

U L P

**U.F.R. DES SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE
INSTITUT DE GEOLOGIE
STRASBOURG**

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE LOUIS PASTEUR DE STRASBOURG

pour obtenir le titre de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE LOUIS PASTEUR DE STRASBOURG
MENTION : GEOLOGIE/GEOCHIMIE**

par

Didier ORANGE

**HYDROCLIMATOLOGIE DU FOUTA DJALON
ET
DYNAMIQUE ACTUELLE
D'UN VIEUX PAYSAGE LATERITIQUE
(AFRIQUE DE L'OUEST)**

Soutenance publique le 20 décembre 1990 devant la Commission d'examen :

**MM. J.C. FLAGEOLLET, Professeur à l'ULP, Président,
B. FRITZ, Directeur de Recherche au CNRS (ULP), Rapporteur interne,
J.Y. GAC, Directeur de Recherche à l'ORSTOM,
J.L. PROBST, Chargé de Recherche au CNRS (ULP), Directeur de thèse,
Y. TARDY, Professeur à l'ULP, détaché à l'ORSTOM, Rapporteur externe.**

Mémoire de thèse réalisé au Centre de Géochimie de la Surface (CNRS) avec le concours de l'ORSTOM et le soutien financier de la CEE dans le cadre du projet EQUESSEN (projet n° TS2-0198F-EDB).

LE PELERINAGE DE DIALIBA ET DE BAFING

Il y a longtemps, bien longtemps les animaux et même les choses allaient en pèlerinage à la Mecque. Comme tout le monde, le "Dialiba" et le "Bafing" voulurent eux aussi se rendre aux lieux saints de l'Islam. Les deux fleuves décidèrent de partir dès le premier chant du coq.

Se méfiant de son compagnon, le Dialiba (ou Niger) se mit en route à minuit. Il marcha pendant tout le reste de la nuit, il traversa des vallons, des plaines, des forêts, contourna des monts et des collines, se heurta à des milliers et des milliers d'obstacles, fit des allers et des retours. Le Tout-Puissant le faisait toujours égarer. La soif le conduisit par-ci par-là ; en fin de compte il alla se jeter dans la mer.

Le Bafing fidèle à la promesse partit à l'aurore et se rendit sans problème dans la ville sacrée. Revenu de la Mecque, il ne chercha plus à savoir où se trouvait son ancien compagnon. Pour éviter même de le revoir, il descendit vers le Nord-Ouest où il rencontra le Bakoye à Bafoulabé pour prendre le nom de "Sénégal". Aussi pour les choses et les phénomènes, le mot "Sénégal" est celui qui remplace El Hadj, titre donné aux pèlerins. Le Bafing est le seul fleuve qui s'est rendu aux lieux saints de l'Islam.

FIN

Contes et légendes d'Afrique recueillis
par Sy MAMADOU, Recherches Africaines, avril-
juin 1962, n°2, p 38-44.

AVANT-PROPOS

Avant de présenter les résultats de quatre années d'étude, deux ans passés à l'ORSTOM-Dakar pour effectuer le terrain et deux ans au Centre de Géochimie de la Surface (CNRS) de Strasbourg, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué par leurs enseignements, leur aide et leur amitié à l'aboutissement de ce travail.

Le Professeur Y. TARDY m'a accueilli au sein de son équipe à Strasbourg et je lui suis reconnaissant de la confiance qu'il m'a procuré. Je le remercie pour les séances de travail qu'il m'a accordé malgré ses lourdes charges. Elles ont toujours été intenses et riches d'enseignement. Je tiens ici à rendre hommage à l'homme de sciences et suis honoré qu'il ait accepté de juger ce manuscrit.

M. J.Y. GAC, en me transmettant son enthousiasme pour la recherche, m'a initié à la géochimie des paysages pendant plus de deux ans dans son laboratoire. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a toujours témoigné et lui suis très reconnaissant de son appui constant aussi bien scientifique, moral que financier. Il est l'initiateur de ce travail et, sans lui, rien n'eut été possible.

Enfin, je me dois de remercier tout particulièrement M. J.L. PROBST qui a dirigé ce travail. Maître exigeant et ami, il a toujours su être un interlocuteur disponible et de bons conseils. Il a eu la lourde tâche de corriger ce manuscrit.

Je suis reconnaissant à M. B. FRITZ pour son accueil chaleureux, lorsqu'en novembre 1986, je débarquai à Strasbourg. Il a été un directeur administratif compréhensif. Je le remercie pour ses encouragements, pour le temps qu'il a su trouver pour m'aider et pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie M. J.C. FLAGEOLLET, Professeur à l'Université de Géographie de Strasbourg, d'avoir bien voulu accepté de présider ce jury et d'entretenir ainsi le dialogue nécessaire entre la géologie de surface et la géographie physique.

J'exprime toute ma reconnaissance à MM. JARRIGE, POUYAUD et OLIVRY, responsables à l'ORSTOM de mon affectation à Dakar, et MM. DALMAYRAC et FONTANA, directeurs successifs du centre ORSTOM de Dakar. Je remercie également les autorités sénégalaises, guinéennes et maliennes pour m'avoir autorisé à accumuler les données de terrain et pour avoir contribué ainsi au bon déroulement de ce travail.

J'ai bénéficié à l'Institut de Géologie et au Centre de Géochimie de la Surface de Strasbourg d'un accueil et d'un appui efficace et amical. M. le Doyen G. MILLOT, membre de l'Académie des Sciences, m'a fait l'honneur de s'intéresser à mon modeste travail et je lui assure toute ma gratitude pour les corrections minutieuses et exigeantes qu'il a apporté au chapitre traitant des apports atmosphériques. D'autre part, je suis plus particulièrement reconnaissant à M^{me} H. PAQUET qui a manifesté tant de générosité et de délicatesse à mon égard et envers ma petite famille. Elle a toujours su être une conseillère efficace dans mon travail et une aide discrète pour les tracés de la vie quotidienne.

Ma reconnaissance s'adresse également à tous mes collègues et amis de l'ORSTOM et du CNRS qui ont participé plus ou moins directement à la réalisation de ce travail. Parmi eux, je

remercie spécialement M^{me} A. PROBST, M^{me} J. DUPLAY, M^{me} N. KAYSER et MM. M. CARN, J.L. SAOS, J.M. BOUCHEZ, J. ALBERGEL, S.B. BAMBA, R.R. NKOUNKOU.

Je remercie vivement toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation des nombreuses analyses nécessaires et qui ont toujours su être de bons conseils lors d'interprétations délicates. Par ordre chronologique, je remercie MM. F. LELONG et J. TRICHET du Laboratoire d'analyses minéralogiques de l'Université d'Orléans, M. G. CHANUT du Laboratoire de Chimie de l'ORSTOM-Dakar, M. J.F. ARANIOSSY de l'AIEA, MM. J. GAUTHEYROU et P. QUANTIN du Laboratoire des formations superficielles de l'ORSTOM-Bondy, MM. G. KREMPP, P. LARQUE, R. ROUAULT, J. SAMUEL et F. WEBER du Centre de Géochimie de la Surface de Strasbourg.

Enfin, je ne saurais oublier dans mes remerciements MM. M. DEYNOUX, F. KALOGA, J.P. LACAUX, J.C. PION, C. ROQUIN, D. TANRE, M. VILLENEUVE qui ont accepté de corriger quelques parties de ce travail selon leur spécialité respective et ont ainsi contribué à l'orientation définitive de ce mémoire. Merci également à Chris, Minique et Richard qui m'ont aidé dans les derniers moments.

Et bien sûr, je pense à mes compagnons de route avec lesquels j'ai accumulé des souvenirs inoubliables au cours de bons et moins bons moments. A toi Souandi BADJI, seul à Bakel durant les trois mois d'hivernage depuis 10 ans, à toi Ousseynou GUEYE, à vous Amadi SAMB, Hubert SANE, Lamine SAGNA, travailleurs dans l'ombre, milles remerciements, vous m'avez tellement appris...

Mais, vous tous, maîtres, amis et collaborateurs, permettez que je laisse une place de choix à mes parents auxquels je dois tout. Entité indissociable, c'est à eux que je dédie ce mémoire.

Merci à tous.

Strasbourg, le 5 septembre 1990.

SOMMAIRE

ABSTRACT**INTRODUCTION****LE MILIEU MORPHOSTRUCTURAL**

CHAPITRE I : LE MILIEU NATUREL

CHAPITRE II : CADRE GEOLOGIQUE ET PEDOLOGIQUE DU DOMAINE LATERITIQUE

HYDROCLIMATOLOGIE

CHAPITRE III : DONNEES CLIMATIQUE ET PARTICULARITE DES ANNEES 1979-1987

CHAPITRE IV : SECHERESSE ACTUELLE ET BILANS HYDROLOGIQUES

**FLUCTUATIONS CLIMATIQUES ET TRANSFERTS DE
MATIERES**

CHAPITRE V : PRESENTATION DES MESURES ET METHODES D'ETUDE

**CHAPITRE VI : L'IMPORTANCE DES APPORTS ATMOSPHERIQUES, PLUIES ET AEROSOLS
DESERTIQUES**

**CHAPITRE VII : TRANSPORTS DE MATIERES DISSOUTES ET PARTICULAIRES SUR LES
BASSINS AMONT DU SENEGAL, DE LA GAMBIE ET DU NIGER**

**CHAPITRE VIII : GEOCHIMIE DES EAUX DE SURFACE DU FOUTA DJALON, EROSION
MECANIQUE ET ALTERATION CHIMIQUE EN DOMAINE SOUDANO-
GUINEEN**

**CHAPITRE IX : INFLUENCE DES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES SUR LA DYNAMIQUE
ACTUELLE DU FOUTA DJALON, ESQUISSE D'UN MODELE PREVISIONNEL**

CONCLUSION GENERALE

ABSTRACT

HYDROCLIMATOLOGY OF THE FOUTA DJALON MASSIF AND PRESENT DYNAMICS OF AN OLD LATERITIC LANDSCAPE.

The present dynamics of the Fouta Djalon massif is investigated from a geochemical study of surface waters which drain this old lateritic Guinean mountainous landscape, referred to as a "water tank" for West Africa. The study is divided in three parts which respectively describe the morphostructural and hydroclimatic environment, the matter transports and their relationship with the climatic fluctuations. These three research directions all contribute to the modelling of the actual dynamics of the Fouta Djalon landscape.

THE MORPHOSTRUCTURAL ENVIRONMENT

SECTION 1 : THE NATURAL ENVIRONMENT

This first section presents the most important features of the Fouta Djalon natural environment, which is restricted, for this hydroclimatic and geochemical study, to the upstream parts of the five drainage basins : the Senegal and Gambia rivers in the North, the Tomine and Konkoure rivers in the West and the Niger river in the East. The important flow of these rivers rightly justifies the designation of "water tank" given to this mountainous massif of West Africa.

SECTION 2 : GEOLOGICAL AND PEDOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THIS LATERITIC REGION

This section describes the geological evolution of the Fouta Djalon massif and determines the most important lithological and pedological units. The different geological formations are reviewed and it appears that the reliefs are mainly constituted of sandstones and dolerites. Five lithological classes are derived from the rocks chemical composition and their weatherability. The *granite class* is mainly represented in the Niger basin, the *sandstone class* in the western part of the Fouta Djalon massif and the *quartzitic sandstone class* in the northern part. The *class of the metamorphic basic rocks* is found principally in the Senegal basin and the *dolerite class* constitutes the central part of the Fouta Djalon massif. The hydrological resources are briefly reviewed and the geochemical interactions between water and relief are recalled. In this tropical zone where the climate is contrasted, hot and humid, the mother rocks are covered with a thick lateritic profile which are developed at their expenses by a chemical weathering. This finally results in a soil which is basically constituted of a kaolinic material.

THE HYDROCLIMATIC ENVIRONMENT

This section establishes the water balance. Since the study was carried out for a recent period and in a region which is not very investigated, it was necessary to acquire

meteorological and hydrological field data and to apply statistical processing methods to enable the correction of raw data to create regional maps.

SECTION 3 : CLIMATIC DATA AND CHARACTERISTICS OF THE 1979-1987 PERIOD

In this section, the water resources are estimated for each basin, from the different hydrological and thermal regimes. The studied area is located between the humid tropical zone and the border of the Sahara desert and displays a wide range of climates. During the 1951-1980 period, the annual pluviometry varied from 2300 mm in the South to 300 mm in the North. In the Fouta Djallon massif, the effects due to the altitude are significant and result in a SW-NE orientation of the isohyets which are oriented W-E in the other part of the studied area. The variability of the rainfall is recorded at all levels. After having determined the different climatic zones from the isohyets maps, drought is discussed. This drought seems to increase from the West to the East, with the exception in the Fouta Djallon massif where the deficit is the most important. There is a pronounced contrast between the western basins where the rainfall amount is high (1600 mm) and the dryer basins of the eastern part (1100 mm). In opposition to rainfall, the interannual variability of temperature and evaporation is low. These parameters are therefore insignificant for differencing the climates ; their study is yet valuable because they take an important part in the hydrological balance. There is evidence of an hydrological deficit in the area which is located at North from the 12th parallel, i.e. at the northern part of the Fouta Djallon massif.

SECTION 4 : ACTUAL DROUGHT AND HYDROLOGICAL BALANCES

A reviewing of the available hydrological data shows that the high variability of runoff is typical for this region. The geomorphological, pedological and climatic conditions all predispose the drainage basins to a significant surface runoff and accordingly to a rapid discharge of the rainfall. Therefore, in consequence of the pluviometric deficit of a last decade, the average hydrological deficit for this period is about 30%, when compared with an historical record of the beginning of the century. Finally, the hydrological balance is established for each drainage basin. The extremes are represented by the Senegal river which restitutes only 7% of the rainfall and by the Konkoure river, which restitutes 50% of the rainfall. During the recent drought, the Fouta Djallon massif received an mean annual rainfall of 1380 mm ; the annual evapotranspiration is equal to 1000 mm and the transit through the six outlets is equal to 700 m³/s, which represents a mean annual runoff of 380 mm, i.e. a runoff deficit of 75%.

CLIMATIC FLUCTUATIONS AND MATTER TRANSPORTS

SECTION 5 : PRESENTATION OF MEASUREMENTS AND INVESTIGATION METHODS

This section is devoted to the description of the sampling procedures, the sampling stations and the analysis methods. It also includes the proceeding of the raw results which enables the monitoring of the chemical analysis quality of water samples. Finally, the methods for computing the dissolved and particulate matter fluxes are presented.

SECTION 6 : IMPORTANCE OF THE ATMOSPHERIC INPUTS, RAINFALLS AND DESERTIC AEROSOLS

From rainfall and atmospheric dust sampling, which were carried out in Senegal, and from use of bibliographic data, a first geochemical estimate of the atmospheric inputs is established for the continental Sahelo-Sudano-Guinean region. We perfect a new instrument (the pyramidal collecting system) to measure the aeolian dust deposition, and a method is proposed to estimate the remobilization rate. The atmospheric flux presents a chemical particularity which is typical for this region. For the Sahelian zone, the flux represents an annual specific contribution of 1345 kg/ha, from which 92% proceed from the Saharan dust. In the Sudano-

Guinean zone, this annual specific contribution is reduced to 540 kg/ha, from which 75% are due to Saharan dusts. 40% to 50% of these dust inputs are remobilized. The dissolved matter rate, brought by the rainfall, is important (13 mg/l each year), owing to the almost constant presence of atmospheric dust : 25% of the annual particles transport occur during the rainy season. At a regional level, some differences are perceptible in the water chemistry behaviour between the Sahelian and the Sudano-Guinean zones : the amount of silica and the dissolved load increase with the aridity and with the meeting between monsoon clouds and harmattan winds bringing lithometeors. The main characteristics of atmospheric contribution in the Sahelo-Sudano-Guinean region are : firstly, the high concentration of bicarbonates in the rainfall and secondly, the significant silica deposition occurring in this region.

SECTION 7 : DISSOLVED AND SUSPENDED MATTER TRANSPORTS IN THE UPSTREAM PART OF THE SENEGAL, GAMBIA AND NIGER BASINS

A long-term and continuing study is necessary to enable the understanding of stream load transport. From a nine-year period of measurements of dissolved and particulate matters in the Senegal river at Bakel, from a five-year period of measurements in the Faleme river at Kidira and a three-year period of measurements in the Gambia river at Kedougou, an endeavour is made to understand the mechanisms of dissolved and suspended load acquisition in the Sahelo-Sudano-Guinean region. Only one year about the upstream part of the Niger basin corroborates the previous results. Models of surface water quality based on relationships between discharges and concentrations are determined. A new method, using cumulative sums of river discharges and river suspended material fluxes, is proposed to explain sediment load acquisition by river waters. Finally, the problem of the quantification of the surface runoff and its suspended load is widely discussed.

