps, la loi de tarissement détermine sous quelle forme s'observe cette décroissance des débits. On admet alors que les nappes non réalimentées, mais toujours drainées par les cours d'eau suivent par approximation la loi de Darcy.

Dans les hauts bassins du Sénégal et de la Gambie, comme du reste dans celui du Niger supérieur (B. Fatogoma, 1994), la loi de tarissement des rivières à une forme exponentielle d'expression :

$$Qt = Qo\ e^{-k(t-to)} \qquad (1)$$

Dans cette expression,
Qo est le débit à l'instant to,
(t-to) est le temps exprimé en jours écoulé entre l'observation du débit Qo et celle du débit Qt,
k est le coefficient de tarissement qui a pour dimension l'inverse du temps.

Ce coefficient de tarissement, pris comme une caractéristique du bassin permet d'évaluer le stock en eau disponible dans les réserves souterraines, suivant un temps déterminé qui correspond à un débit quelconque.

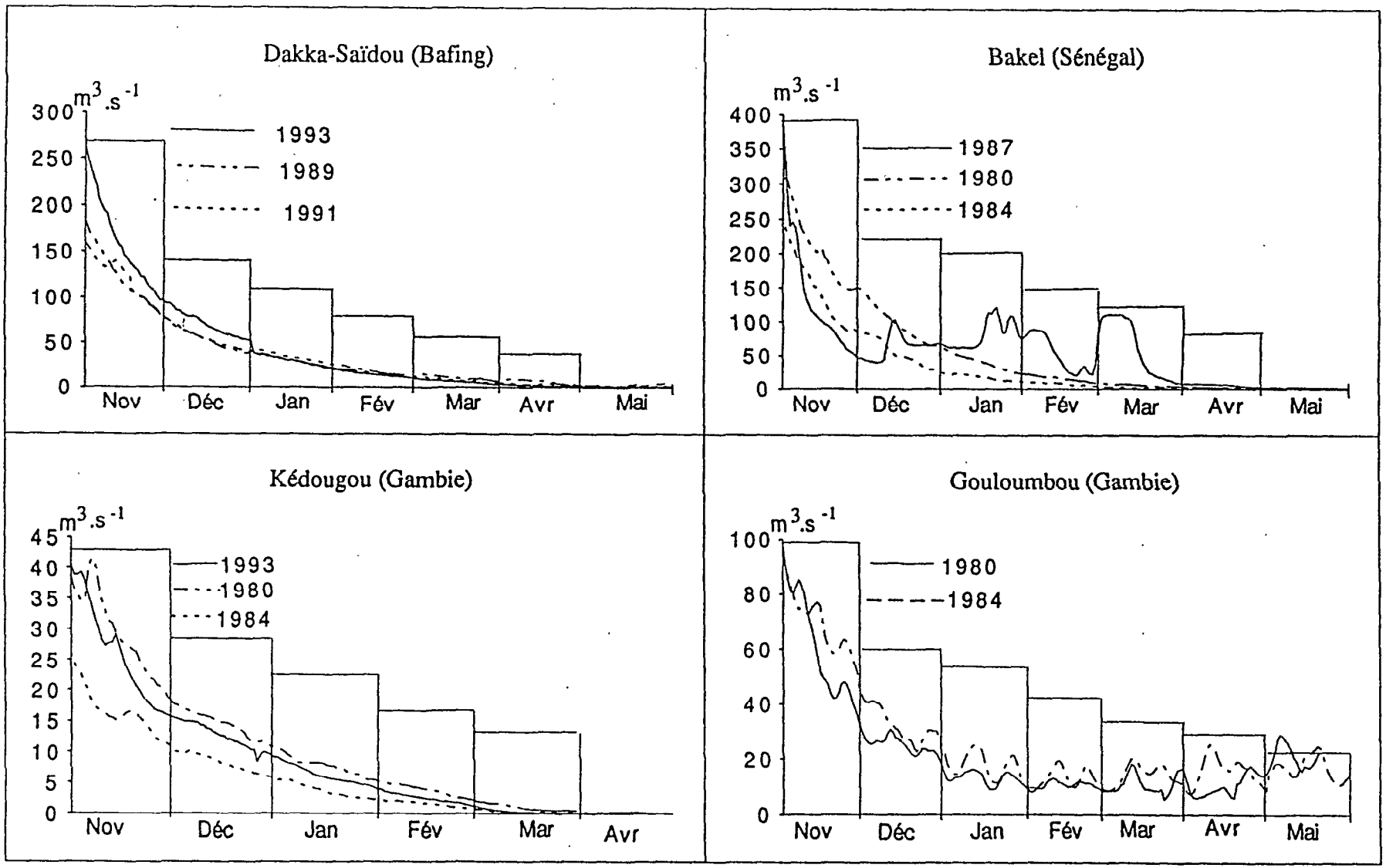


Figure 112 : Courbes de tarissement pour différentes années à quatre stations des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie.

Le tarissement des hauts bassins est étudié à partir de la méthode graphique. Cette méthode détermine le coefficient de tarissement (k) à partir de l'hydrogramme de crue dans sa phase de tarissement.

Il est donné sous une forme logarithmique sur graphique selon l'expression :

$$k = \ln(Qo/Qt)/t \qquad (2)$$

La figure 112 présente le tarissement pour quatre stations des hauts bassins. On considère à priori que le tarissement de ces cours d'eau s'étale de novembre à mai. Les débits mensuels de ces mois sont ensuite portés en leur milieu sur un papier logarithmique. La loi de tarissement se traduit par une droite dont la pente donne la valeur du coefficient de tarissement suivant la formule (2). Cependant, plusieurs droites peuvent être observées pour un même bassin au cours de la saison sèche. Ces droites sont liées à plusieurs raisons qui empêchent le non alignement des points à partir du début du tarissement.

Parmi celles-ci, les erreurs de mesures de débits, les pluies inhabituelles au cours de la phase de décrue, ou encore la prise d'eau par moment dans les cours d'eau sont les plus habituelles. Une correction de la courbe de tarissement est alors nécessaire soit par une régression entre stations du même cours d'eau, soit par une extrapolation ou une interpolation sur une tendance déjà amorcée de l'hydrogramme dans sa phase de tarissement.

Le tableau 84 présente les coefficients de tarissements obtenus sur la période 1961-1993 aux quatre stations de références ainsi que sur la période 1968-1993 à la station de Kabaté sur la Kolimbiné. Les coefficients de la station de Bakel ne sont toutefois pas reportés au-delà de 1987 du fait de la régulation des débits à partir de Manantali.

Les valeurs de ce tableau appellent quelques remarques sachant que, plus le coefficient de tarissement est faible, plus le cours d'eau est soutenu en période d'étiage et inversement :

- C'est d'abord la variabilité interannuelle des coefficients de tarissement. Cette variabilité est fonction à la fois de la lithologie et de l'hydraulicité annuelle de chaque bassin.
- Les variations annuelles des coefficients de tarissement traduisent la fluctuation des aquifères dont le remplissage est tributaire de la pluviométrie. Or, en saison sèche, ces cours d'eau entrent en régime non influencé. Le coefficient de tarissement est donc corollaire du remplissage d'une année à l'autre de ces aquifères.
- Les variations du coefficient de tarissement des hauts bassins se rattachent à trois périodes caractéristiques des hauts bassins : une période à forte hydraulicité des années 1950, qui se prolonge jusqu'en 1968 (tab. 84) ; une période de moyenne à faible hydraulicité qui correspond à la décennie 1970-1980 et une hydraulicité très faible au-delà de cette période qui se prolonge encore.

D'ailleurs, les coefficients les plus élevés aux quatre stations sont tous notés après 1980. En effet, la première sécheresse des années 1970 dont le paroxysme se situe en 1972-1973 s'est soldée par un important tarissement des cours d'eau.

Tableau 84 : Coefficients de tarissement à cinq stations des hauts bassins (1961-1993)

Années	Bakel	Dakka-Saïdou	Gouloumbou	Kédougou	Kabaté
1961-1962	0,016	0,019	0,020	0,017	
1962-1963	0,017	0,021	0,020	0,017	
1963-1964	0,019	0,021	0,020	0,018	
1964-1965	0,015	0,019	0,020	0,016	
1965-1966	0,016	0,014	0,020	0,018	
1966-1967	0,017	0,015	0,020	0,024	
1967-1968	0,015	0,015	0,028	0,017	0,05
1968-1969	0,016	0,014	0,020	0,018	0,02
1969-1970	0,019	0,018	0,020	0,019	0,06
1970-1971	0,015	0,012	0,017	0,016	0,037
1971-1972	0,017	0,013	0,021	0,019	0,04
1972-1973	0,021	0,014	0,020	0,018	0,051
1973-1974	0,021	0,013	0,018	0,019	0,049
1974-1975	0,022	0,013	0,020	0,019	0,040
1975-1976	0,022	0,014	0,018	0,020	0,045
1976-1977	0,025	0,019	0,023	0,021	0,054
1977-1978	0,028	0,012	0,023	0,025	0,057
1978-1979	0,026	0,018	0,026	0,020	0,061
1979-1980	0,028	0,016	0,024	0,023	0,063
1980-1981	0,025	0,017	0,012	0,022	0,066
1981-1982	0,025	0,016	0,011	0,022	0,070
1982-1983	0,027	0,016	0,015	0,022	0,073
1983-1984	0,024	0,020	0,008	0,025	0,074
1984-1985	0,027	0,013	0,011	0,018	0,094
1985-1986	0,030	0,020	0,023	0,020	0,077
1986-1987	0,029	0,021	0,013	0,018	0,082
1987-1988		0,018	0,020	0,023	0,079
1988-1989		0,018	0,014	0,023	0,089
1989-1990		0,016	0,016	0,025	0,084
1990-1991		0,016	0,025	0,021	0,086
1991-1992		0,019	0,015	0,028	0,082
1992-1993		0,023	0,013	0,023	0,088
1993-1994		0,016	0,014	0,021	0,083

Celle des années 1980, par sa remarquable sévérité a considérablement accéléré la vitesse du tarissement des cours d'eau. Cette situation perdure encore malgré l'illusoire diminution des coefficients entre 1985 et 1987 qui laissait entrevoir un retour à la normale de l'écoulement. Les faibles coefficients de la station de Bakel à partir de cette année sont à imputer à l'influence de la retenue de Manantali.

La sécheresse qui affecte les hauts bassins depuis 1968 se traduit par un important tarissement des cours d'eau. Mais si cette décroissance des eaux est variable à la fois dans le temps et dans l'espace, il n'en demeure pas moins qu'elle s'est considérablement aggravée depuis 1980. Cette situation déjà évoquée par A. Joignerez et N. Guiguen, (1992) se poursuit encore ; et malgré l'amorce d'un retour à la normale de la pluviométrie de ces dernières années, les coefficients des années 1990 indiquent encore une hydraulicité très médiocre. On évoque un "effet mémoire" des nappes sérieusement entamées par le cumul des années très déficitaires. A cela, s'ajoute une lithologie particulièrement défavorable où l'existence d'aquifères est très localisée.

Dans la répartition spatiale du tarissement, les cours moyens ont un tarissement moins prononcé lorsque que la sécheresse n'est pas trop étalée. Le cas inverse se produit, quand les déficits hydrologiques perdurent comme pour la période actuelle. Les coefficients de tarissement de la dernière décennie, plus élevés aux stations de Bakel et de Gouloumbou montrent qu'en dépit d'une lithologie défavorable, ce sont les cours supérieurs qui supportent le mieux le tarissement en période de longue sécheresse. Du reste, malgré des conditions hydropluviométriques difficiles, c'est dans ces régions que naissent les cours d'eau qui drainent les hauts bassins. Les conditions climatiques qui prévalent dans les hauts bassins au cours de la période récente y ont induit des changements fondamentaux, dont le principal se résume à la péjoration :

Diminution des précipitations comme l'ont montré les déficits des totaux annuels ; une forte baisse de l'écoulement qui se manifeste par des débits médiocres, un amoindrissement de la puissance des crues, des étiages plus prononcés et un sévère tarissement de l'ensemble des cours d'eau. Il en résulte une modification hydrologique calquée sur l'indigence des ressources en eau de surface fortement réduites, au moment où les besoins en eau dans les hauts bassins comme dans les régions qui sont tributaires (cours inférieurs) s'accroissent démesurément.

Besoins en eau pour l'agriculture dont dépend une population exclusivement rurale, besoins en eau pour bien mener les ambitieux projets de développement que se sont fixés les pays riverains du fleuve Sénégal et Gambie. Mais, pour l'eau encore disponible, il faut une gestion rigoureuse car il s'agit d'une ressource aléatoire puisque constituée entièrement par des apports pluviaux. La préoccupation majeure qui entoure la pénurie actuelle en eau occulte l'évolution des autres éléments liés aux changements climatiques. Or, dans la perspective des aménagements dont font l'objet les hauts bassins, il s'avère impératif de mieux comprendre les causes de la sécheresse. C'est la condition indispensable pour des aménagements fiables et pour une utilisation rationnelle de cette ressource inestimable que représente aujourd'hui l'eau dans le Sahel.

CHAPITRE 4

DYNAMIQUE ET EVOLUTION RECENTE DE LA SECHERESSE

L'analyse des paramètres hydroclimatiques (précipitations, températures, humidité relative et évaporation) met en évidence à travers leur évolution une sécheresse qui perdure depuis plusieurs décennies.

Naturellement, les fluctuations des débits des fleuves suivent celles de la pluviométrie dont elles sont entièrement dépendantes. Ces paramètres hydroclimatiques ne sont en fait que la résultante d'une situation dont les causes sont loin de faire l'unanimité.

Les causes planétaires, nous l'avons évoqué, constituent l'hypothèse la plus plausible. En effet, les circulations entre les hémisphères austral et boréal, la dynamique des échanges méridiens qui en résultent et dont les paramètres climatiques sus-cités en sont l'expression, confortent cette hypothèse dans la cause de la sécheresse. Les manifestations du climat ne sont pas des phénomènes isolés, dont la diversité laisse supposer l'inexistence d'une organisation d'ensemble. L'observation des différents phénomènes météorologiques écarte cette impression et montre une "répétition incessante de temps, dont le processus, le déroulement et les manifestations sont, à des nuances près toujours identiques" (M. Leroux, 1983).

Bien évidemment, l'Afrique par sa position intertropicale s'insère dans ce schéma d'ensemble et les hauts bassins, minuscule mouchoir de poche dans le cadre plus réduit qu'est l'Afrique de l'ouest, n'échappent pas à cette règle.

L'objectif de ce chapitre est donc de voir ce qui à travers l'évolution climatique africaine en général et ouest-africaine en particulier explique la sécheresse. Les observations météorologiques, quelle que soit leur durée, ne permettent pas à elles seules de déterminer les causes réelles de la sécheresse. Mais si les climatologues n'ont pas de réponse précise à cette question, il est possible de rechercher les causes des sécheresses analogues à celles de la période actuelle à partir des données historiques et paléoclimatiques.

L'étude des paléoclimats lors du Pléistocène supérieur et à l'Holocène qui correspondent au Dernier Maximum Glaciaire (DMG) et à l'Optimum Climatique Holocène (OCH) permet de rechercher les causes et les modalités de la sécheresse dans le passé. Comme ces variations se sont produites au cours du passage du dernier grand refroidissement glaciaire au réchauffement interglaciaire actuel, certaines corrélations entre les grands mécanismes atmosphériques et leurs répercussions au Sahel sont plus faciles à mettre en évidence grâce à cet amplificateur du temps paléoclimatique.

Car le Sahel se trouve dans une zone sensible aux moindres déséquilibres planétaires. C'est pourquoi, le comportement du climat sahélien face aux grandes modifications qui ont affecté le climat de la terre est évoqué pour les vingt derniers millénaires. A partir de l'évolution récente, nous analysons la dynamique de la sécheresse actuelle sur les hauts bassins.

1. LES PALEOCLIMATS EN AFRIQUE DE L'OUEST

Les paléoclimats de l'Afrique de l'ouest sont évoqués à partir des paléoenvironnements dont les manifestations ont laissé des témoins sur le paysage. Les caractéristiques extrêmes de ces deux périodes (DMG et OCH) permettent ensuite de retracer les situations paléométéorologiques.

1.1. Les paléoenvironnements en Afrique de l'ouest

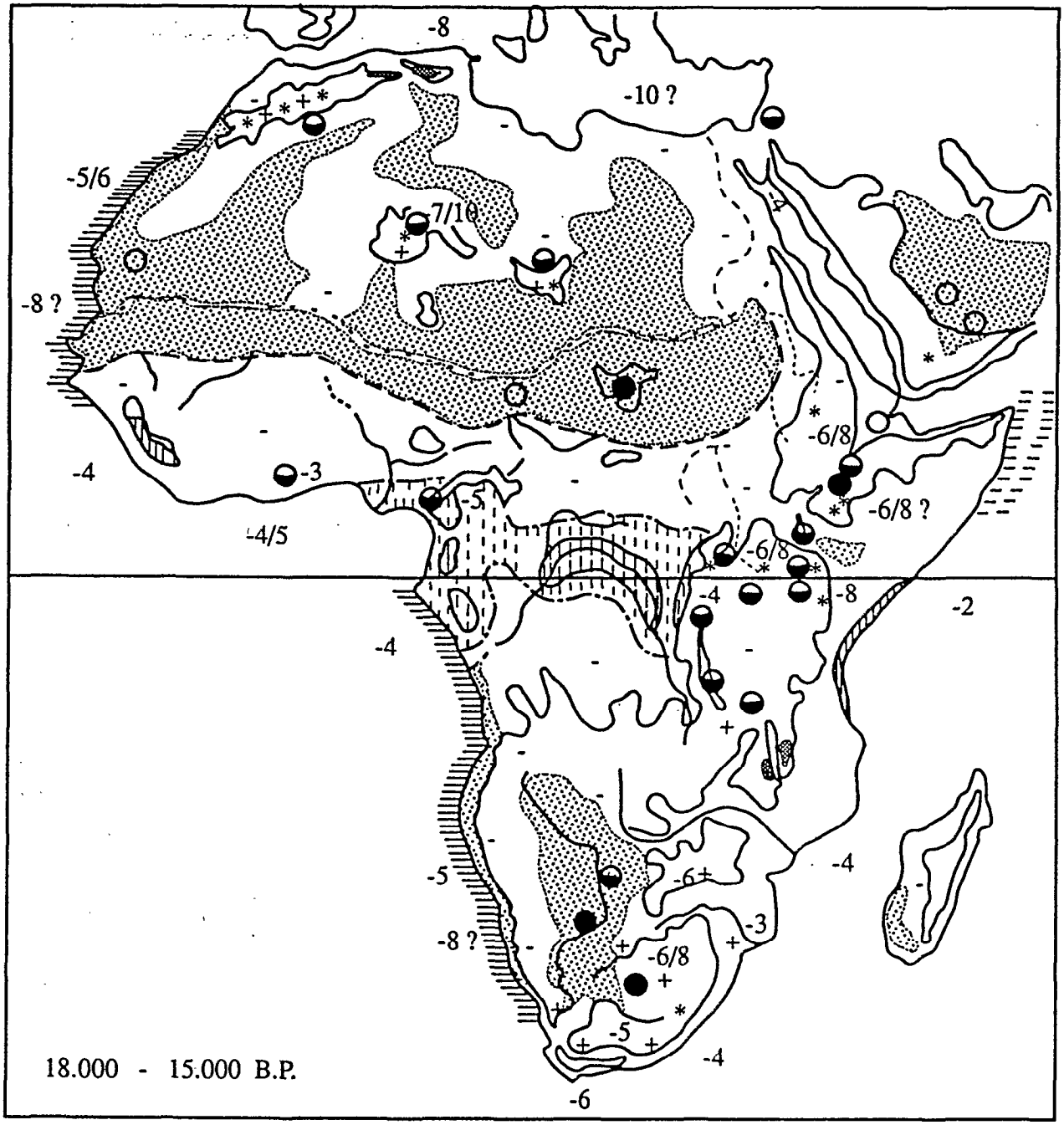
Les paléoenvironnements africains s'inscrivent dans une phase de contrastes climatiques, où les modes de circulation atmosphérique et les changements climatiques ont imprimé des traits particuliers aux paysages. L'évocation des paléoclimats ouest-africains, ses similitudes et/ou différences avec la période récente sont inspirées des travaux de P. Michel, (1973) ; N. Petit-Maire, (1989) ; A. M. Lézine, (1991) ; P. Rognon, (1991) et M. Leroux, (1994).

1.1.1. Le Dernier Maximum Glaciaire (DMG)

En Afrique de l'ouest, le Dernier Maximum Glaciaire s'étend sur la période de 18 à 15 Ka BP. Cependant, cet intervalle est fluctuant, car certaines régions ne sont affectées par le phénomène qu'entre 14 et 13 Ka. Le Dernier Maximum Glaciaire est une période climatique fortement marquée par le froid. La baisse des températures moyennes est "estimée à 8°C par rapport à la période actuelle pour toute l'Afrique septentrionale" (Leroux, 1993). Du point de vue dynamique, les latitudes sud-sahariennes s'assèchent et la réduction de la pluviosité atteint - 50 %.

L'aridité perdure et affecte les paysages de ces régions guinéo-soudaniennes par une dynamique d'altération favorable à la formation de sols ferrugineux. L'avènement de ce bioclimat de savane entraîne par ailleurs une reprise d'induration ferrugineuse en des endroits localisés. L'alimentation médiocre des fleuves, l'extension des cordons dunaires ogoliens d'orientation nord-est à sud-ouest qui atteignent 500 km vers le sud (fig. 113) sont responsables de vastes zones d'endoréisme qui affectent la totalité des cours d'eau sahéliens (P. Michel, 1973). La forêt équatoriale se limite à deux zones refuges, au sud de la Dorsale guinéenne à l'ouest et au sud de la Dorsale camerounaise à l'est.

La majeure partie de l'Afrique de l'ouest est alors occupée par divers types de savanes (J. Maley, 1987). L'importance de ce phénomène et les manifestations qui en découlent s'inscrivent dans une dynamique climatique propre à la période où "le renforcement des alizés et leur maximum de vélocité vers 17 Ka" en sont les meilleurs évocateurs (A. M. Lézine, 1991). Mais si les caractéristiques du Dernier Maximum Glaciaire montrent des ressemblances avec la période actuelle, les températures au cours de cette période furent beaucoup plus basses. Aussi, l'assèchement progressif de cette période n'est pas en relation avec une évaporation plus élevée, mais surtout avec une diminution des pluies (P. Rognon, 1991).



Altitude supérieure à 1000 mètres upwelling côtier : ≡ renforcé ≡ atténué

Formations dunaires Sahara, Kalahari, Namib

Sahara limite sud de l'Ogolien-Kanémien - - - - limite actuelle des dunes vives

Refuges forestiers : refuge d'abri topographique ou refuge fluvial

—·—·— limite des formations boisées hétérogènes (à basse altitude)

niveau des lacs : haut niveau ● bas niveau ◒ lac asséché ○

précipitations : + supérieures à l'actuel - inférieures à l'actuel * névé, glacier

température : -5° baisse de température par rapport à l'actuel (°C)

Figure 113 : Paléoenvironnement de l'Afrique lors du Dernier Maximum Glaciaire (d'après M. Leroux, 1994)

On peut donc retenir que le paléoenvironnement au Dernier Maximum Glaciaire est synonyme d'une dynamique climatique particulière qui se résume en (fig. 113) :

- Une diminution de la pluviométrie et une baisse consécutive du niveau des cours d'eau.
- Une circulation nettement plus rapide avec puissance et renforcement des flux d'alizés.
- Une modification notable des paysages qui s'assimile à une forte dégradation de la végétation, entraînant une extension des cordons dunaires qui empêchent aux cours d'eau d'atteindre la mer (Sénégal notamment).

1.1.2. L'Optimum Climatique Holocène (OCH)

L'Optimum Climatique Holocène est compris entre 9 et 6 Ka BP. C'est une période climatique qui contraste avec le Dernier Maximum Glaciaire puisqu'elle s'inscrit dans une dynamique chaude. Elle se caractérise par un retour à une pluviométrie normale, voire même abondante. Les écoulements des grands organismes fluviaux et de leurs tributaires sont quasi-permanents. Des débits considérables et réguliers sont alors écoulés dans les vallées à grands méandres et plaines d'inondations. Le fleuve Niger à Tombouctou forme de vastes épandages en des lacs et marécages jusqu'à Taoudenni (J. Riser et N. Petit-Maire, 1986). Ces maxima pluviométriques, hydrologiques et biogéographiques correspondent en Europe à un retrait accéléré de l'inlandsis scandinave. Il est donc établi qu'une fois levées les contraintes imposées par la dernière glaciation, on assiste à un brusque retour des conditions de pluies normales au Sahel. Cette recrudescence de la pluviométrie entraîne un lessivage des sols, et une mobilisation du fer.

Dans les hauts bassins, l'avènement d'un bioclimat forestier au sud favorise une altération ferralitique qui donne naissance à des sols ferralitiques. Plus au nord, sur les cours inférieurs traversés par les deux fleuves, l'avènement d'un bioclimat de savane au cours de cette même période holocène se traduit par une reprise de l'induration ferrugineuse avec des possibilités d'induration de cuirasse. A partir de 7,5 Ka, survient un froid bref avec une pluviométrie irrégulière. Les fleuves connaissent, "un écoulement moins régulier, plus saisonnier et recentré sur l'été" (M. R. Talbot, 1990). Cet intermède climatique n'affecte cependant pas la tendance holocène dont les traits du paléoenvironnement s'apparentent à une extension de la forêt guinéenne au-delà du 16° de latitude Nord. M. Leroux, (1990) remarque que "le Sahel était alors couvert par la savane avec des hauts niveaux de lacs d'eau douce et de rivières".

Les principaux traits de l'Optimum Climatique Holocène en Afrique de l'ouest s'identifie à (fig. 114) :

- Un réchauffement général plus précoce au sud (9 Ka) et tardif au nord (6 Ka) après une brève récession fraîche mais intense;
- Une hausse générale de la pluviométrie avec comme corollaire une abondance des organismes fluviaux qui correspond à la 2^{e} phase d'entaille du réseau hydrographique,
- Une extension des forêts, une fixation des édifices dunaires ogoliens et surtout la formation des sols zonaux d'Afrique occidentale.

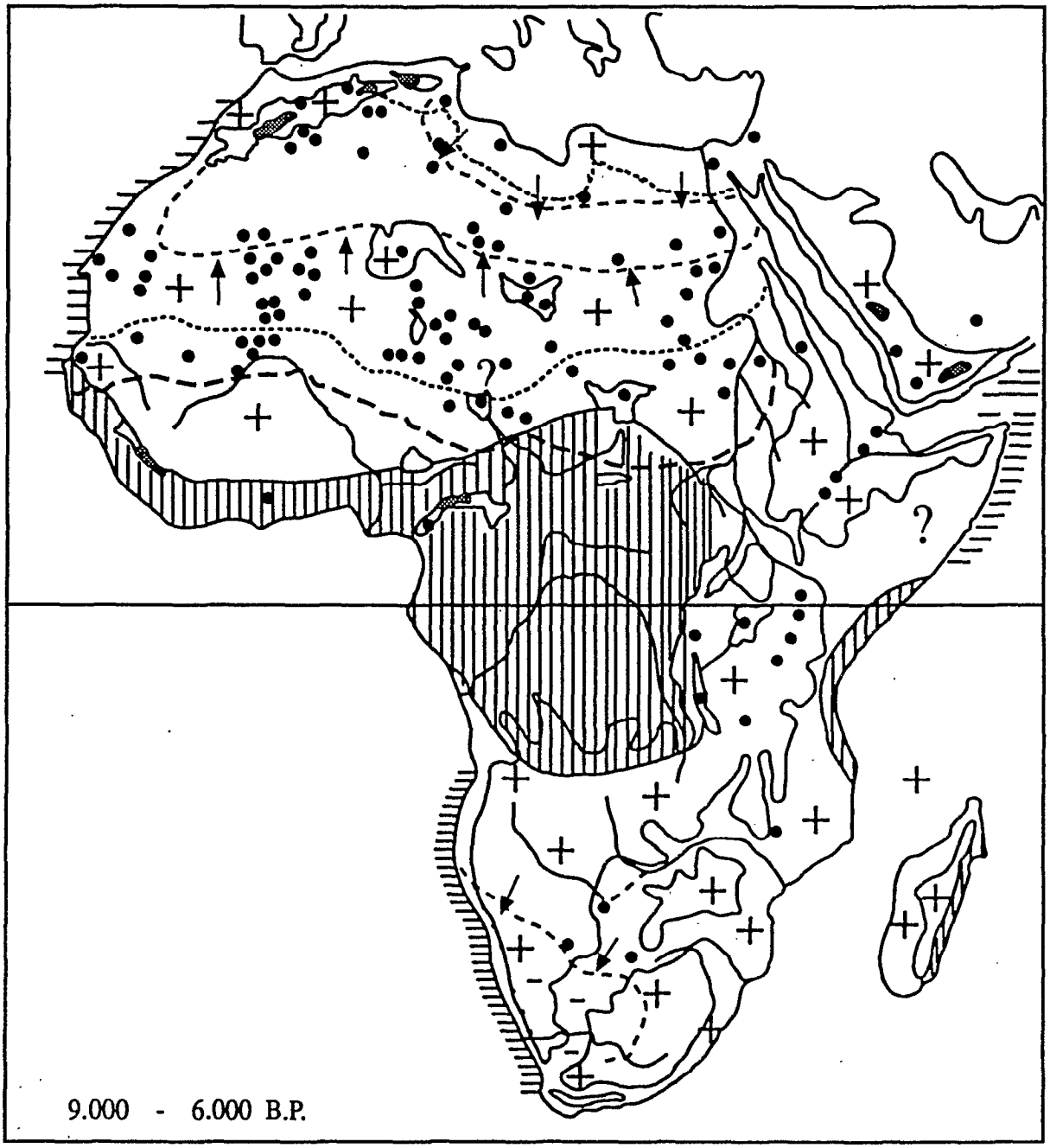


Figure 114 : Paléoenvironnement de l'Afrique lors de l'Optimum Climatique Holocène (D'après Leroux, 1994)

Les paléoenvironnements en Afrique sont donc marqués par deux périodes contradictoires. Le Dernier Maximum Glaciaire (DMG), se caractérise par un froid intense et une tendance à l'aridité.

L'Optimum Climatique Holocène qui lui succède est une période chaude avec une pluviométrie très abondante. L'impact de ces deux périodes sur les paysages se traduit par une dégradation végétale et par la formation de dunes lors du premier épisode (DMG). Le second (OCH), par contre, marque une nouvelle résurgence de la forêt, la fixation des dunes et un écoulement pérenne. Ainsi, les paléoenvironnements de l'Afrique rappellent-ils la brusque aridification notée dans le Sahel à partir de 1968 après les pluies abondantes du dernier optimum climatique contemporain des années 1950.

L'analyse de la dynamique climatique de ces deux périodes à partir de leurs modes de circulation nous permettra de mieux comprendre les similitudes des paléoclimats avec la période actuelle.

1.2. Les modes de circulation paléoclimatiques : essai d'interprétation.

La situation paléométéorologique, interprétée à partir des périodes extrêmes du Dernier Maximum Glaciaire (DMG) et de l'Optimum Climatique Holocène (OCH, 18 000 dernières années), s'exprime en termes inverses. Tous les facteurs climatiques (températures, pluviosité, force du vent, insolation) contrastent à travers un mode de circulation rapide caractéristique du DMG et une circulation lente manifeste durant l'OCH (M. Leroux, 1994).

1.2.1. Le mode de circulation rapide

Le mode de circulation rapide, caractéristique du DMG est la prédominance de la circulation de l'hémisphère boréal. P. Rognon, (1991) note pour cette période la formation d'un inlandsis en Europe du nord dont l'extension atteint 52° de latitude nord. Cet inlandsis de 6,2 millions de km² abaisse les températures sur l'Europe de 10 à 15° environ. Les anticyclones mobiles polaires qui en découlent, ainsi que ceux venus d'Amérique du nord, forment alors de vastes dorsales à basses températures avec une forte cohérence sur de longues distances.

Les flux qui en sont issus (alizés) pénètrent alors très profondément dans le monde tropical, et transmettent progressivement le froid aussi bien en hiver qu'en été. Leur direction méridienne implique un transfert plus intense d'énergie tropicale vers les pôles. Dans les basses couches, le déplacement des AMP est sujet à des trajectoires particulières, en fonction de l'orographie et des blocages anticycloniques.

Cette situation se traduit en altitude par un renforcement des jets d'ouest et de leur subsidence associée, le tout se décalant vers les tropiques. Les agglutinations anticycloniques boréales (Acores et Saharienne) se renforcent énormément. Sur le continent africain, les flux d'alizés deviennent très secs. Mais, du fait de leur grande fréquence, ils pénètrent très loin vers

l'Equateur, bien au-delà des limites actuelles de l'harmattan. La circulation australe est alors fortement confinée et la mousson estivale est repoussée par la puissance des flux boréaux.

La puissance des phénomènes extratropicaux antagonistes réduit considérablement la zone tropicale. La migration annuelle des structures pluviogènes tropicales se limite à une étroite bande cantonnée au sud. L'Equateur Météorologique connaît une faible migration et la puissance des anticyclones interdit une substantielle déviation des alizés en mousson. En Afrique de l'ouest, la diminution des pluies résulte alors d'une forte réduction du transfert d'eau vers l'intérieur par la mousson atlantique qui pénètre difficilement sur le continent en période estivale. L'Afrique de l'ouest est ainsi tributaire d'échanges intenses marqués par une prédominance des AMP qui provoquent un intense transfert de l'énergie tropicale vers les pôles (M. Leroux, 1992).

La conséquence de cette circulation à l'échelle africaine est une prédominance de la sécheresse dont les effets ont été évoqués plus haut. Toutefois, cette tendance sera complètement inversée à partir de l'OCH, par un mode de circulation moins rapide.

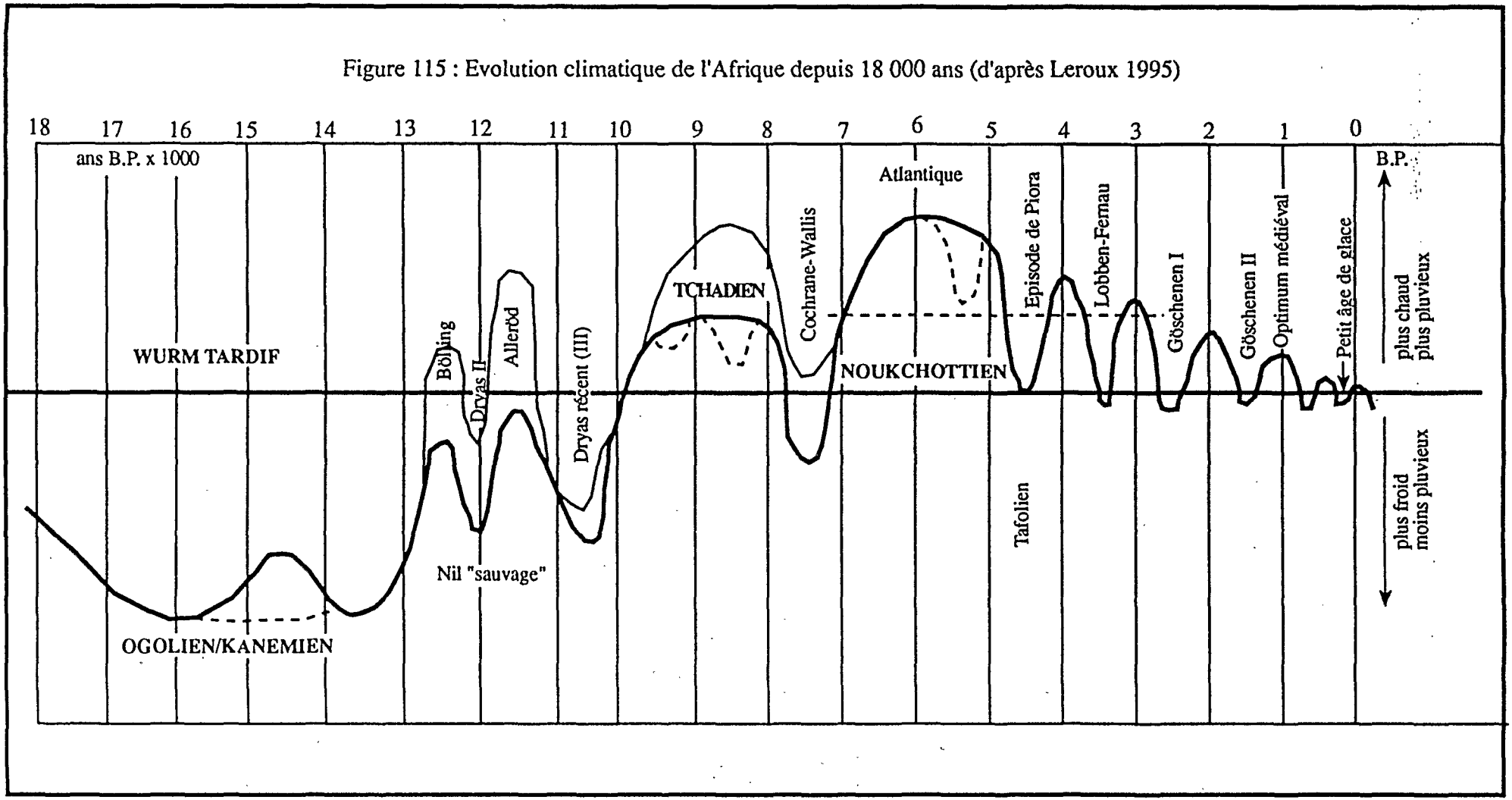
1.2.2. Le mode de circulation lente

Le mode de circulation lente est souvent rattaché à la situation climatique de l'Optimum Climatique Holocène. Elle correspond à une faible régénération des agglutinations anticycloniques boréales et des flux dérivés. Les AMP boréaux, principaux responsables de la translation latitudinale, perdent de leur intensité, ce qui favorise une amplification de la migration des discontinuités. Les agglutinations anticycloniques sont fortement rejetées vers le nord, tandis que les masses d'air australes connaissent un dynamisme intense. Le balayage des flux austraux atteint alors leur aire maximale. Une situation dépressionnaire prédomine, et le facteur thermique en relation avec le mouvement zénithal du soleil développe des dépressions creuses, profondes et attractives.

Du point de vue dynamique, l'affaiblissement de la circulation contribue à déterminer le champ de pression en surface. La reconquête de la forêt, qui a débuté dès 14 Ka s'accompagne d'un maintien sur son pourtour de dépressions thermiques dérivées qui attirent le flux humide sur le continent. Celles-ci, se décalent progressivement au nord et au sud conformément à l'expansion de leurs centres émetteurs, rétablissent la confluence inter-océanique et déterminent la position en surface de l'Equateur Météorologique.

La migration de cette discontinuité, notamment dans les basses couches où son extension est concomitante à l'atténuation des dynamismes extratropicaux, implique une forte amplification des circulations transéquatoriales de la mousson atlantique. Cette situation paléométéorologique favorable est, selon M. Leroux, (1992), responsable "d'une remontée de 500 km de la végétation vers le nord". Elle y perdure jusque vers 6 Ka, où l'équilibre radiatif, l'affaiblissement quasi-général des AMP permettent au domaine tropical d'atteindre sa plus grande extension. La prédominance de la circulation australe autorise alors l'Afrique à conserver le bénéfice du potentiel précipitable tropical (M. Leroux, 1992).

Figure 115 : Evolution climatique de l'Afrique depuis 18 000 ans (d'après Leroux 1995)



La fin de l'OCH en Afrique coïncide progressivement avec un caractère marqué des précipitations. Apparaît alors la typologie de saisons "pluvieuse" en été, en fonction des facteurs de la pluviogenèse et "sèche" en liaison avec la circulation anticyclonique.

La période paléoclimatique ouest-africaine, cadrée à partir de 18.000 ans BP s'inscrit dans les variations du facteur thermique des hautes latitudes qui déterminent le mode de circulation générale.

A cela s'ajoutent pour M. Leroux, (1992) "les facteurs additionnels allogènes représentés par l'environnement continental ou océanique, la puissance des lentilles d'air froid originaires de l'Arctique et de l'Antarctique" et par l'interférence avec les dispositions de l'Afrique. Ce processus nuancé paraît applicable à la situation actuelle, notamment à la dynamique de la sécheresse sahélienne.

Cette hypothèse nous amène à considérer que la corrélation entre assèchement au Sahel et refroidissement aux latitudes plus élevées de l'hémisphère nord est la première explication plausible de la sécheresse (fig. 115). En effet, si depuis la fin de l'OCH (4 800 ans), la dynamique climatique africaine est encore proche du scénario chaud, s'amorce par une tendance certes lente (mais graduelle), d'un scénario froid dont les meilleurs indices se retrouvent à travers de multiples périodes de rémissions dont la dernière "entre 1930 et 1960" correspond à l'optimum climatique contemporain.

Ainsi, les différents indicateurs déjà reconnus (migration continuelle de la sécheresse sahélo-soudanienne, glissement d'ensemble "de 200 à 300 km" des isohyètes vers le sud (R. Morel, 1992) sont autant de constats qui nécessitent une référence aux paléoclimats.

Les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie nous le rappelons intègrent la dynamique climatique de l'Afrique de l'ouest. Leur situation continentale s'identifie en "réceptacle" suivant la proximité ou l'éloignement des flux issus des centres émetteurs.

L'évolution climatique du Dernier Maximum Glaciaire, la propagation des variations climatiques vers la zone tropicale, le processus de transfert de matière et d'énergie par les AMP à cette époque sont tout autant applicables à la période actuelle. Il nous faut à présent, à l'appui des observations synoptiques et/ou saisonnières, étudier l'évolution récente.

2. LES MANIFESTATIONS DE L'EVOLUTION RECENTE

Les facteurs météorologiques des hauts bassins montrent à travers les fluctuations spatiales et temporelles des manifestations très similaires. Ces manifestations, nous l'avons évoqué, s'apparentent à une baisse de la pluviométrie et de l'humidité relative, de l'écoulement, parallèlement à un accroissement des températures et de l'évaporation. Cette évolution récente est dictée par les conditions dynamiques actuelles.

2.1. Les conditions dynamiques actuelles

La dynamique du climat en Afrique de l'ouest a été évoquée précédemment. Toutefois un rappel des conditions générales est nécessaire pour mieux appréhender la dynamique actuelle.

L'Afrique de l'ouest appartient dans son intégralité au climat tropical. Elle participe cependant à la dynamique extratropicale par les anticyclones mobiles polaires (AMP) qui commandent la formation des agglutinations anticycloniques dont sont issues les circulations d'alizés et leurs éventuels prolongements en mousson. En fonction de la période hivernale ou estivale, les flux d'alizés et de mousson constituent les principales composantes de la circulation en Afrique de l'ouest.

- En hiver, la forte puissance des AMP, se traduit par un glissement d'ensemble vers les tropiques. Le vent résultant est représentatif des circulations d'alizés. Son dynamisme est étroitement lié aux situations extratropicales de l'hémisphère nord dont les agglutinations anticycloniques en sont les principales bénéficiaires. La fréquence moyenne de réalimentation de ces agglutinations (Acores notamment) est de 1 AMP tous les 2,4 jours (J. Reynaud, 1992).
- En été, la puissance des AMP diminue, et leur trajectoire est moins méridienne. Les agglutinations boréales se décalent très au nord par rapport aux tropiques tandis que la circulation australe se rétablit progressivement.

Les conséquences de ce mode de circulation imposent donc à l'échelle climatique qu'une stabilité anticyclonique dans l'hémisphère nord se traduit par une non pluviosité dans le Sahel. Cette situation est associée non pas à la latitude subtropicale, mais à la puissance de l'agglutination elle-même, donc au phénomène aérologique dans les basses couches (M. Leroux, 1992).

2.2. Evolution des facteurs aérologiques

Les facteurs aérologiques reconnus dans les hauts bassins concernent essentiellement la pression et le vent. L'analyse des facteurs aérologiques des hauts bassins est faite à partir des données mensuelles et annuelles recueillies dans les stations de base.

2.2.1 Evolution de la pression

L'évolution de la pression est le témoignage du fonctionnement général des phénomènes de l'atmosphère. L'étude de la pression sur une longue période de référence n'est pas aisée, car la succession des épisodes anticycloniques et dépressionnaires ont tendance à se compenser, ce qui limite les résultats obtenus. Mais dans la perspective de notre étude, où la pression atmosphérique est perçue comme un élément du climat et explique, de surcroît, le comportement climatique actuel, le recours à une longue référence nous est indispensable.

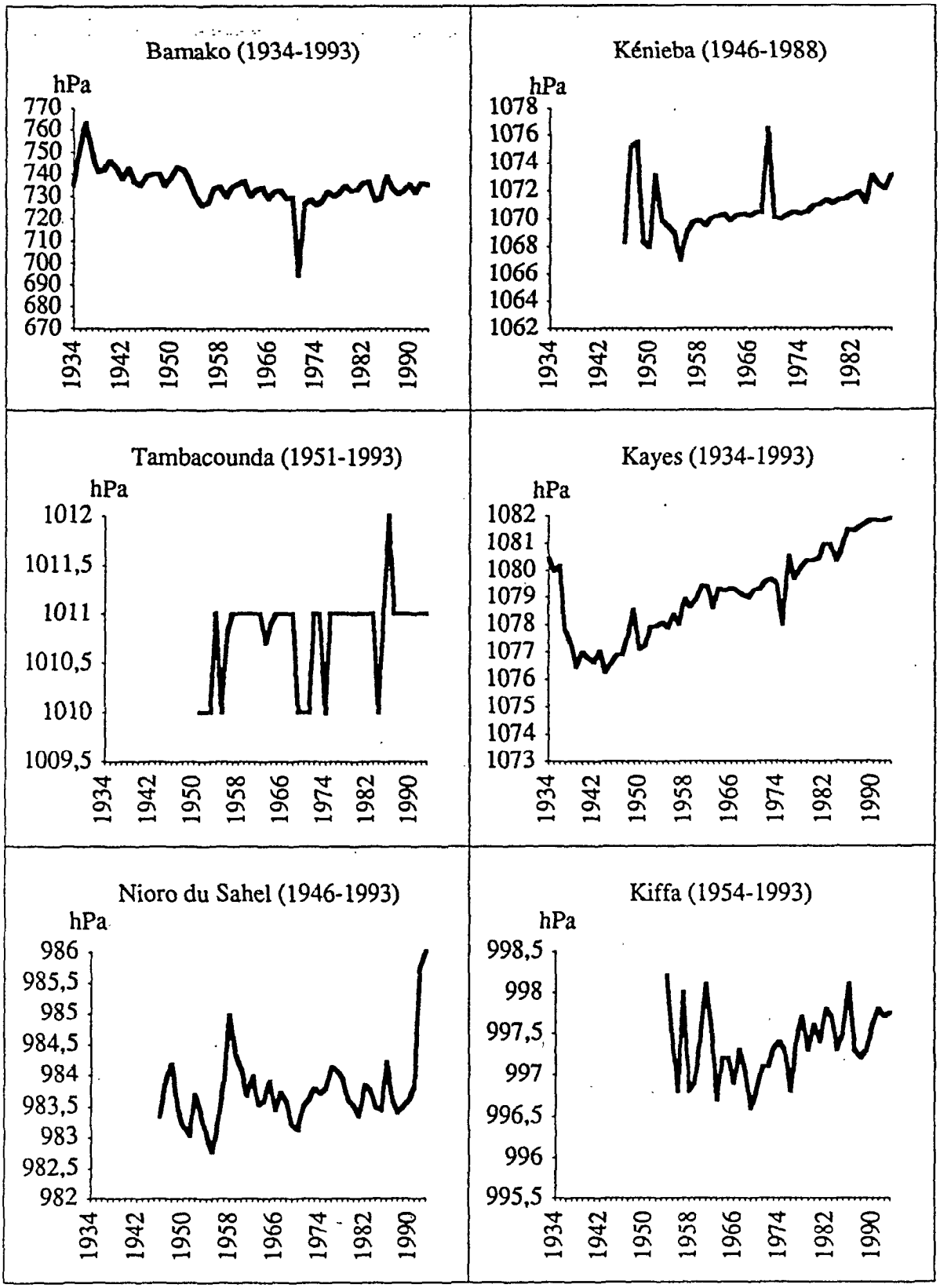


Figure 116 : Pression moyenne annuelle dans six stations des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

2.2.1.1. Evolution de la pression annuelle

Les informations relatives à la pression annuelle des hauts bassins sont mentionnées dans le tableau 85. Comme pour les autres éléments du climat, ces données sont sujettes à une hétérogénéité spatiale.

La figure 116 présente l'évolution de la pression annuelle à chaque station. L'observation de ces graphiques appelle quelques remarques :

- La pression moyenne la plus faible des hauts bassins est enregistrée à la station de Bamako.
- Quelle que soit la longueur de la période, la pression varie peu d'une station à l'autre. Cette faible variation masque cependant des écarts considérables d'une année à l'autre. Car "le bilan des variations synoptiques de la pression, représenté par la moyenne des pressions confère ainsi à la moindre variation un caractère particulièrement représentatif de la dynamique des échanges méridiens" M. Leroux, (1993).

Tableau 85 : Etat des données de pression dans les hauts bassins.

Stations	Période observée	Domaine climatique
Kiffa	1954-1991	sahélien
Nioro du Sahel	1946-1993	
Kayes	1934-1993	nord-soudanien
Tambacounda	1951-1992	
Kénieba	1946-1988	
Bamako	1934-1993	sud-soudanien

- La moyenne des deux stations les plus anciennes (Bamako et Kayes) est respectivement de 734,6 et de 1072 hPa.
- L'évolution de la pression annuelle à toutes les stations montre partout une forte variabilité interannuelle. Cette variabilité est partout très forte en début de période mais s'atténue en fin de période en liaison avec la hausse de pression (fig. 116). Dans les années 1930, cette hausse est forte notamment en 1936 à Bamako et Kayes. Les années 1940 présentent la même caractéristique avec des pointes en 1941 et en 1946. De 1951 à 1960, on observe une baisse de la pression sur l'ensemble des stations. Cette période coïncide d'ailleurs avec la décennie la plus pluvieuse des hauts bassins. Entre 1961 et 1970, la tendance à la hausse s'affirme avec toutefois une baisse en 1969 considérée comme la dernière année pluvieuse au Sahel. A partir de 1970, la tendance à la hausse de la pression est plus nette, avec un maximum dans les années 1972 et 1973 qui correspondent d'ailleurs avec le premier paroxysme de la sécheresse récente. Les années 1980 à 1990 confortent cette augmentation de la pression avec des maxima en 1982, 1983 et 1986, années qui précèdent ou suivent le second paroxysme de la sécheresse.

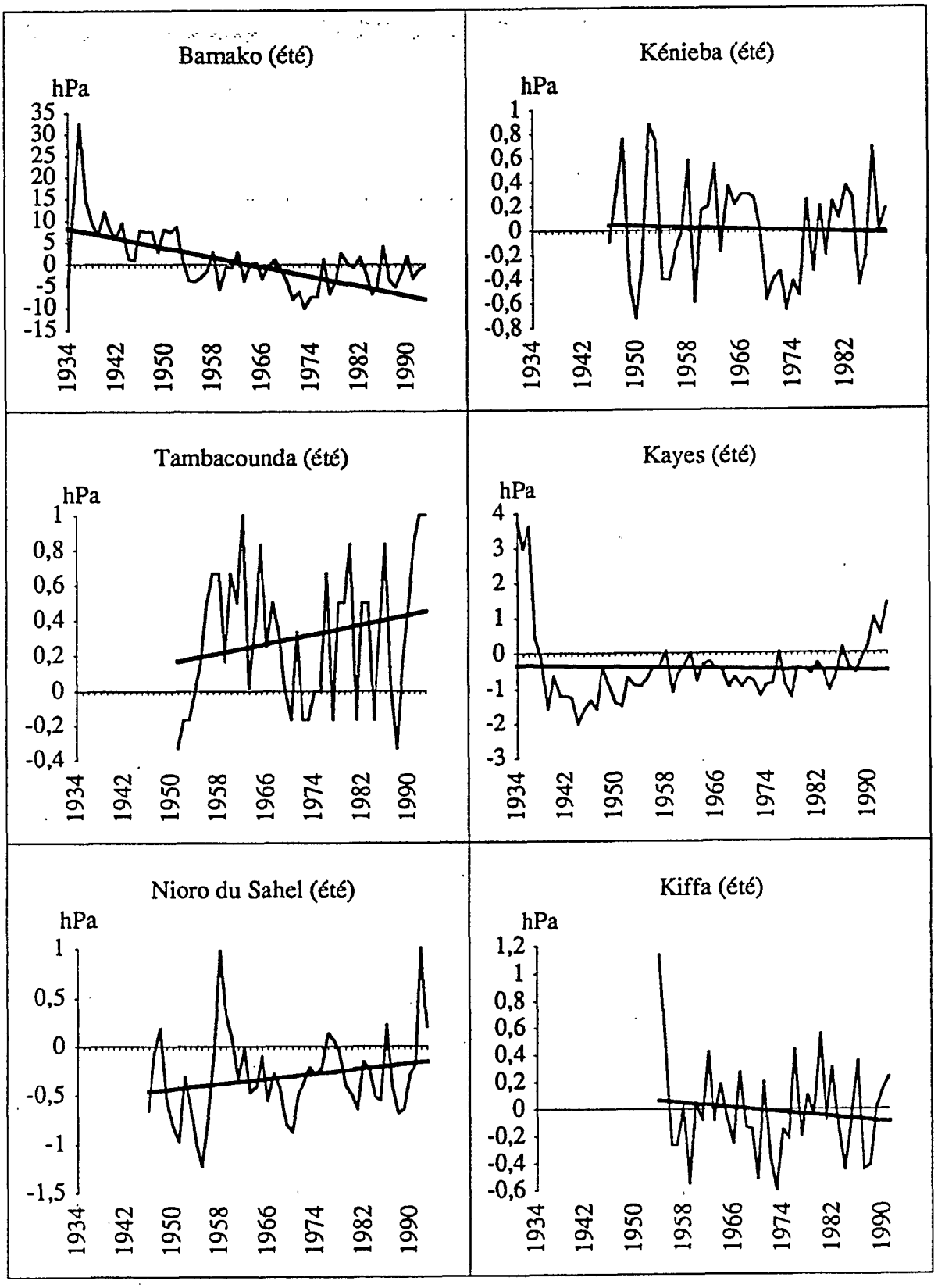


Figure 117 : Pression annuelle moyenne estivale à six stations des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

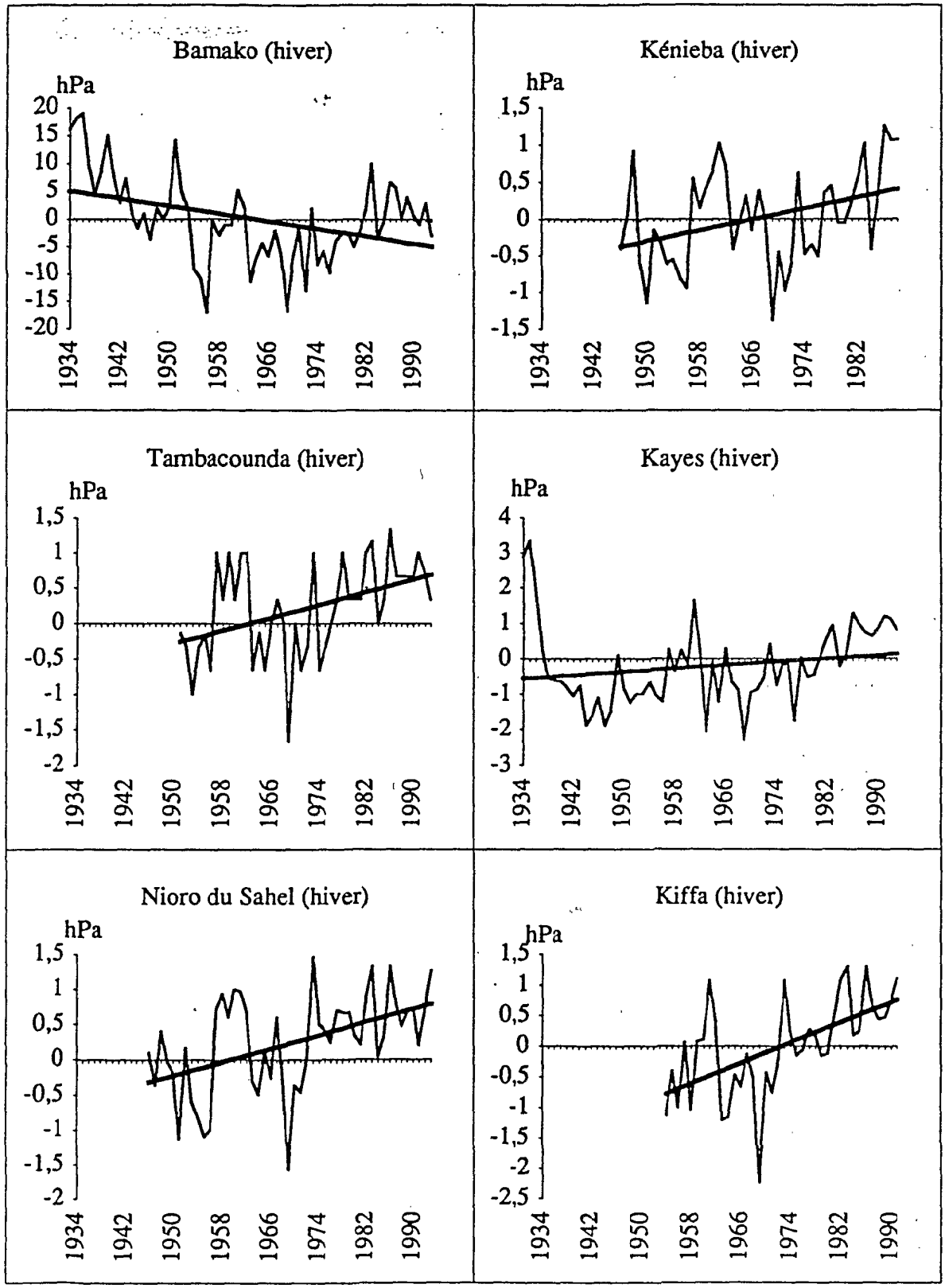


Figure 118 : Pression moyenne annuelle hivernale à six stations des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie

Malgré les légères rémissions observées entre 1988 et 1990, l'évolution des dernières années (1991 à 1993) marque une nouvelle reprise à la hausse à l'exception de Kayes et dans une moindre mesure, Kénieba.

Ces variations interannuelles de la pression se retrouvent dans l'évolution saisonnière. Les fluctuations entre hiver et été de la pression, les flux de surface enregistrés (alizés ou mousson) sont de précieux indicateurs de la pluviométrie.

Ce sont les tendances de cette évolution saisonnière de la pression (à la hausse ou à la baisse) qui expliquent le mieux la baisse de la pluviométrie et par delà la sécheresse dans les hauts bassins.

2.2.1.2. Evolution saisonnière de la pression

Les comportements barométriques saisonniers sont définis à travers les fluctuations entre la période hivernale et estivale. Dans les hauts bassins comme pour le reste du Sahel, la période hivernale est comprise entre les mois de décembre à février tandis que celle d'été s'étend de mai à octobre. Les variations de la pression hivernale dans les hauts bassins sont représentées sur la figure 117.

La droite de régression qui accompagne ces graphiques traduit l'évolution de la pression pour chaque station. Cette évolution montre partout une tendance à la hausse de la pression à l'exception de la station de Bamako. Cette hausse est très nette pour les stations à partir de 1961. Cependant, à Bamako la tendance s'inverse à partir de cette année. La hausse de la pression hivernale est liée à la puissance des agglutinations anticycloniques boréales. Les flux du nord repoussent l'Equateur Météorologique (EM) plus au sud, et la hausse de pression observée au nord de la trace au sol de l'EM de décembre à février (M. Leroux , 1993 ; J. B. Ndong et O. Dione, 1994) montre bien que les flux de l'hémisphère boréal s'opposent à la remontée du flux de mousson.

En été, par contre, la remontée des basses pressions thermiques dans lesquelles s'inscrit l'Equateur Météorologique montre une tendance à la baisse des pressions (fig. 118). Cette baisse est nette à Bamako et à Nioro du Sahel, elle est moindre à Kayes et Kiffa alors qu'elle est insignifiante à Kénieba. A la station de Tambacounda en revanche, la pression estivale est sujette à une forte hausse.

Lorsqu'on recoupe les informations pour l'évolution récente (1961-1993), la covariation inverse entre pression et précipitations se vérifie quasi-systématiquement aussi bien pour les déficits que pour les rares excès pluviométriques (fig. 119). Les années à forte pression (1972, 1982 ou 1983) sont tristement célèbres par leurs déficits pluviométriques aigus.

La faible pression des années 1967, 1969 et plus récemment 1988 est bien connue par les inondations à Bamako (1967) ou au Soudan (M. Leroux, 1993 ; O. Suliman, 1994). C'est donc à travers la dynamique des échanges méridiens que s'expliquent le mieux les causes de la sécheresse actuelle.

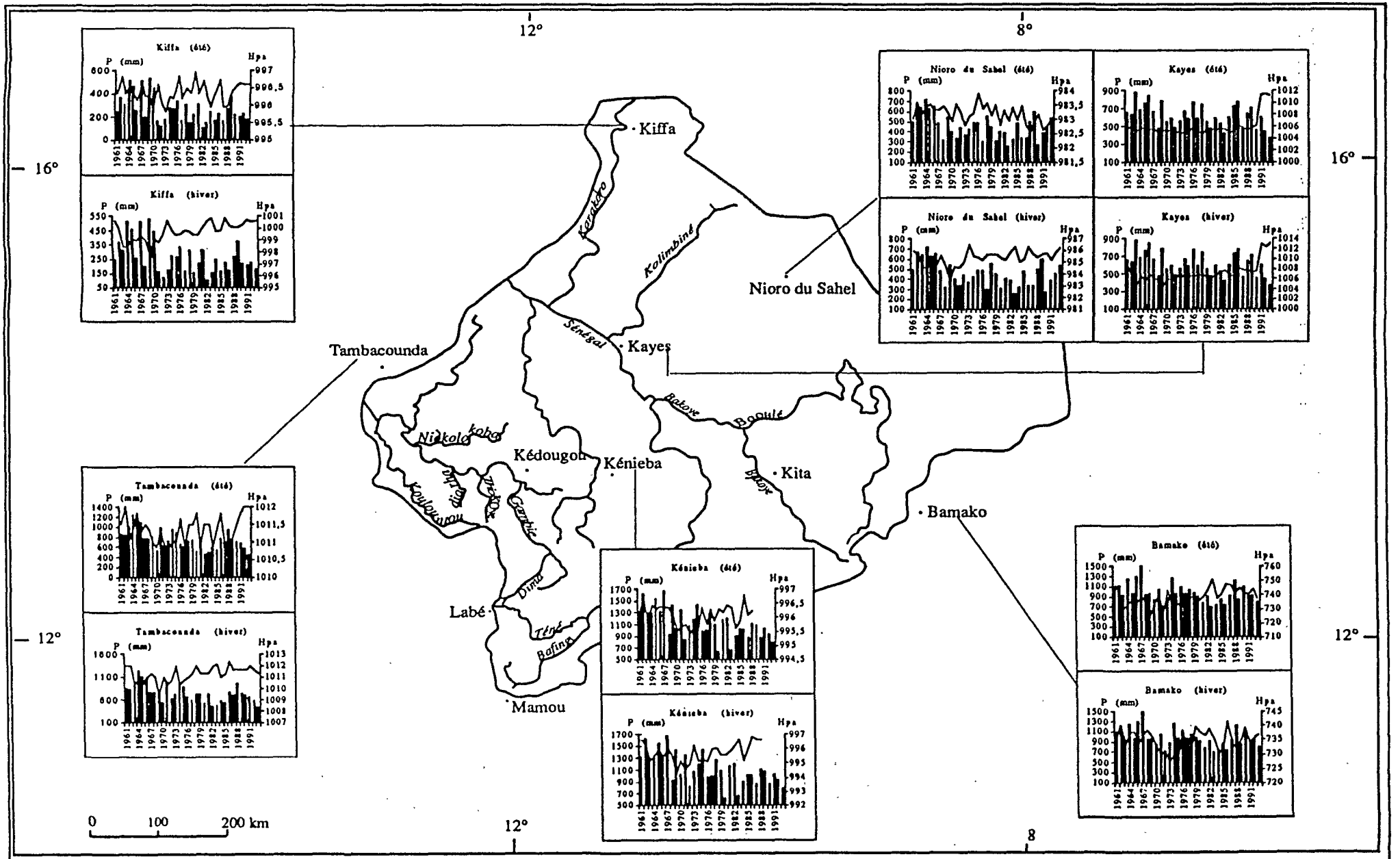


Figure 119 : Evolution des précipitations et de la pression saisonnière dans les hauts bassins (période 1961-1993)

Une certitude est acquise à travers des études fondées, l'Arctique se refroidit (Jones et al., 1991 ; P. Gachon, 1993). Aussi, l'accélération des masses d'air froides à travers la zone tempérée (J. Comby, 1993), en provenance des pôles par les AMP, renforce les échanges méridiens et par delà impose aux hauts bassins et au Sahel en général la péjoration climatique actuelle.

Toutefois, les comportements barométriques et pluviométriques ne réagissent pas en bloc à la dynamique tempérée, elle-même diversement canalisée vers l'Afrique. Des différences sont ainsi perceptibles d'une station à l'autre, suivant la position géographique (latitude et longitude) et les conditions météorologiques estivales propres à la zone tropicale.

Cette évolution de la pression et les conséquences qui en résultent peuvent être confirmées à partir de l'évolution de vents. Car, les circulations d'alizés qui animent la zone tropicale répercutent fidèlement la tendance de la pression qui leur donne naissance.

2.2.2. Evolution des vents

L'origine des vents a été décrite dans les chapitres précédents. On peut rappeler toutefois que les vents dans les hauts bassins découlent de deux flux que sont les alizés et la mousson. La vitesse de ces vents varie selon la saison hivernale ou estivale et des flux qui leurs sont liés.

2.2.2.1. Evolution saisonnière des vents

L'évolution des vents est étudiée à partir de la vitesse en raison des diverses incidences qu'elle peut revêtir : le fléau destructeur quand sa force atteint des valeurs élevées ou l'élément bénéfique lorsque l'homme arrive à le maîtriser pour ses besoins. La vitesse du vent a aussi un impact sur les températures de l'air et, par conséquent, sur l'écoulement des cours d'eau en diminuant ou en augmentant son évaporation suivant que le vent soit sec ou humide.