SECTION 8 : GEOCHEMISTRY OF THE FOUTA DJALON WATERS, MECHANICAL EROSION AND CHEMICAL WEATHERING IN THE SUDANO-GUINEAN ENVIRONMENT

This section begins with a study of the surface water chemical quality in the Fouta Djallon massif. These waters, weakly loaded (35 mg/l), contain bicarbonates, calcium, magnesium and silica. Bicarbonates ensure alone the anion-cation balance and silica represents 33% of the dissolved load. The using of geochemical models shows a general monosiallitic weathering process. However, regional characteristics show up according to the lithological and topographic units. The next task is the quantification of dissolved and particulate matters fluxes coming from the Fouta Djallon massif. The most important characteristic of these matter fluxes is the low rate of the particulate transport (21 mg/l). All transports included, the relative flux of the major constituents is following : $Si > C_{\text{org.}} > Ca > Mg > Na > Cl > K > Al > Fe$. The dissolved part represents 62% of the total transport, the mineral particles part 36% and the organic particulate carbon 2%. Finally, after correction of the atmospheric inputs, the annual rates of chemical weathering and mechanical erosion are respectively estimated at 3 t/km² and 8 t/km². Only 20% to 30% of the dissolved flux result from the chemical weathering and the most important part of this transport is provided by the soft sandstones located in the western part of the Fouta Djallon massif. Presently, the geochemical balance of the Fouta Djallon massif is equilibrated.

SECTION 9 : EFFECTS OF CLIMATIC FLUCTUATIONS ON THE DYNAMICS OF THE FOUTA DJALON MASSIF, OUTLINE OF A FORECAST MODEL

This last section begins with a study of the relationships existing between the flow of the Senegal river at Bakel, the water temperature, the air surface temperature and the rainfall. After describing, for each year, the evolution of these hydroclimatic parameters from 1979 to 1986, the correlations are confirmed at different temporal scales : daily, monthly, seasonal and yearly. A new repartition of the hydroclimatic year shows that flow and air temperature always have a global opposite evolution in the tropical zones, which are characterized by two contrasted seasons. Finally, it is established that the hydrological parameter is the best to explain the bicarbonates transport out of the drainage basins and hence, the atmospheric CO₂ flux consumed by rock weathering. As a result, a forecast model of the dynamics of the Fouta

Djalón region is suggested, if a long-term climate change is assumed. For an annual runoff over 380 mm, the global weathering balance of the Fouta Djalon massif will be positive : the landscape will form soils. But, under this rate, the soil formation by chemical weathering won't be sufficient to balance the soil losses by mechanical erosion.

CONCLUSION : HYDROCLIMATOLOGY AND GLOBAL GEOCHEMISTRY OF CONTINENTS (HGGC)

This work underlines the necessity to study the surface water geochemistry in relation to the hydroclimatology. This method, always done at global scale, is done there at landscape scale to find by climatic zone and/or by large drainage basin, the relationships between flow, air surface temperature and river water bicarbonate load. In the Sahelo-Sudano-Guinean climatic zone, the runoff intensity is the main hydroclimatic parameter which controls the chemical weathering rate. So in this region, the atmospheric CO₂ flux consumed by rock weathering may be expressed as a direct function of the drainage intensity. This approach of *Hydroclimatology and Global Geochemistry of Continents* (HGGC) shows also that the years of climatic type "Wet-Cold" allow to detect an influence of the air surface temperature on the river water bicarbonate loads, and then on the atmospheric CO₂ flux consumed by weathering, increasing with the temperature for a same discharge. In conclusion, at time where the problem of CO₂ concentration evolution in the atmosphere is important, one often forget that the rock chemical weathering can play a major role in the evolution of these atmospheric CO₂ concentrations as buffering effect (regulating or not ?) between natural partitions, which are lithosphere, biosphere and atmosphere. The *HGHC* appears to be a necessary approach to understand and to calculate the CO₂ consumption by climatic zone. For the Sahelo-Sudano-Guinean zone, the present average consumption is estimated to 18.10⁹ mol/km²/y of atmospheric CO₂.

INTRODUCTION

"Ce n'est que si nous avons bien compris les équilibres biogéodynamiques, eau, transports mécaniques, migrations chimiques et biologie, que nous saurons, sans les endommager, tirer le meilleur parti des paysages, au service des hommes."

G. MILLOT, G. BOCQUIER et H. PAQUET (1976)

Les études d'hydrologie et de qualité des eaux pour des grandes unités géographiques sont des recherches répondant à une demande extérieure importante pour le développement. D'autre part, l'Afrique de l'Ouest constitue encore actuellement un laboratoire particulièrement intéressant puisque les sources et interférences anthropogéniques y sont rares. Ainsi, une des finalités de cette recherche est d'identifier dans un milieu intertropical "naturel", les phénomènes actuels et les paramètres de références dont l'évolution future permettra d'évaluer d'éventuelles dégradations du milieu et en particulier les "pollutions" anthropiques. Pour cette raison, une partie de ce travail a consisté à collecter, homogénéiser et valider les différentes données éparses concernant le milieu morphostructural et hydroclimatique de cette zone géographique, afin que les différents programmes d'aménagement du milieu, en cours et à venir, puissent y faire référence.

La dynamique actuelle du vieux paysage latéritique du Fouta Djallon est étudiée à partir de la géochimie des eaux de surface qui drainent ce massif montagneux guinéen, véritable "château d'eau" de l'Afrique de l'Ouest. L'objectif est d'appréhender de manière globale, à l'échelle du paysage, la géochimie des éléments naturels acheminés par les fleuves dans un contexte tropical africain. Situées au coeur du cycle externe des éléments, les rivières accueillent, pour un transit temporaire, les apports atmosphériques, les "séquelles" de l'érosion mécanique, de l'altération chimique et de la dégradation de la biomasse continentale. Les eaux de surface représentent donc "l'humeur" de cet immense organisme appelé TERRE. En effet, leur réponse aux changements de condition du milieu naturel est très rapide. Elles peuvent ainsi être utilisées pour apprécier les changements de conditions à la surface du Globe, qu'ils soient d'origines naturelles ou anthropiques, à la manière d'un médecin qui lit les résultats d'une analyse de sang. Effectivement, elles fournissent des renseignements à la fois quantitatifs pour effectuer des bilans globaux, et qualitatifs pour préciser des études locales, régionales ou globales. Les étudier, c'est donc approcher la dynamique actuelle des grands écosystèmes.

Ce travail entre dans le cadre du programme pluridisciplinaire EQUÉSEN sur l'Environnement et la Qualité des Eaux du Sénégal financé par la CEE. Ce projet regroupe différentes équipes de recherches dépendant d'une part, de la communauté européenne (ORSTOM et FUL) et, d'autre part, de l'Etat sénégalais (ISRA et Université de Dakar). Dans le contexte régional, cette étude s'inscrit dans la continuité des travaux entamés par l'ORSTOM-Dakar et ses divers partenaires nationaux pour l'OMVS et l'OMVG. Enfin, il rejoint dans ses objectifs les grands programmes nationaux et internationaux que sont PIRAT et GLOBAL CHANGE.

La méthodologie utilisée combine l'analyse statistique des observations avec une approche naturaliste du fonctionnement des systèmes. Deux méthodes complémentaires d'acquisition des

données ont été utilisées. La première a consisté à collecter de manière systématique, si possible pendant au moins une décennie, les eaux de surface aux exutoires de grandes unités hydrologiques : bassins amont du Sénégal, de la Gambie et du Niger, trois fleuves issus des hauteurs du Fouta Djalou. Ce travail considérable d'échantillonnage est réalisé par les équipes de l'ORSTOM depuis 7 ans sur le fleuve Sénégal à Bakel et la Falémé à Kidira. La station de Kédougou, exutoire du bassin supérieur de la Gambie, n'est suivie que depuis 1986. Afin de mieux cerner le Fouta Djalou, les stations guinéennes de Kankan, Dabola et Siguiiri (représentant respectivement les exutoires des bassins supérieurs du Milo, du Tinkisso et du Niger) ont été implantées pour la première fois lors de la saison des pluies de 1987. Enfin, aucun suivi continu n'a pu être assuré sur le flanc ouest du Fouta Djalou (fig.1).

Ce manque d'information sur certaines zones géographiques, lié à la difficulté d'implanter des stations permanentes, a nécessité une seconde approche plus ponctuelle qui a permis une étude spatiale de la géochimie des eaux du Fouta Djalou. Ainsi, à l'occasion de trois missions d'appui sur l'ensemble de la zone d'étude, 150 prélèvements d'eau ont été effectués sur des sources, des ruisseaux, des rivières et des fleuves. Ces travaux de terrain ont été guidés par le souci constant de compléter les prélèvements dans certaines régions identifiées par les premiers comme étant des secteurs-clefs du dispositif.

Nous voilà donc avec des échantillons d'eau permettant une étude spatiale de la géochimie des eaux du Fouta Djalou alliée à un suivi dans le temps des principaux cours d'eau qui en sortent, à savoir le Sénégal, la Falémé, la Gambie et le Niger. Le régime prolongé des brumes sèches sur les zones sahélo-soudaniennes nous a conduit à prendre en compte une autre source d'apports terrigènes : les aérosols désertiques.

Ce mémoire s'articule en trois parties décrivant successivement le milieu morphostructural, le milieu hydroclimatique puis les transferts de matières et leurs liens avec les fluctuations climatiques. Ces trois axes participent ensemble à la modélisation de la dynamique actuelle du Fouta Djalou.

Dans la première partie, le chapitre I décrit les caractéristiques du milieu naturel ouest africain. Il fait une présentation géographique succincte du Fouta Djalou et rappelle les particularités morphométriques et hydrographiques des bassins versants étudiés. Le chapitre II approfondit particulièrement le contexte géologique du Fouta Djalou ; l'identification des grands ensembles lithologiques aboutit à la proposition d'une *roche moyenne* représentative de l'ensemble du massif. Enfin, il donne un aperçu du cadre hydrogéologique et pédologique.

La deuxième partie est consacrée au bilan de l'eau. Le chapitre III estime la lame d'eau moyenne disponible dans chaque bassin versant à partir des différents régimes pluviométriques. Au préalable, travaillant sur une zone peu étudiée et sur une période récente, les données météorologiques collectées sur le terrain ont dû être corrigées. Le chapitre IV établit un inventaire des données hydrologiques disponibles, puis ces données sont analysées à la lumière de la sécheresse des deux dernières décennies.

La troisième partie détermine la nature et l'intensité des flux de matières exportés et appréhende les mécanismes actuels de l'érosion et de l'altération régnant sous ces basses latitudes tropicales. Le chapitre V est consacré à la description des protocoles d'échantillonnage, des stations de prélèvements et des méthodes d'analyses. Le chapitre VI précise l'importance des apports atmosphériques secs et humides (aérosols et pluies). Le chapitre VII fait le bilan des transports de matières dissoutes et particulaires sur les bassins amont du Sénégal, de la Gambie et du Niger. On étudie sur ces bassins la composition chimique des eaux et des matières en suspension, la granulométrie et la minéralogie de ces dernières, et on détermine des modèles de qualité des eaux de surface basés sur les relations débits-concentrations. Les mécanismes d'acquisition de la charge solide des eaux dans cette région continentale sahélo-soudano-guinéenne sont discutés. Le chapitre VIII dresse un bilan des flux de matières issus du Fouta Djalou, et,

donne une estimation de l'érosion mécanique et de l'altération chimique sévissant actuellement dans ce paysage montagneux guinéen. Enfin, le chapitre IX appréhende la dynamique actuelle du Fouta Djalon par l'étude des fluctuations hydroclimatiques. Les bicarbonates présents dans les eaux étant des marqueurs de l'intensité de l'altération, cette méthode donne une relation directe entre l'évolution climatique de la zone tropicale ouest africaine et l'intensité de l'altération chimique y régnant. Il en découle l'élaboration d'un modèle prévisionnel de dynamique régionale prévoyant divers scénarios en cas de changements climatiques prolongés.

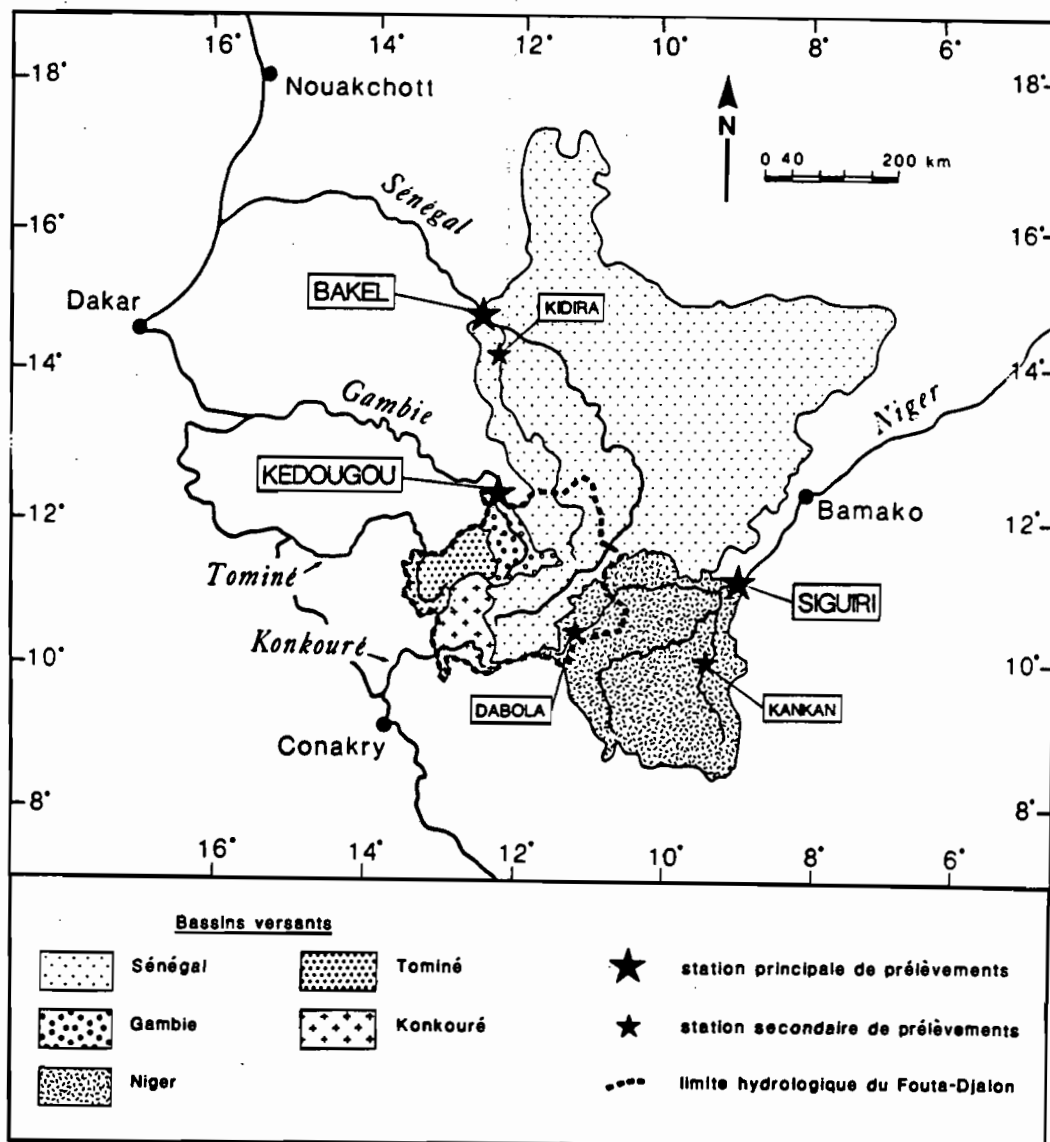


Fig. 1 : Carte de situation de la zone étudiée et des stations permanentes de prélèvements d'eau.

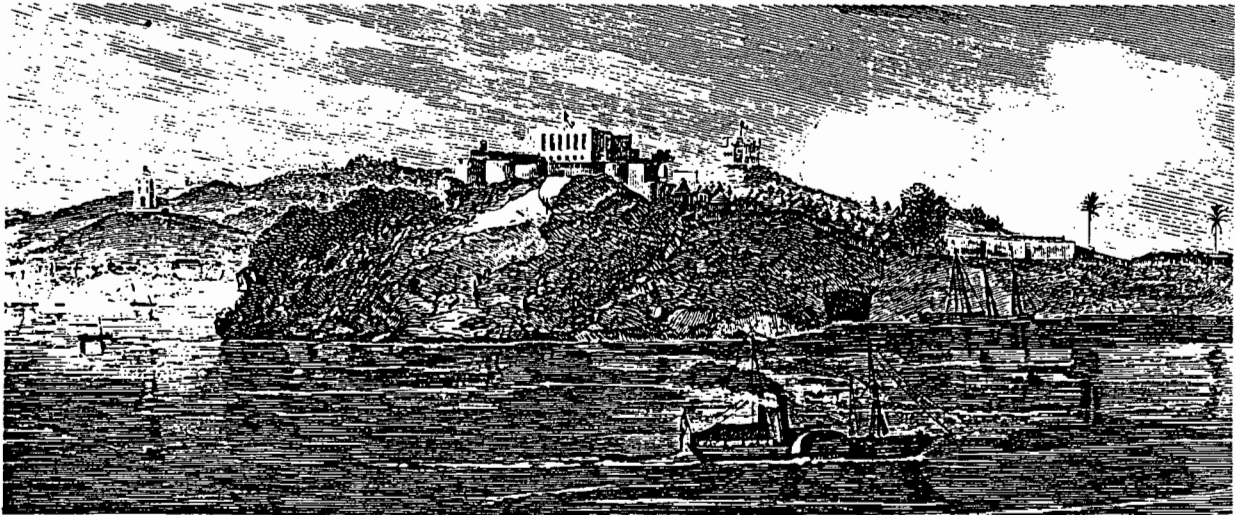
Abréviations :

- FUL Fondation Universitaire Luxembourgeoise
 ISRA Institut Sénégalais de Recherche Agronomique
 OMVG Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie
 OMVS Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal
 ORSTOM Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération

PREMIERE PARTIE

LE MILIEU MORPHOSTRUCTURAL

Ci-dessous : Bakel, terminus de la navigation sur le Sénégal, où parvient la flottille du lieutenant de vaisseau Aube. Le poste (au centre : le fort et la Tour Joris, à gauche : la Tour du Mont-aux-Singes) a été construit en 1819 par le Génie sur un rocher dominant le fleuve Sénégal. De 1853 à 1855, El Hadj Omar n'ose pas attaquer le fort, ce que fera, en vain, Mahmadou Lamine en 1885. En 1958, Bakel, chef-lieu de cercle, était une ville de 2 300 habitants, dont 4 Européens.



CHAPITRE I

LE MILIEU NATUREL

Le Niger, le Sénégal, la Gambie, la Tominé et le Konkouré sont issus du Fouta Djalon. L'importance des écoulements de ces fleuves justifie, à plus d'un titre, l'appellation de "château d'eau" donnée à ce complexe montagneux d'Afrique de l'Ouest.

I - LE FOUTA DJALON

A - SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le Fouta Djalon occupe la zone montagneuse de la partie septentrionale de la Guinée, aux confins du Sénégal et du Mali (fig.2).

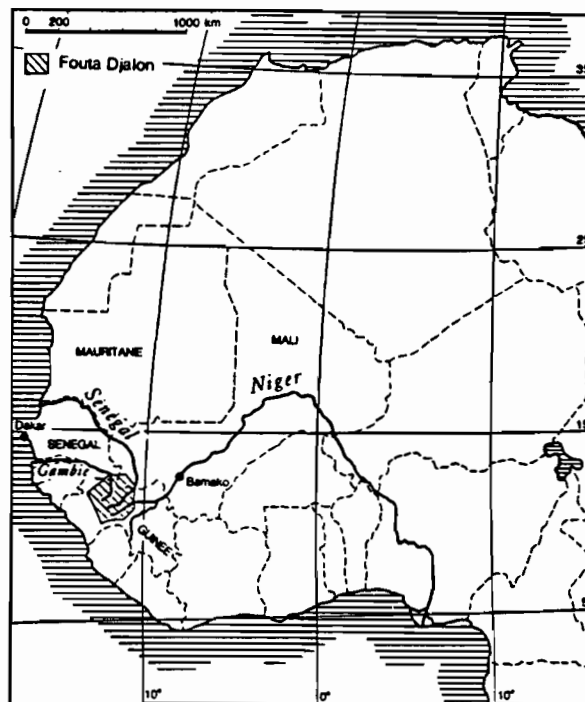


Fig. 2 : Situation géographique du Fouta Djalon en Afrique occidentale.

Ce massif culmine à 1538 m au mont Loura, au Nord de Mali. Un autre pointement remarquable, à l'altitude de 1465 m, se situe au Sud de Dalaba dans les monts Kavendou qui surplombent les sources du Sénégal. La ligne de crêtes, de direction N-S, s'étire sur près de 200 km entre les villes de Mali, au Nord, et de Mamou, au Sud ; elle délimite d'une part, les versants ouest drainés par la Tominé et le Konkouré et, d'autre part, les régions orientales qui englobent les cours supérieurs de la Gambie, du Sénégal et du Niger.

Bien qu'étant une entité naturelle reconnaissable et reconnue (ROBEQUAIN, 1937 ; SAUTTER, 1944 ; PELISSIER, 1949 ; POUQUET, 1956 ; CHURCH, 1957), il n'existe pas de délimitation géographique précise du Fouta Djalon. Ce flou vient de l'origine du nom de ce massif. En effet étymologiquement, Fouta Djalon signifie "*pays des Djalonkés*", cultivateurs de grande taille venus du Mali qui ont colonisé ces montagnes au XVI^{ème} siècle. A côté de cette définition ethnologique, il existe une définition historique qui, malgré tout, ne permet pas de lever cette imprécision. Vers le milieu du XVIII^{ème} siècle, SERI, un chef Foula (ethnie Peul) fonda l'Etat du Fouta Djalon qui comprenait onze provinces : Timbo, Labé, Kolen, Koïn, Kolladé, Fodé Hadji, Timbi Touni, Timbi Madina, Bani, Massi et Akolémadji (BOUILLET, 1893). La capitale était Timbo ; cette ville qui comptait jusqu'à près de 10.000 habitants, est maintenant un village sans importance économique ni politique. Cet état fut annexé par la France en 1897 après seize années de protectorat. Cette date marque la fin de la réalité administrative du Fouta Djalon. Aujourd'hui, les limites naturelles des hauts bassins montagneux se répartissent dans trois des quatre grandes régions de la République de Guinée et débordent légèrement sur les états voisins du Sénégal et du Sierra Leone (fig.3).

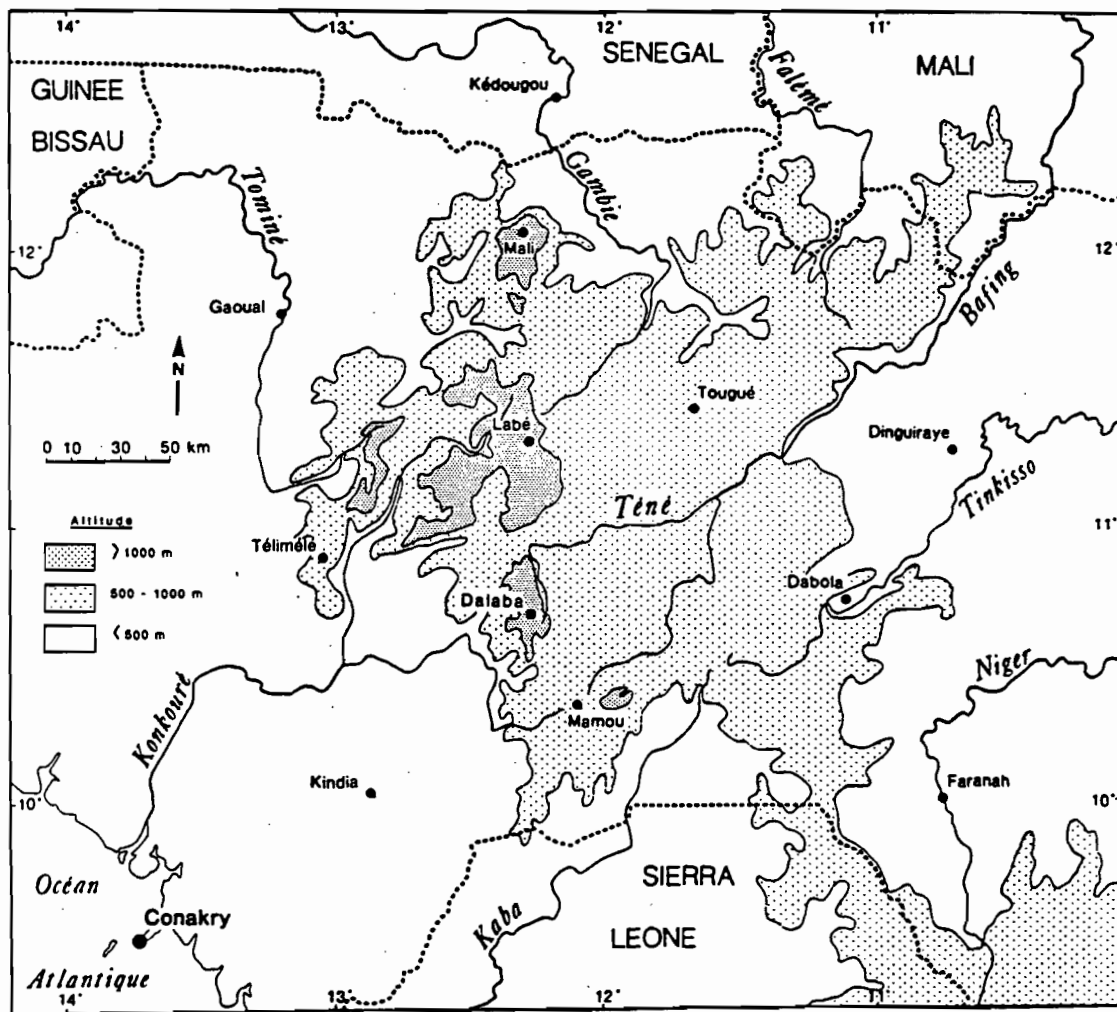


Fig. 3 : Carte hypsométrique du Fouta Djalon.

Devant cette absence de limites géographiques précises, le Fouta Djalon a été circonscrit, pour cette étude, à partir des lignes de partage des eaux. Ce massif montagneux se trouve ainsi constitué de six bassins versants répartis de la manière suivante. Deux bassins côtiers guinéens occupent le flanc ouest : le bassin de la Tominé au Nord et celui du Konkouré au Sud. Le bassin du Tinkisso, affluent de la rive gauche du Niger, constitue le flanc SE. Le coeur du Fouta Djalon et sa partie NE sont formés par le bassin du Bafing, branche mère du fleuve Sénégal. Enfin, le Nord se divise entre le bassin de la Falémé (affluent du Sénégal) et le bassin de la Gambie (fig.4).

Les exutoires de ces six bassins versants sont respectivement les stations de Gaoual sur la Tominé, de Konkouré sur le Konkouré, de Tinkisso sur le Tinkisso, de Dakka-Saïdou sur le Bafing, de Satadoukou sur la Falémé et de Kédougou sur la Gambie. Ainsi délimité, le Fouta Djalon couvre une superficie de 59000 km².

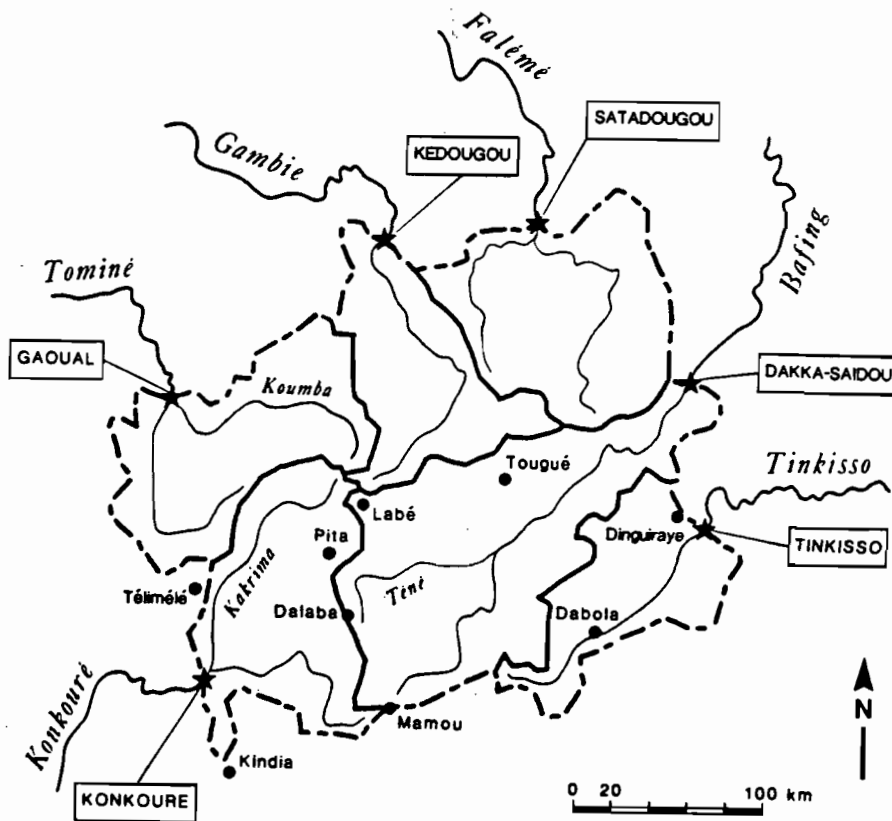


Fig. 4 : Limites hydrographiques du Fouta Djalon.

B - LE RELIEF

La dorsale guinéenne, originalité du relief de l'Afrique occidentale, constitue un important "bourrelet" de hautes terres situées à plus de 1000 mètres d'altitude (DAVEAU, 1971). Elle est divisée en deux vastes ensembles bien distincts séparés par un très large ensellement dont l'altitude moyenne ne dépasse pas 500 mètres et qui correspond au cours supérieur du fleuve Niger (fig.5). La partie sud, sous 9° de latitude Nord, est formée par le socle cristallin ; elle est dominée par les monts Loma (1948 m), point culminant de l'Ouest africain et par quelques pointements remarquables tel que le mont Nimba à 1752 m. La partie nord correspond aux hauts plateaux gréseux et doléritiques du Fouta Djalon dont les niveaux étagés se terminent le plus souvent par d'imposants escarpements.

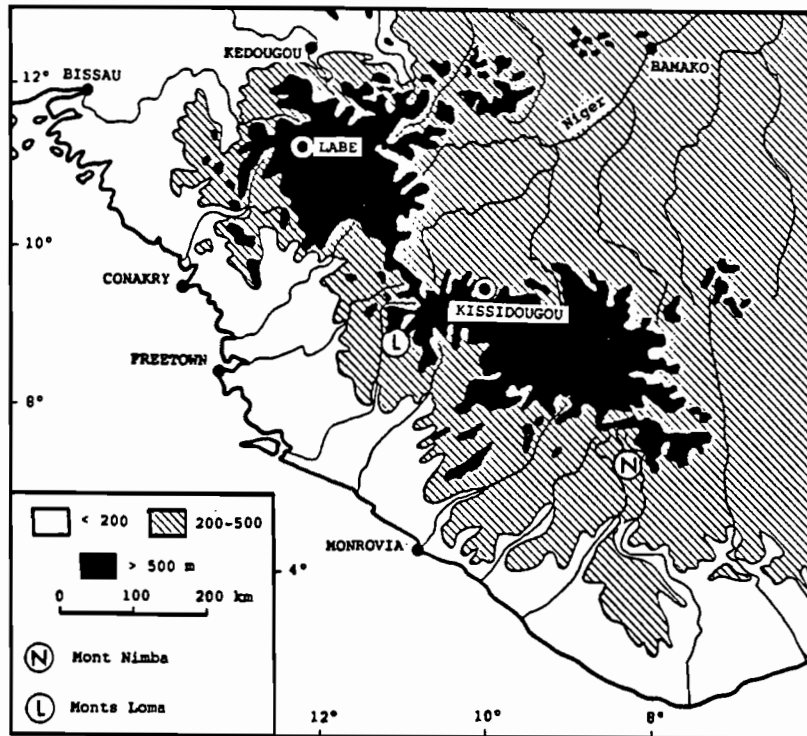


Fig. 5 : Carte de situation générale de la dorsale guinéenne.