Tableau 86 : Données de vent disponibles à certaines stations des hauts bassins

Stations	Période observée	Domaine climatique
Kiffa	1966-1991	sahélien
Nioro du Sahel	1946-1993	
Kayes	1937-1993	nord-soudanien
Tambacounda	1951-1992	
Kita	1955-1993	
Kénieba	1946-1993	sud-soudanien
Bamako	1937-1993	

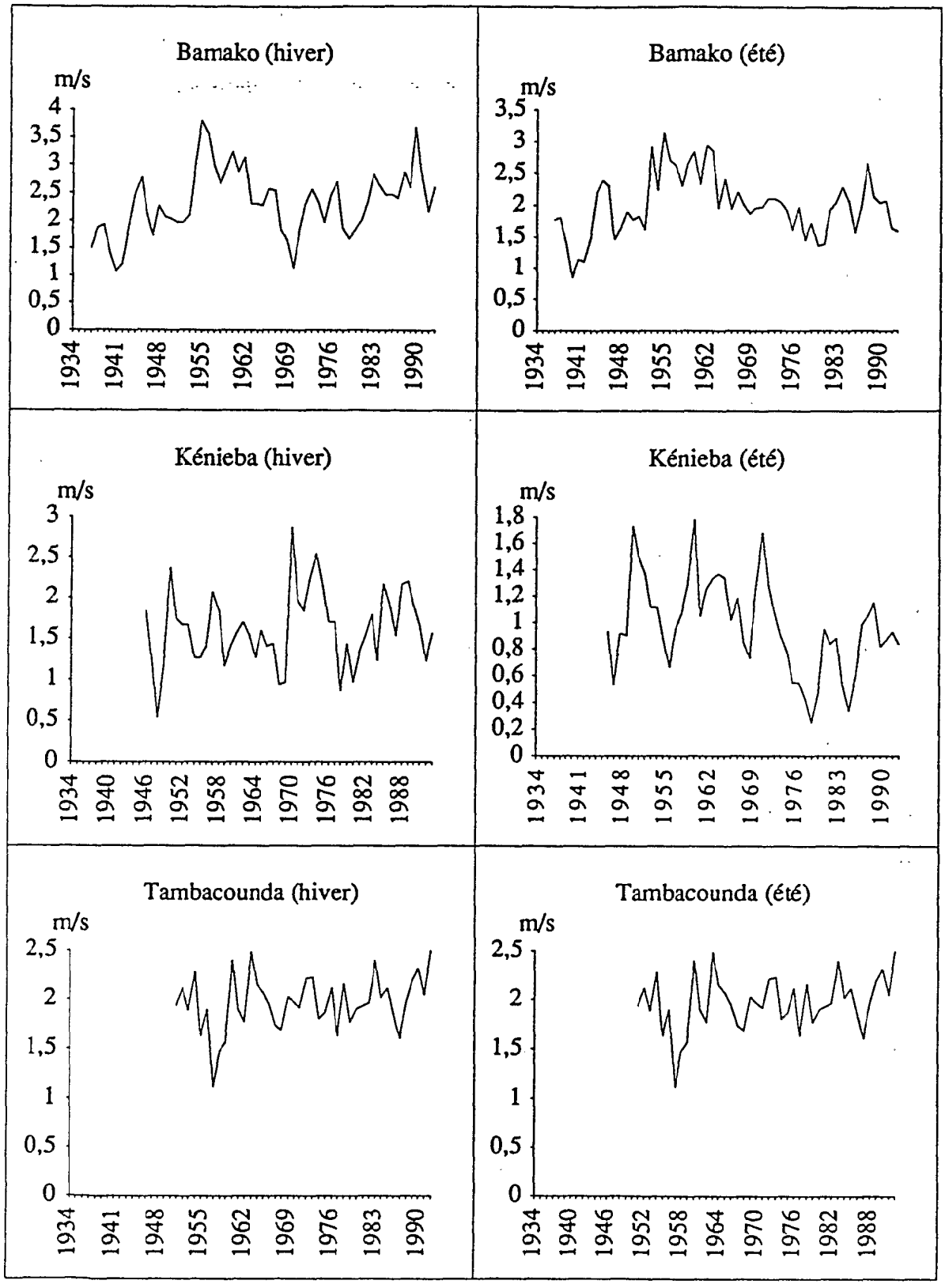


Figure 120 : Evolution de la vitesse moyenne saisonnière dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie.

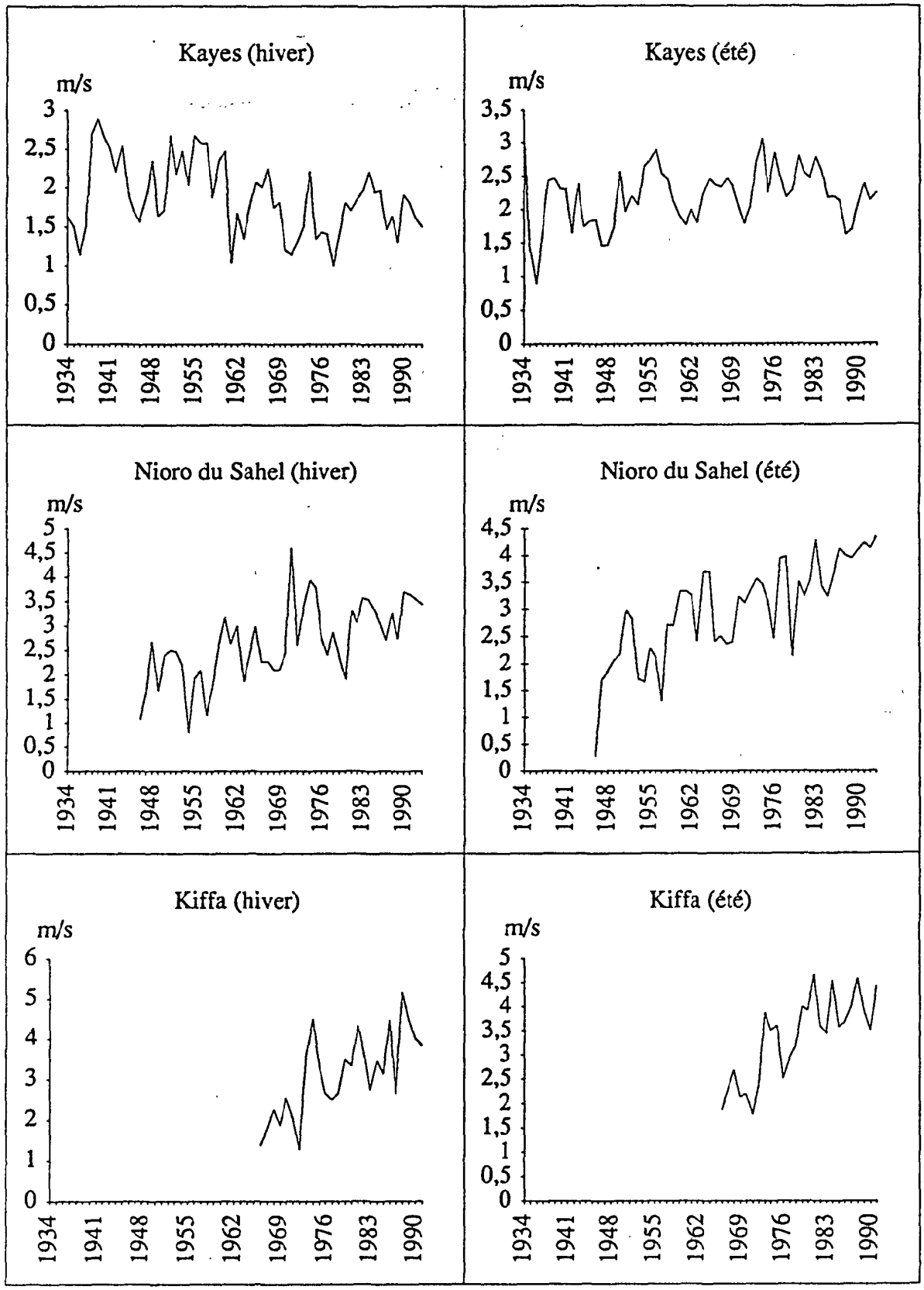


Figure 121 : Evolution de la vitesse moyenne saisonnière dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie.

Du fait de la péjoration climatique actuelle, l'importance saisonnière de la vitesse du vent se renforce et permet de comprendre sa relation avec les autres paramètres climatiques (fig. 120 et 121).

Le tableau 86 présente les différentes informations disponibles sur les vents des hauts bassins. On remarque que le domaine guinéen fait encore figure de parent pauvre. Les informations concernant la station de Labé sont empruntées à C. Rochette, (1974) ou sont celles de la normale 1961-1990 dont nous disposons.

Cette vitesse des vents est loin d'être constante et fluctue d'une année à l'autre. La vitesse annuelle la plus forte est observée en 1955 à Bamako (3,39 m/s) et en 1950 à Kénieba (2,05 m/s). Elle est de 2,6 m/s en 1991 à Tambacounda et de 2,7 m/s en 1957 à Kayes. La vitesse moyenne annuelle la plus élevée est notée en 1983 à Nioro du Sahel (4 m/s) et en 1988 à Kiffa (4,70 m/s). La vitesse moyenne annuelle la plus faible notée à Bamako intervient en 1940 (1,07 m/s) et en 1948 à Kénieba (0,65 m/s). Aux stations de Tambacounda et de Kayes, la vitesse minimale annuelle intervient en 1958 et 1936 avec respectivement 1,4 et 1,02 m/s.

Les stations de Nioro du Sahel et de Kiffa enregistrent quant à elles leur vitesse minimale en 1946 et 1966 avec respectivement 0,63 et 1,63 m/s.

Le recoupement de la vitesse annuelle du vent pour les périodes 1951-1970, et 1972-1993, (tab. 87) permet d'entrevoir certaines caractéristiques :

- La station de Kénieba enregistre pour les deux périodes les vitesses les plus faibles. Cela est imputable à la situation abritée de la station sous la falaise de Tambaoura vers le nord et les contreforts du Fouta Djalon au sud. D'ailleurs, les valeurs de la station de Bamako indiquent mieux l'importance du vent dans cette région.
- L'évolution des valeurs des deux périodes montre, qu'exception faite de la station de Bamako, la vitesse du vent augmente du sud au nord des hauts bassins.

Tableau 87 : Comparaison de la vitesse moyenne annuelle du vent à différentes stations

Stations	Période 1951-1970	Période 1972-1993
Nioro du Sahel	2,53	3,2
Kayes	2,16	2,05
Tambacounda	1,94	2,14
Kénieba	1,30	1,12
Bamako	2,46	2,12

Mais, si de manière générale, la vitesse des vents augmente du sud au nord des hauts bassins, une tendance à la hausse de leur vitesse est notable surtout pour les dernières décennies. Cette situation n'est pas sans établir un certain conformisme avec la hausse de la pression de la période récente.

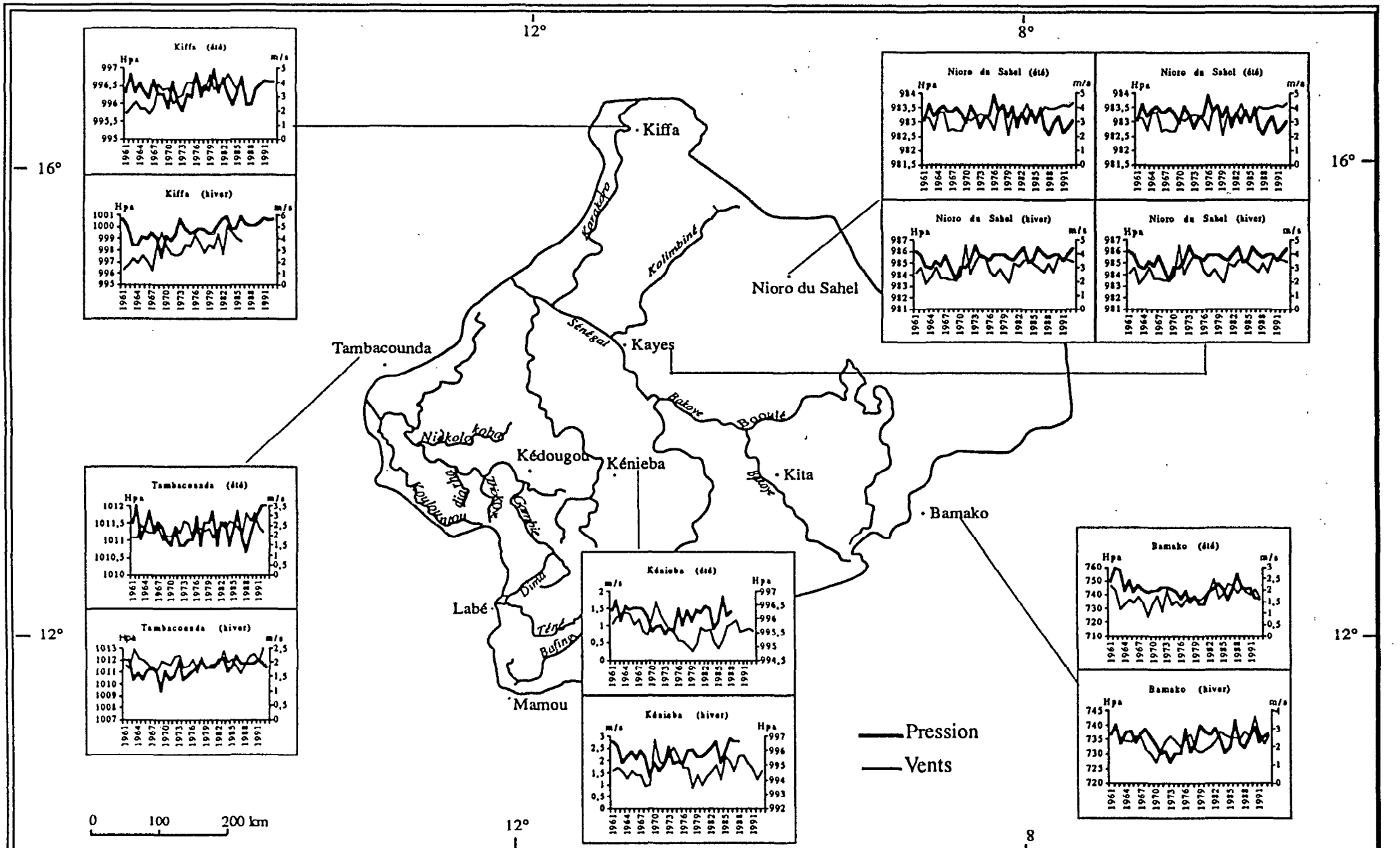


Figure 122 : Evolution annuelle saisonnière des vents et de la pression dans les hauts bassins (période 1961-1993)

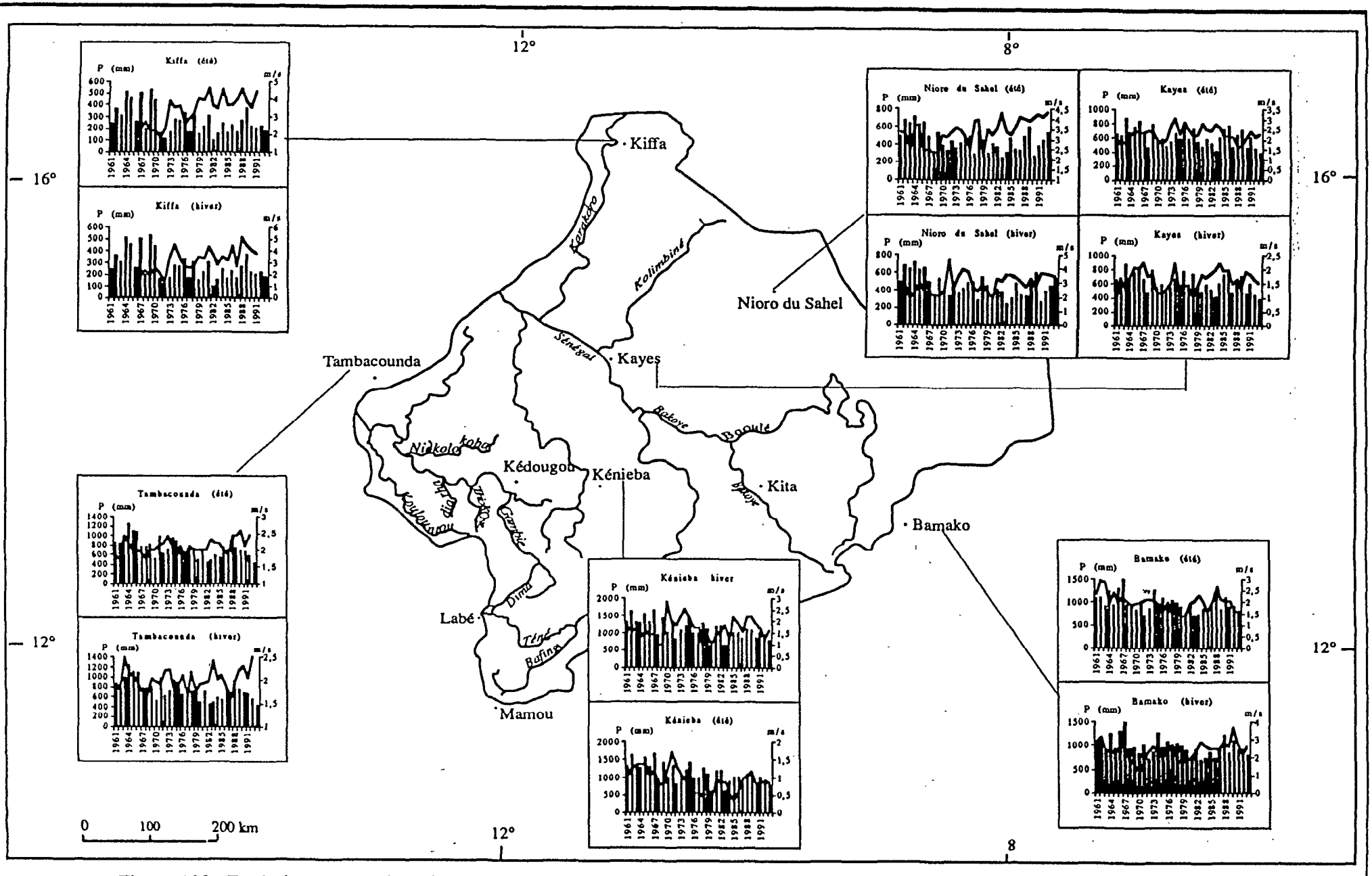


Figure 123 : Evolution des précipitations et de la vitesse annuelle saisonnière du vent dans les hauts bassins (période 1961-1993)

La vitesse du vent résultant de la puissance des noyaux d'anticyclones mobiles, sa variation est ainsi liée à l'évolution du champ de pression en surface. La figure 122 présente l'évolution annuelle saisonnière de la vitesse du vent et de la pression pour la période 1961-1993. Cette évolution montre dans la plupart des stations une tendance similaire entre la vitesse du vent et l'évolution de la pression. Ces observations permettent de conclure que du dynamisme saisonnier des agglutinations en présence dépend la vigueur des flux de surface (alizés ou mousson) qui empêchent ou favorisent le déclenchement des précipitations. Le renforcement du champ barométrique sur l'hémisphère austral favorise alors une accélération de la vitesse du flux de mousson et sa pénétration sur le continent.

D. Lambergeon, (1977) note ainsi "que si les pressions sont fortes à Abidjan et faibles à Nouadhibou, les pluies sont supérieures à leurs normales dans le Sahel". Le phénomène inverse se traduit par, une baisse de la pluviométrie dans la région. Aussi, l'évolution saisonnière de la vitesse du vent permet-elle d'établir une relation avec la péjoration pluviométrique actuelle. Par sa répartition saisonnière, la pluviométrie des hauts bassins est largement corollaire à la fois de l'orientation et de la vitesse du vent.

La figure 123 qui compare l'évolution des précipitations avec la vitesse annuelle saisonnière du vent montre que l'accélération de cette dernière est partout conforme aux années de baisse des pluies. Cependant, la covariance entre la vitesse du vent et la pluviométrie n'est pas toujours établie. Ainsi que le confirme M. Leroux, (1988), le flux de sud-ouest (mousson) tend à pénétrer en surface aussi loin vers le nord pendant les années sèches que pendant les années humides. Toutefois, le flux de mousson dans les basses couches est moins épais et plus faible pendant les années sèches, réduisant le potentiel mis à la disposition des régions sahéliennes.

La pluviogenèse des hauts bassins résultant des structures de l'Equateur Météorologique (EMI et EMV), les fluctuations de ces structures sont tributaires des circulations d'altitude notamment des jets. Leurs conséquences en surface sont visibles à travers la nature des précipitations (lignes de grains pour la majeure partie des hauts bassins) et les interférences avec la structure EMV. Les précipitations obéissent donc à une logique d'ensemble, à la fois spatiale et temporelle qui incorpore des phénomènes d'altitude et de surface.

La sécheresse sahélienne reste sans conteste le phénomène majeur de l'évolution climatique récente. La recherche de ces causes s'inscrit dans une dynamique qui dépasse largement le cadre des hauts bassins. A l'échelle paléoclimatique, cette dynamique montre que le Sahel a déjà connu des périodes similaires à l'évolution récente. Ces dernières, à partir des modes de circulation lente et rapide, s'inscrivaient alors dans des scénarios de chaud et de froid opposant les deux hémisphères météorologiques. L'évolution des paramètres aérologiques de la période récente à travers l'analyse de la pression et des vents permet de mieux comprendre la dynamique de la sécheresse actuelle. La hausse de l'évolution annuelle et/ou saisonnière de la pression concomitante avec celle de la vitesse annuelle saisonnière du vent contraste bien avec la baisse de

la pluviométrie. L'hémisphère météorologique boréal est donc sujet au cours de la période récente à un fort dynamisme lié aux anticyclones mobiles polaires.

Dans les hauts bassins, ce dynamisme se traduit par :

- Une forte hausse de la pression lors de certaines années comme 1972 ou 1983 ;
- Un renforcement de la durée et des fréquences de l'alizé continental jusqu'au milieu de la saison des pluies dans certaines stations (Kiffa, Nara, Nioro du Sahel) ;
- Une recrudescence des phénomènes de brumes sèches dans la partie nord.

L'hémisphère météorologique austral quant à lui se réduit fortement. La faiblesse de la mousson atlantique, notée au cours de la période récente, s'accompagne d'une baisse de la pluviométrie et de l'écoulement, jamais enregistrée depuis les chroniques connues.

Le dynamisme des échanges méridiens par hémisphères météorologique interposés est donc à l'origine de la sécheresse actuelle. Comme le confirme M. Leroux, (1992) : "Climatic changes are then connected with variations of these actions centers, in power, or in latitudinal position". Aussi à l'éventail des hypothèses préconisées (J. Charney, 1975 ; S. E. Nicholson, 1986), la réponse apportée par les échanges méridiens, à travers un dynamisme accru de la zone extratropicale, le phénomène de El Niño (E. Moreau, 1995), prouve que la sécheresse récente s'inscrit bien dans une dynamique planétaire.

Il reste qu'à partir de cette évolution, plusieurs scénarios climatiques sont envisageables, dans les hauts bassins. Ceci d'autant plus que les aménagements réalisés ou en cours ne concordent plus avec la situation climatique actuelle.

CHAPITRE 5

PERSPECTIVES CLIMATIQUES ET AMENAGEMENT DANS LES HAUTS BASSINS

Les changements climatiques notés et l'évolution des ressources en eau de surface constituent une préoccupation majeure pour le devenir des hauts bassins et du Sahel en général. Il n'est pas de notre propos d'étayer encore plus les différentes hypothèses qui expliquent la sécheresse sahélienne. Toutefois, depuis la première grande crise de 1972, la gestion de l'eau est devenue la première priorité des Etats sahéliens. Celle-ci s'est traduite partout par la mise en application de projets d'aménagements, dans le but de sauvegarder les ressources en eau. Cependant, ces mises en valeurs grandioses ne doivent pas occulter la réalité des conditions hydroclimatiques actuelles.

La plupart de ces aménagements résulte de projections hydroclimatiques aujourd'hui déphasées. Or, les conditions actuelles ne sont pas sans rappeler aux populations sahéliennes que les espoirs d'une vie meilleure à travers la politique des barrages sont encore lointains.

Le chapitre qui termine cette étude est donc une loupe sur le présent et le futur proche de l'hydroclimatologie des hauts bassins. En même temps, il porte un regard sur les aménagements réalisés ou en cours, dans un contexte climatique difficile (voire même inadéquat) mais nécessaire et, qui ont comme première ambition, l'amélioration des conditions de vie des riverains des fleuves Sénégal et Gambie.

1. LES SCENARIOS HYDROCLIMATIQUES

Les scénarios hydroclimatiques envisagés sont élaborés à partir des informations acquises et présentées dans les chapitres précédents. Cependant, nous ne retenons que les paramètres, précipitations et écoulements puisque ce sont ces derniers qui fondent en premier lieu les modalités des aménagements. Trois cas sont ainsi analysés avec des perspectives différentes.

1.1. Stagnation des conditions actuelles

Ce premier scénario présage que les conditions climatiques et hydrologiques actuelles soient stationnaires. Dans ce contexte, la baisse de la pluviométrie au rapport de la normale 1931-1960 se maintient à -11 % en domaine guinéen, -28 % en domaine soudanien et -30 % en domaine sahélien sud. Au total, le déficit cumulé des hauts bassins se maintient aux alentours de -69 %, tous domaines pluviométriques confondus.

Sur le plan hydrologique, l'affaiblissement des nappes souterraines se poursuit. Les débits d'étiages deviennent plus précoces avec un étalement de la période de basses eaux. L'essentiel des cours d'eau des hauts bassins connaît alors des étiages absolus nuls.

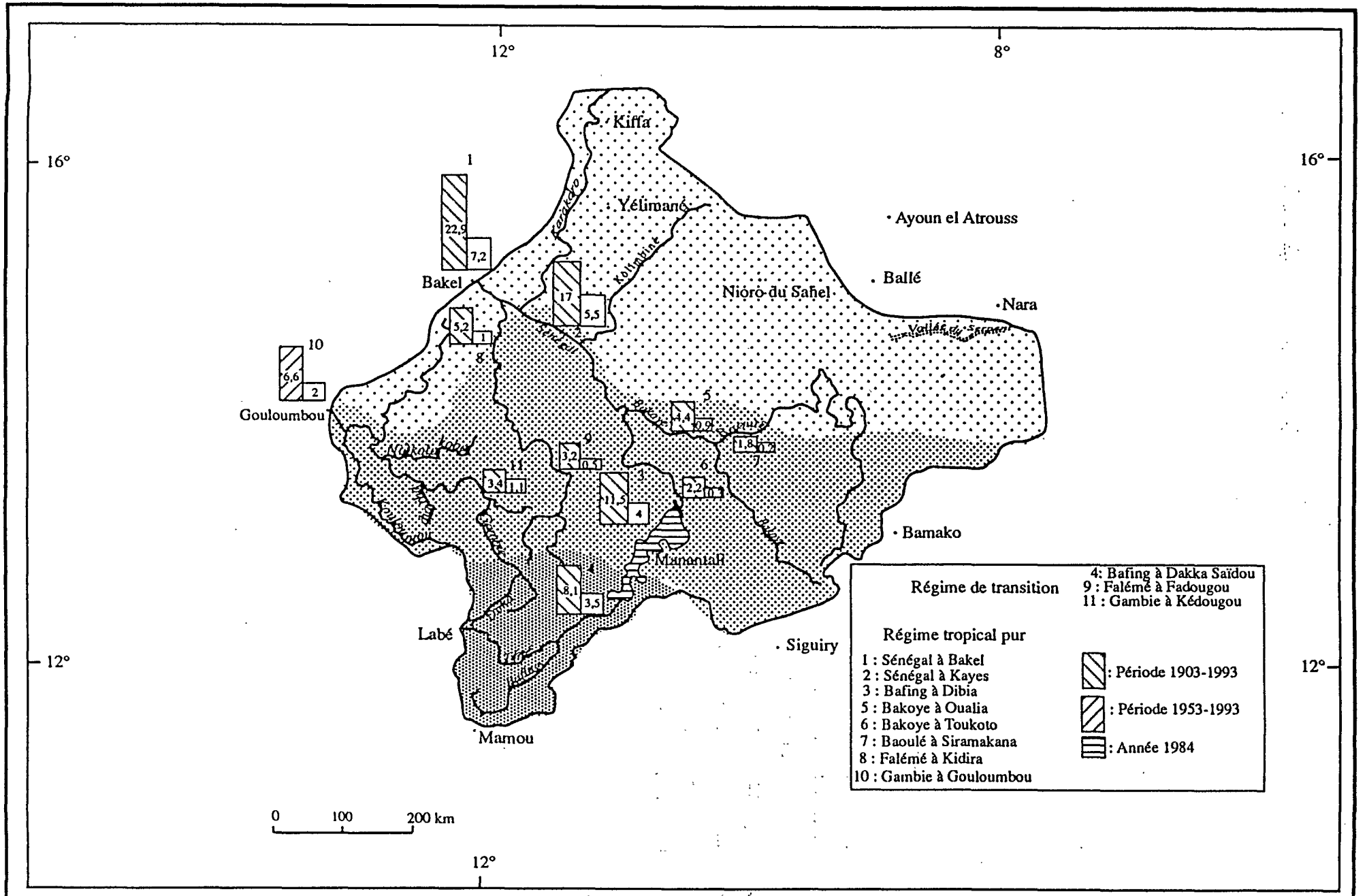


Figure 125 : Variations des volumes d'eau écoulés de l'année 1984 par rapport à la période 1903-1993 (en milliards de m3).

Sans la régularisation du barrage de Manantali, les débits du fleuve Sénégal à Bakel seraient eux aussi nuls. Le volume moyen annuel écoulé resterait en baisse par rapport aux moyennes interannuelles de la période de référence 1903-1993. Il accuserait encore un déficit de -18 % en régime tropical de transition. La diminution de ce volume en régime tropical pur serait estimé au même moment à -50 % à Bakel et Gouloumbou (fig. 124). Les projections au niveau de la retenue de Manantali seraient alors revues à la baisse, tandis qu'en aval de Bakel, l'aire d'inondation des cultures de décrues ne dépasserait pas celle de l'avant-barrage. La baisse des crues annuelles se prolongerait avec un aplatissement de la pointe de crue. La période de hautes eaux se réduirait progressivement à trois mois en domaine de transition tandis qu'elle fluctuerait entre 1 et 2 mois en domaine tropical pur.

1.2. Aggravation de la situation actuelle

Un tel scénario suppose que des déficits analogues à la période 1983-1984 se généralisent sur les hauts bassins. Les totaux pluviométriques atteindraient alors des déficits records. En domaine guinéen, ceux-ci seraient de -31 % tandis que le cumul des déficits du domaine soudanien avoisinerait -50 %. Ce déficit en domaine sahélien serait alors de plus de -60 %.

L'hydrologie des hauts bassins serait alors marquée par un effondrement des nappes souterraines sur l'ensemble des cours d'eau. Leur tarissement, plus prononcé et brutal, conduit à un étiage absolu nul chaque année de tous les cours d'eau non régularisés. Le remplissage de la retenue serait alors très compromis et il n'est même pas sûr que les quantités d'eau retenues puissent enrayer les étiages en aval de Manantali. Compte-tenu de la faiblesse des débits, les affluents du cours moyen des hauts bassins pourraient connaître un arrêt de l'écoulement durant plusieurs mois.

Ainsi, l'écoulement des petits tributaires de la Gambie comme le Thiokoye, le Diarha et dans une moindre mesure le Diaguiry, pourraient être temporaires. Pour le bassin du Sénégal, les écoulements du Baoulé se limiteraient à la station du Parc tandis que la Kolimbiné et le Karakoro se réduiraient à un écoulement de quelques jours seulement. Ce schéma conduit au régime typique des cours d'eau sahéliens et subdésertiques et, à long terme, aux réseaux hydrographiques fossiles (Vallée du Serpent).

Le volume moyen écoulé représenterait alors des valeurs similaires à celles observées en 1984. Pour le régime tropical de transition, les déficits seraient de -56 % à Dakka-Saïdou, et atteindraient -67 % pour la Gambie à Kédougou. Au même moment, le volume écoulé par la Falémé à Fadougou se réduirait de -82 %. En régime tropical pur, le volume des eaux arrivant à Bakel, serait alors déficitaire de -70 % (fig. 125).

Le record de certaines années, observé pour la période récente, serait largement dépassé et les apports du barrage de Manantali atteindraient difficilement 3 milliards de m^3/an. L'hydrogramme du Sénégal et de la Gambie serait plus aplati qu'au cours de la période actuelle, avec de nombreuses indentations correspondant à la faiblesse des crues.