En effet, au-dessus des plaines avoisinantes occupées par la forêt ou la savane, le massif du Fouta Djallon se dresse en falaises abruptes entaillées par les rivières qui en dévalent. Trois plateaux, alignées sur 200 km selon une direction N-S, en occupent la partie centrale (fig.3). Le plus septentrional, celui de Mali, surplombe les plaines de la Gambie d'un millier de mètres de haut et culmine au Fello Loura à 1538 m. Au centre, le quadrilatère qui forme le puissant massif de Pita-Labé ne dépasse guère l'altitude de 1250 m. Au Sud enfin, le plateau de Dalaba érige ses falaises au-dessus de Mamou jusqu'à 1465 m, point culminant du bassin versant du Sénégal aux sources de la Téné. A l'Est, les plateaux drainés par le Bafing et la Téné, moins élevés (750 m d'altitude moyenne) et au relief moins compartimenté, servent de piédestal aux puissantes falaises du Haut-Fouta. A l'Ouest, les plateaux de Gaoual et de Télimélé dépassent rarement 600 m, mais l'énergie des rivières et l'abrupt des versants donnent une empreinte montagnarde à cette marge occidentale du massif.

C - GEOMORPHOLOGIE : LES GRANDS ASPECTS DU RELIEF

Les plateaux et les glacis constituent les traits géomorphologiques dominants de cette région. MAIGNIEN (1958) et MICHEL (1973) ont identifié trois grandes surfaces d'aplanissement cuirassées et disposées en gradins successifs, un relief intermédiaire cuirassé de moyenne altitude sur les versants et trois glacis d'extension très variable.

Les surfaces d'aplanissement du Secondaire et de l'Eocène ont une topographie plane, qui contraste fortement avec leurs rebords escarpés. Cette morphologie est due à la présence en surface d'une cuirasse latéritique d'une dizaine de mètres d'épaisseur qui a moulé chaque aplanissement, préservant ainsi au cours du temps ces témoignages du modelé général. Il ne subsiste plus que quelques lambeaux de la première surface dite *de Labé*, perchés entre 1150 m et 1200 m sur les hauts reliefs du Fouta Djallon. Datées du Jurassique, certaines de ces surfaces ont été portées à des altitudes plus élevées à la faveur de soulèvements régionaux : c'est le cas du revêtement latéritique situé à quelques kilomètres au Sud de la ville de Mali et qui coiffe, à près de 1382 m, un important sill de dolérites. La deuxième surface, d'âge Crétacé, dite *de Dongol Sigon*, couvre une vaste superficie dans la partie orientale du Fouta Djallon, et est bien représentée sur les bordures occidentales et méridionales du bassin de la

Gambie où son altitude varie entre 850 et 1000 m. Les *bowé* (ou plateaux cuirassés) de cette surface se rencontrent surtout dans les cours supérieurs de la Liti (région de Mali) et de la Koéla (région de Tougué). La troisième surface, d'âge Eocène, dite *de Fantofa*, située en contrebas des témoins de la seconde surface d'aplanissement, a été bien conservée sur les contreforts du Fouta Djallon et sur les hauteurs du plateau Mandingue : elle s'étage entre 550 m et 650 m le long des têtes de ruisseaux. Les principaux *bowé* de cette troisième pénéplaine apparaissent dans la région de Fantofa (bassin versant de la Falémé).

Le relief intermédiaire s'est développé au cours du Pliocène formant une surface de remblaiement lorsqu'elle se confond avec le sommet des dépôts du Continental terminal, ou une surface d'érosion quand elle recoupe les formations antérieures. Les formes de ce relief sont très variées : versants en pente douce à revêtement latéritique, croupes arrondies ou ensemble confus de collines. Sa position au raccord des anciennes surfaces du Secondaire, de l'Eocène et des glacis façonnés au cours du Quaternaire lui a valu ce qualificatif de relief intermédiaire (VOGT, 1959).

Durant le Quaternaire ancien, la surface d'érosion du Pliocène supérieur a été rajeunie et détruite sur de vastes étendues par le réseau hydrographique qui a entaillé les cuirasses latéritiques et permis la mise en place d'importantes nappes détritiques, constituées de matériaux fins, de galets et de graviers de cuirasses ; le haut glacis s'est alors formé par accumulation et migration des sesquioxides. Au cours d'une seconde phase de creusement, le haut glacis a lui-même été entaillé, et les éléments de cette érosion ont contribué à la formation du moyen glacis en contrebas, avec également addition de sesquioxides par migration latérale. Une deuxième entaille a entraîné la formation du bas glacis.

D - UNE VEGETATION TROPICALE DEGRADEE

Sous ce climat subtropical à saisons contrastées, qui est une variante d'altitude du type *soudano-guinéen*, la végétation originelle consistait essentiellement en une forêt dense de *Parinari excelsa*, qui constituait une défense naturelle contre l'érosion. Mais par suite d'une densité démographique de plus en plus importante, il n'en subsiste que quelques lambeaux. On distingue maintenant deux grands ensembles : la *forêt dégradée guinéenne* dans la zone du plateau central, d'altitude supérieure à 800 m, et la *savane soudanaise* dans la zone de ceinture, d'altitude inférieure à 800 m. Il faut insister sur l'importance de la nature et de la densité du peuplement végétal pour la morphogénèse. Les racines interviennent dans le processus de fragmentation mécanique en pénétrant dans les diaclases des grès et des dolérites, et dans les fissures et alvéoles des cuirasses. L'abondance du feuillage intervient également dans la protection des sols, en jouant un rôle déterminant d'écran sur l'importance de la déflation éolienne et du ruissellement diffus au cours des grosses averses (MAIGNIEN, 1958 ; ROUGERIE, 1960 ; MICHEL, 1973 ; ROOSE, 1980).

1. La forêt et la savane guinéenne

Les hauteurs du Fouta Djallon ont été fortement sollicitées par l'extension des zones de cultures. De plus, le maintien des traditionnels feux de brousse ou cultures sur brûlis n'a laissé persister que quelques forêts fermées de *Parinari excelsa* qui sont pour la plupart des reliques couvrant les versants, les fonds de vallée et certaines crêtes. Ailleurs, le tapis herbacé s'est développé, formant de grandes savanes et prairies.

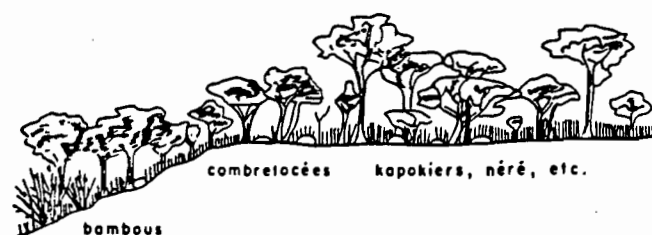
Sur les hauts plateaux de Labé, la déforestation est presque totale. Les formations herbacées occupent de vastes étendues : les associations les plus fréquentes étant les savanes à *Parinari excelsa*, les savanes à *Parkia biglobosa* et les prairies (GUPTA, 1987). La monotonie de ce tapis herbacé n'est interrompue que par les "*tapades*", où les populations font prospérer des plantations de manguiers, d'orangers et de bananiers. Dans la région de Dalaba, de nombreuses collines sont aujourd'hui peuplées par des conifères introduits pendant l'épisode colonial. La région de Mali, qui est moins arrosée, a un couvert végétal constitué de forêts reliques à

Parinari excelsa et *Carapa procera*, avec un sous-bois arbustif. Les savanes se sont étendues sur la plupart des versants et des cuvettes intérieures du massif, suite à la déforestation.

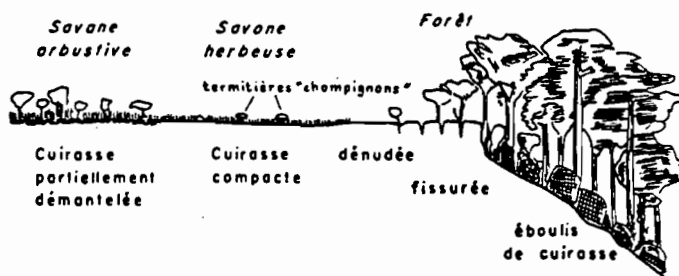
2. La savane soudanaise

La savane soudanaise (fig.6), formée de hautes herbes qui comprennent des strates arborées et arbustives, se rencontre dans la partie septentrionale du massif. Souvent touffue, la végétation est constituée de nombreuses essences, dont les plus abondantes sont : *Gardena erubescens*, *Lanchocarpus laxiflorus*, *Sterculia setigera*. Celles-ci sont recouvertes par des espèces plus grandes dont les plus importantes sont : le Néré (*Parkia biglobosa*), le Kapokier (*Bombax costatum*), le Tamarinier (*Tamarindus indica*) et quelques bambous (*Oxytenanthera abyssinica*) poussant sur les versants des collines dans la zone de Gaoual. Le tapis herbacé de base est surtout formé de graminées (GUPTA, 1987).

a - Savane boisée



b - Plateau cuirassé (bowal) et son rebord



c - Marigot avec petite galerie forestière



Fig. 6 : Paysages végétaux du Fouta Djallon (d'après MICHEL, 1973).

Sur les plateaux cuirassés (fig.6), l'état du sol n'autorise que le développement d'espèces arbustives, telles les *Combretacées*. Sur les versants, l'amalgame de produits d'érosion permet la croissance de grands arbres, tels que *Daniela oliveri*. Dans les bas-fonds humides, le couvert végétal est surtout composé de bambous, de rôniers, de palmiers à huile et de raphias (GUPTA, 1987).

A - LES PAYSAGES GUINEENS

1. Le Fouta Djalou

De Kindia à Labé en passant par Mamou, on s'engage dans une grande dépression de direction générale SW-NE, bordée par des falaises gréseuses, imposantes par leur faciès tabulaire et leur grande extension. La régularité de ces falaises est interrompue, par endroits, par des venues doléritiques (CHETELAT, 1938 ; OBERMULLER, 1941 ; MICHEL, 1973). L'altitude varie entre 600 et 1400 m. Les rivières présentent de nombreuses chutes d'eau. La végétation est formée de savanes sur les plateaux, de forêts clairsemées dans les bas-fonds et de galeries forestières assez denses le long des rivières.

Entre Labé et Dabola, le paysage change ; les grès horizontaux font place aux affleurements granitiques souvent couronnés par des venues doléritiques (OBERMULLER, 1941) et le modelé s'en ressent : montagnes et chaînes de montagnes sont arrondies, surmontées quelquefois par des falaises à débit prismatique.

2. Le bassin de Siguiri

De Dabola à Kankan, le pays est très montagneux dans les derniers contreforts du Fouta Djalou (les sommets atteignant 1000 mètres ne sont pas rares près de Dabola), puis il devient plus monotone dans la plaine du Niger où l'altitude moyenne est de 500 m près de Kankan. De vastes étendues latéritiques à peine ondulées, interrompues occasionnellement par de petits inselbergs de granite, caractérisent cette région. La végétation, peu dense avec de hautes herbes et des arbustes rabougris, renforcent la monotonie du paysage. D'étroites galeries forestières persistent le long des principaux cours d'eau.

Dans le Sud immédiat de Kankan, l'aspect du paysage est identique à celui de Kouroussa : une grande plaine latéritique ondulée avec de rares inselbergs de roches éruptives (OBERMULLER, 1941 ; PELISSIER & ROUGERIE, 1953), l'ensemble étant recouvert par une savane légèrement boisée. Plus au Sud, le pays devient accidenté et la végétation plus dense. Le Milo y sinue dans une grande dépression d'altitude moyenne de 500 m et de direction générale N-S entre deux chaînes de montagnes. Dans l'ensemble, le modelé se traduit par des ondulations à grand rayon de courbure.

B - LE PLATEAU MANDINGUE ET LE DOMAINE SAHELIEU

Le plateau Mandingue fait suite au Fouta Djalou vers le NE ; il est surtout constitué de formations gréseuses traversées de sills doléritiques. Il est moins élevé et n'atteint que 800 m dans sa partie la plus haute, près du rebord méridional. Il ne s'agit pas d'un vaste plateau homogène, mais d'une succession de plateaux d'altitudes variables séparés par des couloirs ou des plaines. C'est uniquement sur ses bordures que le plateau Mandingue présente une allure massive, se terminant à l'Ouest par la *falaise de Tambaoura*, au-dessus de la plaine de la Falémé, et au Sud par les *monts Mandingues*, au-dessus du bassin de Siguiri. Son aspect change du Sud au Nord. Dans la partie méridionale, de nombreux plateaux latéritiques s'élèvent à des altitudes de 550 à 700 m, se terminant souvent par des versants en pente douce (15° à 20°) couverts comme eux d'un manteau latéritique ; à leur base se développent les glacis cuirassés. Au Nord, s'étendent des surfaces planes sableuses ou rocheuses, souvent très vastes, au milieu desquelles apparaissent des inselbergs et des plateaux gréseux à corniches. Les formations cuirassées deviennent rares et ne marquent plus le paysage. Les grandes rivières, Bafing, Bakoye et Baoulé, coulent tantôt dans de larges plaines, tantôt s'encaissent dans les plateaux de grès, passant d'une diaclose à l'autre par de brusques coudes.

Au Nord de ce plateau, en domaine sahélien, les plaines alternent avec les plateaux. Les vallées de la Kolimbiné et du Karakoro, au Nord et au NE de Kayes, s'allongent entre le massif doléritique de Bafoulabé et les massifs gréseux de l'Afollé et de l'Assaba. Le modelé

général s'aplatit dans la région de Kayes et vers la confluence Falémé-Sénégal. Les altitudes restent inférieures à 100 m. Les glacis cuirassés ont disparu. Les terrains sableux ou caillouteux aux pentes douces s'étendent à perte de vue.

C - PRESENTATION DES BASSINS VERSANTS

1. Le bassin versant supérieur du fleuve Sénégal (fig.8)

Le bassin versant -amont du Sénégal se partage entre les quatre républiques de Guinée, du Mali, de Mauritanie et du Sénégal (fig.7). De forme ovoïde avec un grand axe SW-NE, il s'étend de 10°20' à 17°00' de latitude Nord et de 7° à 12°20' de longitude Ouest. Il couvre une superficie de 218000 km².

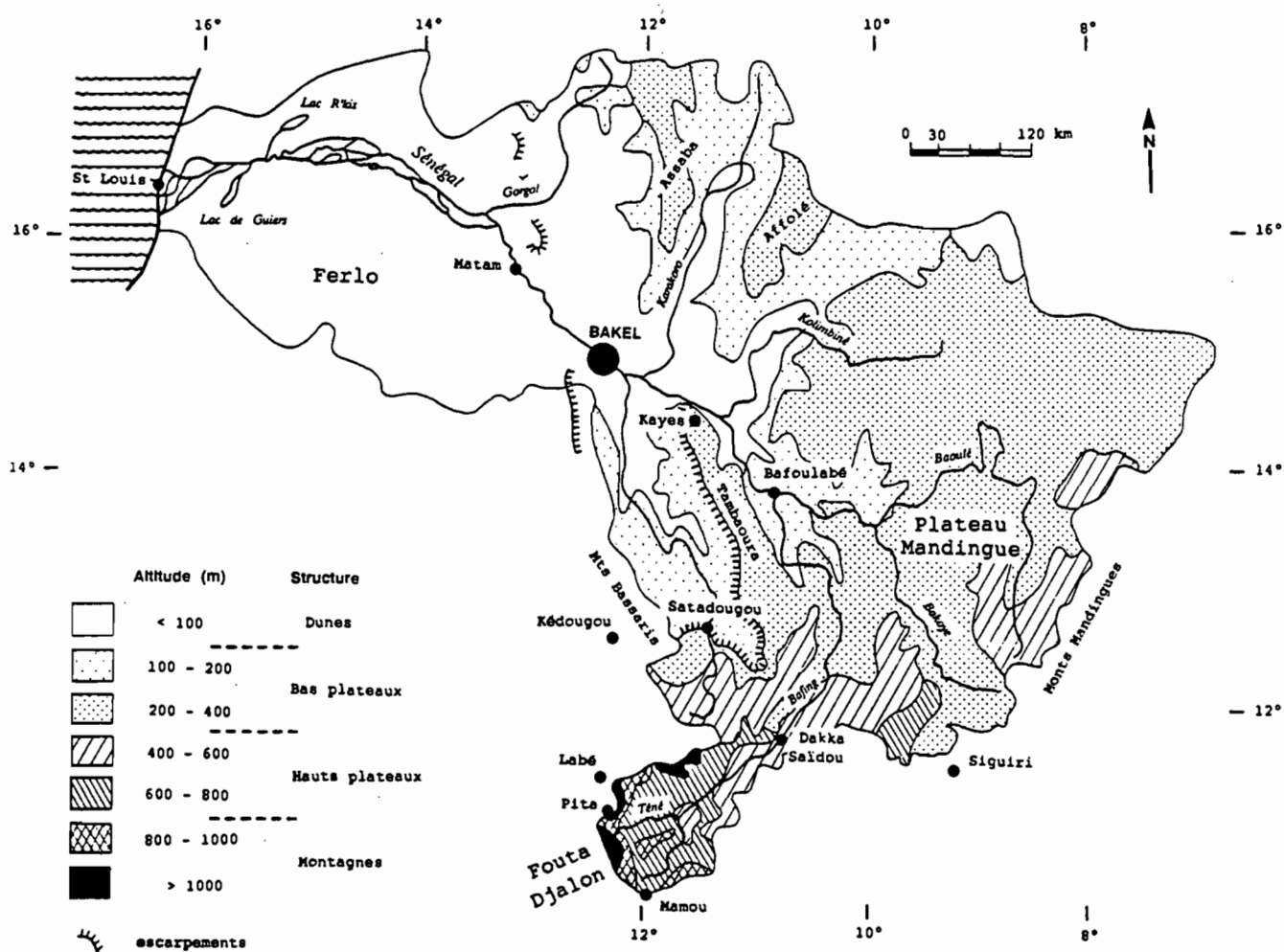


Fig. 8 : Le bassin versant amont du Sénégal (hypsométrie, cadre structural et réseau hydrographique principal).

a) D'un relief montagneux à un relief pénéplané

Le fleuve Sénégal, long d'environ 1800 km, prend sa source dans le massif du Fouta Djallon en Guinée. Il est formé de la jonction du Bafing et du Bakoye à Bafoulabé, 255 km en amont de Bakel. A partir de cette ville, il sert de frontière entre le Sénégal et la Mauritanie jusqu'à Saint-Louis où se situe son embouchure dans l'océan Atlantique.

L'extrémité méridionale du bassin est la plus montagneuse. Elle est constituée en territoire guinéen par le massif du Fouta Djallon, et en territoire malien par le plateau Mandingue. Le point le plus élevé du bassin est à une altitude de 1465 m, et l'altitude moyenne de sa partie guinéenne atteint près de 1000 m. De là, descend le Bafing en passant successivement sur une série de reliefs subtabulaires d'altitudes décroissantes du Sud au Nord jusqu'à 600 m. Cet ensemble se délimite aux environs de 12° de latitude Nord par une ligne de falaises plus ou moins verticales qui se dessine très bien dans le paysage, et qui domine une région beaucoup plus basse d'une altitude moyenne de 300 m et où les seuls reliefs notables sont créés par des sills doléritiques ; 50% de la superficie totale du bassin amont est comprise entre 200 et 400 m d'altitude (fig.8).

Les caractéristiques physiques des bassins du Bafing, du Bakoye et de la Falémé dont la réunion constitue 70% du bassin amont du Sénégal, sont rassemblées dans le tableau 1 (ROCHETTE, 1974). Les indices de pente décroissent rapidement de l'amont vers l'aval pour atteindre sur son cours inférieur une pente des plus faibles au monde (de 1 à 5 cm/km) (KANE, 1985).

Tableau 1 : *Caractéristiques morphométriques du bassin versant amont du Sénégal à Bakel (d'après ROCHETTE, 1974)*

Bassin versant	Superficie (km ²)		Périmètre (km)	IG (m/km)	Kc	Re		Altitudes (m)		
		%				L	l	maxi	mini	moy
BAFING (à Mahina)	38400	17,6	1514	1,01	2,16	701	55	1465	89	550
Bafing (à DakkaSaïdou)	15700	-	777	1,59	1,74	343	46	1465	307	-
BAKOYE (à Kalé)	85600	39,3	1645	0,37	1,57	697	123	873	102	-
FALEME (à Kidira)	28900	13,3	938	1,50	1,54	396	73	906	19	-
Falémé (à Fadougou)	9300	-	418	3,72	1,21	145	64	906	119	-
SENEGAL (à Bakel)	218000	100	3144	0,43	1,89	1418	154	1465	15	300

IG (indice général de pente), Kc (coefficient de compacité de Gravelius), Re (rectangle équivalent : L longueur et l largeur en km)

b) *Un réseau hydrographique dense et des profils en long très accidentés*

La densité du réseau hydrographique souligne la nature imperméable des terrains. A Bakel, le Sénégal a déjà reçu la quasi totalité de ses affluents. Les profils en long de tous les cours supérieurs sont très accidentés et entrecoupés de nombreux rapides. Le tableau 2 donne les principales caractéristiques du réseau hydrographique.

Tableau 2 : *Caractéristiques principales du réseau hydrographique du fleuve Sénégal en amont de Bakel (d'après ROCHETTE, 1974)*

Cours d'eau	Longueur (km)	Altitudes (m)		Dénivelé (m)	Pente moyenne (m/km)
		maxi	confluent		
BAFING (à Mahina)	750	960	88	872	1,16
BAKOYE (à Kalé)	561	760	88	672	1,20
FALEME (à Kidira)	625	928	18	910	1,46
SENEGAL (à Bakel)	1006	928	11	917	0,91

Le Bafing est la branche-mère du Sénégal bien que son bassin versant ne soit que de 38400 km². Il prend sa source dans le Fouta Djallon à 960 m d'altitude, à 17 km au NW de Mamou. Son cours supérieur est sinueux, entrecoupé de rapides. Il circule entre des massifs

granitiques et doléritiques qui l'obligent à prendre des orientations très diverses. D'orientation SW-NE, il reçoit successivement la Téné (dont les sources sont situées en contrebas du mont Kavendou, point culminant du bassin versant du fleuve Sénégal à 1465 m) et la Kioma sur sa rive gauche, puis après sa sortie du Fouta Djallon à Dakka-Saidou il reçoit sur sa rive droite, à 250 m d'altitude, le Balé 1 et le Balé 2, avant de prendre la direction SE-NW jusqu'à sa confluence avec le Balinn. Ensuite, il s'oriente N-S jusqu'à Bafoulabé où il reçoit les apports du Bakoye. A Bafoulabé, le Bafing a parcouru 750 km. De Bafoulabé à Bakel, le Sénégal a une direction SE-NW et traverse une zone plate, entrecoupée par quelques rapides ou par des chutes (seuil de grès de Talari, chutes de Gouina et de Félou). Ses principaux affluents rive droite sont la Kolimbiné (près de Kayes) et le Karakoro (à 70 km en amont de Bakel). En rive gauche, il reçoit un seul affluent important : la Falémé (à 50 km en amont de Bakel).

Le Bakoye a un bassin versant de 85600 km² et prend sa source aux monts Ménién (au NW de Siguiri), sur les contreforts du plateau Mandingue à 760 m d'altitude. Il atteint rapidement la cote 400 m après avoir traversé successivement une région granitique par une série de chutes et de rapides, puis une région sans relief accusé constituée de schistes birrimiens puis de grès. La direction générale de son cours est SE-NW et son principal affluent est le Baoulé qu'il reçoit au km 445 avant la confluence avec le Bafing au km 561.

Le Baoulé prend sa source à 750 m d'altitude dans la région SE de Bamako. Il traverse, dans la partie supérieure de son cours, des reliefs doléritiques, puis il débouche sur le plateau Mandingue où sa faible pente et le manque de relief font qu'il décrit de nombreux méandres. Il a une direction sensiblement N-S puis, après avoir dessiné deux immenses boucles, il rejoint le Bakoye en suivant une direction NE-SW.

La Falémé prend sa source au bowal *Séguéré Fougou* dans une région de plateaux doléritiques qui s'élèvent à 850 m. Le point culminant du bassin versant (928 m) se situe à l'Est de Fongolambi sur la ligne de crêtes qui le sépare du bassin de la Gambie. Dans l'ensemble, son cours a une orientation sensiblement parallèle à celui du Bafing. A sa sortie du Fouta Djallon, après Satadougou, la Falémé draine sur 300 km l'ensemble granitique et métamorphique birrimien de la *fenêtre de Kéniéba*. Ensuite, les 100 derniers kilomètres de son parcours se font sur des grès quartzitiques.

La Kolimbiné et le Karakoro rejoignent la rive droite du Sénégal après avoir traversé des zones basses et marécageuses. Leurs apports sont négligeables par suite de l'aridité croissante du climat. Leur bassins sont entièrement situés en zone sahélienne entre les isohyètes 200 et 500 mm.

2. Le bassin versant supérieur du fleuve Gambie (fig.9)

a) Une petite surface de forme triangulaire et un haut relief

Le cours supérieur de la Gambie, limité à Kédougou, s'étire entre 11°22' et 12°35' de latitude Nord et couvre une superficie de 7525 km², ce qui représente le dixième du bassin versant total du fleuve. Les principaux sous-bassins sont ceux de l'Oundou, de la Liti et de la Dima (tableau 3).

Le bassin versant supérieur de la Gambie a une altitude moyenne de 520 m. L'analyse hypsométrique (BAMBA, 1987) fait apparaître trois ensembles (fig.9) :

- 3,3% de la superficie du bassin est à plus de 1000 m d'altitude. Cette partie est constituée de hauts plateaux cuirassés aux pentes abruptes (de 30 à 40%) donnant naissance à des vallées très encaissées. Elle correspond au massif de Mali, véritable bastion culminant à 1538 m (mont Loura), et aux zones montagneuses de la région de Labé (massif de Limboko) à l'extrémité SW du bassin à proximité des sources de la Dima ;

- entre 1000 et 500 m, on trouve la majeure partie des terres (48,7% de la superficie totale) correspondant à des plateaux cuirassés dont la pente des versants varie de 10 à 15%. Cet ensemble couvre toute la partie occidentale et méridionale du bassin ;

- enfin, les points bas du paysage représentent 48% de la superficie et correspondent aux vallées alluviales qui s'étagent sous formes de glacis entre 500 et 120 m d'altitude. Elles se situent dans la partie NE et centrale du bassin en remontant profondément vers l'amont des cours supérieurs de la Liti, de l'Oundou, de la Koéla et de la Dima.

Tableau 3 : *Caractéristiques morphométriques du bassin versant amont de la Gambie (d'après DESCROIX, 1986)*

Bassin versant	Superficie (km ²)		Périmètre (km)	IG (m/km)	Kc	Re		Altitudes (m)	
		%				L	l	maxi	mini
OUNDOU (à la confluence)	1650	21,9	225	-	1,54	95	17	850	250
LITI (à la confluence)	1090	14,5	145	-	1,21	49	22	950	160
GAMBIE (à Kédougou)	7500	100	490	3,36	1,58	208	36	1538	120

IG (indice général de pente), Kc (coefficient de compacité de Gravelius), Re (rectangle équivalent : L longueur et l largeur en km)

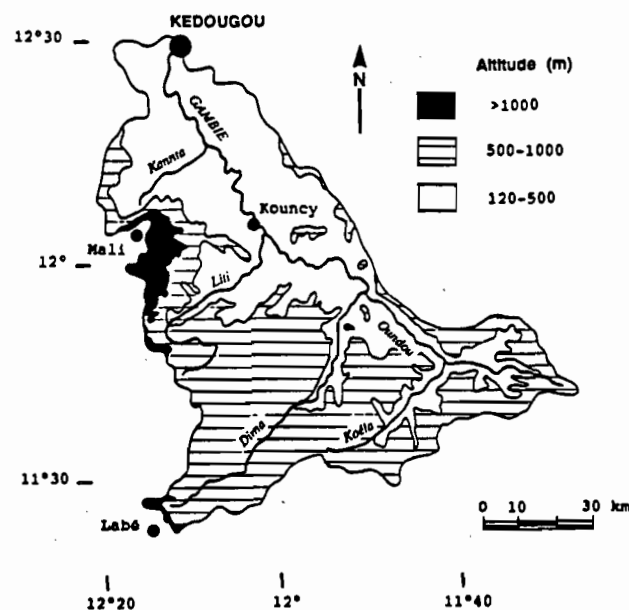


Fig. 9 : Le bassin versant amont de la Gambie (hypsométrie et réseau hydrographique principal).

b) Un réseau hydrographique dense

Le réseau hydrographique de la haute Gambie est bien hiérarchisé. Son chevelu est dense dans la partie montagneuse qui est bien arrosée. Le fleuve Gambie prend naissance sous le nom de Dima à proximité de Labé, sur le versant nord de la partie orientale du Fouta Djallon. De la source jusqu'à l'exutoire de Kédougou, il décrit un parcours sinueux d'environ 250 km, passant de 1125 m à 120 m d'altitude. Il s'oriente d'abord vers le NE, recevant au km 69 les modestes apports de la Silamé puis, en rive droite au km 111, ceux plus importants de l'Oundou et de la Koéla. De nombreuses chutes jalonnent le cheminement du cours supérieur à travers un paysage essentiellement cuirassé installé sur un substratum gréseux. A la confluence avec l'Oundou, la Gambie ne se situe plus qu'à 250 m d'altitude. Elle entreprend alors un

long périple en direction du NW, marqué par de nombreux méandres, jusqu'à l'exutoire de Kédougou. Au cours de cet itinéraire, elle se grossit en rive gauche, peu avant Kouny au km 162, des eaux de la Liti et, au km 213, des eaux de la Kannta issue des hauteurs du massif de Mali. Elle franchit la frontière sénégal-guinéenne à 30 km en amont de Kédougou. La partie supérieure et méridionale du bassin (en amont de la confluence avec la Liti) est la plus arrosée et fournit un écoulement quasi-permanent. La bordure orientale et les régions septentrionales ne sont fonctionnelles qu'en saison pluvieuse.

La Gambie présente un profil en long très irrégulier et accidenté. En de nombreux endroits, le cours d'eau franchit d'importants seuils rocheux formant des chutes (GAC & al., 1987a). Sur l'ensemble de son parcours, la pente moyenne de la haute Gambie est de 4 m/km. Cependant, son cours comprend trois parties distinctes : le cours supérieur, d'une longueur de 69 km, se limite à la Dima, en amont de la confluence avec la Silamé, la pente y est forte (12 m/km) et le régime de type torrentiel ; le cours moyen, long de 91 km, se déroule jusqu'à la confluence avec la Liti, la pente moyenne est de 3,6 m/km ; et le cours inférieur, qui s'achève à la station de Kédougou, d'une longueur de 98 km, a une pente faible de 0,5 m/km. Enfin, les pentes moyennes des principaux affluents sont respectivement 13,5 m/km pour la Liti, 11,5 m/km pour la Silamé et 9,6 m/km pour l'Oundou (DESCROIX, 1986).

3. Le bassin versant supérieur du fleuve Niger (fig.10)

a) Une forme ovoïde et un relief peu accidenté

Le bassin versant du Niger supérieur est généralement arrêté à Koulikoro, située en aval de Bamako, 250 km après Siguiri. Ici, l'exutoire du haut Niger a été fixé à la station de Siguiri ; son bassin couvre alors une superficie de 67600 km² et a une forme ovoïde. Il s'étend entre 8°35' et 12° de latitude N, et entre 8°45' et 11°30' de longitude W. Il est encadré au Nord par le plateau Mandingue qui longe le fleuve, à l'Ouest par le Fouta Djallon et au Sud par les monts Nimba. Seuls les extrémités ouest et sud sont accidentés (fig.10) : 1,6% seulement de la superficie totale a une altitude supérieure à 1000 mètres, 28,6% est comprise entre 1000 et 500 m et 69,8% entre 500 et 300 m. L'altitude moyenne du bassin est de 510 m.

b) Un réseau hydrographique en éventail

Le Niger supérieur est constitué par la réunion de quatre branches mères de même importance (tableau 4) et qui prennent leurs sources sur le versant oriental du Fouta Djallon et dans le massif qui le prolonge vers le SW.