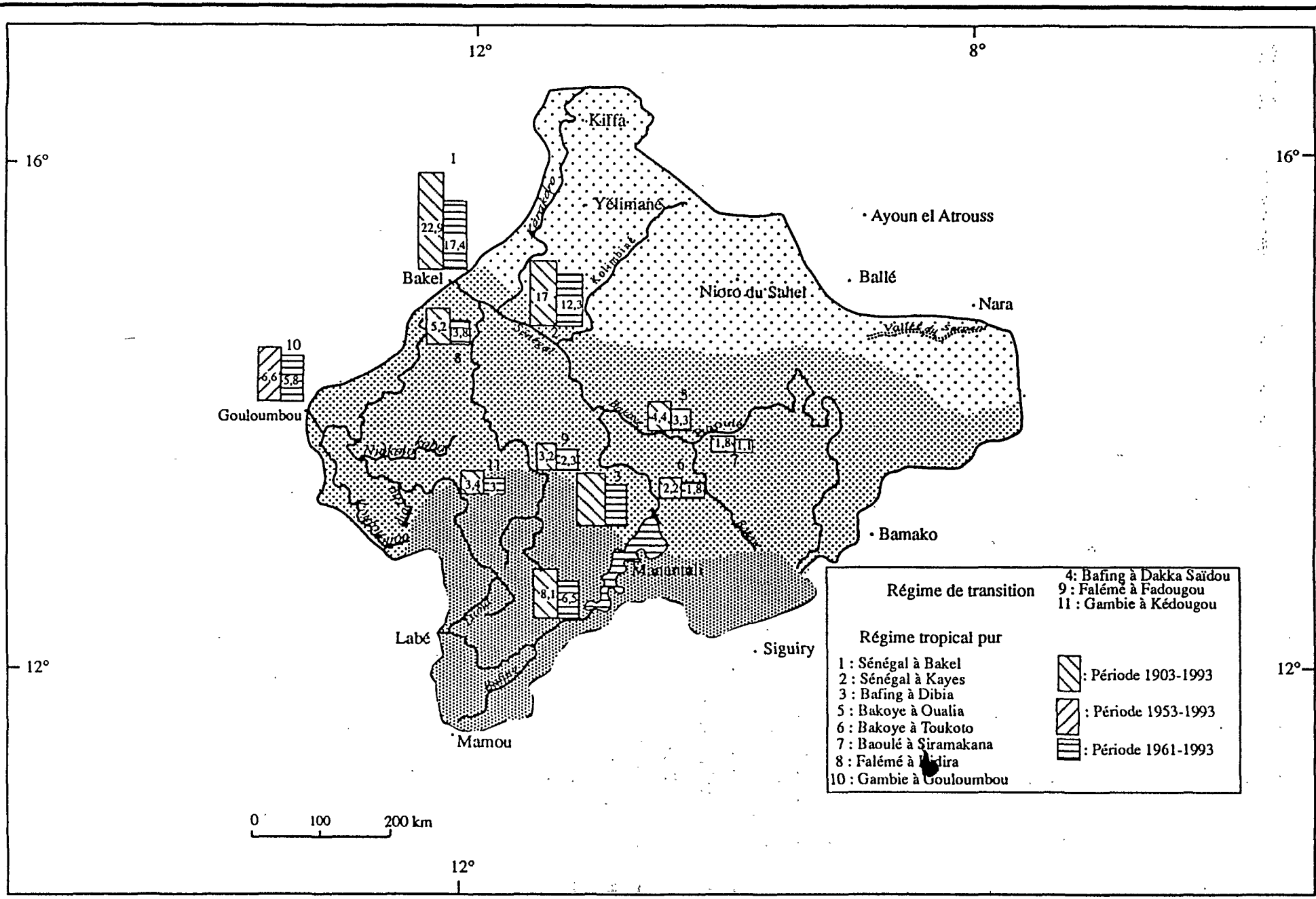


Figure 124 : Variations des volumes d'eau écoulés de la période 1961-1993 par rapport aux périodes 1903-1993 et 1953-1993 (en milliards de m3).

Le maximum de la crue pourrait être localisé, résultant même d'un tributaire sahélien. Les maxima annuels pourraient en même temps être divisés par 3 ou 5 par rapport à ceux des normales 1931-1960 ou 1951-1980.

1.3. Un retour à une période humide

Une telle hypothèse suppose une reprise de la pluviométrie avec des totaux annuels égaux à ceux de la décennie 1951-1960 ou, dans un cas plus favorable, à ceux de la normale 1931-1960.

Suivant ce contexte, le domaine guinéen enregistrerait de nouveau une moyenne pluviométrique de 1772 mm environ. Les domaines soudaniens se situeraient à une pluviométrie moyenne respective de 1200 mm (sud-soudanien) et 850 mm (nord-soudanien). Le domaine sahélien au même moment pourrait enregistrer une pluviométrie moyenne supérieure à 500 mm.

Cependant, les cours du Sénégal et de la Gambie ne sauraient bénéficier dans un court terme des effets de cette reprise. En effet, comme l'ont montré les analyses précédentes, la léthargie de l'écoulement suite au cumul de trois décennies de sécheresse a considérablement entamé les réserves souterraines. Après le premier paroxysme de 1972-1973, l'épuisement des nappes n'a pas été trop marqué. La reprise pluviométrique de 1974 et 1975 a été synchrone de celle de l'écoulement.

En revanche, la situation actuelle est beaucoup plus défavorable, comme le montre la reprise des pluies en 1988 et 1989 alors que l'écoulement des hauts bassins se maintient à un niveau médiocre. Le retour à un écoulement normal serait donc très progressif et variable d'un bassin à l'autre. L'effet mémoire des années de sécheresse et la nature hydrogéologique de chaque bassin déterminant les conditions d'une reprise à la normale de l'écoulement.

Les scénarios hydroclimatiques ci-dessus envisagés permettent donc de faire une approche sur les éventualités à prendre en compte pour l'aménagement des hauts bassins. Il est évident qu'à la sécheresse climatique se surimpose avec un décalage pluriannuel une "sécheresse phréatique".

Le déficit d'alimentation des fleuves par les nappes souterraines, apparent en saison sèche, est sous-jacent en période de crue et ceci explique la faible hydraulicité et les modestes maxima de crues observés malgré une certaine reprise de la pluviosité (J. C. Olivry, 1993). Dans les hauts bassins, les lois de l'hydrogéologie sont telles que même dans de bonnes conditions de pluviosité, l'amélioration des régimes de basses eaux pourrait demander un temps comparable à celui qui a conduit à sa dégradation actuelle. De pareilles circonstances interpellent sur les conditions de mise en valeur.

2. ASPECTS ET CONTRAINTES DE L'AMENAGEMENT DANS LES HAUTS BASSINS

Dans un milieu aussi divers que celui des hauts bassins, l'aménagement n'est pas un recours facile. Car, en plus des aléas climatiques, d'autres contraintes sont toutes aussi omniprésentes et freinent dans une certaine mesure les possibilités de mise en valeur.

2.1. Les disponibilités en eau des hauts bassins

Les disponibilités en eau constituent le premier paramètre de mise en valeur d'un bassin versant. Quel que soit le but recherché (irrigation, hydroélectricité, navigation pour le cas présent), la présence de l'eau et de ses quantités sont indispensables. Seulement, dans les hauts bassins, l'eau ne connaît ni chaque année et moins encore en toutes les saisons la régularité et la même abondance, ce qui nécessite sa quantification. L'évaluation des disponibilités en eau est faite à partir de la période récente (1961-1993) car c'est à ce moment où la ressource se fait de plus en plus rare que sa gestion devient capitale.

2.1.1. Les disponibilités annuelles

Les disponibilités annuelles en eau de surface sont évaluées à partir de l'indice d'écoulement déjà évoqué. La figure 126 présente les volumes d'eau moyens disponibles dans les hauts bassins pour la période récente. On remarque d'emblée que ceux-ci augmentent d'amont en aval.

Lorsqu'on compare les deux bassins au niveau de leurs exutoires respectifs, le volume moyen annuel du Sénégal à Bakel représente le triple de celui de la Gambie à Gouloumbou. Ceci est normal puisqu'à Bakel, le bassin du Sénégal est cinq fois plus grand.

Cependant les valeurs à ces deux stations traduisent surtout un fait déjà confirmé par les différents indicateurs de l'écoulement, à savoir la faiblesse des volumes d'eau disponibles. Cette indigence des ressources annuelles en eau de surface est encore plus nette lorsqu'on compare les volumes du régime de transition à ceux du tropical pur. Ainsi, le volume moyen annuel du Bafing à Dakka-Saïdou représente le double de celui du Bakoye à Oualia pour une superficie qui lui est quintuple.

Mais si ces particularités permettent d'apprécier l'abondance des cours d'eau pour mieux asseoir leur mise en valeur, il demeure que ces volumes d'eau sont très fluctuants à l'échelle annuelle. L'irrégularité de l'écoulement, tous domaines hydrologiques confondus, montre que tous les cours d'eau sont sujets à des fluctuations annuelles qui peuvent varier du simple à plus du quintuple lors d'années particulières, humides ou sèches (tab. 88).

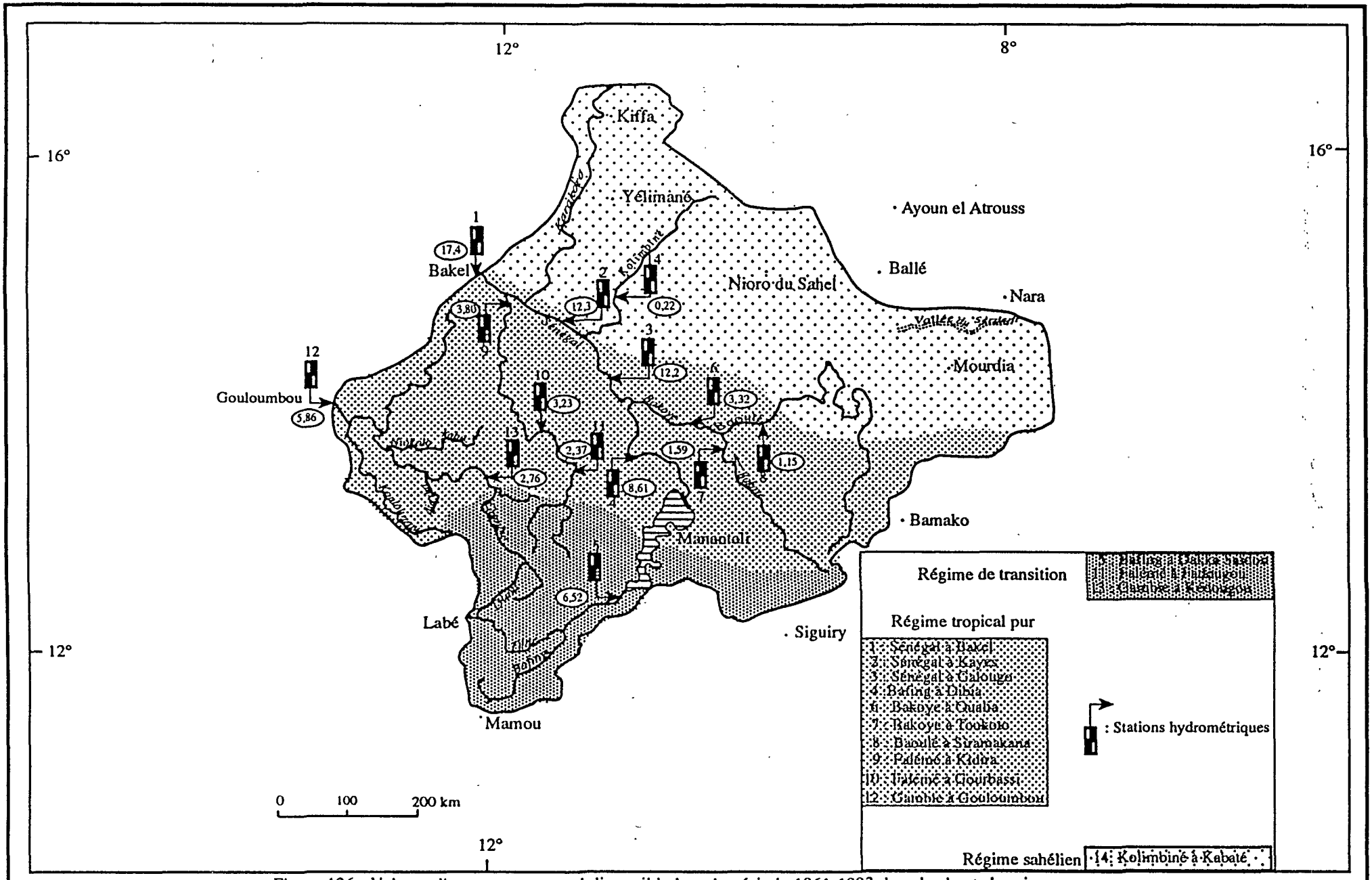


Figure 126 : Volume d'eau moyen annuel disponible lors de période 1961-1993 dans les hauts bassins (en millards de m3/an).

Les volumes d'eau écoulés peuvent ainsi être exceptionnellement forts lors d'années humides. Comparés à la période récente (fig. 126), ces volumes sont supérieurs à la moyenne annuelle des 33 dernières années à tous les cours d'eau.

Tableau 88 : Volume d'eau moyen annuel lors d'années particulières humide et sèche (en milliards de m^3 an^{-1})

	Stations	Années	Débit Q $m^3.s^{-1}$	Volume m^3 an^{-1}	Intervalle Variation	D s $l.s^{-1}.km^{-2}$
Bassin	Bakel	1924	1353	42,6	35,9	6,2
		1987	212,4	6,6		0,9
	Kayes	1936	950,9	29,9	24,5	6,04
		1984	174,8	5,4		1,1
	Dibia	1936	599,7	18,9	14,3	17,9
du		1984	128,9	4,06		3,8
	Dakka-Saïdou	1924	419,2	13,2	9,6	26,7
		1984	113,3	3,5		7,2
	Oualia	1935	257,3	8,1	7,4	3,03
		1987	19,6	0,6		0,2
	Toukoto	1954	135	4,2	3,9	8,1
		1983	9,7	0,3		0,5
	Siramakana	1957	137,8	4,3	-	2,31
		1979	0	0		0
	Kidira	1935	338,3	10,6	9,9	11,7
		1983	23,3	0,7		0,8
	Fadougou	1954	198,8	6,2	5,67	21,3
		1984	18,9	0,5		2,03
Sénégal	Kabaté	1969	13,8	0,4	12,5	0,46
		1983	1,23	0,038		0,007
Bassin	Gouloumbou	1966	396	12,4	10,3	9,4
de la		1983	66,4	2,09		1,58
	Kédougou	1955	192,5	6,07	4,9	25,4
Gambie		1984	35,3	1,1		4,6

Par contre, en période, de pénurie les eaux de surface disponibles peuvent être très ridicules, certains cours d'eau se caractérisant même par un tarissement général (le Baoulé en 1979). L'intervalle de variation à toutes les stations traduit ainsi le paradoxe entre les énormes masses d'eau disponibles d'une année et son extrême rareté à l'autre.

Or, ces années de manque sont toutes situées dans la période récente (tab. 88), ce qui rend encore plus hypothétique la représentativité des ouvrages réalisés. Cependant, quelle que soit la particularité de l'année, il reste que les régimes hydrologiques des hauts bassins sont toujours soumis à une période de hautes et de basses eaux. Ces variations ci-dessus notées, nous amènent à étudier les disponibilités saisonnières en eau de surface.

2.1.2. Les disponibilités saisonnières

Les régimes hydrologiques des hauts bassins se particularisent par une brève période de hautes eaux et une longue période de basses eaux. Si, du point de vue de l'écoulement, ces deux périodes recouvrent des réalités différentes, elles sont encore plus apparentes dans la perspective de mise en valeur. Durant la période de hautes eaux, qui correspond par ailleurs à la saison des pluies, d'immenses quantités d'eau sont écoulées sans pour autant qu'elles soient utilisées.

En revanche, c'est durant la période de basses eaux, qui concorde avec la saison sèche que les besoins se font sentir, et que l'utilisation des eaux fluviales devient cruciale. La période d'inertie qui affecte alors les hauts bassins pendant 7 à 8 mois s'apparente à un véritable dilemme quant à la répartition de l'eau pour des besoins multiples.

Nous considérons que la période des basses eaux s'étend de novembre à juin tandis que celle de hautes eaux recoupe les mois de juillet à octobre. Une telle subdivision caractérise beaucoup plus le régime de transition que le tropical pur, compte-tenu de la dégradation hydrographique de ce dernier régime pour la période actuelle. En plus, par rapport aux autres facteurs déjà évoqués (géologie, morphométrie, pluviométrie), il reste que l'apport fluvial du domaine guinéen détermine l'écoulement des hauts bassins.

Le tableau 89 montre les disponibilités en eaux de surface pour la période de hautes eaux que récapitule la figure 127. Les valeurs de ce tableau indiquent qu'en période de hautes eaux, les quantités d'eau disponibles sont largement supérieures aux volumes annuels.

Les stations de Bakel et de Gouloumbou enregistrent les volumes totaux des différents sous-bassins du Sénégal et de la Gambie. A l'échelle mensuelle, les volumes maximaux sont tous notés au mois de septembre à l'exception de la station Siramakana. Cependant, d'un sous-bassin à l'autre, ces disponibilités sont variables et justifient les possibilités de mise en valeur.

Le Bafing à Dibia dispose de 51 % du volume d'eau total des eaux arrivant à Bakel. Ce volume est de 25 % pour la Falémé à Kidira tandis que le Bakoye à Toukoto et le Baoulé à Siramakana n'apportent respectivement que 10 et 8 % du volume total. Les apports de la Kolimbiné à Kabaté sont très faibles et représentent environ 1,16 %.

Lorsqu'on évalue les apports du domaine tropical de transition, le volume d'eau qui passe à la station de Dakka-Saïdou sur le Bafing représente 40 % du volume total du haut bassin du Sénégal.

Figure 127 : Disponibilité des eaux de surface durant la période de hautes eaux
(période 1961-1993)

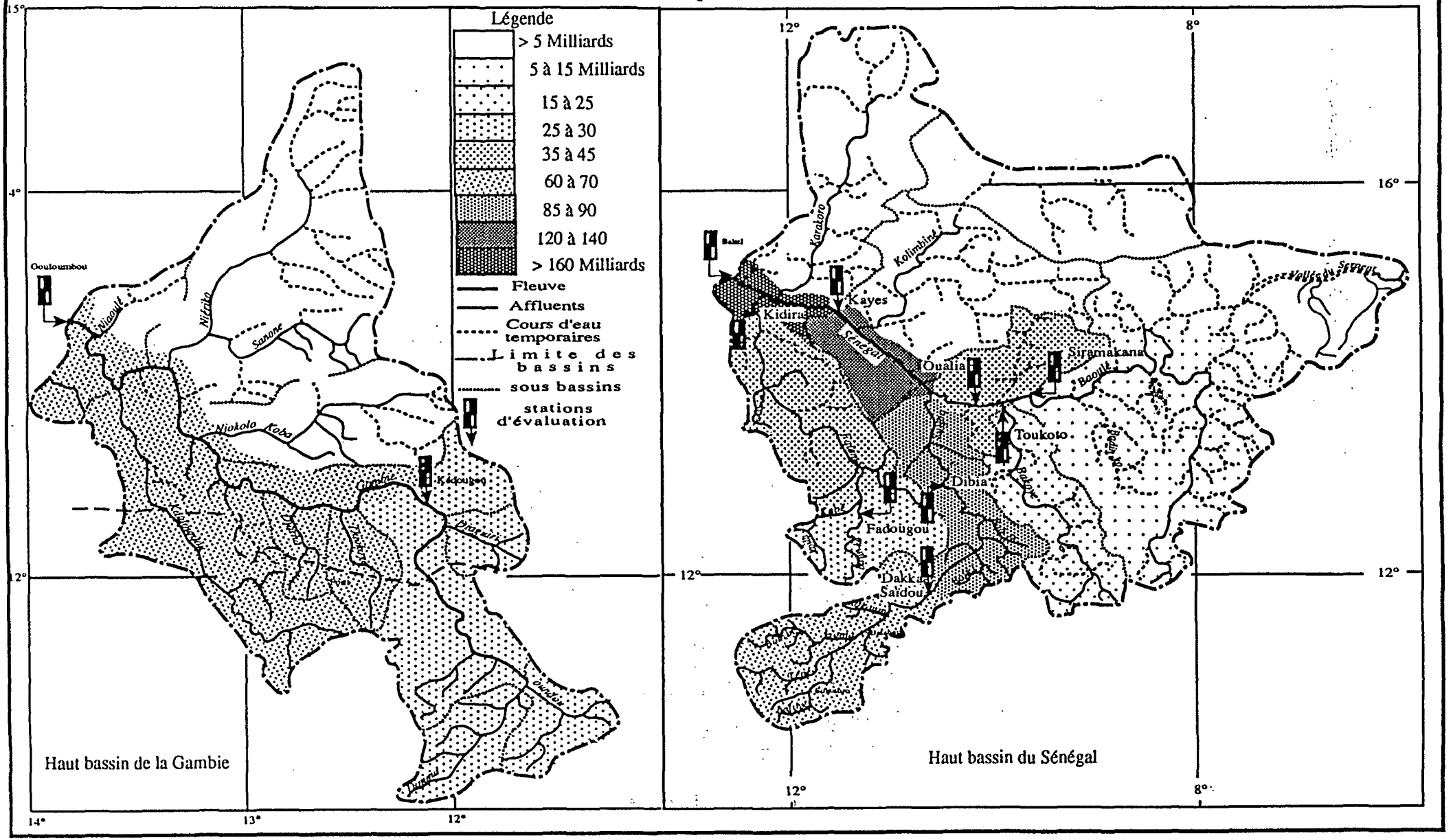


Tableau 89 : Disponibilités en eaux de surface en période de hautes eaux dans les hauts bassins en milliards de m^3 an^{-1} (période 1961-1993).

Cours d'eau	Stations	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Total
Sénégal	Bakel	13,21	47,14	72,87	31,15	167,37
	Kayes	11,10	37,62	52,38	26,29	127,39
Bafing	Dibia	7,17	24,70	35,54	18,20	85,61
	Dakka-Saïdou	7,41	20,65	24,78	13,7	66,54
Bakoye	Oualia	3,86	11,34	15,48	6,08	36,76
	Toukoto	1,31	4,69	7,69	3,46	17,15
Baoulé	Siramakana	1,59	4,79	4,70	1,67	12,75
Falémé	Kidira	2,80	12,99	18,90	7,46	42,15
	Fadougou	2,24	8,23	10,47	4,66	25,60
Kolimbiné	Kabaté	0,16	0,72	0,90	0,17	1,95
Gambie	Gouloumbou	4,22	15,67	25,22	16,77	61,88
	Kédougou	2,82	9,17	11,58	5,86	29,43

Pour le bassin de la Gambie, la station de Kédougou enregistre quant à elle 48 % du volume total écoulé à Gouloumbou. Ces disponibilités en périodes de hautes eaux ne doivent pas faire oublier que le but principal est de pouvoir les ménager pour mieux les rentabiliser en période de basses eaux. En effet, au-delà du mois d'octobre, ces volumes d'eau s'amenuisent considérablement.

Les disponibilités de la période de basses eaux sont ainsi caractéristiques de très faibles volumes (tab. 90). Le volume total écoulé à Bakel durant cette période représente 7 fois moins que celui de la période de hautes eaux à la même station. A la station de Gouloumbou sur la Gambie, le volume d'eau en période de basses eaux est 8 fois moins élevé par rapport à celui de hautes eaux.

Par ailleurs, la faiblesse des volumes mensuels s'accentue au fur et à mesure que s'affirme la saison sèche. Les mois d'avril et de mai qui correspondent au cœur de la saison sèche (suivant les régimes), sont ceux des maigres les plus prononcés.

Mais comme pour la période de hautes eaux, des disparités sont aussi notées, à travers les sous-bassins (fig. 128). En période de basses eaux, ce sont encore les rivières du régime de transition qui amènent des volumes totaux les plus conséquents. Le Bafing à Dakka-Saïdou fournit ainsi 46 % du volume d'eau écoulé vers Bakel.

Cette quantité d'eau est identique pour la Gambie à Kédougou par rapport à Gouloumbou. Le tribut de la Falémé à Fadougou n'est cependant que de 25 % pour l'ensemble des eaux transitant à Kidira.

Figure 128 : Disponibilité des eaux de surface durant la période de basses eaux
(période 1961-1993)

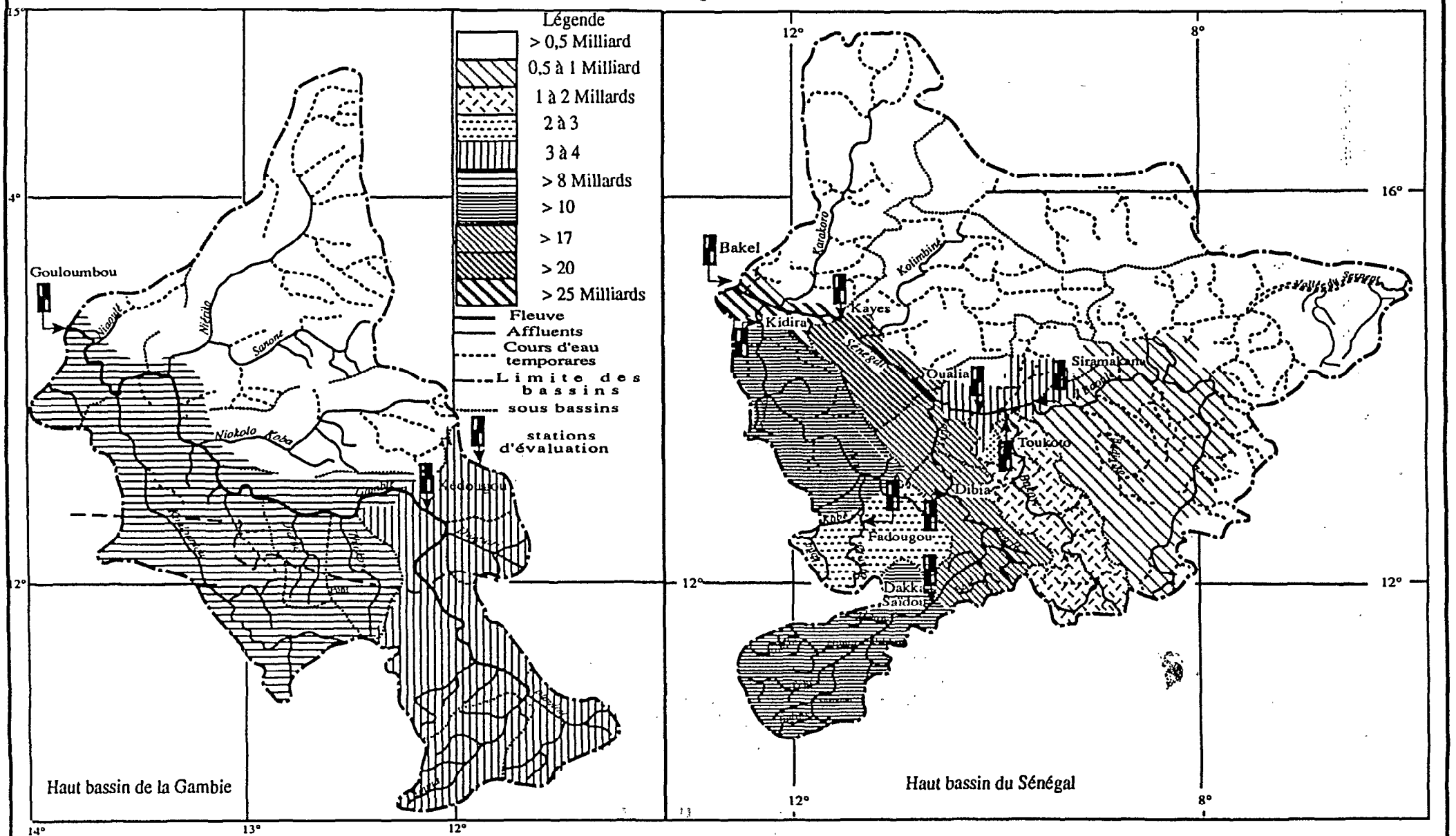


Tableau 90 : Disponibilités en eau de surface en période de basses eaux dans les hauts bassins en milliards de m^3 an^{-1} (période 1961-1993).

Cours d'eau	Stations	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr -	Mai	Juin	Total
Sénégal	Bakel	11,7	4,45	2,48	1,71	1,30	0,81	0,7	1,85	25,05
	Kayes	9,50	3,62	2	1,34	0,99	0,64	0,61	1,62	20,32
Bafing	Dibia	7,03	3,06	1,86	1,33	1,02	0,70	0,8	1,92	17,72
	Dakka-Saïdou	5,24	2,09	1,11	0,64	0,39	0,26	0,38	1,52	11,62
Bakoye	Oualia	1,50	0,61	0,26	0,13	0,05	0,013	0,012	0,49	3,06
	Toukoto	0,99	0,34	0,21	0,09	0,04	0,01	0,001	0,24	1,92
Baoulé	Siramakana	0,48	0,14	0,07	0,08	0,75	0,037	0,00009	0,071	0,96
Falémé	Kidira	7,46	1,88	0,06	0,38	0,16	0,052	0,0088	0,29	10,86
	Fadougou	1,43	0,67	0,31	0,14	0,05	0,026	0,039	0,23	2,69
Kolimbiné	Kabaté	0,14	0,05	0,0094	-	-	-	-	0,025	0,22
Gambie	Gouloumbou	4,54	1,42	0,53	0,34	0,22	0,18	0,26	0,75	8,24
	Kédougou	1,79	0,77	0,39	0,19	0,08	0,031	0,016	0,50	3,77

Les disponibilités en eau de surface des hauts bassins sont ainsi marquées par un paradoxe saisonnier. D'immenses quantités d'eau peu ou pas utilisées durant une période de hautes eaux assez courte font suite à un maigre potentiel sur une saison sèche très longue. Ce contraste se traduit par des disponibilités annuelles faibles, aggravées par la péjoration hydropluviométrique. Aussi, aux ressources mobilisables en période de hautes eaux, s'illustre une gestion visant à les retenir afin de les exploiter ultérieurement.

2.2. Les contraintes liées à l'aménagement

Si le paramètre eau reste le facteur déterminant de la mise en valeur des hauts bassins, d'autres facteurs sont aussi importants pour mieux asseoir un aménagement conforme aux normes socio-économiques et naturelles de la région. A la lumière des développements précédents, ceux-ci peuvent aussi se poser en obstacles et méritent plus de considérations. On peut ainsi retenir :

2.2.1. Les contraintes physiques

Les obstacles liés à ce paramètre se résument essentiellement à la mise en valeur agricole. En effet, il a été mis en évidence que les sols des hauts bassins sont souvent peu propices à l'agriculture. Leurs caractéristiques (surfaces cuirasses, bad-lands, latérites) ne se prêtent pas à

priori à une agriculture de vaste échelle. Les sols susceptibles de connaître une exploitation judicieuse sont localisés et parfois handicapés par les conditions climatiques. A cela, s'ajoute une forte érosion des sols du fait de l'action anthropique et de l'effet éolien.

Les ressources naturelles ayant une valeur économique comme les forêts naturelles, les terres à pâturages la faune aquatique et terrestre sont en dégradation progressive.

2.2.2. Les contraintes climatiques

Elles sont fondamentales et diverses, renforcées par leur caractère aléatoire. Parmi celles-ci, l'évaporation reste sans doute le facteur le plus contraignant, surtout dans la partie nord. Les conditions climatiques qui prévalent dans cette partie des hauts bassins contribuent à exacerber ce facteur.

La péjoration pluviométrique par l'indigence qu'elle impose demeure cependant la préoccupation majeure. Le caractère limitant de ce facteur a été longuement évoqué. Les déficits de la pluviométrie et de l'écoulement, unanimes sur l'ensemble des hauts bassins contrastent avec les aménagements élaborés souvent à partir de perspectives climatiques inadéquates au contexte actuel.

Cette situation se traduit par un surdimensionnement des ouvrages réalisés. Les études préalables à la faisabilité de ces ouvrages s'appuyant sur la normale climatique 1951-1980, les ouvrages recensés n'arrivent pas souvent à fonctionner dans les conditions optimales des prévisions initiales.

2.2.3. Les contraintes humaines

La population vivant dans les hauts bassins du Sénégal et de la Gambie s'élève à environ 934 130 habitants (partie guinéenne non comprise) : 823 000 habitants au Mali, 98 500 au Sénégal et 12 630 habitants en Mauritanie.

Le groupe ethnique dominant est à forte composante de Soninké. Les autres groupes recensés sont les Khassonkés et les Malinkés dans la partie malienne, les Toucouleurs aux abords de Bakel et les Maures qui prédominent dans la partie mauritanienne.

Les conditions sanitaires varient d'une région à une autre. Les maladies liées à l'eau telles que le paludisme, la bilharziose, l'onchocercose et surtout les gastro-entérites sont des fléaux ravageurs.

Les contraintes liées à l'homme en vue de l'aménagement sont très diverses. Dans les hauts bassins, ces contraintes sont d'autant plus importantes que la population ne suit pas une prétendue loi de l'eau (A. Demangeot, 1967). Elle est très hétérogène et inégalement répartie. Les hiérarchies sociales traditionnelles sont encore vivaces. La population, peu nombreuse, est très dispersée. Elle connaît une faible croissance, principalement due à l'exode de sa population masculine. A ces contraintes, s'ajoutent :

* le défrichement et la surexploitation de sols moins fertiles,
* la monétarisation de l'agriculture,
* les problèmes de régimes fonciers qui freinent l'expansion du secteur agricole.

2.2.4. Les contraintes économiques

Les contraintes économiques forment avec l'aspect humain le paramètre le plus limitant à l'aménagement des hauts bassins. Ces contraintes économiques se résument à trois secteurs fondamentaux :

2.2.4.1. Dans le domaine de l'agriculture

Les cultures pluviales constituent l'essentiel du système de production. La culture de décrue est fortement handicapée par la topographie (haute vallée notamment). En outre, la résistance des exploitants agricoles, la pénurie de main d'œuvre liée à l'exode, le coût économique exorbitant limitent considérablement l'irrigation.