Tableau 4 : *Caractéristiques principales du réseau hydrographique du fleuve Niger en amont de Siguiri*

Cours d'eau	exutoire	Superficie (km ²)	Longueur (km)	Altitudes (m)		Dénivelé (m)	Pente moyenne (m/km)
				maxi	mini		
DIOLIBA	Kouroussa	18 600	415	800	360	440	1,06
NIANDAN	confluence	12 700	365	700	360	340	0,93
MILO	confluence	13 500	490	1050	350	700	1,43
TINKISSO	confluence	19 800	620	983	340	640	1,03
NIGER	Siguiri	67 600	600	1050	340	710	1,2

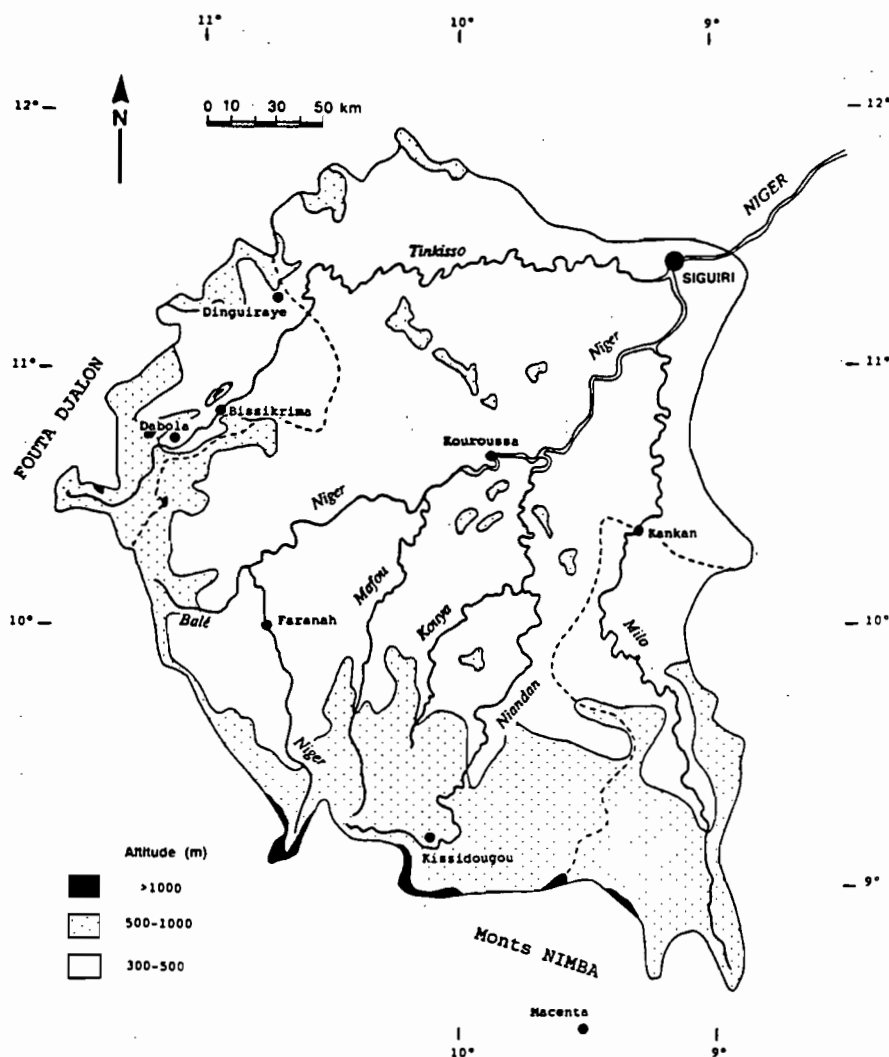


Fig. 10 : Le bassin versant amont du Niger (hypsométrie et réseau hydrographique principal).

Le Niger (ou Diolibà) prend sa source à 800 m d'altitude à la frontière de la Guinée et du Sierra Leone. Son cours est tout d'abord torrentiel : il perd 300 m d'altitude sur 40 km. Jusqu'à sa confluence avec le Balé, il est de direction S-N et reçoit des rivières issues de l'extrémité méridionale du Fouta Djallon et dont la pente assez forte explique les pointes de crue élevées enregistrées à l'amont de Kouroussa. Après le Balé, il prend une direction SW-NE qu'il gardera jusqu'à Siguiri. Au km 480, il reçoit sur la rive droite le Mafou, son premier affluent important et dont la pente est relativement forte. Immédiatement après, il descend une dizaine de mètres par une série de rapides, seul accident de son parcours. Peu après Kouroussa, il reçoit le Niandan au km 410. Depuis ce point, il conserve le même aspect jusqu'à Bamako : une plaine d'inondation notable et quelques îles au milieu d'un lit apparent qui s'élargit progressivement, une pente à peu près constante voisine de 12 cm/km. Il reçoit le Milo à 50 km en amont de Siguiri puis le Tinkisso 44 kilomètres plus loin.

Le Niandan prend sa source à 700 m d'altitude à proximité du Mafou. Sa pente est au départ moins élevée que celle du Niger. D'orientation W-E jusqu'à Kissidougou, il prend ensuite la direction générale S-N qu'il conserve jusqu'au Niger. Après avoir reçu sur sa rive gauche son principal affluent, la Kouya, et à la suite de plusieurs séries de rapides, il change d'aspect. Il coule alors sur une largeur de 150 à 200 m et sa pente n'est plus que de 15 cm/km.

Le Milo est constitué par la jonction de plusieurs petits ruisseaux qui drainent un vaste plateau compris entre 800 et 1050 m d'altitude au NE de Macenta. De tous les affluents

du Niger, c'est celui dont la source est la plus élevée et une des plus méridionales, c'est pourquoi son débit d'étiage est élevé. De pente relativement faible au début de son cours (42 cm/km), il descend ensuite, rapidement, du plateau pour trouver la plaine où il prend le même aspect que le Niandan.

Le Tinkisso est le seul grand affluent en provenance du Fouta Djalon. Il prend sa source à 983 m d'altitude, au signal de Konko, dans les monts Moulo, à l'extrémité SE du Fouta Djalon. Il descend très rapidement à 700 m et a une direction générale W-E constante. A Bissikrima, sa pente est de 50 cm/km, elle passe rapidement à 20 cm/km puis 5 cm/km, pente qu'il conserve sur les 400 km qui constituent son cours moyen et inférieur. Il présente alors d'innombrables sinuosités jusqu'à sa confluence avec le Niger. Tous ses affluents présentent les mêmes caractéristiques : faible pente et nombreux méandres.

4. Les bassins versants côtiers guinéens (Tominé et Konkouré)

a) Le bassin versant supérieur de la Tominé (tableau 5)

Tableau 5 : Caractéristiques principales du réseau hydrographique du fleuve Tominé en amont de Gaoual

Cours d'eau	exutoire	Superficie (km ²)	Longueur (km)	Altitudes (m)		Dénivelé (m)	Pente moyenne (m/km)
				maxi	mini		
KOUMBA	pont	2 100	100	1287	180	1120	11,2
OUESSEGUELE	confluence	900	90	900	180	720	8,0
BANTALA	confluence	1 900	90	1500	150	1350	15,0
KOUMBA	confluence	6 100	190	1500	100	1400	7,4
TOMINE	confluence	3 300	140	1000	100	900	6,4
TOMINE	Gaoual	9 400	140	1500	80	1480	10,6

Le bassin versant supérieur de la Tominé, limité à Gaoual, couvre une superficie de 9400 km² et constitue la partie NW du Fouta Djalon (fig.4).

La Tominé prend sa source à 1000 m d'altitude sur le versant ouest du plateau cuirassé situé au Nord de Téliélé. D'orientation NE-SW sur les 60 premiers kilomètres, elle prend une direction générale S-N sur les 80 kilomètres restant avant Gaoual. Dans son cours supérieur, elle dévale rapidement les contreforts occidentaux du Fouta Djalon (16 m/km de pente moyenne) et atteint la cote 200 après seulement 50 kilomètres d'existence. Le seul affluent important est la Koumba, qu'elle reçoit un kilomètre avant Gaoual. A la confluence, la Tominé a drainé un bassin versant de 3300 km². Après son passage à Gaoual (à 80 m d'altitude), elle devient la Koliba puis, en Guinée Bissau, le Rio Corubal qui atteint péniblement l'océan Atlantique.

La Koumba, qui draine un bassin versant de 6100 km², possède trois affluents majeurs et a une longueur de 190 km alors que la Tominé n'a parcouru à leur confluence que 140 km. La Koumba prend sa source à 1287 m au mont Kokou, point culminant du *Fello Ali*, à 20 km au Nord de Labé, non loin des sources de la Dima et de la Kakrima. Tout d'abord d'orientation W-E puis S-N, elle acquiert sa direction générale E-W au bout de 40 km. Torrentielle dans les 20 premiers kilomètres, elle atteint la cote 500 après 30 km de parcours seulement et la cote 200, 60 kilomètres plus loin. Elle est à la cote 100, 10 kilomètres avant sa confluence. Elle reçoit en rive droite, au km 70, la Tiri qui draine les contreforts méridionaux du massif de Mali, et en rive gauche, au km 100, l'Ouességuelé qui prend sa source à 900 m d'altitude à proximité de celle de la Tominé. Enfin, son dernier affluent

majeur est la Bantala en rive droite, au km 130 ; cette rivière prend sa source à 1500 m d'altitude au mont Loura (point culminant du Fouta Djallon) mais le premier tiers de son réseau hydrographique dendritique n'est fonctionnelle qu'en saison pluvieuse.

b) *Le bassin versant supérieur du Konkouré* (tableau 6)

Tableau 6 : *Caractéristiques principales du réseau hydrographique du fleuve Konkouré en amont de Konkouré*

Cours d'eau	exutoire	Superficie (km ²)	Longueur (km)	Altitudes (m)		Dénivelé (m)	Pente moyenne (m/km)
				maxi	mini		
SALA	confluence	450	60	1200	550	650	10,8
KAKRIMA	confluence	5 700	190	1300	180	1120	5,9
KOKOULO	confluence	2 200	160	1200	300	900	5,6
KONKOURE	confluence	4 200	170	900	180	720	4,2
KONKOURE	Konkouré	9 900	180	1090	150	940	5,2

Le bassin versant supérieur du Konkouré, limité à Konkouré, couvre une superficie de 9900 km² et constitue la partie SW du Fouta Djallon (fig.4).

Le Konkouré prend sa source au signal de *Bilima Kanté* à 1090 m d'altitude dans le Sud du Fouta Djallon, à 10 km à l'Est de Mamou. D'axe général E-W, il reçoit de nombreux affluents drainant le contrefort occidental du plateau de Dalaba. Jusqu'à la cote 400, sa pente moyenne est de 10 m/km, puis il atteint péniblement la cote 300 au bout de 60 kilomètres à travers un paysage gréseux. Avant sa confluence avec la Kakrima en rive droite au km 160, sa pente passe de 1,7 à 2,5 m/km : son cours est coupé de plusieurs rapides. A Konkouré, il a parcouru 180 km.

La Kakrima est le principal affluent du Konkouré. Elle draine un bassin versant de 5700 km² sur 190 km de long. Elle prend sa source à 1287 m au mont Kokou (comme la Koumba), au Nord de Labé. Elle reçoit la Sala en rive gauche, cet affluent prend sa source à proximité de la Dima. Ensuite, elle s'écoule entre le plateau de Télimélé et le plateau de Labé suivant une direction générale NNE-SSW ; sa pente (6,5 m/km) est relativement constante jusqu'à sa confluence avec le Kokoulo, 20 km avant de se jeter dans le Konkouré. Ces derniers 20 kilomètres sont entrecoupés de nombreux rapides. Le Kokoulo est un affluent d'importance équivalente à la Kakrima (tableau 6) ; circulant dans un même paysage gréseux, il en a les mêmes caractéristiques et le même aspect. Il prend sa source sur le plateau de Labé au Sud de la ville, et on peut noter ses très belles chutes qui constituent d'une part, un site touristique renommé et, d'autre part, dont la force hydraulique est exploité pour fournir de l'énergie électrique à une grande partie du pays.

III - LE FOUTA DJALON : EVOLUTION ACTUELLE DU BIOTOPE

A - UNE POPULATION ESSENTIELLEMENT RURALE

Le Fouta Djallon est une zone fortement peuplée. La densité moyenne est de 25 hab/km². Certaines zones dépassent les 100 hab/km² ; le maximum est atteint à Labé où on enregistre 640 hab/km² avec près de 50000 habitants (GUPTA, 1987). Ces populations sont en majorité rurales (de 85 à 90%). La partie centrale du massif est occupée par des Peuls et des Mandingues ; les minorités sont les Bassaris, les Soninkés, les Kogniaguys et les Sarakolés. Les

propriétaires terriens sont des Foulas (ethnie Peul), les autres ethnies sont consultatives bien qu'elles constituent maintenant la majorité de la population. Toute la population est islamisée, ce qui conditionne beaucoup les attitudes socio-économiques.

Au Nord, dans la région de Kédougou, les Bassaris représentent l'ethnie dominante devant les minorités Peuls et Wolofs. La densité de population y est nettement moins importante (6 hab/km²) ; Kédougou regrouperait environ 10000 habitants (DESCROIX, 1986).

B - L'UTILISATION DU BIOTOPE

L'homme extrait du sol tous les aliments qu'il consomme et la grande partie des matériaux qu'il utilise pour sa protection. Il est successivement agriculteur, éleveur et artisan.

Deux systèmes de culture existe : un système individuel (ou familial) et un système communautaire. Le système individuel consiste en une petite exploitation privée correspondant à une famille. Traditionnellement laissée à la libre gestion des femmes, on y cultive sous les arbres fruitiers (manguiers et orangers), maïs, haricot, arachide, taro, manioc, patate, aubergine, gombo, oignon. Le système communautaire est le domaine des hommes. Ce système d'entraide est appelé "kilé". Il consiste en une culture itinérante de fonio, céréale qui forme la base de l'alimentation. L'entretien des sols est assuré par la pratique d'une jachère de 7 ans.

L'élevage ne constitue pas une spéculation agricole sur laquelle vivent les villageois. On trouve un nombre important de petits ruminants (peu de moutons et beaucoup de chèvres) et quelques bovins.

C - DISCUSSION : LA DEGRADATION DU MILIEU

Les récoltes sont de plus en plus faibles du fait de la baisse de fertilité des sols, de l'insuffisance des pluies depuis les années 70 et de l'endommagement des cultures par certains animaux sauvages (criquets, cynocéphales, termites, chenilles). En effet, dans tout le Fouta Djallon, la dégradation du milieu naturel est visible à l'échelle humaine (PELISSIER, 1949 ; MAIGNIEN, 1954 ; TRICART, 1956 ; GUPTA, 1987). Cette évolution négative rapide est consécutive à la concomitance de trois facteurs indépendants : le climat, le facteur édaphique et l'action anthropique. La région est assujettie depuis les années 70 à un déficit hydrique important qui a entraîné l'accentuation du contraste entre saison sèche et saison humide. L'altération ferrallitique des roches alumino-silicatées, qui remonte au Crétacé ou Jurassique, et qui est accentué par le climat actuel, a contribué au cuirassement des sols. Enfin, l'explosion démographique entraînant une charge de plus en plus importante sur ce milieu fragile n'a fait qu'accentuer les effets néfastes des deux facteurs précédents.

Il est donc urgent de lutter contre la surexploitation de ce milieu menant vers la fragilité écologique, vers les défrichements inconsidérés sur les pentes provoquant l'érosion et l'écoulement accéléré, vers la régénération des terrains de pâturage par le feu et les pâturages non contrôlés causant l'élimination à long terme de la couverture végétale.

IV - CONCLUSION

Bien que le tapis végétal se modifie en allant du Sud au Nord, la forêt s'éclaircissant et passant progressivement à la savane arborée et arbustive, les mêmes paysages morphologiques se retrouvent partout. Les "donghols", monotones et vastes plateaux ; les "fellos", buttes isolées sur les plateaux offrant des pentes sévères et qui donnent tous les sommets ; les "aïndés", vallées profondes et souvent étroites qui découpent le massif en "cases de damier" (PELISSIER,

1949), et qui font dire à H. CHURCH que : "*some 5000 squares miles are above 3000 feet ; these figures might indicates rather unimpressive mountains but on the contrary they are majestic, because of intense dissection*" (in *West Africa*, 1957, p.285).

CHAPITRE II

CADRE GEOLOGIQUE ET PEDOLOGIQUE DU DOMAINE LATERITIQUE

Ce chapitre est consacré à l'histoire géologique du Fouta Djalou, à la définition des grands ensembles lithologiques et pédologiques. Un intérêt particulier est donné à la description des différentes unités géologiques. Ce qui suit est donc une synthèse bibliographique des travaux les plus récents et tente de donner un aperçu simple de cette zone géologique fortement bouleversée. Ensuite, un rapide aperçu des ressources hydrogéologiques est dressé avant de décrire les principaux types de sols.

I - CADRE GEOLOGIQUE

A - LE CRATON OUEST-AFRICAIN

Le Fouta Djalou se situe sur la bordure SW du craton ouest-africain. Ce vaste complexe géologique, stabilisée à la fin de l'orogénèse éburnéenne vers 1800-1600 Ma, est limité par des zones mobiles formées ou rajeunies au cours de cycles orogéniques ultérieurs, panafricains (660 et 550 Ma), hercynien (250 Ma) ou encore alpin (60 Ma). La conception classique considère le craton ouest-africain comme un ensemble continu s'étendant de la Mauritanie et de l'Algérie, au Nord, à la Côte d'Ivoire et au Ghana, au Sud (BESSELES, 1977). Cette plate-forme cratonique est constituée d'une dorsale de socle au Nord (*dorsale Réguibat*) et d'une autre au Sud (*dorsale de Léo*) et, entre les deux, d'une couverture sédimentaire (*bassin de Taoudéni*) possédant deux fenêtres de socle (*fenêtre de Kayes* et *fenêtre de Kéniéba*) (fig.11).

B - HISTOIRE GEOLOGIQUE DE LA REGION

L'histoire géologique de la région est retracée à partir des récents travaux de VILLENEUVE (1984) et DEYNOUX & *al.* (1989b) qui complètent les études antérieures de BASSOT (1966, 1969), TROMPETTE (1973), DILLON & SOUGY (1974), DEYNOUX & TROMPETTE (1976), BESSELES (1977), DEYNOUX (1980). Les grands événements géologiques de la région peuvent être retracés en huit épisodes.

1. L'orogénèse éburnéenne (1800 Ma) constitue la fin du cycle birrimien. Elle a affecté toutes les roches formées depuis le cycle libérien (3000-2500 Ma) (BESSELES, 1977).

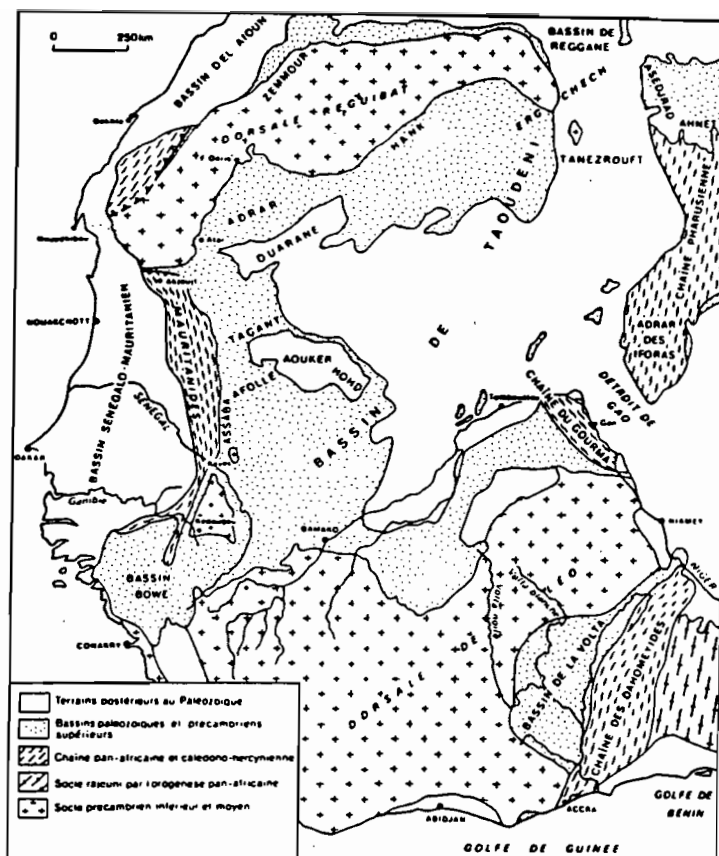


Fig. 11 : Carte géologique schématique de l'Ouest africain (ROSSI & al., 1984).

2. Vers 1000 Ma, des mouvements distensifs débutant par des épanchements rhyolitiques individualisent le bassin de *Madina Kouta* dont les sédiments, d'abord continentaux puis épicontinentaux à marins, indiquent l'ouverture d'une dépression orientée E-W.

3. Cet épisode prend fin vers 650 Ma au début du Briovérien (BASSOT, 1966) suite à la subduction vers l'Ouest d'un rift de type mer Rouge provoquant la collision de deux masses continentales donnant naissance à la chaîne du Panafricain I des Bassarides (VILLENEUVE, 1984 ; VILLENEUVE & DALLMEYER, 1987). Cette chaîne, d'orientation SSW-NNE, forme dans sa partie nord une bande de 10 à 30 km de large en bordure des dépôts tertiaires du golfe sénégal-mauritanien, prenant en écharpe la limite occidentale des parties amont des bassins versants des fleuves Sénégal et Gambie. Vers le Sud, dans le bassin continental du fleuve Gambie, elle s'élargit puis se divise en deux branches distinctes (GAC & al., 1987a). Les trois grandes unités lithostructurales, étirées en bandes de direction N-S, sont d'Est en Ouest : l'unité A qui représente la bordure de la paléomarge passive orientale, l'unité B qui correspond à la province du rift océanisé devenue active lors de la subduction et l'unité C qui est la paléomarge continentale ouest, active lors de la subduction (VILLENEUVE, 1984).

4. Ces unités sont recouvertes en discordance par des dépôts molassiques du Protérozoïque terminal et du Cambrien inférieur. Ils représentent la phase d'érosion de la chaîne du Panafricain I des Bassarides. Cette période d'érosion et de dépôt a été peu marquée par les plissements provoqués par la phase du Panafricain II (vers 550 Ma) bien développée au Sud, en Sierra Leone, où elle est à l'origine de la chaîne des Rokalides (VILLENEUVE, 1988).

5. Après ces derniers ressauts tectoniques, le Gondwana stabilisé (PIPER, 1976) est le théâtre d'une sédimentation discontinue jusqu'à la fin du Dévonien. Les dépôts dus à l'érosion des Rokalides s'accumulent en Guinée dans le bassin de *Youkounkoun* et dans le bassin *Bové*. Cet important bassin sédimentaire dessine une vaste structure synclinale de plus de 50.10³ km² entre Forécariah (Guinée) et Sonaco (Guinée-Bissau). Son extension originelle devait cependant être plus importante. En effet, on lui attribue également le chapelet de buttes témoins qui se

relaient depuis la Guinée-Bissau jusqu'au SE du Sénégal et le plateau de l'Assaba, en Mauritanie, au Nord de Bakel dans le *bassin de Taoudéni*.

6. Dès la fin du Dévonien supérieur et au Carbonifère (vers 345 Ma), les formations du *bassin Bové* ont été affectées, essentiellement dans la partie Nord, par les phases tectoniques compressives hercyniennes de la chaîne des Mauritanides. A cette structuration hercynienne synclinale, succède une structuration post-hercynienne en marche d'escalier liée à l'ouverture de l'Atlantique. De la fin du Permien au début du Jurassique (DILLON & SOUGY, 1974), ces phénomènes distensifs se sont accompagnés de remontées de magma basique le long de nombreuses cassures. Elles se sont traduites par l'injection de dolérites dans tous les terrains encaissants, les sills de dolérites sont cependant plus importants dans les formations tabulaires argileuses.

7. Après ce stade initial du rift médio-atlantique marqué par la fissuration des marges et un volcanisme doléritique important, une période d'émersion et d'érosion arase les plis et les bombements hercyniens. La mer envahit les régions côtières du Sénégal au Jurassique (vers 180 Ma) et s'avance vers l'intérieur au Crétacé. La transgression est maximale au Lutétien (vers 45 Ma, Eocène moyen) ; la mer occupe alors la moitié ouest des deux bassins fluviaux du Sénégal et de la Gambie. A la fin de l'Eocène, un bombement du socle dû à des remontées mantelliques individualise le massif du Fouta Djallon. La mer se retire, l'érosion entaille les reliefs et le matériel gréseux du Continental terminal s'empile au-dessus des séries marines éocènes. Au Pliocène, le continent actuel est émergé. La surrection du Fouta Djallon s'étend du Tertiaire au Quaternaire et a engendré la topographie actuelle. On note encore quelques manifestations locales d'hydrothermalisme (GIRARD, 1985 ; GAC, 1986 ; GIRARD & *al.*, 1989).

8. Au cours du Quaternaire ancien et moyen, de vastes glacis étagés en trois niveaux se sont formés, s'ordonnant en fonction du réseau hydrographique. Le climat a ensuite évolué vers la sécheresse pendant le Würm récent ; les fleuves ont alors creusé leur lit dans les grès du Continental terminal et dans les séries marines sous-jacentes. Les cours d'eau ont repris les galets des terrasses anciennes pour former les "*graviers sous berges*" (VOGT, 1959) en bordure des plaines alluviales. Les dernières phases de l'évolution sont marquées par d'importantes modifications bioclimatiques au cours de la seconde moitié du Pléistocène supérieur et de l'Holocène (AUDIBERT, 1970 ; MICHEL, 1973 ; MONTEILLET, 1988 ; DIOUF, 1989 ; GAC & ORANGE, 1990).

C - LES GRANDS ENSEMBLES GEOLOGIQUES

L'esquisse géologique (fig.12) est extraite de la notice de la carte géologique de l'Afrique Occidentale (au 1/2.000000^{ème}) publiée par le BRGM en 1960, des notices des cartes géologiques de Guinée (au 1/1.000000^{ème}, Service des Mines, Conakry, 1985) et du Mali (au 1/1.500000^{ème}, Ministère du Développement Industriel, DNGM, Bamako, 1981). Elle a été précisée grâce à de nombreux travaux dont les plus exhaustifs sont ceux de CHETELAT (1933), GOLOUBINOW (1950), DARS (1961), BASSOT (1969), MACHENS (1973), MICHEL (1973), TROMPETTE (1973), DILLON & SOUGY (1974), BESSOLES (1977), DEYNOUX (1980), VILLENEUVE (1984), DEYNOUX & *al.* (1985), MARCHAND & *al.* (1987), DEYNOUX & *al.* (1989), GIRARD & *al.* (1989) et VILLENEUVE (1989).

Le socle est recouvert par les formations allochtones du Protérozoïque et n'apparaît qu'en deux fenêtres. Ces formations sédimentaires très anciennes ont été fortement plissées, métamorphosées et injectées de roches volcaniques et granitiques. Pendant le Cambrien, d'épaisses séries sédimentaires principalement gréseuses se sont déposées ; elles sont affectées par des plissements, métamorphosées à l'Ouest et traversées de venues doléritiques. Ces grès et ces dolérites forment les principaux reliefs des bassins versants supérieurs de la Gambie, du Sénégal et du Niger.

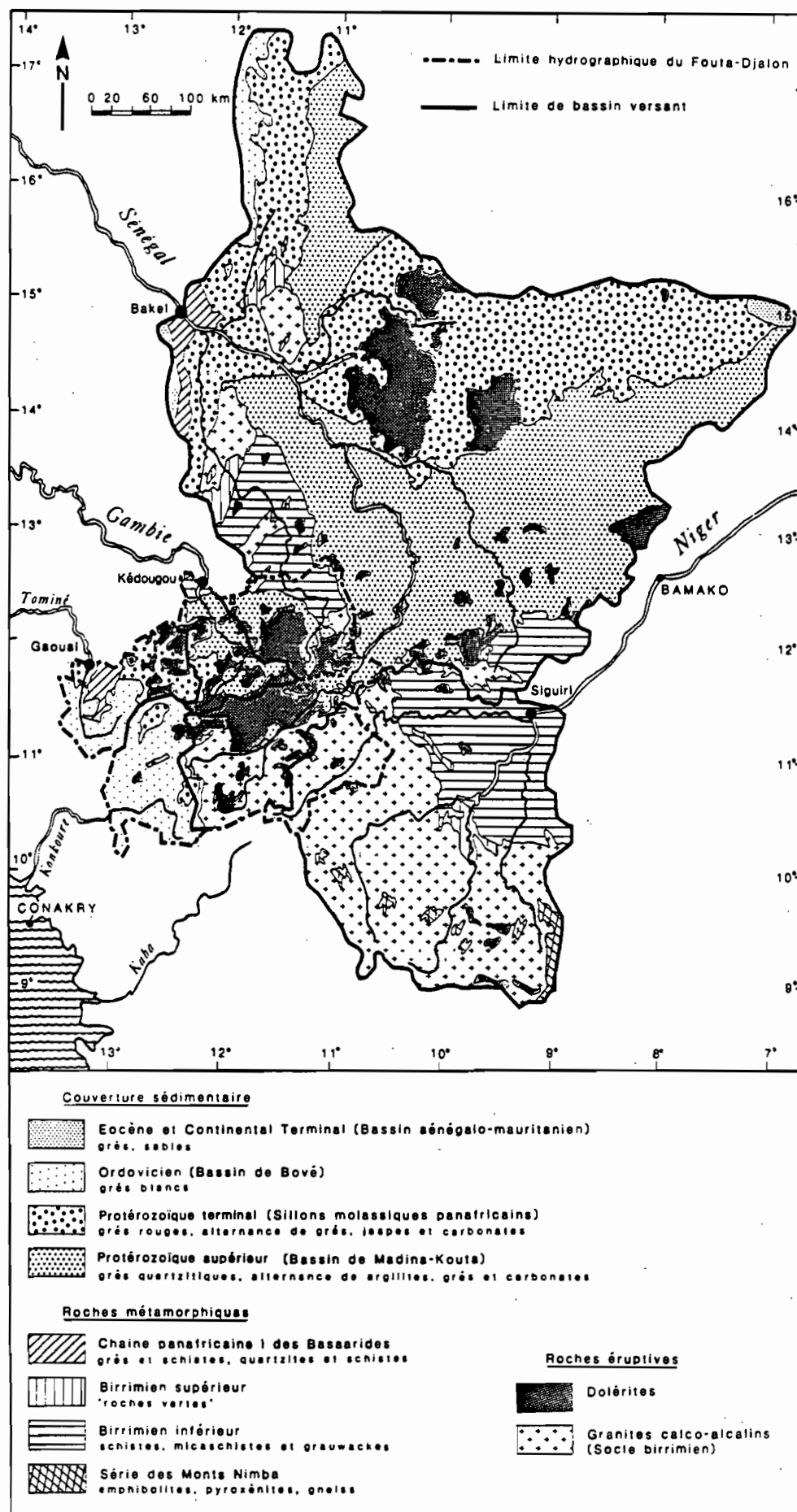


Fig. 12 : Esquisse géologique du Fouta Djallon et des bassins versants supérieurs du Sénégal et du Niger.

1. Les formations birrimiennes du socle

Les affleurements du socle sont représentés par les fenêtres de Kayes, au Nord, et de Kéniéba, à l'Ouest, et par l'extrémité septentrionale de la dorsale de Léo au Sud. Le socle est constitué de formations birrimiennes faiblement métamorphisées d'origine sédimentaire ou éruptive et ayant subi diverses granitisations.

Les séries métamorphiques sont formées d'un ensemble de schistes et grauwackes, et de roches volcaniques basiques faiblement métamorphisées. Le premier ensemble, attribué au Birrimien inférieur, s'étend de part et d'autre du cours supérieur de la Falémé et, surtout, forme un cercle d'une centaine de kilomètres de rayon autour de Siguiri dans le bassin du Niger. Le faciès schisteux comprend des schistes sériciteux, des talcschistes et des micaschistes, le plus souvent à muscovite ; les grauwackes et quartzites représentent d'anciens grès feldspathiques mal classés. On trouve également des cipolins en deux groupes d'affleurement bien individualisés d'une puissance de 2300 m : l'un est situé à l'Ouest et au SW de Kédougou, l'autre sur la Falémé à l'extrémité SE du *granite de Saraya* (dans la fenêtre de Kéniéba). Ce sont des calcaires dolomitiques pouvant évoluer vers des faciès siliceux ou marneux (BASSOT, 1966). GOLOUBINOW (1936, 1950) signale également quelques calcaires recristallisés, des quartzites et des schistes charbonneux au sein d'arkoses schisteuses dans la série métamorphique de Siguiri. Les roches volcaniques, attribuées au Birrimien supérieur, sont désignées sous le terme de "*roches vertes*". Elles sont moins répandues que la formation précédente. On les trouve du Nord au Sud, au Nord du granite de Kayes dans le bassin versant du Sénégal, au Nord de Kédougou dans les bassins versants de la Gambie et de la Falémé, à l'Ouest de Kankan dans le bassin versant du Niger. Ce sont des métaandésites ou metabasaltes associés à des tufs, grauwackes, jaspes et argilites (BASSOT, 1966 ; MICHEL, 1973).