La croissance de la production agricole est menacée par divers problèmes dont le déclin de la fertilité des sols, l'érosion et la réduction des périodes de jachères.

2.2.4.2. Dans le domaine de l'élevage

Les potentialités offertes par ce secteur sont assez modestes. La sédentarisation progressive des pasteurs avec une gestion des pâturages autour d'un point fixe n'implique cependant pas une reprise effective du cheptel. En plus, le risque de surpâturage, reste un problème constant. Cependant, le cheptel est de plus en plus considéré comme une opportunité d'investissement. En saison sèche, la présence de zone humide autour de la Kolimbiné et de la mare Magui fournit aux troupeaux de la partie sahélienne d'importantes ressources pastorales (bourgoutières).

La fraction d'eau qui correspond au besoin du cheptel est évalué à 50 litres d'eau par tête de gros bétail, et entre 5 et 20 litres par tête pour le petit bétail (J. Bethemont, 1977). Les difficultés d'accès à l'eau et le renouvellement des pâturages restent néanmoins un frein notable à une exploitation optimale.

2.2.4.3. Dans le domaine des infrastructures

Ce domaine constitue le handicap majeur de tout aménagement de la région. En effet, par leur continentalité, les hauts bassins sont caractérisés par un réseau de communication très médiocre. L'absence d'axe routier praticable en toute saison et les mauvaises liaisons routières intra-régionales interdisent l'accès des produits agricoles périssables aux grands marchés. Certes,

la voie ferroviaire est praticable toute l'année, mais celle-ci n'est qu'un couloir visant plus à désenclaver Bamako qu'à stimuler le développement des hauts bassins. Le coût élevé du fret réduit fortement l'exportation des produits non périssables comme les animaux sur pied, les céréales ou le bois de chauffage. Concernant les besoins énergétiques, l'électrification de la région se limite essentiellement à Kayes et à Bakel. Le manque de fiabilité des réseaux publics et ses tarifs élevés favorisent de surcroît le recours aux groupes électrogènes beaucoup plus souples.

Les contraintes liées à l'aménagement des hauts bassins sont ainsi multiples. Mais pour autant, elles n'ont pas empêché la multiplication des projets de mise en valeur. Par son caractère dramatique, la péjoration climatique de ces dernières décennies, a accélérer la réalisation tous azimuts de ces projets dont certains sont achevés et d'autres en cours de finition.

3. LES AMENAGEMENTS DES HAUTS BASSINS

Les travaux d'aménagements visent à une correction hydraulique ou à une modification des données naturelles par l'eau. Cette correction est souhaitable en fonction d'une part de la sécheresse et des aléas climatiques qui ne permettent pas de tirer le meilleur parti des terres planes et arables (cours inférieur), d'autre part de l'irrégularité saisonnière et de la pente du fleuve (chutes et seuils) qui obvient à son utilisation. Dans les hauts bassins, cette correction est rendue possible par l'abondance des cours (à la sortie du domaine guinéen), mais elle postule à une meilleure utilisation des débits et de sa pente. A l'exception de quelques aménagements réalisés en République de Guinée, les aménagements dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie présentent la particularité d'être réalisés à travers une coopération sous-régionale, regroupant souvent les pays qui se partagent les eaux des deux bassins. Car au-delà des notions d'axes et de bassins qui unissent et rassemblent des espaces divers, ces fleuves ont aussi une vocation de frontière. Cette dernière notion est assez sensible, même à l'intérieur des espaces nationaux où jusque dans un passé récent, les fleuves et les rivières servaient à établir des divisions régionales.

Aujourd'hui, il semble que la nécessité d'accéder au développement et de l'harmoniser avec un équilibre des régions a amené les pays riverains des fleuves Sénégal et Gambie à privilégier la notion de bassin versant sur celle des frontières. Dans l'optique moderne, ceux-ci apparaissent à la fois comme des cadres de vie, des unités de gestion d'une ressource commune et précieuse et des cadres d'action pour tirer un meilleur parti de cette ressource (J. Bethemont, 1977). La péjoration hydropluviométrique, qui affecte ces pays, favorisant du coup une rapide altération des richesses naturelles renouvelables, a contribué au regroupement et la création d'organismes communautaires. Aussi, les différents programmes d'aménagement entrepris dans les hauts bassins rappellent, du moins à travers la situation hydroclimatique actuelle, que l'eau n'est pas un don de la nature. Par la mobilisation et la nécessité de maîtrise qu'elle suscite, elle est devenue un bien économique, une matière première qui a un prix et surtout un coût s'il faut la produire et la reproduire.

3.1. Les objectifs et programmes de mise en valeur

Deux organismes communautaires sont chargés de la mise en valeur des fleuves Sénégal et Gambie :

L'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS) est née des cendres de l'OERS[17] et du Comité Inter-Etats des riverains du fleuve Sénégal dont la création remonte à juillet 1963. La convention de Nouakchott (Mauritanie) du 11 mars 1972 jette alors les bases d'un organisme communautaire qui regroupe trois états : le Mali, la Mauritanie et le Sénégal. La république de Guinée où naît pourtant le fleuve Sénégal n'est pas membre de l'organisation.

L'OMVG (Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Gambie) organisation sœur de l'OMVS a pris la relève du programme de développement des Nations Unies intitulé "REG 60" dans les années 1960-1970. Elle a été créée en 1978 à l'initiative du Sénégal et de la Gambie. Elle s'est ouverte en 1981 à la République Populaire et Révolutionnaire de Guinée avant d'étendre son giron en 1983 à la République de Guinée-Bissau.

Ces deux organismes sous-régionaux sont chargés de la promotion et de la coordination des études et des travaux de mise en valeur des ressources des bassins des deux fleuves sur les territoires nationaux des états membres. Les objectifs visés pour mise en valeur des fleuves malgré les décalages se résument ainsi :

- L'amélioration des ressources d'un maximum de population dans les bassins et les régions avoisinantes,
- L'établissement d'un équilibre plus stable entre l'homme et l'environnement particulièrement en zone sahélienne pour l'OMVS,
- La réduction de la vulnérabilité des économies par rapport aux aléas climatiques et extérieurs,
- L'accélération de la coopération économique à travers la coopération inter-états.

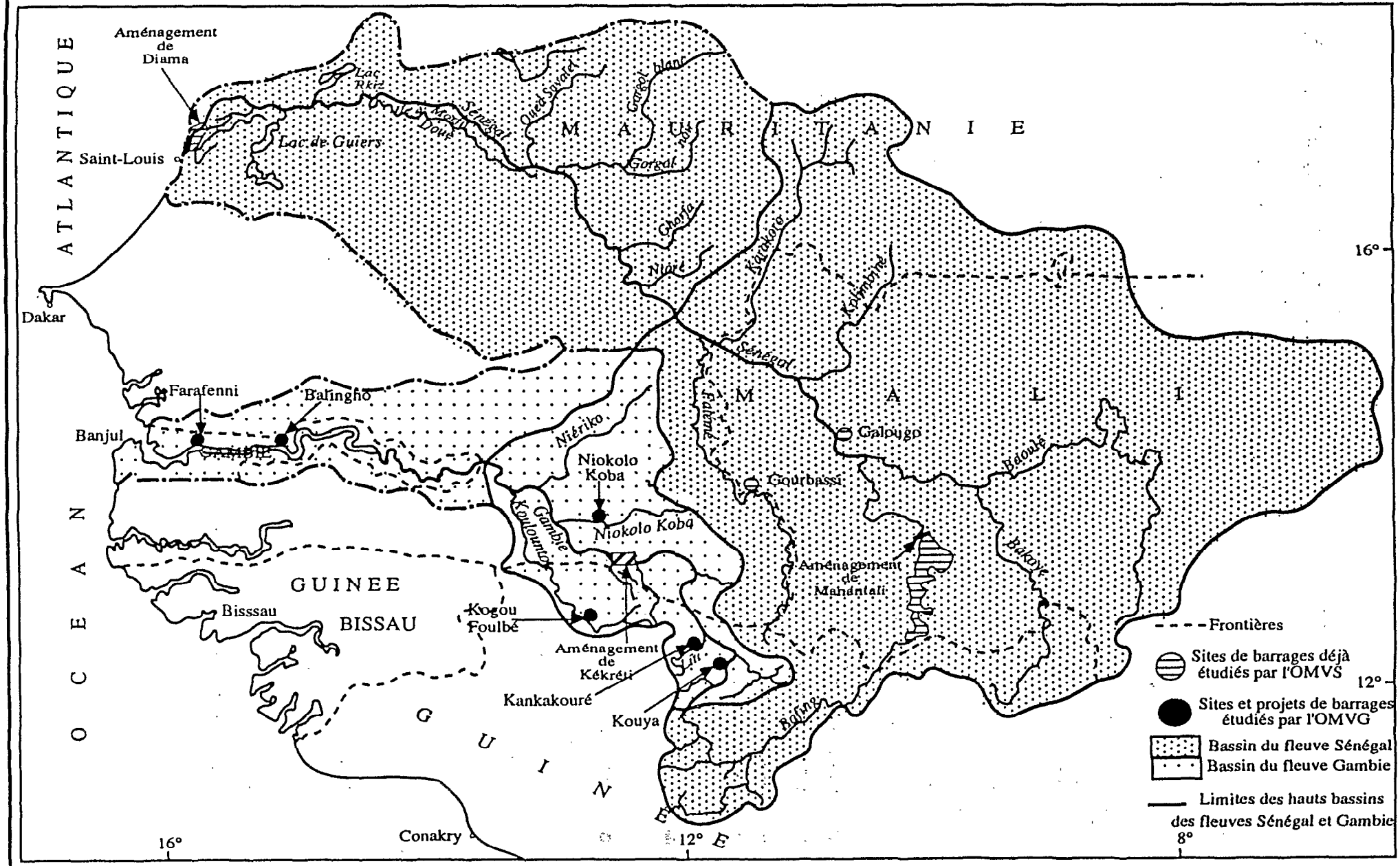
Ces différentes suggestions se sont ainsi traduites dans les faits par la réalisation de certains aménagements.

3.2. Des aménagements fondés sur des barrages

Les programmes d'études et de travaux qui ont été élaborés pour atteindre les objectifs des deux organismes sont surtout basés sur la régularisation des débits des fleuves par la construction de barrages. Ceux-ci concernent la construction de barrages régulateurs pour contrer en amont les effets pervers de la saison sèche et de la sécheresse en général ; et en aval par l'édification de barrages anti-sel, destinés à empêcher la remontée du biseau salé à l'intérieur des terres. Ces travaux sont sans doute indispensables, dans la mesure où ils permettent de valoriser le capital

[17] O.E.R.S. : Organisation des Etats Riverains du fleuve Sénégal.

Figure 129 : Aménagements et projets d'aménagements dans les bassins des fleuves Sénégal et Gambie



hydrique jusqu'alors peu et mal utilisé et de fournir des ressources nouvelles à une population en voie de croissance rapide, mais souvent contrainte à l'exode.

Ainsi, entre 1967 et 1970, débute pour le compte de l'OMVS l'identification, la prospection de site et la faisabilité d'une régularisation de débits sur le fleuve Sénégal par Sénégal-Consult (Association de la Société Générale pour l'Industrie à Genève, l'Electro Watt Ingénieur Conseils de Zurich, Motors Colombus Ingénieurs Conseil de Baden et de Zinder International Ltd de New York).

Pour l'OMVG, les travaux effectués par la société Howards Humpreys & Sons Ingénieurs Conseils de Londres en 1974 sous l'égide du PNUD[18] constituent les bases de l'aménagement hydro-agricole du fleuve Gambie.

Parmi les projets réalisés dans ce bassin, on peut citer (fig. 129) :

- Le barrage anti-sel de Farafénnié, dans le bassin estuairien à 134 km de Banjul mais qui n'intéresse pas les hauts bassins car destiné à contrôler la remontée de la langue salée et à stocker l'eau utile à l'agriculture en saison sèche.
- Le barrage de Kékréti dans le haut bassin, complété en partie par le barrage anti-sel de Balingho. Commencé en 1983, il devait en plus de sa fonction hydro-agricole produire de l'hydroélectricité (360 millions de Kwh). Sa retenue vive, estimée à 4,9 10^9 m^3 devait s'étendre jusqu'à la frontière guinéenne. Les aménagements hydro-agricoles prévus devaient ainsi être de 29 000 ha au Sénégal et de 24 000 ha en Gambie.

Cependant, aucun des objectifs assignés à cet ouvrage ne sont à l'heure actuelle atteint. Car, comme le note J. C. Olivry, (1983) un débit suffisant qui maintient la salinité en dessous de 1,5‰ était la condition d'une réussite de l'irrigation. La réduction de l'écoulement au cours de la décennie actuelle achève de convaincre les plus réticents sur une réussite de cette entreprise. Du coup, certains projets déjà énoncés connaissent plus de prudence quant à leur éventuelle réalisation. Parmi ceux-ci, le barrage de Niokolo Koba, d'une réserve utile de 180 millions de m^3 destinée à l'irrigation de 12 000 ha au Sénégal et à la faune du parc du même nom. D'autres projets comme les barrages Kouya sur la haute Gambie, de Kankakouré sur le Liti, et de Kogou Foulbé sur la Koulountou, tous en territoire guinéen, sont aujourd'hui sans lendemain. A ces différentes mésaventures, s'ajoutent les dissensions politiques entre les états membres (Sénégal et/ou Guinée-Bissau, Gambie) et leurs faibles apports financiers qui compromettent la survie de l'OMVG.

Quant à l'OMVS, après les études des différentes missions d'étude et l'obtention de fonds internationaux (provenant en partie de fonds arabes et européens), deux ouvrages ont vu le jour :

- Le barrage de Diama, situé à 40 km de l'embouchure, a pris la relève du bouchon de Kheune[19]. La pose de la première pierre du barrage de Diama intervient le 12 décembre 1979 et le début des

---

[18] PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

[19] Le bouchon de Kheune, situé à 114 km de l'embouchure du fleuve, fut édifié le 26 novembre 1983 suite à la crue déficitaire de cette année afin de stopper la remontée précoce des eaux salées et d'assurer un meilleur remplissage du lac de Guiers. Premier lien de terre ferme entre la Mauritanie et le Sénégal, cette digue de terre fut emportée par la crue du 23 juillet 1984. Kheune II lui succède le 13 novembre 1984, puis Kheune III en juillet 1985. Ce dernier bouchon fut relayé par le barrage de Diama.

travaux survient à la fin de l'année 1981. D'un coût de 850,5 millions de francs environ, 36 % des fonds proviennent du Fond d'Aide et de Coopération (F.A.C.) et de la Caisse Centrale de Coopération Economique (C.C.C.E.). Le reste du financement est assuré par des fonds arabes (24 %) et africains 13 %. Le barrage de Diama fonctionne depuis avril 1986. Son rôle est d'empêcher l'intrusion marine qui remontait à l'intérieur des terres jusqu'à 200 km environ dans la vallée. Ce barrage n'a aucune incidence sur le bassin amont du Sénégal et concerne tout particulièrement la vallée.

- Le barrage de Manantali dans le haut bassin se voit assigner des rôles multiples que nous évaluons.

3.3. Le barrage de Manantali

Le site de Manantali sur le Bafing (bras principal du Sénégal) a été préféré aux autres sites de Galougo (en amont de Kayes sur le Sénégal) et de Gourbassi sur la Falémé. Le barrage de Manantali est d'abord une retenue d'eau qui occupe une aire de 10 000 ha environ, avec une capacité de stockage de 11 milliards de m^3. Son coût est estimé à 2,8 milliards de francs soit trois fois celui de Diama. Le financement du barrage de Manantali est assuré pour 50 % par des fonds arabes, 34 % par des fonds européens (allemands en particulier) et 14 % par des fonds africains. La construction de la retenue de Manantali comme toute les retenues a nécessité le déplacement des populations environnantes. Celles-ci, estimées à environ 13 000 habitants sont réinstallées en aval du barrage.

Mais ce déplacement des populations ne s'est pas soldé par un éclatement de la structure familiale à l'image de celui observé pour d'autres barrages africains (Assouan, Akossombo, Kariba, Kainji) comme le craignaient E. Goldsmith et N. Hildyard, (1986). Au contraire ces dernières y ont trouvé un facteur de promotion sociale avec l'accès à des structures modernes comme l'école, les dispensaires .....

Toutefois des subsides supplémentaires doivent s'ajouter aux 2,8 milliards de francs (coût du barrage) pour l'assistance technique et sanitaire aux populations riveraines. Mais si l'aspect humain semble être résolu, le problème fondamental de la retenue de Manantali pourrait provenir de la dégradation du milieu environnant. En effet, au regard des superficies défrichées, la forêt galerie et les espaces verts avoisinants ont été entièrement détruits. Or, le rôle de ces formations végétales est capital pour freiner le sapement latéral des berges lors des crues. L'intensité du ruissellement sur le sol entraînera sans nul doute un alluvionnement rapide de la retenue de Manantali si des mesures urgentes ne sont pas prises. Les différents indicateurs actuels (pression démographique, défrichement, assèchement climatique, et pressions anthropiques sur le milieu) conduisent à une accentuation des actions mécaniques et par tant à une modification du système morphogénique. Tout ceci joue sur les transferts solides et sur la capacité de stockage de la retenue de Manantali. Les dommages d'une pareille situation seraient alors catastrophiques pour le fonctionnement du barrage. C'est pourquoi, l'évolution climatique actuelle et ses effets, aussi

bien sur les écoulements que sur le régime morphogénique doivent conduire à revoir les précisions de colmatage de la retenue telle qu'elles ont été conçues par Gannet Fleming lors des études préliminaires, à partir de données correspondant à une période manifestement plus humide que l'actuelle.

La mise en eau du barrage de Manantali en 1987 reste toutefois comme une réponse à trois préoccupations principales.

3.3.1. L'irrigation

Les eaux retenues à Manantali sont destinées pour l'instant à l'irrigation des terres de la vallée alluviale. Comme nous l'avons montré, de multiples contraintes handicapent l'irrigation des terres dans les hauts bassins, et particulièrement dans la haute vallée du Sénégal. Par contre, dans la vallée alluviale où la topographie est beaucoup plus favorable, les aménagements hydro-agricoles ont toujours souffert de l'irrégularité de l'écoulement surtout en saison sèche. Ce sont donc les terres d'inondation dans la vallée alluviale, qui s'étirent de Bakel à Saint-Louis qui sont les premières intéressées par l'eau provenant de Manantali.

Les études réalisées projettent ainsi l'irrigation de 376 529 ha répartis entre le Sénégal et la Mauritanie. L'irrigation de la partie malienne se confine en d'étroites bandes de terre qui s'allongent entre Bafoulabé et Kénieba. Le débit prévu pour assurer la réalisation de ce projet est de 300 $m^3 \cdot s^{-1}$ disponible en permanence à Bakel. Les affluents non régularisés (Falémé, Bakoye et Baoulé) devant assurer, dans la phase transitoire (période de remplissage de la retenue), le débit nécessaire au maintien des cultures de décrue en aval. Cependant, les prélèvements au titre de l'irrigation peuvent connaître de fortes variations d'une année à l'autre en fonction du déficit saisonnier des précipitations, ce qui est actuellement le cas des hauts bassins. Il n'est donc pas exclu que ce volume définitif retenu soit sujet à l'avenir à de fortes imprécisions. L'orientation principale des cultures, faite vers le riz est la réponse à une conjoncture économique difficile qui accroît les difficultés d'approvisionnement alimentaire de cette denrée, nourriture de base des pays de l'OMVS. Tirant les leçons d'échecs des aménagements précédents dans la région (Office du Niger[20] notamment), la priorité est donnée pour l'instant à une culture à échelle réduite à travers les P.I.V[21]. Dans la phase de transition, le but ultime demeure donc l'autosuffisance alimentaire. C'est au-delà de cette optique que la retenue de Manantali assurera à long terme une irrigation à grande échelle avec une mécanisation poussée.

3.3.2. La navigation

L'irrégularité de l'écoulement dans le bassin du fleuve Sénégal a de tout temps entravé la navigation fluviale en période de basses eaux. Au cours de la période de hautes eaux, la remontée

[20] Conçus au départ comme une réplique de la Djézirah (au Soudan), les aménagements de l'Office du Niger qui devaient assurer une forte production de coton ont opéré après des échecs répétés une reconversion vers la riziculture qui connaît actuellement des résultats mitigés.

du fleuve se fait entre Saint-Louis et Podor. L'édification de la retenue de Manantali a donc entre autre but d'assurer en toutes saisons la navigation sur le fleuve de Saint-Louis à Kayes. C'est donc dire qu'avec l'apport d'un correctif (régulation), la voie fluviale devrait s'apparenter à un transport de masse et pallier l'insuffisance des infrastructures de communications. Cette solution permet de mieux désenclaver le Mali et d'assurer une rupture de charge entre le fleuve et le rail (voie Dakar-Bamako).

Le débit nécessaire à la navigation est un paramètre difficile à cerner. En effet, celui-ci est à la fois fonction du tirant d'eau des bateaux et des ponctions faites par l'irrigation. Ces deux obligations supposent une répartition dans le temps et dans l'espace des besoins en eau suivant les périmètres équipés, et le tirant d'eau des bateaux qui remontent le fleuve.

En plus, la présence de différents seuils entre Kayes et Boghé nécessite plus de précision sur le volume du transport. Le débit initial retenu pour l'irrigation correspond selon les projections de l'OMVS à celui de la navigation. Ainsi, ce dernier secteur doit se contenter du résidu de l'irrigation, avec dans tous les cas des apports substantiels (J. C. Bader, 1993).

Toutefois, même fortement atténuées, ces contraintes liées aux variations saisonnières ne sont pas pour autant définitivement abolies. La période de sécheresse actuelle que connaît la région ne présage en rien d'un succès de la navigation fluviale. Le cas de certains fleuves bien aménagés et véritables "autoroutes fluviales" comme le Rhin moyen ou le Rhône qui lors des années sèches comme 1971, 1972 ou 1976 ont vu le tirant d'eau des bateaux tomber de 3 mètres à 1,3 mètre est assez édifiant (J. Bethemont, 1977).

Mais, comme il n'existe aucune méthode d'aménagement ayant une portée générale, l'organisme spécifique de chaque cours d'eau réagissant aux travaux d'aménagement qui lui sont propres, on peut souhaiter pour le fleuve Sénégal une fin plus heureuse du volet navigation.

Pour l'instant, celle-ci est encore loin d'être réalisée. L'image de la grande écluse vide de Diama à l'aval qui fait écho au silence du projet des onze ports fluviaux s'échelonnant jusqu'à Kayes rappelle l'inanité des espérances du programme de navigation fluviale.

3.3.3. L'hydroélectricité

La production d'énergie hydroéclectrique représente le volet le plus ambitieux du barrage de Manantali. En effet, de la réussite de ce projet, seront générées les ressources financières nécessaires au remboursement des emprunts. Mais, tout comme pour la navigation, les besoins en eau pour la production d'électricité sont tout aussi difficiles à appréhender. Ils supposent une évaluation rigoureuse des consommateurs potentiels et de leurs besoins. Cependant la faible urbanisation de la zone constitue déjà un handicap certain. Et si le Mali comme la Mauritanie espèrent à partir de Manantali développer au mieux leurs politiques d'électrification, pour l'instant, l'option du coût pour les usagers reste à déterminer. A cela, s'ajoutent des difficultés de transport et surtout des pertes qui en résultent. Le prix de cession du courant devant incorporer outre le remboursement des emprunts contractés, le montant des réserves constituées pour le

renouvellement du matériel, il est peu probable que le coût de l'électricité de Manantali soit à aussi bon marché que celle produite actuellement dans les centrales thermiques.

Aussi, si la construction de Manantali n'a pas été suscitée de l'extérieur pour procurer de l'énergie à bon marché à des multinationales, à l'image de grandes réalisations africaines comme Akossombo ou Edéa, avec l'exploitation future des richesses minières de la région (Miferso pour le Sénégal, bauxite et or pour le Mali), le risque de monopole de l'hydroélectricité en faveur de groupes nantis demeure réel. Cette crainte est d'autant plus fondée que les 800 gigawatts[22] que pourront produire les deux turbines du barrage ne peuvent à l'heure actuelle trouver d'acquéreurs sur un rayon de 300 km autour de Manantali.

A l'heure actuelle, l'état peu propice des produits miniers sur le marché mondial permet de repousser cette échéance. Mais, d'ici 1996, date de mise en service de la centrale de Manantali il reste encore peu de temps, mais néanmoins précieux, pour parer à une mauvaise politique énergétique du barrage.

3.4. Gestion et enjeux futurs de Manantali

A travers ses objectifs multiples, Manantali constitue pour les pays membres de l'OMVS l'objet de gestion et d'enjeux multiples. Comme le note J. Bethemont, (1977), "à partir du moment où un aménagement est conçu à plusieurs fins... le calcul de rentabilité devient complexe dans la mesure où la recherche d'une rentabilité globale doit être substituée à des comptabilités par secteurs".

Ainsi, par la réussite des différents rôles qui lui sont assignés, dépend dans une large mesure le devenir économique de toute la région. L'exploitation à des fins multiples impose une gestion plus complexe des ouvrages et de l'eau, avec des volants de répartition saisonnière des priorités (énergie suivant les besoins, irrigation en saison sèche) et surtout la recherche entre des compatibilités et des incompatibilités entre usagers multiples.

Dans le cas de Manantali, la recherche des compatibilités et incompatibilités à travers les ordres de priorité se retrouve dans les objectifs assignés au barrage. Bien entendu, le nombre et les exigences quantitatives et/ou qualitatives des ces usages multiples appellent à plusieurs impératifs de gestion. Car, avec le problème des priorités, apparaît un aspect essentiel de la gestion hydraulique à savoir l'arbitrage entre intérêts conflictuels.

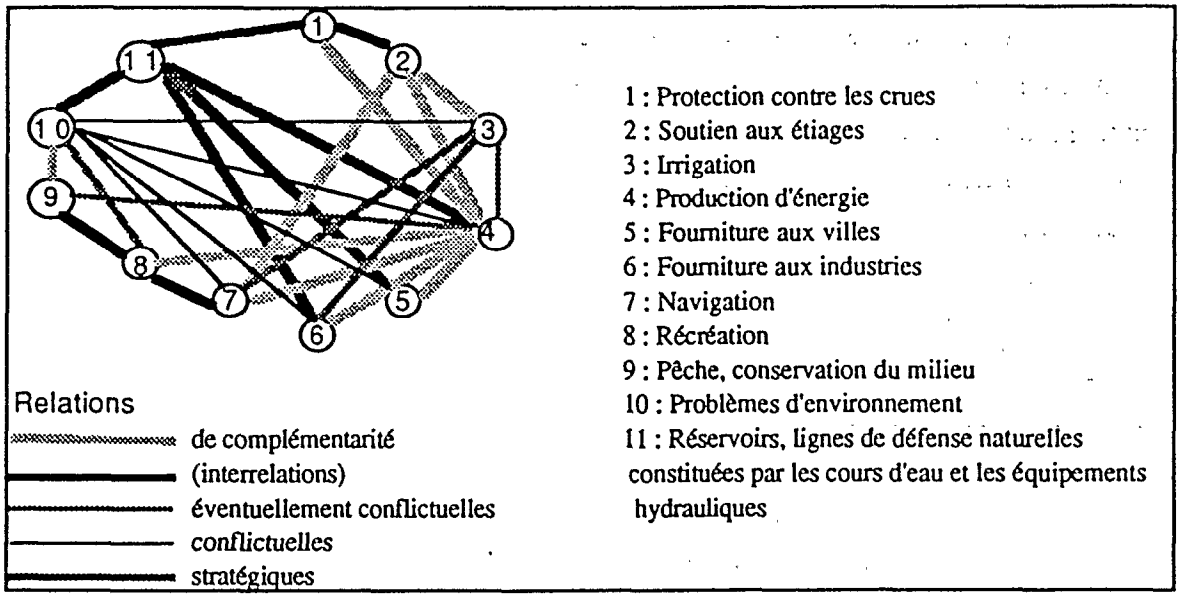
Ces conflits peuvent être sectoriels et opposer les électriciens et les agriculteurs ou, de façon générale, divers intérêts économiques. Cet aspect est d'autant plus valable pour Manantali qu'il est la base de programmes d'aménagements communs mais dont les intérêts peuvent différer entre les pays membres de l'OMVS (fig. 130).

C'est pourquoi les multiples considérants, qui rendent inéluctable le recours à la gestion de l'eau, entrent généralement en interférences complexes les uns avec les autres, et cette complexité s'accroît avec l'augmentation des besoins. Ainsi, comment face à la reproduction

[22] 800 gigawatts équivalent à 800 milliards de watts.

élargie des besoins, passer à la reproduction élargie de la ressource en eau ? Tel semble être le problème majeur qui entoure le devenir du barrage de Manantali. Les gestionnaires doivent donc prévoir cette évolution, rechercher les tendances, déceler longtemps à l'avance les futurs modes d'utilisation de l'eau, de façon à éviter, avec les à-coups, les charges résultants des investissement trop longtemps différés ou non prévus en temps utile (J. Bethemont 1977). La réussite du programme de Manantali passe donc par une solution au problème de l'eau et de son utilisation. Cette solution appelle une nouvelle logique économique, une organisation rationnelle de l'espace et des activités, une gestion démocratique et planifiée de la ressource en eau. C'est donc un problème de société, un problème politique qui appelle à la concertation des états membres de l'OMVS. Ceci implique en définitive un travail de planification, entrepris par des organismes permanents.

Figure 130 : Relations possibles (compatibilité et incompatibilité) résultant des divers objectifs de Manantali (adapté de J. Bethemont, 1977).



L'OMVS semble avoir compris l'utilité de pareilles dispositions et la nécessité d'une gestion rigoureuse. La création de C.P.E. (Commission Permanente des Eaux) a ainsi entre autres objectifs de confronter les besoins en eau de tous les usagers avec les disponibilités de la ressource et de négocier le calendrier des lâchés. Cette commission se réunit trois fois par an :

- En janvier-février au début de la saison sèche pour planifier les différents besoins en eau,
- En mai-juin au début de la saison pluvieuse pour évaluer les quantités d'eau à retenir à Manantali,
- Et en octobre-novembre à la fin de l'hivernage pour évaluer les stocks d'eau disponibles.

Sur le plan hydrologique la parution d'un bulletin d'information 3 fois par an depuis 1987 permet de mieux situer l'évolution de la retenue conformément aux besoins en eau.

Malgré ces précautions, des difficultés liées à la gestion de Manantali subsistent :

- En 1988-1989, l'exécution des travaux de la digue rive droite (territoire mauritanien) est encore inachevée, contraignant de ce fait la bonne gestion des lâchures de Manantali. Au même moment, le recouvrement des redevances d'eau accusait un retard sur le programme de fonctionnement et d'entretien des ouvrages.
- En 1992-1993, l'OMVS n'avait pas encore contracté d'assurances. Il en était de même pour la responsabilité décennale de l'entreprise et de la responsabilité de l'ingénieur conseil. A la même période, les dégradations du "rip rap" (parement amont du barrage) empêchent une exploitation optimale de la retenue qui ne put être remplie à la cote normale prévue de 208 m.

Ces différents problèmes renforcent les enjeux futurs du barrage de Manantali et relancent la nécessité d'une bonne gestion de l'eau. Il revient ainsi à Manantali d'assurer le soutien du débit en fin d'hivernage (octobre à novembre) pour les besoins agricoles, mais aussi en début d'hivernage ainsi qu'au cours de la pointe de crue en septembre.

Mais, il ne faut pas pour autant oublier que le but des barrages est d'améliorer les conditions de vie des populations. De ce fait, il est urgent de mieux asseoir une politique de développement des hauts bassins de sorte que ces derniers ne soient pas les laissés-pour-compte de la politique des barrages (R. Dumont, 1986 ; M. Mainguet, 1995). Une fois cet objectif atteint, le barrage de Manantali aura déjà gagné un pari de ses innombrables enjeux, car faut-il le rappeler, "bien plus que les terres et les eaux, les hommes qui peuplent un bassin fluvial en sont la ressource principale et tout programme d'aménagement doit miser sur eux dès le début" Nations unies, (1958). Le plan directeur Dames & Moore[23] sur financement de l'U.S.A.I.D.[24] entrevoit dans un futur proche l'aménagement des hauts bassins. Pour l'instant, l'amélioration attendue du cadre de vie (disponibilité d'eau pour les hommes, le bétail et les troupeaux) n'est pas encore visible. En outre, la valorisation des projets miniers de la région une fois de meilleurs cours rétablis sur le marché mondial devrait permettre un nouvel essor. En attendant, une fois jugulés les problèmes pratiques de mise en valeur et en escomptant une amélioration des conditions climatiques, on peut normalement s'attendre à une esquisse d'un développement sérieux de la région. Certes, il est illusoire de voir le fleuve Sénégal de Manantali à Saint-Louis se muer en ce début du XXI^{e} siècle en une "vallée du Rhône" sahélienne. Mais, au mieux, un développement harmonieux entre l'homme et son environnement peut être atteint et les prémices de disette annihilées.

---

[23] Le plan Dames et Moore, élaboré entre 1989 et 1992, suite à la mise en service des barrages de Diama et de Manantali a pour but de réorienter la planification du développement agricole régional dans les trois Etats membres de l'OMVS, les agences nationales de développement, les bailleurs de fonds et les habitants, surtout dans la haute vallée.

[24] U.S.A.I.D : Agence Américaine pour le Développement International

L'hydrologie des hauts bassins est fortement corollaire des variations climatiques. En effet, si la relation entre pluie et débit n'est pas toujours évidente, il n'en demeure pas moins que l'évolution de ces deux paramètres sont toujours conjoints. Les phases de hausse ou de baisse de la pluviométrie se retrouvent dans celles de l'écoulement.

L'évolution climatique récente marquée par une forte péjoration climatique affecte considérablement l'hydrologie des hauts bassins. La baisse générale des débits sur la période récente s'accompagne partout d'une modification des régimes hydrologiques :

- Tendance à la réduction des hautes eaux dans les différents régimes hydrologiques ;
- Tendance à la précocité des crues au mois d'août contrairement à leur apparition normale en septembre ;
- Aplatissement des hydrogrammes de crues sur l'ensemble des cours d'eau ;
- Des étiages précoces et prononcés avec de profonds tarissements.

Paradoxalement, c'est cette période de forts déficits qui a suscité dans les hauts bassins une mise en valeur du potentiel hydraulique dont les aménagements résultent d'anciennes projections hydroclimatiques. Pour les aménageurs, la rareté de l'eau au cours des dernières décennies justifiait pour autant sa gestion en vue de pallier son manque cruel. Bien sûr, le meilleur moyen de retenir l'eau pour mieux l'exploiter reste l'édification de barrages ; mais ceux réalisés sur les hauts bassins et dans le Sahel en général sont-ils vraiment les meilleures réponses aux fluctuations hydroclimatiques actuelles ? Cette question est encore d'actualité et les prémices de "barrages contre le développement" (C. Reboul, 1984) restent encore en suspens. Il n'est pas de notre propos de relancer la polémique de pareilles suppositions, mais certains points obscurs de la politique des barrages méritent d'être éclaircis.

Par leur coût exorbitant, les barrages sur le cours du Sénégal (Manantali et Diama) contrastent fortement avec les budgets des états membres de l'OMVS. Par delà se pose irrémédiablement le problème du remboursement des emprunts nécessaires à leur construction. Les différents objectifs assignés à Manantali montrent ainsi combien il sera probable, dans la difficulté de rembourser à terme les emprunts nécessaires à sa réalisation (la dévaluation aidant), l'opposition éventuelle qui peut naître entre les décideurs "énergéticiens et économes " d'une part et agronomes et écologistes de l'autre sur l'ordre de priorité. Car il faut le reconnaître, le barrage de Manantali renferme des intérêts contradictoires et à compromis difficiles. Les projections hydro-agricoles des différentes sociétés de mises en valeurs (SAED[25], SONADER[26], et OMVSTM[27] respectivement pour le Sénégal, la Mauritanie et le Mali) visent une extension considérable des terres à irriguer. La production future de 800 gigawatts par les turbines du barrage amène elle aussi à s'interroger sur les raisons d'une pareille boulimie énergétique. Car, au niveau des besoins énergétiques, les villes de Kayes, Bamako et la cimenterie de Diamou ne dépasseront guère 468 GwH en 1995 (E. Goldsmith et N. Hildyard, 1986). La navigation

[25] SAED : Société d'Aménagement des terres du Delta

[26] SONADER : Société National de Développement Rural

[27] OMVSTM : Opération Vallée du Sénégal, Térécote et lac Magui

fluviale par les investissements qu'elle nécessite pose à son tour le problème de rentabilité et par delà la notion de priorité.

Le plus difficile reste à planifier ces intérêts divergeants afin que Manantali puisse livrer de l'eau, à la fois "source de vie" et de revenu à tous. Cet intérêt que revêt l'eau dans les hauts bassins et les parties situées en aval où elle est utilisée renforce l'intérêt de études hydroclimatologiques et des prévisions qui en résultent.

Pour la période récente que nous avons analysée, la forte péjoration hydroclimatique reste partout la préoccupation majeure. Le tableau 91 qui présente les variations de la retenue de Manantali en période d'hivernage pour les deux dernières années hydrologiques montre bien que l'ampleur des déficits évoqués n'est pas exagérée et les prévisions futures ne garantissent pas pour autant une quelconque amélioration.

Tableau 91 : Variations du volume d'eau (milliards de m^3) de la retenue de Manantali

	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre
1991-1992	7,92	9,12	9,11	9,36	8,89
1992-1993	5,90	7,04	7,22	7,35	7,26

source OMVS (bulletins C.P.E.)

Les conclusions des récents travaux de M. Leroux, (1994) montrent que le dynamisme météorologique de l'hémisphère nord s'accroît. Or, comme ce sont les bilans thermiques polaires qui commandent toute la circulation générale, leurs variations (plus ou moins marquées et/ou prolongées) influencent fortement les phénomènes tropicaux dont la position saisonnière de l'Equateur Météorologique. Ainsi, les épisodes froids confirmés ces dernières années (1992, 1993, 1994) et la dynamique des échanges méridiens qui en résulte laissent encore présager des lendemains difficiles pour les hauts bassins et le Sahel en général. Pour les aménagements, les conséquences durables d'une telle situation ne sont guère réjouissantes. Les prévisions alarmantes de C. Reboul, (1984) ; M. Mainguet, (1995) pèsent alors comme une épée de Damoclès sur des populations durement éprouvées. Aussi, malgré toute notre estime, nous leur souhaitons d'avoir tort.

CONCLUSION GENERALE

"Fétichiste ou pas..... Il lui apparaissait comme un magicien qui avait réalisé des prodiges extraordinaires. Ne disait-on pas qu'il avait fait revenir l'eau dans un puits sec ? Pleuvoir sur une ville assiégée qui manquait d'eau et risquait ainsi de se rendre ? "

"Maryse Condé, **Ségou**, 1984"

A l'inverse du marabout Toucouleur El Hadji Omar, nous n'avons pu malheureusement réaliser des miracles. Nous avons simplement observé le manque d'eau. A la fois sous sa forme précipitée et écoulée, en essayant de comprendre les causes et les conséquences.

La région étudiée, les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie, est un milieu spécifique. Par son cadre physique, elle contraste avec les régions avoisinantes. Pour autant, elle ne forme pas une région uniforme. Aux hautes terres guinéennes formant sa cime dans sa partie méridionale se succèdent vers le nord des plateaux soudaniens qui s'adoucissent considérablement au contact des plaines sahéliennes. Naturellement, la géologie y transparaît à travers des formations éruptives, métamorphiques et des intrusions .... bref un conglomérat issu des vicissitudes tectoniques de la région.

Des sols variés, conséquence de la trame géomorphologique ont ensuite évolué à travers les différents épisodes climatiques, certains se sont cuirassés. Cette diversité des sols n'empêche cependant pas une certaine uniformité quant à leur faiblesse pour abriter des nappes et leurs faibles aptitudes à la mise en valeur.

Bien évidemment, la végétation dont ils sont en premier le support est aussi diverse selon les aptitudes du sol et l'importance de la pluviométrie.

Sur le plan climatique, les hauts bassins participent à la dynamique d'ensemble de l'Afrique de l'ouest. Les circulations d'alizés et de mousson, elles-mêmes résultant des échanges méridiens rythment les variations saisonnières.

Le premier obstacle à l'étude des hauts bassins réside dans son extension sur quatre entités politiques. Le maillage des différents réseaux météorologiques est assez dense, mais la collecte des données n'est pas pour autant aisée surtout pour le réseau guinéen.

Le second obstacle tient à la durée des séries d'observations, très inégales suivant les stations, de 98 ans (Kayes) à 62 ans (Kita) pour la pluie et de 57 ans à 16 ans pour les autres paramètres climatiques. Les données hydrologiques connaissent les mêmes handicaps entre les stations du haut bassin du Sénégal (91 ans d'observations) et celles du haut bassin de la Gambie dont les plus anciennes mesures remontent à 1953. Il s'y ajoute des lacunes souvent fréquentes, surtout pour les données climatiques, ce qui limite l'exploitation des informations à certaines stations.

En dépit de ces difficultés, le climat des hauts bassins à été étudié à travers les facteurs essentiels : les précipitations, les températures, l'insolation, l'humidité relative, l'évaporation et les vents.

Les précipitations, facteur de premier ordre en milieu tropical, occupe une place primordiale. Par son abondance, se déterminent la subdivision climatique et les conditions d'écoulement, elles-mêmes caractéristiques de l'hydrologie fluviale.

L'importance d'une meilleure connaissance des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie, longtemps considérés comme une entité pluviométrique nantie, se trouvait de fait renforcée par rapport aux régions avoisinantes qui forment le Sahel occidental. La pluviométrie,

estimée globalement sur la période 1931-1993 est de 830 mm. Mais cela sous-entend fortement une variabilité spatiale, caractéristique en différents domaines pluviométriques reconnus. Du sud au nord, le gradient pluviométrique décroissant, identifie des nuances guinéennes, sud-soudaniennes, nord-soudaniennes et sahéliennes. Mais, à l'intérieur même de ces domaines, la pluie n'est pas homogène. Des nuances apparaissent çà et là, suivant l'exposition au flux de mousson, la position d'abri et l'importance du potentiel précipitable.

Cette variabilité des précipitations est aussi interannuelle, et traduit l'irrégularité du régime pluviométrique. Entre l'année la plus arrosée et la moins abondante, l'écart peut être multiplié par dix. L'analyse fréquentielle des précipitations montre d'ailleurs des récurrences centennales en période humide.

Lorsqu'on examine l'évolution des précipitations au cours de la période 1931-1993, on constate une tendance à la normale des précipitations jusque dans les années 1960. Au-delà, se dégage une nette diminution des pluies dans toutes les stations. Cette baisse généralisée des précipitations, dont les paroxysmes sont notés en 1972-1973 puis en 1983-1984, a introduit dans la région le concept de péjoration pluviométrique communément appelé sécheresse. Ainsi dans l'évolution de la période récente (1961-1993), c'est surtout la forte progression des déficits qui attire partout l'attention.

Les températures ont ensuite été étudiées. Dans les hauts bassins, la répartition des températures est concomitante avec celle de la pluviométrie. Le gradient thermique individualise ainsi des températures fraîches pour les hautes terres du sud, les plus arrosées. Au fur et à mesure que les précipitations décroissent vers le nord, les températures augmentent, individualisant un gradient sud-nord inverse à celui de la pluie. La variabilité spatiale des températures est aussi observée d'ouest en est. En raison de la continentalité, les températures s'accroissent vers l'intérieur.

La variabilité interannuelle des températures est moindre. D'une année à l'autre, les écarts entre les températures maximales excèdent rarement 1°C, alors que ceux entre les températures minimales ne dépassent guère 2,5°C.

Les régimes moyens mensuels montrent que le mois le plus chaud correspond à avril-mai puis à celui d'octobre. Le mois le plus frais est celui de janvier suivi de celui d'août. Ces caractéristiques permettent d'individualiser sur l'ensemble des hauts bassins un régime thermique bimodale.

Les températures, replacées dans la période la plus longue (1936-1993), montrent une tendance à la stabilité voire même une baisse à certaines stations. Cependant, l'évolution de la période récente montre une nette tendance à la hausse des températures. Cette augmentation n'est pas spécifique aux hauts bassins. Elle suit la tendance générale décelée en plusieurs endroits de la planète. Elle est due à l'accroissement des températures maximales alors que les températures minimales se stabilisent ou sont même en baisse. Ce contraste relativise la hausse des températures au niveau des moyennes.

Que retenir des précipitations et des températures ?

Sinon qu'elles représentent les éléments fondamentaux du climat en milieu tropical. De leur évolution, dépendent les autres éléments du climat que sont entre autre l'humidité relative, l'insolation et l'évaporation. L'analyse en second lieu de ces facteurs montre l'étroite relation entre ces éléments du climat dits mineurs et ceux plus déterminants que sont les précipitations et les températures.

La péjoration pluviométrique reconnue dans les hauts bassins est aussi manifeste à travers l'évolution des autres éléments climatiques : hausse des températures, de l'insolation et de l'évaporation, diminution des taux d'humidité relative conformément à l'affaiblissement du potentiel précipitable. Mais de l'évolution générale des éléments climatiques en milieu tropical, ce sont les précipitations qui restent l'élément principal de détermination du climat. Aussi, la baisse prolongée de la pluviométrie occulte-t-elle l'évolution des autres éléments et suscite par delà un intérêt croissant des médias à travers les faibles totaux de pluies enregistrés, les épisodes de famines, et de péril acridien qui accompagne la sécheresse.

Cet aspect médiatisé de la question fait alors souvent oublier que les déficits pluviométriques ont une incidence majeure sur l'écoulement. Cette seconde approche de l'eau à travers les modalités de l'écoulement explique l'importance de l'étude des hauts bassins. Car, dans cette vaste entité aride du Sahel qu'il draine, le fleuve Sénégal constitue un élément allogène tout comme son voisin le Niger. Aussi, l'ampleur de son déficit d'écoulement ne peut être réellement appréciée que replacée dans son entité hydroclimatique d'origine. L'étude des différentes modalités de son écoulement parallèlement à celles de la Gambie, dont l'écoulement n'est pas soumis aux rigueurs du Sahel, permet de mieux comprendre les différents aspects de la péjoration climatique.

De l'analyse des différents paramètres qui évaluent l'importance des modalités fluviales, les débits écoulés sont les mieux explicatifs. Au-delà de l'irrégularité interannuelle caractéristique de l'écoulement fluvial en domaine tropical, la baisse des débits est observée à toutes les stations de mesures des deux fleuves. Cette faiblesse de l'écoulement conforme aux années à faible pluviométrie prend un caractère dramatique depuis bientôt trois décennies qui correspondent à la sécheresse récente. L'évaluation des ressources en eau des deux fleuves indique alors un déficit cruel que traduit la faiblesse des crues, la sévérité des étiages, des tarissements profonds et une médiocrité croissante des volumes d'eau écoulés.

Il est donc établi que du point de vue hydroclimatique une sécheresse sans précédent depuis le début du siècle affecte les hauts bassins du Sénégal et de la Gambie, et par-delà tout le Sahel Occidental. L'extension de ce phénomène à d'autres régions du domaine tropical, avec des caractères nuancés d'une région à l'autre montre bien que la recherche de ses causes ne peut s'inscrire dans un contexte local ou régional. Comme le reconnaît A. Berger, (1986), "la méconnaissance de la solidarité de tous les phénomènes météorologiques rend vaine toutes les tentatives de découvrir les lois régissant l'évolution de la situation en lieu donné, en partant uniquement des relevés antérieurs en ce même lieu". La nécessité de connaître les causes profondes de la sécheresse pour mieux "diagnostiquer" la maladie des fleuves qui drainent le

Sahel (J. C. Olivry, 1992) nous conduit alors à évoquer les paléoclimats africains. Car, à travers les paléoenvironnements du continent africain, la mise en évidence de phases sèches analogues à la période actuelle sont décelables dans le paysage. La mise en place de ces périodes arides n'est pas locale mais s'inscrit dans un processus climatique de circulation lente ou rapide, à partir d'une dynamique de chaud ou de froid, en rapport avec la prédominance des hémisphères géographiques. La cause de la sécheresse est donc planétaire et l'évolution des facteurs aérologiques à travers la pression et les vents de la période récente renforcent les échanges méridiens comme facteurs principaux d'explication de la sécheresse.

Pour le milieu naturel et les hommes durement éprouvés par une sécheresse persistante et de plus en plus intense, s'imposent alors des tentatives de survie à des aléas climatiques draconiens. La politique des aménagements hydrauliques, mise en branle depuis l'avènement de la crise climatique en 1970 et confirmée par l'édification de barrages au milieu des années 1980 semble être pour les autorités politiques la réponse adéquate à la situation climatique gravement exacerbée.

Mais pour ces ouvrages dont les projections d'édification ne concordent plus avec les tendances hydroclimatiques se pose aujourd'hui le problème de leur rentabilité conformément à leur coût exorbitant. Les espoirs nés de leur fondation et justifiés à l'époque par le gigantisme des constructions ne doivent pas mener aujourd'hui le paysan sahélien dans un fatalisme de la sécheresse face à des digues à moitié remplies. Il faut pour cela que du peu d'eau disponible se dégage une politique cohérente et judicieuse de son utilisation, car à l'heure actuelle, qui mieux que le paysan sahélien conçoit à juste titre cette pensée de Valéry (Louanges à Dieu) que "la vie n'est que l'eau organisée".

L'étude hydroclimatique des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie s'inscrit donc dans une meilleure connaissance de l'évolution climatique et hydrologique du milieu tropical. L'avènement de la sécheresse au cours de la période récente renforce de ce fait l'intérêt d'une telle étude. Dans une région comme le Sahel, les manifestations de la sécheresse sont beaucoup plus sensibles à cause du caractère très aléatoire de la pluviométrie et de la sévérité des autres paramètres climatiques. Les aménagements réalisés reposent alors sur l'abondance fluviale des cours d'eau allogènes qui drainent cette région. Or, la diminution de la pluviométrie corrélée aux déficits d'écoulement des fleuves tropicaux est devenue un phénomène généralisé. Il est donc urgent d'évaluer les effets de la sécheresse dans les régions où naissent ces cours d'eau. La connaissance de l'importance des déficits hydropluviométriques des régions pourvoyeuses d'eau comme les hauts bassins permet alors de mieux asseoir les aménagements dans celles moins nanties. De telles expériences sont tout aussi applicables dans d'autres régions du monde.

BIBLIOGRAPHIE

ACADEMIE DES SCIENCES D'OUTRE-MER -1985- La sécheresse en zone sahélienne. Causes-Conséquences-Etude des mesures à prendre. In n°4216-4217. Notes et études documentaires. La Documentation Française, Paris.

ALBERGEL J. CARBONNEL J. P. GROUZIS M. -1984- Péjoration climatique au Burkina Faso : Incidences sur les ressources en eau et les productions végétales. Cahiers ORSTOM, série Hydrol., vol XXI, n°1, pp. 3-19

ALBERGEL J., CASENAVE A., VALENTIN C. -1985- Modélisation du ruissellement en zone soudano-sahélienne ; simulation de pluies et cartographie des états de surfaces. Journées hydrologiques de Montpellier, Coll. et Sém. ORSTOM, pp. 75-84.

ALBERGEL J. -1986- Evolution de la pluviométrie en Afrique soudano-sahélienne, exemple du Burkina Faso. Rapport multigr., ORSTOM, Ouagadougou, 19 p.

ALBERGEL J. -1987- Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface. Application aux petits bassins du Burkina Faso. In : "The influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources", (Eds. S. I. SOLOMON, M. BERAN, S. HOGG), IAHS Publication, 168, pp. 355-366.

ALBERGEL & AL -1990- Monographie hydrologique du fleuve Gambie. ORSTOM, Dakar, 245 p.

ALBERGEL J., PEPIN Y. -1991- Etude des ressources en eau des Iles du Cap-Vert, Projet-P.N.U.D - CVI/001/90; Mission d'expertise du 10 Décembre au 20 Janvier 1991, 111 p.

ARCHAMBAULT J. -1960- Eaux souterraines de l'Afrique occidentale. Edition BERGER-LEVRAULT, Nancy, 139 p.

ARLERY R., GRISSOLET H., GUILMET B. -1973- Climatologie : méthodes et pratiques. 2e édit., Paris, Bruxelles, Montréal, 434 p.

ASSAD E. -1987- Utilisation des satellites météorologiques pour le suivi agroclimatique des cultures en zone sahélienne : cas du Sénégal. Thèse hydrologie - Montpellier, 260 p.

ASEQUA. Bull. -1987- Les changements globaux en Afrique durant le quaternaire.

AYME J. M., DROUHIN J. P., LARROUIHL J. -1962- Rapport de synthèse sur le bassin du Sénégal. Rapport géologique C.O.P.E.T.A.O., n° 14, 46 p.

BALLO A. -1983- Les modalités de l'écoulement en domaine tropical humide africain : L'exemple du Niger supérieur et du Bani. Thèse de doctorat 3e cycle, Nancy 173 p.

BADER J. C. -1992- Etude de l'impact du barrage de Manantali sur le régime hydrologique du Sénégal au niveau de Bakel. Rapport multigr., ORSTOM, Projet AGRHYMET (OMM/PNUD-Sén/86/009), 49 p.

BALLAND P. -1983- Méthodologie de quantification des flux de nutriments en rivières. Proceding. of Hambourg Symp., IAHS publ., 141, pp. 333-345.

BAMBA S.B. -1985- Première approche de la physico-chimie des eaux interstitielles des sédiments du lac de Guiers. Mémoire de DEA, Dépt. de Géologie, Univ. de Dakar, 48 p.

BAMBA S.B. -1987- Le bilan de l'eau et de la matière dans le haut bassin guinéen du fleuve Gambie. Thèse 3e cycle, Géologie, Univ. Dakar, 147 p.

BASSOT J. P. -1966- Etude géologique du Sénégal oriental et de ses confins Guinéo-Maliens. Mém. BRGM , n°40, 322 p.

BEAUMONT C. -1982- The analysis of hyrological times series. In progress in physical Geography, vol. 6, n°1, 1982.

BENSE C. -1964- Les formations sédimentaires de la Mauritanie méridionale et du Mali Nord-occidental (Afrique de l'Ouest). Mém. du BRGM, Paris, 26, 270 p.

BERGER A. -1992- Le climat de la terre. Un passé pour quel avenir ?. Univ. de Boeck, 479 p.

BERHAUT J. -1975- Flore illustrée du Sénégal. Gouvernement du Sénégal, Ministère du Développement Rural et de l'Hydraulique, Direction des Eaux et Forêts, Dakar, tome IX, 523 p.

BERNUS E. -1979- Exploitation de l'espace et désertification en zone sahélienne. In Travaux de l'Institut de Géographie de Reims, n°39-40.

BESSOLES B. -1977- Géologie de l'Afrique, le craton ouest africain. Mémoire du BRGM, Paris, n° 88, 402 p.

BESSOLES B., et TROMPETTE R. -1980- Géologie de l'Afrique, vol. 2. La chaîne panafricaine, zone mobile d'Afrique centrale et zone mobile soudanaise. Mém. du BRGM, n°92, 396 p.

BETHEMONT J. -1977- De l'eau et des hommes. Essai géographique sur l'utilisation des eaux continentales. Bordas Etudes, 280 p.

BLOT A. -1970- Les nappes phréatiques au Sénégal oriental, données géochimiques sur les eaux. Rapport ORSTOM, Dakar, 34 p. multigr.

BLOT A. -1980- L'altération climatique des massifs de granite du Sénégal. Trav. Doc. ORSTOM, Paris, n° 114, 434 p.

BONNEFOND PH. -1984- Une forme d'intervention contre la sécheresse : l'irrigation. l'exemple de la rive gauche du fleuve Sénégal. Bull. Soc. Languedoc. Géogr. n°3-4. "La sécheresse au Sahel ", pp. 207-219.

BOUCHEZ J.M. -1986- Monographie du fleuve Gambie. Avancement des études. Avril-Octobre 1986, ORSTOM, Dakar.

BOUREIMA A.G. -1988- Crises alimentaires et stratégies de subsistance en Afrique sahélienne (Burkina Faso, Mali, Niger). Thèse de doctorat, 4 vol., Univ. Paris VII, 850 p.

BOUREIMA A.G. -1992- Sécheresses, Famines et Epidémies au Sahel. In SECHERESSE, vol 3 n°4 , déc 1992. CNRS 1981.

BRUNET-MORET Y. -1968- Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale. Rép. du Sénégal. ORSTOM, Avril 1968.

BRUNET-MORET Y. -1970- Etude hydrologique en Casamance. Rapport définitif, ORSTOM, 52 P.

BRUNET-MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.P., MOLINIER M. -1986- Monographie hydrologique du fleuve Niger, I. Niger supérieur, II. Cuvette lacustre et Niger moyen. Collection Monographies hydrologiques n°8 (Ed. ORSTOM, Paris), 2 tomes, 394 et 503 p.

CARBONNEL J. P, HUBERT P. -1985- Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'Ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques au Burkina Faso (Ex Haute Volta). C.R. Acad. Sc. Paris, 301, série II, n° 13, pp. 941-944.

CARBONNEL J.P., HUBERT P., WALBADET E., MERMOUD A. -1990-Variabilité spatiale des précipitations soudano-sahéliennes à l'échelle décamétrique. C. R. Acad. Sc., Paris, tome 311, Série II, pp. 1425-1430.

CARN M., DAGORNE D., GUILLOT B., LAHUEC J.P. -1987- Estimation des précipitations par satellite au Sahel pour la période de mai à septembre 1987. Bull. Veille Climatique Satellitaire, Lannion, 20, pp. 26-30.

CASTANY G. -1982- Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Edit. DUNOD, Paris. 233 p.

CALDWEL J.C. -1975- La sécheresse au Sahel et ses conséquences démographiques. Cahiers OLC, n°8, déc. 75.

CHAMARD P.C. et COUREL M.F. -1983- Les variations spatiales et temporelles des précipitations au Sahel. In Hommes et Terres du Nord. Revue de l'Institut de Géographie de Lille, pp. 15-23.

CHAPERON P. - 1974- Etude hydrologique du bassin continental du fleuve Gambie. Rapport terminal. ORSTOM. Tome 1, Résultats des mesures et analyse des données. PNUD. Projet REG 60, 84 p + cartes

CHAPERON P. -1985- Quatre années de sécheresse dans le Sahel. ORSTOM, Dakar, colloque de Nouakchott.

CHARRE J. -1988- Les grandes régions de variabilité pluviométrique en Afrique de l'ouest au sud du Sahara. In Veille Climatique Satellitaire, n°22, pp 21-25.

CHOURET A. -1982- La crue 1982 sur le haut bassin du Sénégal au Mali. Comparaison avec les périodes de sécheresse passées. ORSTOM Bamako, 51 p.

CITEAU J. - 1992- Les satellites météorologiques, une nouvelle approche de la connaissance du climat au Sahel. Thèse de doctorat, Univ. Paul Sabatier, Toulouse 110 p.

CITEAU J., FINAUD L., CAMMAS J. P., DEMARCQ H. -1989- Questions relative to ITCZ migrations over the tropical Atlantic ocean, sea surface temperature and Senegal river runoff. Meteorol. Atmos. Phys., 41, pp. 181-190.

CITEAU J., GOURIOU Y., GUILLOT B. -1984- Position de la zone inter-tropicale de convergence à 28° ouest et température de surface dans le golfe de Guinée. Bull. Veille Climatique Satellitaire, n°4, pp. 2-5.

COLY A. -1991- Monographie hydrologique de la Koulountou. Mémoire de maîtrise, Dpt Géographie, Univ. Dakar, 148 p.

COCHEME J., FRANQUIN P. -1967- Etude d'agroclimatologie de l'Afrique sèche au sud du Sahara, en Afrique occidentale. Rapp. tech. FAO (UNESCO).

COUREL M.F. -1984 - Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par satellites. Thèse de doctorat d'Etat, Univ. Paris I Sorbonne, 407 p.

CUETO L. -1983- Synthèse des prospections pédologiques dans le bassin versant de la Gambie. TCP/RAF/2214 OMVG-FAO Dakar-Rome.

DACOSTA H. -1986- Essai d'extension à des échantillons de débits mensuels et annuels du fleuve Gambie, Sept 85, ORSTOM Montpellier, 71 p.

DACOSTA H. -1989- Pluies et Ecoulement sur le bassin de la Casamance. Thèse de doctorat 3e cycle, ORSTOM-UCAD, 273 p.

DARS R. -1961- Les formations sédimentaires et les dolérites du Soudan occidental (Afrique de l'Ouest). Thèse Sciences, Géologie, Univ. Paris XII. Mém. du BRGM, Paris XII, 327 p.

DAUTY J. -1967- Estimation des débits d'étiages à partir des précipitations et des caractéristiques physiques du bassin versant. Notes internes. Réf. 56-67 GHLNH.

DECRAENE P. -1979- Le Sénégal convalescent de la grande sécheresse. Le Monde 5-6 Août 1979, p. 9.

DEMANGEON. A -1930- Rhin et Rhône, aspects de la rivalité entre deux fleuves. A.G. XXXIV, pp. 225-243.

DEMANGEOT. J -1984- Les milieux naturels du globe. Paris, Masson, coll. Géo. 250 p.

DESCROIX L. -1986- Projet pour la première partie de la monographie hydrologique du bassin du fleuve Gambie. Composantes géographiques et climatiques. Rapport multigr.,ORSTOM, Dakar, 54 p.

DESCY J.P., COSTE M., MAIFFI-RASSAT M. -1990- Application d'un indice diatomique d'évaluation de la qualité des eaux courantes à des points du réseau national de bassin sur le Rhône et ses affluents. Rapport Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse 86 p.

DEYNOUX M., SOUGY J., TROMPETTE R. -1985- Lower paleozoïc rocks of west Africa and western part of central Africa. In Lower paleozoïc of Northwesthern and West central Africa, Willey Ed., New York, p.337-495.

DEYNOUX M., MARCHAND J., PROUST J. N. -1989- Notice explicative et synthèse stratigraphique et sédimentologique des cartes géologiques au 1/ 200 000 e de Kossanto, Kayes, Kankossa (Mali occidental). Rapport Centre de Sédim. et Géochimie de la Surface, Univ. Strasbourg, 71 p.

DHONNEUR G. -1985- L'Equateur Météorologique : une structure planétaire. In Climatologie Tropicale et Etablissements Humains, Actes du symposium n°23, Dijon, 22-25 Août.

DIANDY R. -1986- Etude statistique et géographique des crues dans la basse vallée du fleuve Sénégal de 1968 à 1982 . T.E.R, Dpt de Géographie, Univ. Dakar, 124 p.

DIONE O. -1991- Ecoulement, Crues et Etiages dans le bassin versant de la Falémé. Mém. maîtrise, Dpt de Géographie Univ. Dakar, 105 p.

DIONE O. -1992- Sécheresses climatiques dans le bassin versant de la Falémé. Mém. D.E.A. Dpt de Géographie, Univ. Dakar 132 p.

DIONE O. -1992- Ajustement statistique à des échantillons de pluies et débits : Application aux données du bassin de la Falémé. Rapport de stage de D.E.A, Dakar, 45 p.

DIOP N. -1984- Aménagements hydro-agricoles et agriculture traditionnelle dans la moyenne vallée du Sénégal. Thèse de 3e cycle 189 p. Univ. Louis Pasteur, Strasbourg.

DIOP E. S. -1987- Estuaires holocènes tropicaux "du Saloum à la Mélacorée". Thèse d'Etat, Univ. Louis Pasteur Strasbourg, 504 p.

DIOUF A. -1991- Monographie hydrologique du Diaguiry. T.E.R, Dpt de Géographie, Univ. Dakar 114 p.

DOSSEUR H., TOUCHEBOEUF P., -1984- Hydrologie, hydraulicité et climatologie. Tentative d'explication de l'insuffisance des précipitations en Afrique et dans d'autres régions du monde en 1983. Congrès International, UPDEA, Lomé 4-8 Juin 1984.

DUBREUIL P. -1966- Les caractéristiques physiques morphologiques des bassins versants. Leur détermination avec une précision acceptable. Cahiers ORSTOM, série hydrol. n°5.

DUBREUIL P. -1971- Détermination des paramètres du sol influant sur le cycle hydrologique dans les B. R .E. In cahiers ORSTOM, série. hydrol. vol VIII, n°3.

DUMONT R. -1986- Pour l'Afrique j'accuse. Ed. Karthala. Histoire de développement-Grands barrages, Grands dommages ? 457 p.

DURUFLE G. -1994- Le Sénégal peut-il sortir de la crise ? Ed. Karthala.

EAUX et CLIMATS -1989- Mélanges géographiques offerts en hommage à Charles Pierre PEGUY. Grenoble, 1981, 595 p.

FATOGOMA B. -1994- Etude du tarissement des cours d'eau des bassins supérieurs du Niger et du Sénégal. Rapport de stage ORSTOM, Bamako, 54 p.

FAURE H., GAC J.Y. -1981- Un futur cycle aride au Sahel vers l'an 2 005 ?

FAURE H., GAC J.Y., MONTEILLET J. -1981- Variations du niveau de la mer ou crues fluviales ? Proceedings of Symposium on "Variations in sea level in the last 15 000 years, magnitude and causes ", Columbia (U.S.A.), 6-10 avril 1981, 3 p.

FAURE H et GAC J.Y. - 1982- Will the sahelian drought end in 1985 ? Nature, vol. 291, n° 5 815, pp. 475-478.

FAURE H., GAC J.Y., HILLAIRE-MARCEL C., LEZINE A.M., MONTEILLET J., NGOM P.M., PEZERIL G., SAOS J. L. -1984- Tropical peats : hydrologic and climatic control. In " Climatic changes on a yearly to millenial basis", Morner and Karlen (Eds), Reidel Publ. C^{ie}, pp. 201-203.

FONTAINE B. -1985- Anomalies pluviométriques et circulation estivale dans la bande sahélienne pendant la sécheresse 1968-1975. In Climatologie et Etablissements Humains, Actes du symposium n°23, Dijon, 22-25 Août.

FRECAUT R. -1964- Eléments d'hydrologie continentale. Paris C D U, 231 p.

FRECAUT R. -1970- Etiages, application à l'Afrique occidentale et centrale du Nord-ouest. "Colloque hydrologie sur la précision des débits". Bull. assoc. Géogr. Franç., n°459, pp. 61-71.

FRECAUT R. -1982- Eléments d'hydrologie et de dynamique fluviale. Régions chaudes et humides des basses latitudes. Tome 1, Publ. Univ. Nancy II, 147 p.

GAC J. Y. -1985- Le phénomène de brume sèche au Sénégal en 1984-1985. Veille Climatique Satellitaire, n°7 (Mai) pp. 31-35.

GAC J. Y., FAURE H. -1987- Le "vrai" retour à l'humide au Sahel est-il pour demain ?. C.R. Acad. Sciences, Paris, t. 305, sér. II, pp. 777-780.

GAC J. Y., BOUCHEZ J. M., BAMBA B. S., CARN M., ORANGE D. -1987- Géochimie des eaux du Fouta-Djalon. Flux dissous et particulaires en Haute Gambie (Kédougou et Gouloumbou). Contribution à la Monographie de la Gambie. Rapport multigr., ORSTOM, Dakar, 124 p.

GAC J. Y. -1989- Environnement et qualité des eaux du Sénégal. Rapport scientifique n°1, multigr., projet EQUESEN, CEE, Bruxelles, 1 Novembre 1989, 29 p.

GAC J. Y. -1990- Environnement et qualité des eaux du fleuve Sénégal. Rapport Scientifique n°2, multigr., projet EQUESEN, ORSTOM, Dakar, 54 p.

GAC J. Y., COGELS F. X., KANE A., SAOS J. L. -1990- Environnement et qualité des eaux du Sénégal. Rapport scientifique n°3, multigr., projet EQUESEN, CEE, Bruxelles, 1 novembre 1990, 63 p.

GAC J. Y., APPAY J. L., CARN M., ORANGE D. -1990- Le haut bassin du fleuve Sénégal. Rapport multigr., ORSTOM, et rapport CEE, projet EQUESEN, Dakar, 108 p.

GAC J. Y -1991- Environnement et qualité des eaux du fleuve Sénégal. Rapport scientifique n° 4, multigr., ORSTOM et Rapport CEE, projet EQUESEN, Avril 1991, 122 p.

GAC J. Y., CARN M., CECCHI P., COGELS F. X., MILLET B, -1992- Environnement et qualité des eaux du fleuve Sénégal. Rapport scientifique n° 6. multigr., ORSTOM, Rapport CEE, projet EQUESEN, 67 p.

GAC J. Y., CARN M., ORANGE D. -1991- Données hydroclimatiques et géochimiques sur le bassin versant du fleuve Sénégal et sur la Guinée (Tome 1). Rapport multigr., ORSTOM, Rapport CEE, projet EQUESEN, 87 p.

GAC J. Y., CARN M., ORANGE D. -1991- L'impact de la sécheresse actuelle sur le bilan hydrologique du fleuve Sénégal à Bakel. Rapport multigr., ORSTOM et Rapport CEE, projet EQUESEN, 32 p.

GAC J. Y., CARN M., SAOS J. L. -1986- L'invasion marine dans la basse vallée du Sénégal. I. période 1903-1980., II. Période 1980 : proposition d'un nouveau modèle d'intrusion continentale des eaux océaniques. Revue hydrol. Trop. pp. 93-103.

GANNETT F.C & CARPENTER -1990- "Senegal River Basin Monitory Activity" Synthesis report Novembre 1990.

GAZELLE F. -1978- La grande sécheresse de 1976 dans les pays de l'Agout et leur pourtour, Sté hydrotechnique de France, 15e journée de l'hydraulique, Toulouse 5, 6, 7 Sept, 1978.

GEORGE P. -1990- Dictionnaire de la Géographie. 4 éd. P.U.F Paris, 512 p.

GIRAUD M. -1951- Rapport sur le régime du fleuve Sénégal pendant la grande crue de 1950. Rapport de la M.A.S. (Mission d'Aménagement du fleuve Sénégal), multigr., Saint-Louis (Sénégal), 19 p.

GLANTZ M. -1979- Intérêt d'une prévision météorologique à long terme pour le Sahel Ouest Africain. In Travaux de l'Institut de Géographie de Reims, n°39-40, 1979.

GNINGUE A. -1986- Etude hydrologique du bassin versant du Niériko T.E.R, Dpt de Géographie, Univ. Dakar, 93 p.

GOLDSMITH E & HILDLARD N. -1986- Social and Environmental Effects of Large Dams. San Francisco, Sierra Club, 3 volumes.

GOUDIABY. A -1984 - L'évolution de la pluviométrie en Sénégambie de l'origine des stations à 1983. T.E.R Dpt de Géographie, Univ. Dakar 235 p.

GOUROU P. -1968- L'Afrique. Edition Masson, 251 p.

GUIGUEN N. et LERIQUE J. -1977- Notes sur l'étalonnage du fleuve Sénégal à Bakel à la suite des campagnes de mesure de 1974-1975. Rapport ORSTOM, Dakar, 38 p.

HASTENRATH S. & LAMB P.J. -1977- Climatic atlas of the tropical Atlantic and eastern Pacific oceans. The Univ.of Wisconsin press, 112 p.

HISARD P. -1980- Observation de réponse de type "El Niño" dans l'Atlantique tropical oriental-Golfe de Guinée. Océanol. acta. 3, 1, 69-78 p.

HUBERT H. -1921- Eaux superficielles et souterraines du Sénégal. Paris Larose, 31 p.

HUYGEN J. P. -1978- Development of the Gambia river basin. A foresty study of the basin report prepared for UNDP/OMVG.

JANICOT S. -1988- Facteurs naturels impliqués dans la sécheresse au Sahel. In Climats et Climatologie. Dijon, 1988.

JANICOT S. -1990- Variabilité des précipitations en Afrique de l'ouest et circulation quasi-stationnaire durant une phase de transition climatique . Thèse de doctorat Univ. Paris VI.

JAUJAY J. -1992- Les "aménagistes" face à l'environnement : l'exemple du fleuve Sénégal. In Afrique Contemporaine, n°168, Janvier-Mars 1992, pp. 217-224.

JOIGNEREZ A., GUIGUEN N. -1992- Evaluation des ressources en eau pérenne du Mali. Rapport final (ORSTOM), Novembre, 1992.

JONES P.D. -1988- Hemispheric surface air temperature variations : recent trends and an update to 1987. J. Climate 1, 654-660.

KALOGA B. -1983- Le manteau kaolinique des plaines du centre sud de la Haute-Volta, dynamique et relation avec le manteau smectitique. Thèse Sciences, Géologie.Univ. de Strasbourg, 320 p.

KANE A. -1986- Le fleuve Sénégal : Bilan hydrologique et flux continentaux de matières particulaires à l'embouchure. Sci. Géol. Bull, 39,1,pp. 99-13 Strasbourg.

KONATE L. -1992- Monographie hydrologique du Diarha. T.E.R, Dpt de Géographie, Univ. Dakar 98 P.

LAKE L.A. -1982- Analyse cartographique de la désertification dans le nord du Sénégal. Thèse de doctorat 3e cycle, Univ. Dakar 236 p.

LAMAGAT J. P. -1989- Monographie hydrologique du fleuve Gambie Collection Mém. ORSTOM-OMVG, 250 p.

LAMAGAT J. P. -1986- Le fleuve Sénégal à Bakel : une révision des débits. Rapport multigr., ORSTOM, Dakar, multigr., 86 p.

LAMBERT R. -1996- Géographie du cycle de l'eau. Presse Univ. du Mirail, 439 p.

LAMBERGEON D. -1977- Relation entre les pluies et les pressions en Afrique occidentale. Publ. Dir. Expl. Mét. Série II n°57, ASECNA, Dakar.

LEBORGNE J. -1988- La dégradation actuelle du climat entre le Sahara et l'Equateur. Séminaire de Recherche Internationale, Dakar 21-26 Nov. 1988.

LEBORGNE J. -1988- La pluviométrie au Sénégal et Gambie. Laboratoire de Climatologie, Univ. Dakar, 94 p.

LEBORGNE J. -1988- Un siècle d'évolution de la pluviométrie dans la région Mauritano-Sénégambienne. In Climats et Climatologie, pp. 309-318, Dijon 1988.

LE HOUEROU H. N. -1979- Ecologie et désertification en Afrique. In Travaux de l'Institut de Géographie de Reims, n°39-40, 5-26 p.

LEPRUN J. C. -1967- Les sols dans la région de Goudiri. Collection ORSTOM, 1967.

LERICOLLAIS A. -1976- La sécheresse et les population dans la vallée du Sénégal. In "la désertification au sud du Sahara". Nouv. éd. Afric. pp. 111-117, Dakar.

LERICOLLAIS A., SCHMITZ -1984-"La calebasse et la houe", techniques et outils des cultures de décrues dans la vallée du Sénégal. Cahiers ORSTOM. Série. Sces, Hum, vol 20, n°3-4. p 217-238.

LERIQUE J. -1975- Les transports solides en suspension dans la Gambie à Kédougou et à Gouloumbou. Résultats de la campagne 1974. PNUD, projet REG 60. ORSTOM, avril, 1974.

LEROUX M. -1980- Le climat de l'Afrique tropicale. Doctorat d'Etat, 3 tomes, Dijon, 1427 p.

LEROUX M. -1980- Atlas du Sénégal. Edition, Jeune Afrique, 72 p, Paris.

LEROUX M. -1987- L'interdépendance des phénomènes climatiques, la circulation générale de l'atmosphère. Séminaire du Laboratoire de Géologie du Quaternaire : "Le quaternaire continental méthode d'étude et point des connaissances sur le dernier cycle climatique (0-140 000 ans BP)", CNRS Marseile/Luminy. 5-6 Mai 1967.

LEROUX M. -1988- La variabilité des précipitations en Afrique de l'ouest : les composantes aérologiques du problème. Veille Climatique Satellitaire, n°22, ORSTOM/CMS, pp. 26-45.

LEROUX M. -1991- Les conditions climatiques de l'Afrique de l'Ouest . In "Hydrogéologie de l'Afrique de l'ouest" , R. GIRAUD éd.

LEROUX M. -1992- Interprétation météorologique des changements climatiques observés en Afrique depuis 18.000 ans. Géo-Eco-Trop, Bruxelles 1992.

LEROUX M. -1992- Perception statistique et réalité dynamique, transport méridien en masse extratropicale, agglutination anticyclonique et circulation linéaire tropicale.
Publ. AIC, Vol. 5, 1992.

LEROUX M. -1992- L'Equateur Météorologique en Afrique tropicale ; du front intertropicale (FIT) à l'équateur météorologique (EMI et EMV) évolution d'un concept.

LO H.M. -1984 - Le bassin de la Gambie en amont de Gouloumbou. Contribution à l'hydrologie et à la dynamique fluviale en domaine tropical humide africain.
Thèse de doctorat 3 ^{e} cycle, Nancy II, 396 p.

LOUP J. -1974- Les eaux terrestres. Masson et C^{ie}, 171 p., 48 fig.

MAHE G., OLIVRY J. C. -1991- Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale, du mensuel à l'interannuel. In Proceedings of the Vienna Symposium "Hydrology for the Water Management of large River Basins", August 1991. I.A.H.S, publ. n°201, pp 163-171.

MAHE G. -1993- Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes.Ed. ORSTOM, Coll. Etudes et Thèses, Paris, 438 p.

MAINGUET M. -1995- L'homme et la sécheresse. édition Masson, 425 p.

MAIGNIEN R. -1958- Le cuirassement des sols en Guinée, Afrique occidentale. Thèse Sciences, Géologie, Univ. Strasbourg, Mém. Serv. Carte Géol. Als.-Lorr., 16, 239 p.

MAKEDONSKY E. -1989- Le Sénégal, la Sénégambie. Ed. L'Harmattan, 2 volumes.

MANDIN R. -1957- Rapport sur les mesures de débits solides à Dagana-Bakel et Fadougou. Bull. MAS 44, 60 p.

MARCHAND J., BASSOT J. P., SIMON B. -1987- Notice explicative de la carte photogéologique au 1/200000 de Kossanto (Mali). Rapport Direction Nationale Géol. Mines, Bamako (Mali), 28 p.

MARENA M. -1989- Critique de thèse portant sur : Pluie Ecoulement dans le bassin du fleuve Sénégal. Dpt de Géographie,Univ. Dakar 32 p.

MARENA M. -1989- Sécheresse hydrologique dans le bassin de la Casamance en amont de Kolda Mém. de D.E.A, Dpt de Géographie Univ. de Dakar.

MARUIS C. -1976- Effets de la sécheresse sur l'évolution des sols à mangrove en Casamance et en Gambie. Rapp. ORSTOM. Multigr.

MARIUS C. -1985- Mangroves du Sénégal et de la Gambie : Ecologie, Pédologie, Géochimie, Mise en valeur et aménagement. Thèse de doctorat ès-Sciences Nat., 309 p. + photos.

MBAYE C -1991- Variation spatio-temporelle de la demande évaporative au Sénégal. T.E.R, Dpt de Géographie Univ. de Dakar 162 p.

MICHEL P. -1960- Recherche géomorphologique en Casamance et en Gambie méridionale. BRGM, Dakar.

MICHEL P. -1973- Les bassins du fleuve Sénégal et Gambie : Etude géomorphologique. Thèse d'Etat, 3 tomes, 752 p.

MICHEL P. SALL M. -1984- Dynamique des paysages et aménagement de la vallée alluviale du Sénégal. In Mémoire ORSTOM, Paris n°106, pp. 89-109.

MICHEL P. -1985- Sécheresse et transformation morphodynamique dans la vallée et le delta du fleuve Sénégal. Bull. n° 4 du C.N.R.S Strasbourg.

MICHEL P. -1986- Sécheresse, dégradation du milieu naturel et désertification au Sénégal. Géoökdynamik, Darmstadt, tome 7, pp. 63-88.

MICHEL P., BARUSSEAU J.P. RICHARD J.F. SALL. M -1990 - Après-barrage dans la vallée du fleuve Sénégal Projet campus, Mars 1990, 153 p.

MICHEL P. -1990- La vallée du fleuve Sénégal : Milieu naturel, Mise en valeur et Aménagement. In Espaces Tropicaux, n° 2, Talence CEGET-CNRS.

MOLINIER M. - 1979- La sécheresse de 1978 dans le Sud-Ouest Congolais. Cahiers ORSTOM, série hydrol, vol XVI, n°2.

MOREL R. -1993- L'Atlas agroclimatologique des pays du CILSS. Bull. Veille Climatique Satellitaire, Lannion, 45, pp. 37-46.

MOUMOUNI A. -1973- Energy needs and problems in the sahelian and soudanese zones : prospects of solar power, Ambio, vol.II, N°6, pp. 203-213.

NDONG J. B. -1991- Etude des saisons pluvieuses de 1985 -1986 et 1987 au Sénégal. Mém. de maîtrise, Dpt de Géographie, Univ. de Dakar 125 p.

NDONG J. B. -1992 - Etude de la situation météorologique des 3-4-5-6 Septembre 1991 au Sénégal Mém. de D.E.A, Univ. de Dakar 69 p.

NDOUR M -1990 - Monographie hydrologique du Sandougou. Mém. de maîtrise, Dpt de Géographie, Univ. de Dakar 82 p.

NIANG A. -1990 - La Casamance et son bassin : Etude hydrologique. Mém. de maîtrise, Dpt de Géographie Univ. de Dakar, 152 p.

NICHOLSON S. E. -1981- The historical climatology of Africa. In Climate and History, Cambridge Univ. Press, 249-70.

NICHOLSON S. E.-1980- The nature of rainfall fluctuations in sub-tropical West Africa. Monthly Weather Review, 108, 473-487.

NICHOLSON S. E., KIM J., HOOPINGARNER J. -1988- Atlas of african rainfall and its interannual variability. Department of Meteorology, Florida State University, Tallahassee, Florida, U.S.A.

NICHOLSON S. E. -1989- Long term changes in African rainfall. Weather, vol. 44, n°2, pp. 47-56.

OLIVRY J. C. -1967 - Régimes hydrologiques des rivières Batékés (Lefimi, Alima Nkéni), ORSTOM, Brazzaville, 52 p.

OLIVRY J. C. -1974 - Les déficits hydropluviométriques au Cameroun pendant les années sèches 1972 et 1973. ORSTOM, Yaoundé 71, p.

OLIVRY J. C. - 1981 - Mission U.N.S.O. d'évaluation du problème de la sécheresse et d'examen des activités en cours ou prévues pour la mise en oeuvre du plan d'action de lutte contre la désertification en Guinée-Bissau (7-18 mai 1981). Rapport d'activités UNSO-ORSTOM, 35 p.

OLIVRY J. C. -1982 - Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux îles du Cap Vert : Examen de quelques séries de longue durée, débits et précipitations. Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, t 20 n°1, pp. 47-69, Dakar.

OLIVRY J. C -1983 - Evaluation des données hydrologiques et météorologiques disponibles sur le bassin du fleuve Gambie. Rapport préliminaire OMVG/FAC ORSTOM Fév. 1983, 91 p.

OLIVRY J.C -1983- Contribution de la prévision en hydrologie à l'éventuelle maîtrise des ressources déficitaires du fleuve Sénégal pour la saison 1983-1984. Rapp.ORSTOM-Dakar, 91 p.

OLIVRY J. C. -1986- Fleuves et rivières du Cameroun. Thèse d'Etat. MESRES-ORSTOM. Collection "Monographies hydrologiques O.R.S.T.O.M" , n°9. Paris. 733 p, 360 tab, 2 cartes.

OLIVRY J. C., CHASTANET M -1986- Evolution du climat dans le bassin du fleuve Sénégal (Bakel) depuis le milieu du XIX^{e} siècle. (Extension de la période d'observations hydropluviométriques à partir de données historiques). Symposium "Changements globaux en Afrique" INQUA-ASEQUA, Dakar, Avril 1986, Coll. Trav. Doc. ORSTOM, n° 197, Paris, pp. 337-342.

OLIVRY J. C -1987 - Les conséquences durables de la sécheresse actuelle sur l'écoulement du fleuve Sénégal et l'hypersalinisation de la basse- Casamance. Veille Climatique Satellitaire, n°17 (Mai), pp. 31-39.

OLIVRY J. C, CHASTANET M -1989- Evolution de l'hydraulicité du fleuve Sénégal et des précipitations dans son cours inférieur depuis le milieu du XIX^{ème} siècle. Communication Colloque Nordeste Sahel. Paris Janvier 1986, Ed. B.BRET "Les hommes face aux sécheresses". Coll. Trav. Mémoires de l'IHEAL n°42, pp. 115-124.

OLIVRY J. C., SIRCOULON J., TOURE M. -1992- The ill rivers of Africa. In Actes du Colloque ICID "Impactos de variaoes climaticas e desenvolvimento sustentavel em regios semi-aridos", janvier 1992, Fortaleza, (Brazil).

OLIVRY J. C. -1993- De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies. In Actes des Journées Hydrologiques "Centenaire Maurice Pardé", Institut de Géographie, LAMA, Grenoble, Sept. 1993, 10 p.

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. Madeleine Griselin, 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 ? In "Hydrology of Warm Humid regions", Ed. J.S Gladwell (Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993) IAHS Publ. n°216, pp. 66-78.

OMOTOSHO J.B. -1976- A survey of the temperature and wind fields over tropical West Africa and their relation to the line squall. Bull. Sc. Projet report. Dept. of Geophysics. University of Reading. England.

OMOTOSHO J.B. -1984- On the initiation and organisation of deep convective system over West Africa. WMO/TD. n°23. pp. 154-157.

ORANGE D. -1986- Bilan de l'altération chimique et de l'érosion mécanique sur le haut bassin du fleuve Sénégal. Mém. de D.E.A., Univ. d'Orléans, 111 p.

ORANGE D -1990- Hydroclimatologie du Fouta Djalon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique. Thèse de doctorat, Univ. Louis Pasteur Strasbourg, 241 p.

PARDE M. -1968- Fleuves et rivières. Paris, A. Colin 245 p.

PAPY L. -1951- La vallée du Sénégal. Agriculture traditionnelle et riziculture mécanisée.. In Cahiers Outre-mer, n°15, pp. 277-324.

PEGUY Charles. P. -1977- Une économie méconnue, l'économie de l'eau. Bull. n°1. INFO-GEO.

PETIT-MAIRE N., RISER J. -1983- Sahara ou Sahel ? 473 p., Marseille.

PUECH C. -1983- Persistance de la sécheresse au Sahel. Conséquences sur les normes hydrologiques et pluviométriques. C.I.E.H., Série Hydrologie, 24 p.

REBOUL C. -1984- Barrages contre le développement ? Les aménagements hydrauliques de la vallée du fleuve Sénégal. Revue Tiers Monde tome XXV, n° 100 oct-déc 1984, pp. 749-760.

REMENIERAS G. -1980- Hydrologie de l'ingénieur. Eyrolles 2e édition 456 p.

RICHARD J.F -1990- La dégradation des paysages en Afrique de l'ouest. ORSTOM 310 p.

ROCHE M.F. -1986- Dictionnaire Français de l'hydrologie de surface. Paris, Masson, 286 p.

ROCHETTE C. -1974- Monographie hydrologique du fleuve Sénégal. Coll. Mém. ORSTOM, 1, 442 p.

ROGNON P. -1976- Oscillations climatiques au Sahara depuis 40 000 ans. Paris, Masson, RV. Géogr. Phys. Géol. Dyn., 18, 2.

ROOSE E -1980- Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Thèse Sciences, Géologie, Univ. d'Orléans, 587 p.

ROSSI P., DEYNOUX M., SIMON B. -1984- Les formations glaciaires du Précambrien terminal et leur contexte stratigraphique (formations pré et post-glaciaires et dolérites du massif de Kaarta) dans le bassin de Taoudenni au Mali occidental (Afrique de l'Ouest). Sci Géol., 37, p. 91-106.

ROUGERIE G. -1960- Le façonnement actuel des modelés en Côte d'Ivoire forestière. Thèse Lettres, Géographie, Univ. Paris IV; Mém. IFAN, Sénégal, 58, 542 p.

SAGNA P. -1988- L'importance pluviométrique des lignes de grains en Afrique occidentale. Thèse de 3e cycle, Dpt. de Géographie, Univ. de Dakar, tome 1, 291 p.

SAGNA M. -1991- Monographie hydrologique du Thiokoye. T.E.R, Dpt. de Géographie, Univ. Dakar 102 p.

SALL M. -1983- Dynamique et morphogenèse actuelles au Sénégal. Thèse d'Etat, Univ. Louis Pasteur de Strasbourg I, 2 tomes, 604 p.

SALL M. -1979- Hydrologie et géomorphologie du delta et de ses bordures (Aftout es Sahéli et Ferlo nord-occidental) d'après les images Landsat du 30/9/1972. Revue photo-interprétation, Paris, n° spécial Sénégal, fasc. 4, pp. 29-35.

SALL M. et DIOP E. S. -1979- Géomorphologie et évolution des lignes de rivages holocènes dans les îles du Saloum. Bull. ASEQUA, N°30.

SALL M. et MICHEL P. - 1987- Le façonnement actuel de la vallée et du delta du Sénégal. Géo-Eco-Trop, Vol. 2, n°1.

SANTOS L. -1986- Etude monographique du bassin versant du Niokolo-Koba. Dpt. de Géographie Univ. Dakar . T.E.R, 81 p.

SCHNELL R. - 1960- Notes sur la végétation et la flore des plateaux gréseux de la moyenne Guinée et de leurs abords.

SECK A. et MOUNDJANANI. A. -1967- L'Afrique occidentale. Paris, Masson, 221 p.

SECK S. M. -1981- Irrigation et aménagement de l'espace dans la moyenne vallée du Sénégal. Participation paysanne et problèmes de développement. Thèse d'Etat, 2 tomes, Univ. Jean Monnet, Saint-Etienne, 625 p.

SENE O. -1992- Ecoulement, Crues et Etiages dans le bassin versant de la Koulountou. T.E.R, Dpt. de Géographie Univ. de Dakar 109 p.

SIRCOULON J. -1984- Quinze années de sécheresse au Sahel : Impacts sur les ressources et moyens de lutte. In Procedings of the 5th international conference on water and amenagement "water in year 2000", Athènes, 1-4 october.

SIRCOULON J. -1984- La diminution des ressources en eau au Sahel depuis 1968. In colloque OMM sur le Xe de l'expérience ETGA, Dakar, Déc. 1984.

SIRCOULON J. -1985- La sécheresse en Afrique de l'Ouest : Comparaison des années 1982-83 avec les années 1972-73 cah. O.R.S.T.O.M., série. Hydrol., Vol. XXI, n°4.

SIRCOULON J. -1986- Bilan hydropluviométrique de la sécheresse 1968-1984 au Sahel et comparaison avec les années 1910 à 1916 et 1940 à 1949. In coll. Nordeste-Sahel, Institut des Hautes Etudes d'Amérique Latine. Paris 16-18 Janv. 1986.

SIRCOULON J. -1986- Caractéristiques de la sécheresse actuelle en Afrique de l'ouest et centrale. Considérations sur les stations pluviométriques de longue durée et les débits des rivières. In Colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidents de la sécheresse. Ouagadougou, 20-24 mai 1986. Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), Série Hydrologie.

SIRCOULON J. -1990- Aspects hydrologiques des fluctuations climatiques en Afrique de l'ouest et centrale. Bull. O.M.M. 380, 8 p.

SIRCOULON J. -1990- Le réseau pluviométrique en Afrique de l'ouest. Journée de réflexion sur "La variabilité climatique en Afrique", Ministère de la Recherche et de la Technologie, 10 p.

SIRCOULON J. -1990- Comportement des cours d'eau tropicaux, des rivières et des lacs en zone sahélienne. In Impact possible des changements climatiques à venir sur les ressources en eau de surface des régions arides et semi-arides. OMM, n°380, 83 p.

SOKONA Y. -1981- Contribution à l'étude des ressources en eau du bassin du Sénégal. Etude de la capacité du réservoir de Manantali. Thèse de doctorat-ingénieur, Univ. Paris IV, 123 p.

SOW A. A. -1982- Le Nord-ouest du Sénégal et la sécheresse 1968-1974. Contribution à l'étude des sécheresses en Afrique. Mém. D.E.A, Univ. Nancy II, 42 p.

SOW A. A. -1984- Pluies et Ecoulement dans le bassin du fleuve Sénégal. Contribution à l'hydrologie en domaine fluvial tropical humide africain.
Thèse de doctorat 3e cycle, Nancy II, 442 p.

SOW A. A. -1988- Ecoulement et indices de sécheresse dans le bassin du Niokolo-Koba. In Annales de la Faculté des Lettres Sciences Humaines, Dakar, 13 p.

SOW A. A. -1988- Pluie moyenne et moyenne pluviométrique au Sénégal. In Annales de la Faculté des Lettres Sciences Humaines, Dakar, n°18, pp. 151-171.

SOW A. A. -1994 - Analyse des hauteurs d'eau journalières dans le bassin du fleuve Sénégal. Publ. ARDIS, Dakar, 27 pp.

SOW M. -1992- Sécheresses climatiques dans le bassin versant du Niériko. T.E.R, Dpt. de Géographie Univ. Dakar 126 p.

SCHUH G.E., LE MOIGNE G., CERNEA M & GOODLAND R.J.A -1988- "Social and Environmental Impacts of Dams : The World Bank Experience". In Commission Internationale des Grands Barrages. Compte-rendus du 16e Congrès international des Grands Barrages, San Francisco, Paris, CIBG/ICOLD, vol. 1 pp. 419-436.

TECASEN -1986- Les données N.O.A.A. et l'inventaire des cultures inondées et des cultures de décrues dans la vallée du fleuve Sénégal. (crue de 1985-1986). Rapport n°5, juin 1986.

TIERCELIN J. -1971- Modéle d'étiage. La houille blanche, n°3 pp. 225-230.

TOUPET C. -1975- La sédentarisation des nomades en Mauritanie Centrale Sahélienne. Thèse de doctorat, Univ. Paris VII, 490 p.

TOUPET C. -1976- L'évolution du climat en Mauritanie du Moyen-Age jusqu'à nos jours. In la désertification au sud du Sahara. Nouv. Ed. Af., Dakar, pp. 56-63.

TOUPET C. -1977- La grande sécheresse en Mauritanie. In Drought in Africa. International African Institute, spécial report n°6, London.

TOUPET C. -1978- Comparaison des sécheresses historiques et de la sécheresse actuelle au Sahel : Essai de définition de la sécheresse et de l'aridification. Bull. ASS. Géogr. Franç). n°484, pp. 34-38.

TOUPET C. et MICHEL P. -1979- Sécheresse et aridité : l'exemple de la Mauritanie et du Sénégal. Géo. Eco. Trop. n°3, pp.137-157, 4 fig.

TOUPET C. -1992- Le Sahel. Edition Nathan, 192 p.

TRAORE A. Z. -1985- Géologie et hydrogéologie des plateaux mandingues (Mali), région de Koula-Nossombougou. Thèse 3e cycle, Géologie, Univ. Grenoble, 218 p.

TROCHAIN J. -1940- Contribution à l'étude de la végétation au Sénégal. Ed. Larose, Paris et Mém. I.F.A.N, n°2, 434 p.

TRICART J. -1961- Dégradation du milieu naturel et problèmes d'aménagement au Fouta Djalon. Revue de Géographie Alpine Française, 1, pp. 7-36.

VAN ES F.W.J, PEREIRA BARRETO S. -1962- Etude pédologique des hauts plateaux du Fouta Djalon. CCTA/FAMA, rapport Ministère Economie Rurale de Guinée, Conakry et rapport O.R.S.T.O.M, Dakar, multigr., 89 p.

VILLENEUVE M. -1984- Etude géologique de la bordure SW du craton Ouest africain : la suture panafricaine et l'évolution des bassins sédimentaires protérozoïques et paléozoïques de la marge NW du continent de Gondwana. Thèse Sciences, Géologie, Univ. de Marseille, 552 p.

VILLENEUVE M., DALLMEYER R. D -1987- Geodynamic evolution of the Mauritanide, Bassaride and rokelide orogens (West Africa). Precambrian research, 37, pp.305-322.

VILLENEUVE M. -1989- The geology of the Madina-Kouta basin (Guinea-Senegal) and its significance for the geodynamic evolution of the western part of the West African craton during the upper Proterozoïc period. Precambrian Research, 44, pp. 305-322.

VERSTAPPEN H. TH -1979- Les levés de sensibilité à la sécheresse et la notion de surveillance de l'écologie paysagique. In Travaux de l'Institut de Géographie de Reims, n°39-40.

ZILIOLI E., BRIVIO P.A. -1986- Détection des indicateurs hydrologiques pour la prévision des disponibilités en eau de crue dans les bassins versants des fleuves Niger et Sénégal. Rapport final d'activité. Action thématique italienne, projet 958 (83), TEL-1 CEE-DG VIII, Milan, 107 p.

RAPPORTS ADMINISTRATIFS ANONYMES

ASECNA-ORSTOM -1990- Précipitations journalières de 1966 à 1980 au Sénégal.

BRGM - 1967- Chronique d'hydrogéologie n°11.

D.E.H -1985- Etude du stockage des eaux de ruissellement au Sénégal. Louis Berger international., Fév. 85, Dakar.

D.E.H - 1986- Débits correspondants du fleuve Gambie. Février 1986.

D.E.H - 1992- Annuaires hydrologiques du Sénégal.

ENDA -1986- Vallée du Sénégal : les enjeux de l'après-barrage. Notes et études documentaires, Dakar, 594 p.

IFAN -1968- Atlas international de l'ouest africain

OMVG-ONU -1973- Etude hydrologique et topographique du bassin du fleuve Gambie. Rapport de reconnaissance des sites de barrage. Howards humphreys & sons. Vol I, 124 p.

OMVG-ONU -1980- Aménagement du fleuve Gambie. Rapport de mission finale, PNUD, Avril 1980.

OMVG-ONU -1984- Aménagement du bassin du fleuve Gambie Plan d'action PNUD Juin 1982.

OMVG-USAID -1984- Etude du bassin du fleuve Gambie. Rapport final, classification d'utilisation. Univ. Michigan.

OMVG-G.T.Z -1984- Projet du réservoir de Kékréti. A.H.T. & H.H.S. -Juillet 1984- Dakar.

OMVG -1986- Etude de petits bassins, aménagements hydrauliques sur le bassin du fleuve Gambie en Guinée.

OMVS -1973- Etude hydroagricole du bassin du fleuve Sénégal. S.E.D.A.G.R.I. Paris, rapport O.M.V.S, P.N.U.D, F.A.O.

OMVS -1976- Aménagement du bassin versant fleuve Sénégal : Données géographiques, régime des eaux, les sols aménagements prévus.

OMVS -1989- Bilan de gestion des eaux du fleuve Sénégal pendant la campagne de saison sèche 1988-1989. Dakar, Juin 1989, 14 p.

OMVS -1992- Etude du Plan Directeur du développement de la haute vallée du Sénégal. Projet d'appui à la planification du développement n°625-062. Dames et Moore, 34 p.

UNESCO-OMM -1987- Aspect hydrologique des sécheresses. Contribution au programme hydrologique international. 172 p.

UNESCO-OMM -1992- Glossaire international d'hydrologie. 413 p.

USAID-DAT -1986- Cartographie et télédétection des ressources de la République du Sénégal. Etude de la Géologie, de l'Hydrologie, de la Végétation des Sols et des potentiels d'utilisation des sols. Dakar, 653 p.

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique des bassins des fleuves Sénégal et Gambie.
Figure 2 : Situation des hauts bassins par rapport à l'ensemble des bassins des fleuves Sénégal et Gambie.
Figure 3 : Esquisse géologique des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie.
Figure 4 : Coupe schématique des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie.
Figure 5 : Relief des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie.
Figure 6 : Paysages végétaux du Fouta Djalon
Figure 7 : Paysages végétaux du plateau Mandingue, des pays de la Falémé et de la moyenne Gambie.
Figure 8 : Esquisse hydrogéologique des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie.
Figure 9 : Réseau météorologique des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie.
Figure 10 : Dynamique de la circulation en Afrique
Figure 11 : Coupe de la troposphère ouest-africaine le long du méridien 0°
Figure 12 : Rose des vents à la station de Labé pour la période 1961-1990.
Figure 13 : Rose des vents à la station de Bamako pour la période 1961-1990.
Figure 14 : Rose des vents à la station de Tambacounda pour la période 1961-1990.
Figure 15 : Rose des vents à la station de Kiffa pour la période 1961-1990.
Figure 16 : Migration de la trace au sol de l'Equateur Météorologique en Afrique occidentale
Figure 17 : Structure de la troposphère et composantes de la pluviogenèse en Afrique occidentale
Figure 18 : Isohyètes moyennes annuelles des hauts bassins (période 1931-1993)
Figure 19 : Profil pluviométrique annuel des hauts bassins
Figure 20 : Domaines climatiques des hauts bassins
Figure 21 : Principe d'homogénéisation des données à quelques stations des hauts bassins.
Figure 22 : Régime pluviométrique des hauts bassins
Figure 23 : Pluviométrie moyenne annuelle depuis l'origine des mesures
Figure 24 : Pluviométrie moyenne annuelle depuis l'origine des mesures
Figure 25 : Ecart de la pluviométrie d'une année par rapport à la pluviométrie moyenne
Figure 26 : Ecart de la pluviométrie d'une année par rapport à la pluviométrie moyenne
Figure 27 : Evolution de la pluviométrie à partir de 1931
Figure 28 : Evolution de la pluviométrie à partir de 1931
Figure 29 : Ecart de la pluviométrie d'une année par rapport à la normale 1931-1960
Figure 30 : Ecart de la pluviométrie d'une année par rapport à la normale 1931-1960
Figure 31 : Ecart de la pluviométrie d'une année par rapport à la normale 1961-1990.
Figure 32 : Ecart de la pluviométrie d'une année par rapport à la normale 1961-1990.
Figure 33 : Migration décennale des isohyètes principales (500,1000,1500 mm)

Figure 34 : Migration décennale des isohyètes.
Figure 35 : Polygones de Thiessen appliqués aux hauts bassins.
Figure 36 : Variations interannuelles des précipitations et seuils limites des quintiles à trois stations des hauts bassins.
Figure 37 : Pluviométrie annuelle et moyennes mobiles de la période 1961-1993.
Figure 38 : Pluviométrie annuelle et moyennes mobiles de la période 1961-1993.
Figure 39 : Evolution générale des précipitations depuis 1961
Figure 40 : Evolution générale des précipitations depuis 1961
Figure 41 : Déficits de la période 1961-1993 par rapport à la normale 1961-1990.
Figure 42 : Migration des isohyètes lors des années extrêmes;
Figure 43 : Régime ombrothermique des hauts bassins
Figure 44 : Températures maximales moyennes mensuelles des hauts bassins (janvier à avril).
Figure 45 : Températures minimales moyennes mensuelles des hauts bassins (janvier à avril).
Figure 46 : Températures maximales moyennes mensuelles des hauts bassins (mai à août).
Figure 47 : Températures minimales moyennes mensuelles des hauts bassins (mai à août).
Figure 48 : Températures maximales moyennes mensuelles des hauts bassins (septembre à décembre).
Figure 49 : Températures minimales moyennes mensuelles des hauts bassins (septembre à décembre).
Figure 50 : Températures maximales moyennes annuelles des hauts bassins (1961-1990).
Figure 51 : Températures minimales moyennes annuelles des hauts bassins (1961-1990).
Figure 52 : Evolution des températures maximales, moyennes et minimales mensuelles des hauts bassins (1961-1990).
Figure 53 : Températures maximale, moyenne et minimale annuelles depuis l'origine des mesures.
Figure 54 : Evolution des températures maximales, moyennes et minimales annuelles des hauts bassins.
Figure 55 : Gradient thermique sud-nord des hauts bassins.
Figure 56 : Gradient thermique est-ouest des hauts bassins.
Figure 57 : Ecart de la température d'une année par rapport à la moyenne.
Figure 58 : Ecart de la température d'une année par rapport à la moyenne.
Figure 59 : Ecart de la température d'une année par rapport à la moyenne.
Figure 60 : Evolution des températures maximales et minimales annuelles (1961-1993).
Figure 61 : Evolution des températures maximales et minimales annuelles (1961-1993).
Figure 62 : Régime d'humidité relative dans les hauts bassins.
Figure 63 : Humidité relative maximale et minimale mensuelle dans les hauts bassins.

Figure 64 : Humidité relative maximale moyenne mensuelle des hauts bassins (janvier à avril).
Figure 65 : Humidité relative minimale moyenne mensuelle des hauts bassins (janvier à avril).
Figure 66 : Humidité relative maximale moyenne mensuelle des hauts bassins (mai à août).
Figure 67 : Humidité relative minimale mensuelle des hauts bassins (mai à août).
Figure 68 : Humidité relative maximale moyenne mensuelle des hauts bassins (septembre à décembre).
Figure 69 : Humidité relative minimale moyenne mensuelle des hauts bassins (septembre à décembre).
Figure 70 : Humidité relative maximale moyenne annuelle (1961-1990).
Figure 71 : Humidité relative minimale moyenne annuelle (1961-1990).
Figure 72 : Evolution de l'humidité relative maximale et minimale moyenne annuelle dans les hauts bassins.
Figure 73 : Evolution de l'humidité relative maximale et minimale moyenne annuelle dans les hauts bassins.
Figure 74 : Insolation moyenne mensuelle à différentes stations des hauts bassins.
Figure 75 : Evolution de l'insolation moyenne annuelle des hauts bassins.
Figure 76 : Régime d'évaporation moyenne des hauts bassins.
Figure 77 : Evolution de l'évaporation moyenne mensuelle des hauts bassins.
Figure 78 : Variation de l'évaporation moyenne mensuelle des hauts bassins (janvier à avril).
Figure 79 : Variation de l'évaporation moyenne mensuelle des hauts bassins (mai à août).
Figure 80 : Variation de l'évaporation moyenne mensuelle des hauts bassins (septembre à décembre).
Figure 81 : Variation de l'évaporation moyenne annuelle des hauts bassins.
Figure 82 : Evaporation moyenne annuelle dans huit stations des hauts bassins.
Figure 83 : Comparaison entre évaporation et évapotranspiration dans les hauts bassins (1951-1980).
Figure 84 : Indice pluviométrique aux différents domaines climatiques.
Figure 85 : Comparaison entre précipitations moyennes et humidité relative moyenne annuelle dans les hauts bassins.
Figure 86 : Comparaison entre précipitations moyennes et évaporation moyenne annuelles dans les hauts bassins.
Figure 87 : Comparaison entre insolation moyenne et températures moyennes annuelles dans les hauts bassins.
Figure 88 : Comparaison entre évaporation moyenne et insolation moyenne annuelle dans les hauts bassins.

Figure 89 : Comparaison entre évaporation moyenne températures moyennes annuelles dans les hauts bassins.
Figure 90 : Réseau hydrographique des hauts bassins.
Figure 91 : Réseau hydrographique et sous bassins du fleuve Sénégal.
Figure 92 : Hypsométrie du haut bassin du fleuve Sénégal.
Figure 93 : Hypsométrie du bassin du Bafing et de la Falémé.
Figure 94 : Hypsométrie du bassin du Bakoye et du Baoulé.
Figure 95 : Réseau hydrographique et sous bassins du fleuve Gambie.
Figure 96 : Hypsométrie du haut bassin du fleuve Gambie.
Figure 97 : Hypsométrie du bassin de la Koulountou et du Thiokoye.
Figure 98 : Profil en long du bassin du Bafing de la Falémé et de leurs affluents.
Figure 99 : Profil en long du bassin du Bakoye et du Baoulé.
Figure 100 : Profil en long du bassin du fleuve Sénégal en amont de Bakel.
Figure 101 : Profil en long du bassin du fleuve Gambie en amont de Gouloumbou .
Figure 102 : Régimes hydrologiques des hauts bassins
Figure 103 : Schéma de la variation spatiale des modules annuels des hauts bassins (1903-1993).
Figure 104 : Variation interannuelle et moyennes mobiles de l'écoulement des hauts bassins.
Figure 105 : Hydrogrammes d'années humide, moyenne et sèche dans dix stations.
Figure 106 : Evolution de l'hydraulicité dans dix stations des hauts bassins.
Figure 107 : Pluviométrie et hydraulicité dans neuf stations des hauts bassins.
Figure 108 : Etude fréquentielle des dates d'apparition des crues dans quatre stations des hauts bassins.
Figure 109 : Evolution de la valeur atteinte par la crue annuelle et moyennes mobiles quinquennales dans les hauts bassins.
Figure 110 : Distribution statistique des modules de crues dans les hauts bassins.
Figure 111 : Débits classés dans six stations des hauts bassins.
Figure 112 : Courbes de tarissement dans six stations des hauts bassins.
Figure 113 : Paléoenvironnement de l'Afrique lors du Dernier Maximum Glaciaire.
Figure 114 : Paléoenvironnement de l'Afrique lors de l'Optimum Climatique Holocène.
Figure 115 : Evolution climatique de l'Afrique depuis 18 000 ans BP.
Figure 116 : Pression moyenne annuelle dans six stations des hauts bassins.
Figure 117 : Pression moyenne estivale dans six stations des hauts bassins.
Figure 118 : Pression moyenne hivernale dans six stations des hauts bassins.
Figure 119 : Evolution des précipitations et de la pression hivernale et estivale dans les hauts bassins.
Figure 120 : Evolution de la vitesse moyenne estivale dans six stations des hauts bassins.
Figure 121 : Evolution de la vitesse moyenne hivernale dans six stations des hauts bassins.

Figure 122 : Evolution saisonnière de la vitesse du vent et de la pression.
Figure 123 : Evolution des précipitations et de la vitesse annuelle saisonnière du vent dans les hauts bassins.
Figure 124 : Variation des volumes d'eau écoulés de la période 1961-199 par rapport à la période 1903-1993 et 1953 1993.
Figure 125 : Variation des volumes d'eau écoulés de l'année 1984 par rapport à la période 1903-1993.
Figure 126 : Volume d'eau moyen annuel disponible de la période 1961-1993.
Figure 127 : Disponibilité des eaux de surface durant la période de hautes eaux dans les hauts bassins.
Figure 128 : Disponibilité des eaux de surface durant la période de basses eaux dans les hauts bassins.
Figure 129 : Aménagement et projets d'aménagement dans les hauts bassins.
Figure 130 : Relations possibles (compatibilités et incompatibilités) résultant des divers objectifs du barrage de Manantali.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Essai de classification des ensembles géographiques des hauts bassins.
Tableau 2 : influence des facteurs stabilisants de l'écoulement des hauts bassins.
Tableau 3 : Directions du vent dans quatre stations des hauts bassins.
Tableau 4 : Variations mensuelles de la vitesse du vent dans quatre stations des hauts bassins.
Tableau 5 : Caractéristiques des stations pluviométriques des hauts bassins
Tableau 6 : Comblement des lacunes par la régression
Tableau 7 : Valeurs caractéristiques de la pluviométrie en domaine guinéen (Labé).
Tableau 8 : Valeurs caractéristiques de la pluviométrie en domaine guinéen (Dabola).
Tableau 9 : Valeurs caractéristiques de la pluviométrie en domaine guinéen (Mamou).
Tableau 10 : Valeurs caractéristiques de la pluviométrie en domaine sud-soudanien
Tableau 11 : Valeurs caractéristiques de la pluviométrie en domaine nord-soudanien
Tableau 12 : Valeurs caractéristiques de la pluviométrie en domaine sahélien
Tableau 13, 14 et 15 : Paramètres de la pluviométrie aux stations de base depuis l'origine des mesures.
Tableau 16 : Ecarts de la pluviométrie d'une année par rapport à la normale 1961-1990
Tableau 17 : Ecarts de la pluviosité d'une année particulière par rapport à la normale 1931-1960
Tableau 18 : Ecarts de la pluviosité d'une année particulière par rapport à la normale 1961-1990
Tableau 19 : Pluies fréquentielles à différentes stations des hauts bassins
Tableau 20 : Valeurs caractéristiques de la pluviosité décennale
Tableau 21 : Fréquences d'apparition du maximum pluviométrique depuis l'origine des mesures.
Tableau 22 : Valeurs relatives du maximum pluviométrique (1931-1993)
Tableau 23 : Lame d'eau reçue par méthode de Thiessen.
Tableau 24 : Mécanismes de Feed-back (rétro-action) permettant aux modifications des caractères du sol provoquée par la sécheresse de la renforcer.
Tableau 25 : Quintiles en mm et écarts moyen pour la période 1961-1993
Tableau 26 : Fréquences d'apparitions et déficits extrêmes annuels de la période 1961-1993
Tableau 27 : Caractéristiques des températures mensuelles en domaines climatiques guinéen, sud-soudanien et sahélien.
Tableau 28 : Caractéristiques des températures mensuelles en régime sahélien.
Tableau 29 : Etat des données de températures par station dans les hauts bassins.
Tableau 30 : Comparaison entre températures maximales et minimales moyennes à différentes stations.
Tableau 31 : Températures décennales maximales et minimales à quelques stations.

Tableau 32 : Paramètres statistiques de la période 1951-1970 dans certaines stations des hauts bassins.
Tableau 33 : Paramètres statistiques de la période 1972-1993 dans certaines stations des hauts bassins.
Tableau 34 : Etat des données d'humidité relative dans les hauts bassins.
Tableau 35 : Variation mensuelle de l'humidité relative dans les hauts bassins.
Tableau 36 : Comparaison entre humidité relative maximale et minimale moyenne à différentes stations.
Tableau 37 : Etat des données d'insolation d'après certaines stations.
Tableau 38 : Insolation mensuelle en heures et dixième d'heures dans certaines stations.
Tableau 39 : Insolation moyenne annuelle de la période 1967-1993.
Tableau 40 : Variation de l'insolation décennale à quelques stations des hauts bassins.
Tableau 41 : Etat des données d'évaporation d'après certaines stations.
Tableau 42 : Variation de l'évaporation mensuelle en mm dans différentes stations des hauts bassins.
Tableau 43 : Comparaison de l'évaporation moyenne annuelle dans différentes stations.
Tableau 44 : Evaporation décennale à quelques stations des hauts bassins.
Tableau 45 : : Comparaison entre évaporation et évapotranspiration mensuelles dans les hauts bassins.
Tableau 46 : Bilan par domaine climatique dans les hauts bassins (période 1961-1993).
Tableau 47 : Caractéristiques du réseau hydrographique des hauts bassins.
Tableau 48 : Paramètres hydrologiques des hauts bassins.
Tableau 49 : Caractéristiques de l'équipement hydrologique dans le haut bassin du Sénégal.
Tableau 50 : Caractéristiques de l'équipement hydrologique dans le haut bassin de la Gambie.
Tableau 51 : Débits moyens mensuels et coefficient mensuels de débits à Dakka-Saïdou (1903-1993 ; 1961-1990).
Tableau 52 : Débits moyens mensuels et coefficient mensuels de débits à Kédougou (1961-1990).
Tableau 53 : Débits moyens mensuels et coefficient mensuels de débits à Bakel (1903-1993 ; 1961-1990).
Tableau 54 : Débits moyens mensuels et coefficient mensuels de débits à Gouloumbou (1961-1990).
Tableau 55 : Débits moyens mensuels et coefficient mensuels de débits à Kabaté (1968-1993).
Tableau 56 : Ecoulement moyen annuel dans les hauts bassins.
Tableau 57 : Paramètres statistiques et modules extrêmes dans quelques stations des hauts bassins.
Tableau 58 : Modules fréquentiels à huit stations des hauts bassins.

Tableau 59 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Dakka-Saïdou (1903-1993).
Tableau 60 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Siramakana (1903-1993).
Tableau 61 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Toukoto (1903-1993).
Tableau 62 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Kidira (1903-1993).
Tableau 63 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Bakel (1903-1993).
Tableau 64 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Kédougou (1953-1993).
Tableau 65 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan à Gouloumbou (1953-1993).
Tableau 66 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan de la période 1931-1940.
Tableau 67 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan de la période 1941-1950.
Tableau 68 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan de la période 1951-1960.
Tableau 69: Valeurs caractéristiques et termes du bilan de la période 1961-1970.
Tableau 70 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan de la période 1971-1980.
Tableau 71 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan de la période 1981-1990.
Tableau 72 : Valeurs caractéristiques et termes du bilan de la période 1961-1993.
Tableau 73 : Coefficients de corrélation entre pluviométrie et hydrologie dans les hauts bassins.
Tableau 74 : Nombre et fréquences d'apparition par mois des crues dans les hauts bassins (période 1903-1993).
Tableau 75 : Nombre et fréquences d'apparition par mois des crues dans les hauts bassins (période 1961-1993).
Tableau 76 : Fréquences d'apparition décadaire des débits instantanés à neuf stations des hauts bassins.
Tableau 77 : Caractéristiques des crues dans les hauts bassins (période 1903-1993 et 1953-1993)
Tableau 78 : Nombre de fréquences d'apparitions par mois des étiages dans les hauts bassins (1903-1993, 1953-1993)
Tableau 79 : Nombre de fréquences d'apparitions par mois des étiages dans les hauts bassins (1961-1993)
Tableau 80 : Caractéristiques moyennes annuelles des étiages dans les hauts bassins (période 1903-1993, 1953-1193).
Tableau 81 : Modules et écarts à la normale des débits dans le haut bassin du Sénégal.
Tableau 82 : Modules et écarts à la normale des débits dans le haut bassin de la Gambie.
Tableau 83 : Valeurs de l'hydraulicité par rapport à la moyenne 1961-1993 dans les hauts bassins
Tableau 84 : Coefficients de tarissement dans quatre stations des hauts bassins.
Tableau 85 : Etat des données de la pression dans les hauts bassins.
Tableau 86 : Données de vents disponibles à certaines stations des hauts bassins.
Tableau 87 : Comparaison de la vitesse moyenne annuelle du vent dans différentes stations.
Tableau 88 : Volume d'eau moyen annuels lors d'années particulières humide et sèche.

Tableau 89 : Disponibilité des eaux de surface en période de hautes eaux dans les hauts bassins.
Tableau 90 : Disponibilité des eaux de surface en période de basses eaux dans les hauts bassins.
Tableau 91 : Variation du volume d'eau de la retenue de Manantali.

LISTE DES PHOTOS

Planche 1 : Diversité des paysages des hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie.
photo 1 : Les contreforts septentrionaux du Fouta Djalon
photo 2 : Paysages du plateau Mandingue.
photo 3 : La falaise de Tambaoura

Planche 2 : Quelques aspects de l'aplanissement et de la latérisation des hauts bassins.
photo 1 : Aspects du couvert végétal des buttes témoins
photo 2 : Paysages de buttes témoins et de plateaux
photo 3 : Paysages d'éboulis de cuirasses.

Planche 3 : Paysages végétaux des pays de la Falémé et de la Moyenne Gambie
photo 1 : Végétation arborée des régions déprimées.
photo 2 : Aspects du déboisement.
photo 3 : Répartition de la végétation suivant la topographie.

Planche 4 : Quelques aspects des types de sols des hauts bassins.
photo 1 : Sols d'éboulis de cuirasses
photo 2 : Sols latéritiques.
photo 3 : Les obstacles à la mise en valeur des sols latéritiques.

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS 1
Résumé 4
Abstract 7
INTRODUCTION GENERALE 10

PREMIERE PARTIE :
LE CADRE GEOGRAPHIQUE DES HAUTS BASSINS

CHAPITRE 1. PRESENTATION GENERALE DES BASSINS DU SENEGAL ET DE LA GAMBIE 14

1. LES VALLEES ALLUVIALES 16
2. LES HAUTS BASSINS 17

CHAPITRE 2. LE MILIEU NATUREL DES HAUTS BASSINS 19

1. LE FOUTA DJALON 21
2. LE PLATEAU MANDINGUE 30
3. LES PAYS DE LA FALEME ET DE LA MOYENNE GAMBIE 34
4. LES PLAINES ET PLATEAUX DU NORD 40

DEUXIEME PARTIE :
LE MILIEU CLIMATIQUE DES HAUTS BASSINS

INTRODUCTION 52
1. SOURCES ET METHODES 52
1.1. La pluviométrie 52
1. 2. Les autres éléments climatiques 54

CHAPITRE 1. LES MECANISMES CLIMATIQUES ET LE DECOUPAGE DE L'AFRIQUE OCCIDENTALE 55

1. LES COMPOSANTES DE LA CIRCULATION GENERALE 55
1.1. Les AMP : moteurs de la circulation générale 55
1.2. Les agglutinations anticycloniques 57
2. LA CIRCULATION TROPICALE 57
2.1. Le vent dans les hauts bassins. 59
2.1.1. Les directions du vent dans les hauts bassins 5

2.1.2. Les variations saisonnières de la vitesse du vent....66
2.2. Les flux de surface....67
2.2.1. Les alizés....67
2.2.2. La mousson....68
2.3. Les discontinuités....69
2.3.1. L'Equateur Météorologique....69
3. LES NOYAUX DE VENTS D'EST....71
3.1. Le Jet d'EST Africain Nord (J.E.A.N..)....71
3.2. Le Jet d'Est Tropical (J.E.T.)....73
4. la pluviogenese en Afrique Occidentale cas des hauts bassins....74
4.1.1. La saison non pluvieuse....74
4.1.2. La saison des pluies....75
4.2. Les domaines climatiques des hauts bassins....76
4.2.1. Le domaine guinéen....76
4.2.2. Le domaine sud-soudanien....79
4.2.3. Le domaine nord-soudanien....79
4.2.4. Le domaine sahélien....79

CHAPITRE 2. LES REGIMES PLUVIOMETRIQUES DES HAUTS BASSINS..82

1. LES DONNEES PLUVIOMETRIQUES....82
1.1. L'homogénéisation des données....82
1.2. Le comblement des lacunes....84
1.3. L'indice du vecteur régional....85
1.4. Les périodes d'étude retenues et les stations de base....85
2. LES REGIMES PLUVIOMETRIQUES DES HAUTS BASSINS....87
2.1. Le régime guinéen....87
2.1.1. La nuance pluviométrique de Labé....87
2.1.2. La nuance pluviométrique de Dabola....89
2.1.3. La nuance pluviométrique de Mamou....90
2.2. Le régime sud-soudanien....91
2.3. Le régime nord-soudanien....92
2.4. Le régime sahélien....94

CHAPITRE 3. LES CARACTERES DE LA PLUVIOMETRIE DES HAUTS BASSINS 97

1. LES TRAITS DE LA PLUVIOMETRIE DES HAUTS BASSINS 97
1.1. Les totaux pluviométriques annuels 97
1.2. La variabilité des pluies annuelles 100
1.2.1. Les pluies annuelles à Kayes 100
1.2.2. Les pluies annuelles à partir de 1918 104
1.3. Les pluies annuelles à partir de 1931 107
1.3.1. Les pluies fréquentielles 116
1.3.2. La variabilité des pluies décennales 118
1.3.2.1. La décennie 1931-1940 118
1.3.2.2. La décennie 1941-1950 120
1.3.2.3. La décennie 1951-1960 120
1.3.2.4. La décennie 1961-1970 122
1.3.2.5. La décennie 1971-1980 122
1.3.2.6. La décennie 1981-1990 123
1.3.3. La variabilité mensuelle des précipitations 124
2. L'ABONDANCE PLUVIOMETRIQUE MOYENNE 126
2.1. La lame d'eau reçue par la méthode de Thiessen 126

CHAPITRE 4. LA PEJORATION PLUVIOMETRIQUE RECENTE ET SES MANIFESTATIONS 129

1. GENESE ET EVOLUTION DU CONCEPT DE SECHERESSE 129
1.1. La sécheresse récente déterminée par la méthode des quintiles 132
2. LA SECHERESSE RECENTE ET SES MANIFESTATIONS 135
2.1 Les caractères temporels de la sécheresse 135
2.1.1. Le début de la sécheresse récente 136
2.1.2. L'intensité de la sécheresse récente 139
2.1.2.1. L'année 1972 140
2.1.2.2. L'année 1977 140
2.1.2.3. De 1980 à 1990 141
2.1.2.4. De 1991 à 1993 142
2.1.3. Les années insolites 143
2.1.3.1. L'année 1969 143
2.1.3.2. L'année 1974 146
2.1.3.3. L'année 1989 146

2. 2. Les caractères spatiaux de la sécheresse récente 146
2.2.1. L'extension de la sécheresse récente 148
2.2.2. La variabilité spatiale de la sécheresse 148

CHAPITRE 5. LES TEMPERATURES DANS LES HAUTS BASSINS 151

1. LES CARACTERES MOYENS DES TEMPERATURES 151
1.1. Les régimes thermiques et les saisons climatiques 151
1.2. La distribution des températures mensuelles 153
1.2.1. Le régime thermique guinéen 153
1.2.2. Le régime thermique sud-soudanien 153
1.2.3. Le régime nord-soudanien 157
1.2.4. Le régime thermique sahélien 162
2. LES TEMPERATURES MOYENNES ANNUELLES 167
2.1. Les courbes générales 169
2.2. La distribution spatiale des températures annuelles 171
2.2.1. Le gradient sud-nord des températures annuelles 171
2.2.2. Le gradient ouest-est des températures 172
3. EVOLUTION INTERANNUELLE DES TEMPERATURES 174
3.1. La variabilité des températures annuelles 174
3.2. Evolution récente des températures annuelles (1961-1993) 180

CHAPITRE 6. L'HUMIDITE RELATIVE, L'INSOLATION ET L'EVAPORATION DANS LES HAUTS BASSINS 184

1. L'HUMIDITE ATMOSPHERIQUE DANS LES HAUTS BASSINS 184
1.1. Les régimes hygrométriques des hauts bassins 187
1.1.1. La distribution mensuelle de l'humidité relative 187
1.1.1.1. Le domaine guinéen 187
1.1.1.2. Le domaine sud-soudanien 191
1.1.1.3. Le domaine nord-soudanien 195
1.1.1.4. Le domaine sahélien 195
1.2. L'humidité relative annuelle 198
2. L'INSOLATION DANS LES HAUTS BASSINS 201
2.1. La distribution mensuelle de l'insolation 201
2.2. L'insolation annuelle dans les hauts bassins 204
3. LES CONDITIONS D'EVAPORATION ET D'EVAPOTRANSPIRATION DES HAUTS BASSINS 207

3.1. L'évaporation saisonnière et ses variations 207
3.2. L'évaporation annuelle 215
3.3. Les variations décennales de l'évaporation 217
3.4. L'évapotranspiration dans les hauts bassins 219

SYNTHESE DES PARAMETRES CLIMATIQUES, FACTEURS CONDITIONNELS DE L'ECOULEMENT 223

TROISIEME PARTIE : LES MODALITES DE L'ECOULEMENT FLUVIAL DES HAUTS BASSINS

CHAPITRE 1. LES CARACTERES DE L'ECOULEMENT DES HAUTS BASSINS 234

1. PRESENTATION DES UNITES HYDROLOGIQUES 234
1.1. Le réseau hydrologique des hauts bassins 234
1.1.1. Le Sénégal 234
1.1.1.1. Les affluents de gauche du Sénégal 239
1.1.1.2. Les affluents de droite du Sénégal 241
1.1.2. La Gambie 244
1.1.2.1. Les affluents de rive gauche de la Gambie 247
1.1.2.2. Les affluents de rive droite de la Gambie 249
2. LES TRAITS PHYSIQUES DE L'ECOULEMENT DES HAUTS BASSINS 250
2.1. La pente et la forme des hauts bassins 250
2.2. Les profils en long des rivières des hauts bassins 251
3. ETAT DES DONNEES DE L'ECOULEMENT DES HAUTS BASSINS 258
3.1. Présentation et critique statistique des données hydrologiques 258
3.2. Les stations hydrométriques et les périodes d'étude retenues 261
3.2.1. Les périodes d'étude retenues 262

CHAPITRE 2. LES REGIMES ET LES BILANS HYDROLOGIQUES DES HAUTS BASSINS 264

1. LES REGIMES HYDROLOGIQUES DES HAUTS BASSINS 264

1.1. L'année hydrologique 264
1.2. Les régimes hydrologiques des hauts bassins 264
1.2.1. Le régime fluvial de transition 265
1.2.2. Le régime tropical pur 268
1.2.3. Le régime sahélien 271
2. L'ABONDANCE ANNUELLE ET SA VARIABILITE 272
2.1. Les modules annuels 273
2.2. Les débits spécifiques 275
2.3. La variabilité des modules interannuels 277
3. LES BILANS HYDROLOGIQUES DES HAUTS BASSINS 282
3.1. Les termes du bilan moyen 283
3.2. Le bilan moyen du haut bassin du Sénégal 284
3.2.1. Le bilan moyen du Bafing à Dakka-Saïdou 284
3.2.2. Le bilan moyen du Baoulé à Siramakana 285
3.2.3. Le bilan moyen du Bakoye à Toukoto 285
3.2.4. Le bilan moyen de la Falémé à Kidira 286
3.2.5. Le Sénégal à Bakel 286
3.3. Le bilan moyen du haut bassin de la Gambie 287
3.3.1. Le bilan moyen de la Gambie à Kédougou 287
3.3.2. Le bilan moyen de la Gambie à Gouloumbou 288
3.4. La variabilité du bilan moyen dans les hauts bassins 289
3.4.1. L'hydraulicité des hauts bassins 289
3.4.2. Les bilans décennaux des hauts bassins 291
3.3.2.1. La période 1931-1940 291
3.4.2.2. La période 1941-1950 292
3.4.2.3. La période 1951-1960 292
3.4.2.4. La période 1961-1970 293
3.4.2.5. La période 1971-1980 294
3.4.2.6. La période 1981-1990 294
3.4.3. Les bilans moyens de la période récente (1961-1993) 296

CHAPITRE 3. CHANGEMENT CLIMATIQUE ET RESSOURCES EN EAU DE SURFACE DANS LES HAUTS BASSINS 299

1. INDICES CLIMATIQUES ET ECOULEMENT 299
1.1. Nature des précipitations et écoulement dans les hauts bassins 299
1.2. La relation précipitations et débits 300
2. LES DEBITS EXTREMES DES HAUTS BASSINS 302

2.1. Les crues dans les hauts bassins 303
2.1.1. Les crues mensuelles 303
2.1.2. La variabilité interannuelle des crues et leurs puissances 308
2.2. Les étiages dans les hauts bassins 312
2.2.1. Les étiages mensuels 312
2.1.2. La variabilité interannuelle des étiages 316
3. SECHERESSE ET MODIFICATION HYDROLOGIQUE 317
3.1. Les aspects hydrologiques de la sécheresse 318
3.1.1. La baisse des modules annuels 318
3.1.2. La faiblesse des crues annuelles 322
3.2. Evolution de l'hydraulicité 323
3.3. Le tarissement dans les hauts bassins 326

CHAPITRE 4. DYNAMIQUE ET EVOLUTION RECENTE DE LA SECHERESSE 332

1. LES PALEOCLIMATS EN AFRIQUE DE L'OUEST 333
1.1. Les paléoenvironnements en Afrique de l'ouest 333
1.1.1. Le Dernier Maximum Glaciaire (DMG) 333
1.1.2. L'Optimum Climatique Holocène (OCH) 334
1.2. Les modes de circulation paléoclimatiques : essai d'interprétation 336
1.2.1. Le mode de circulation rapide 336
1.2.2. Le mode de circulation lente 337
2. LES MANIFESTATIONS DE L'EVOLUTION RECENTE 339
2.1. Les conditions dynamiques actuelles 340
2.2. Evolution des facteurs aérologiques 340
2.2.1 Evolution de la pression 340
2.2.1.1. Evolution de la pression annuelle 342
2.2.1.2. Evolution saisonnière de la pression 345
2.2.2. Evolution des vents 347
2.2.2.1. Evolution saisonnière des vents 347

CHAPITRE 5. PERSPECTIVES CLIMATIQUES ET AMENAGEMENTS DANS LES HAUTS BASSINS 356

1. LES SCENARIOS HYDROCLIMATIQUES 356
1.1. Stagnation des conditions actuelles 356
1.2. Aggravation de la situation actuelle 357

1.3. Un retour à une période humide 359
2. ASPECTS ET CONTRAINTES DE L'AMENAGEMENT DANS LES HAUTS BASSINS 360
2.1. Les disponibilités en eau des hauts bassins 360
2.1.1. Les disponibilités annuelles 360
2.1.2. Les disponibilités saisonnières 363
2.2. Les contraintes liées à l'aménagement 367
2.2.1. Les contraintes physiques 367
2.2.2. Les contraintes climatiques 368
2.2.3. Les contraintes humaines 368
2.2.4. Les contraintes économiques 369
2.2.4.1. Dans le domaine de l'agriculture 369
2.2.4.2. Dans le domaine de l'élevage 369
2.2.4.3. Dans le domaine des infrastructures 369
3. LES AMENAGEMENTS DES HAUTS BASSINS 370
3.1. Les objectifs et programmes de mise en valeur 371
3.2. Des aménagements fondés sur des barrages 371
3.3. Le barrage de Manantali 374
3.3.1. L'irrigation 375
3.3.2. La navigation 375
3.3.3. L'hydroélectricité 376
3.4. Gestion et enjeux futurs de Manantali 377
CONLUSION GENERALE 383

BIBLIOGRAPHIE 387

LISTE DES FIGURES 405
LISTE DES TABLEAUX 410
LISTE DES PHOTOS 414

TABLE DES MATIERES 415