Ces deux séries métamorphiques ont subi diverses granitisations liées à l'orogénèse éburnéenne. Les granites syntectoniques sont de loin les plus répandus ; ils constituent le vaste ensemble granito-gneissique de la *dorsale de Léo* située à l'Est, au Sud et à l'Ouest des formations métamorphiques de Siguiri. On les retrouve également dans la *fenêtre de Kayes* et dans la *fenêtre de Kéniéba*. Malgré la grande diversité de leur chimisme qui évolue de la granodiorite au granite alcalin, ils sont classés dans la catégorie des granites calco-alcalins (GOLOUBINOW, 1950). Dans la région de Kissidougou, on trouve en leur sein des séries à amphibolites, pyroxénites et gneiss que BESSOLES (1977) décrit comme étant les traces du vieux socle archéen. Les granites post-tectoniques sont très localisés et de faible importance.

2. La couverture sédimentaire du Protérozoïque supérieur du bassin de Madina Kouta

En bordure du socle, des couches sédimentaires souvent très épaisses reposent en discordance majeure sur les séries métamorphiques et leurs intrusions granitiques. Ces dépôts, essentiellement gréseux, correspondent à la couverture sédimentaire protérozoïque supérieur du *bassin de Madina Kouta* qui occupe la majeure partie des bassins versants supérieurs du Sénégal et de la Gambie. VILLENEUVE (1984), en s'appuyant sur les travaux de BASSOT (1966) et TORCHINE (1976), distingue, au Sénégal oriental, le *groupe de Ségou* à la base et le *groupe de Madina Kouta* en discordance sur le premier ou directement sur le socle. Ces deux groupes comprennent chacun une importante formation gréseuse plus ou moins quartzitique et très dure, respectivement la *formation de Dindéfello* et la *formation de Kannta*, reposant sur des séquences décimétriques argilo-carbonatées et gréseuses.

Dans le paysage, cette couverture constitue le sud du plateau de l'Afollé au Nord de Kayes, le plateau Mandingue d'axe E-W et dont le contact avec le socle est matérialisé par la célèbre *falaise de la Tambaoura*, et enfin, le NE du Fouta Djallon au Sud de Kédougou. Les couches, d'une puissance de 600 m à 1500 m, ont toujours un faible pendage de direction Est ou NE sur le plateau Mandingue ou Sud dans le Fouta. La lithostratigraphie de cette vaste couverture sédimentaire (Sénégal oriental, Mali occidental, Affolé-Assaba, Adrar de Mauritanie) a donné lieu à de nombreuses divergences (AYME & al., 1962 ; BENSE, 1964 ; SIMON, 1979 ; SIMON & al., 1979 ; ROSSI, 1982 ; ROSSI & al., 1984 ; MARCHAND & al.,

1987 ; DEYNOUX & *al.*, 1989a ; PROUST, 1990) dont une synthèse est proposée dans GAC & ORANGE (1990). Enfin, il importe de préciser que sur toute l'étendue du plateau Mandingue les bancs de grès siliceux durs présentent de grandes fissures. Ces diaclases, bien visibles sur photos aériennes, se recoupent sous des angles divers et forment un quadrillage parfois serré. De nombreux cours d'eau, même les plus importants, empruntent ces discontinuités et changent brusquement de direction à plusieurs reprises. Ce réseau de diaclases joue un rôle primordial dans la morphogénèse.

3. La chaîne panafricaine des Bassarides

VILLENEUVE définit la partie sud de l'unité A par le *groupe de Termesse* qui correspond en partie à la *série de la Falémé* identifiée au Sénégal par BASSOT (1966) et plus couramment appelé *Falémien*. Cette série forme une bande étroite d'une vingtaine de kilomètres s'étalant de Gaoual à Bakel ; elle montre une succession de jaspes, schistes et grès, les grès en constituant le niveau caractéristique. La partie nord est composée de roches faiblement métamorphiques et s'étire de Bakel, dans le bassin du Sénégal, à Mbout, en Mauritanie, en se prolongeant vers le NW jusqu'à Akjoujt. C'est la *série de Bakel-Mbout* (MICHEL, 1973) constituée de quartzites et de schistes. Les quartzites sont bien représentées dans la région de Bakel ; il s'agit de quartzites clairs, blancs, massifs et lités. Vers l'Ouest, les formations de cette unité plongent sous les dépôts du Tertiaire, les pendages étant de l'ordre de 30° à 40°.

L'unité B correspond au *groupe de Guingan* (VILLENEUVE, 1984) ou *série des Bassaris* (BASSOT, 1966). Elle se situe dans un étroit couloir orienté NNE-SSW limité par des failles entre l'unité A à l'Est et la couverture molassique de Youkounkoun à l'Ouest. Elle est constituée de matériaux volcaniques basiques, de tufs volcaniques et de sédiments détritiques à association peu différente de celle rencontrée dans l'unité A.

Enfin, l'unité C, absente de la zone étudiée, comprend plusieurs groupes aux faciès pétrographiques variés et ayant subi des degrés divers de métamorphisme.

4. Les sillons molassiques panafricains du Protérozoïque terminal et Cambrien inférieur

La couverture molassique représente la phase d'érosion de la chaîne du Panafricain I des Bassarides et correspond au comblement des dépressions disposées en sillons parallèles à la chaîne. La particularité de cet ensemble est de débiter par un marqueur lithostratigraphique lié à l'épisode glaciaire de l'Eocambrien, d'une continuité extraordinaire sur des milliers de kilomètres et connu sous le nom de "*la triade*" (DEYNOUX & *al.*, 1989b ; GAC & ORANGE, 1990).

Dans le bassin versant de la Gambie, VILLENEUVE (1984) distingue le *groupe de Mali*, ensemble inférieur essentiellement argilo-gréseux et le *groupe de Youkounkoun*, ensemble supérieur à grès rouges situé entre les unités B et C de la chaîne panafricaine. Le *groupe de Mali* débute par un conglomérat argilo-gréseux d'origine glaciaire surmonté par un niveau de calcaires dolomitiques auquel succèdent dans certains cas des jaspes, pélites et grès (BASSOT, 1966). Cet ensemble à teinte dominante verte est plissé vers l'Ouest dans les zones de faiblesse de la chaîne aux abords des failles. Il repose en discordance sur le socle birrimien, sur le groupe horizontal de Madina Kouta et sur les unités A et C de la chaîne des Bassarides. Les caractères principaux des formations de ce groupe (dépôts homogènes, présence de dépôts d'origine glaciaire à la base, absence de matériaux volcaniques, plissement relativement faible et absence de métamorphisme) permettent de les différencier de celles du *groupe de Youkounkoun* de la chaîne panafricaine. VILLENEUVE (1984) a interprété les dépôts de la base du *groupe de Mali* comme les premiers faciès molassiques mis en place dans un environnement en partie glaciaire et structurés par des phases panafricaines tardives liées à l'édification de la chaîne des Rokelides au Sierra Leone. Les autres dépôts molassiques du *groupe de Youkounkoun* seraient plus récents (post panafricain II). Ce dernier ensemble est essentiellement constitué de grès et de conglomérats ; il est à teinte dominante rouge ou brun-rouge. Le caractère peu évolué de ces sédiments indique un faible transport et un mauvais étalement dans des bassins profonds

bien circonscrits (2000 à 3000 mètres de puissance), probablement tectoniquement actifs et à subsidence rapide. Le métamorphisme de ces formations est très faible. Ces dépôts correspondent à l'épisode molassique de la chaîne des Rokelides.

Vers le Nord, l'équivalent du *groupe de Mali* est représenté par le *groupe de Bakoye pro parte* et le *groupe de Nioro* (ROSSI, 1982 ; ROSSI & al., 1984 ; VILLENEUVE, 1988, 1989 ; GAC & ORANGE, 1990). Ces formations silto-argileuses et à grès feldspathiques fins surmontent des dolomies calcaires à barytine qui coiffent les dépôts glaciaires de "*la triade*" (tillites et grès conglomératiques). Elles affleurent largement vers l'Est dans le bassin versant de la Kolimbiné et dans la région de Nioro (au Nord des plateaux Mandingues). Comme la plupart de ces roches sont très sensibles à l'érosion en milieu tropical, les différents niveaux de la série ont été largement déblayés. Ainsi à l'Ouest de Kayes, le long du Karakoro, on observe quelques rares affleurements de dolomies calcaires.

5. Les formations sédimentaires du Cambrien supérieur au Dévonien

Les sédiments paléozoïques sont surtout connus dans le *bassin Bové*. Dans le *bassin de Taoudéni*, ces formations paléozoïques sont situées en Mauritanie dans les plateaux de l'Assaba et du Tagant, dans la falaise du Hodh et, surtout, dans l'Adrar.

Les grandes subdivisions lithostratigraphiques du *bassin Bové* sont, de bas en haut, les *groupes de Pita, de Télimélé et de Bafata* dont les puissances sont de 300-600 m, 300 m et 100 m. VILLENEUVE (1984) a attribué à ces trois groupes respectifs des âges cambro-ordovicien, silurien et dévonien. Les deux derniers groupes apparaissent uniquement au centre du *bassin Bové* en Basse Guinée. Le *groupe de Pita*, base de la série, est représenté dans le plateau de l'Assaba, dans la partie occidentale du Fouta Djallon et par trois buttes témoins dans le bassin de la Gambie. Il se subdivise en trois formations correspondant à trois types de dépôts différents. A la base, la *formation de Guéméta* (grès feldspathiques et conglomérats souvent rouges) correspond probablement à des dépôts fluviatiles comblant des paléodépressions locales importantes de la chaîne panafricaine à relief encore marqué ; au centre, la *formation de Kindia* (grès blancs à passées conglomératiques et à stratifications obliques) provient d'un épandage fluvial en "*trasse*" ; au sommet, la *formation du mont Gangan* (grès blancs massifs et conglomérats rouges) peut avoir une origine glaciaire et correspondre à la glaciation fini-ordovicienne et au dépôt de la "*tillite supérieure*" (DEYNOUX, 1983).

Les formations de *Guémata* et de *Kindia* affleurent jusqu'aux sommets des principaux reliefs du Fouta Djallon entre Labé, Pita et Dalaba. Enfin, les formations sédimentaires du Paléozoïque sont subhorizontales dans le Fouta Djallon et ne présentent que des pendages faibles en allant vers l'Ouest. Par contre, plus au Nord, les couches sont affectées par une tectonique hercynienne plus violente (MICHEL, 1973 ; VILLENEUVE, 1984).

6. Les venues doléritiques permo-triasiques

Les dolérites, du Permien et du Trias, forment avec les grès, les principaux reliefs des bassins versants supérieurs du Sénégal et de la Gambie. La répartition des venues doléritiques et leur mode de gisement dépendent des roches traversées : elles sont sous forme de dykes au sein des roches granitiques et métamorphiques alors qu'à l'intérieur des séries sédimentaires (argilites) elles se développent en sills. Le métamorphisme de contact développé est assez important (400-500°C) et, surtout, elles semblent responsables d'un phénomène d'hydrothermalisme affectant tout le *bassin de Taoudéni* (GIRARD, 1985 ; GIRARD & al., 1989). Il en résulte la transformation locale des pélites et des grès calcaires ou argileux en cornéennes et des autres grès en quartzites (DARS, 1961). Ces dolérites sont particulièrement abondantes dans la partie Sud du *bassin de Taoudéni* et spécialement le long de la faille guinéo-nubienne qui traverse de part et d'autre le craton ouest africain (GIRARD & al., 1989). Ce sont des roches foncées, grisâtres à verdâtres, à grains de dimension variable, très dures (DARS, 1961 ; MACHENS, 1973). Elles se débitent en boule sous l'effet de l'altération (MICHEL, 1973). CHETELAT (1938) note que le type le plus fréquent dans le Fouta Djallon est une dolérite à

grains moyens de texture ophitique, de même composition géochimique que celles du Maroc et du bassin de Taoudéni (GIRARD & al., 1989).

7. Le bassin méso-cénozoïque sénégalo-mauritanien (Eocène et Continental terminal)

Ce vaste bassin sédimentaire, qui s'étend du Nord de la Mauritanie au Sud du Sénégal, s'est mis en place à partir du Crétacé et durant le Tertiaire. Seules les formations de l'Eocène et du Continental terminal affleurent. Sous ce nom, on désigne en Afrique occidentale un complexe sédimentaire d'origine continentale allant de l'Eocène au Quaternaire (ARCHAMBAULT, 1960). Des sables et des grès tendres ou argileux dominant et alternent avec des bancs d'argiles. Cette série constitue la partie supérieure du bassin sénégalo-mauritanien. Elle n'apparaît qu'à l'extrême NE du bassin versant du Sénégal, en contact discordant avec les terrains paléozoïques. Par endroit, l'érosion a mis à jour la couche sédimentaire concordante sous-jacente de l'Eocène dont ELOUARD (1962) a fait une description détaillée. Cette série d'origine marine, grés-argileuse affleure surtout le long de la vallée du fleuve Sénégal en aval de Bakel.

8. Les formations latéritiques et superficielles

En Afrique occidentale, les latérites ont une extension considérable (MAIGNIEN, 1958 ; BOULANGE & MILLOT, 1988). Dans ces régions tropicales à climat chaud et humide, un épais profil d'altération latéritique se développe au dépens des roches mères du substratum (PEDRO, 1968). Ainsi, une couche latéritique dont l'épaisseur peut dépasser 50 mètres recouvre souvent la surface (LACROIX, 1914 ; GOLOUBINOW, 1950 ; MICHEL, 1973). Les latérites de la zone de départ et de la zone de concrétion présentent souvent des faciès caractéristiques des roches sous-jacentes. Sur les roches granitiques, elles sont de teintes orangées, très argileuses et riches en grains de quartz résiduels. Sur les schistes, elles sont rouges violacées, à grains fins et à texture schisteuse leur donnant un délit en plaquette. Ces formations latéritiques ont des significations géomorphologiques complexes qui ont été présentées dans le chapitre I.

Les autres formations superficielles sont constituées d'alluvions, de dunes et de quelques dépôts loessiques. Les alluvions garnissent les vallées alluviales du fleuve Sénégal de Bakel à Kayes, de la Kolimbiné et du Niger de Siguiri à Kouroussa ; il s'agit de limons très fins peu argileux, de sables et de graviers. Ce remblai atteint une quinzaine de mètres d'épaisseur et sa largeur peut dépasser plusieurs kilomètres (GOLOUBINOW, 1950 ; MICHEL, 1973). Les alluvions anciennes ont été souvent latéritisées et il est difficile de les distinguer des latérites provenant d'éluvions. Enfin, des bancs de sable ou dunes recouvrent l'extrémité ENE du bassin versant du Sénégal à l'Est de Niore et des limons éoliens saupoudrent les plateaux latéritiques et les glacis élevés du Fouta Djallon et du plateau Mandingue méridional (GSELL, 1957 ; MICHEL, 1973).

II - COMPOSITION CHIMIQUE DU SUBSTRATUM ROCHEUX

Les flux de substances dissoutes ou de matières particulières qui transitent dans les eaux fluviales à l'exutoire d'un bassin versant relèvent de processus d'érosion mécanique et d'altération chimique dont l'intensité est fortement tributaire de la nature lithologique des formations rocheuses et des sols drainés. Dans un premier temps, il est donc intéressant d'établir une classification lithologique par bassin versant et de définir une composition chimique moyenne des principaux faciès.

A - LITHOLOGIE ET DEGRE D'ALTERABILITE

1. Degré d'altérabilité des roches

Les minéraux présentent des sensibilités différentes à l'altération selon leur composition chimique et l'agencement de l'édifice cristallin. Dans le domaine tropical, MAIGNIEN (1958), LENEUF (1959) puis LELONG (1969) ont établi l'ordre de vulnérabilité décroissant suivant dépendant du chimisme du minéral : silicates basiques, feldspaths calco-sodiques, feldspaths potassiques, muscovite et quartz. Ce schéma type présente naturellement des variations selon les conditions locales. Cependant, il ressort de cette classification, la nette opposition entre les roches basiques et les roches acides, visible d'ailleurs à toutes les échelles, du minéral au paysage. En effet, l'altération se manifeste de façon brutale sur les roches basiques et de façon progressive sur les roches acides. D'autre part, la vitesse d'altération dépend également de mécanismes physiques qui séparent et désagrègent les cristaux des roches. ROUGERIE (1960), en Côte d'Ivoire, puis MICHEL (1973) sur les bassins versants du Sénégal et de la Gambie, ont proposé pour les différentes formations rocheuses représentées une échelle de dureté ou de résistance à l'altération tenant compte de ces deux paramètres :

- roches très dures : grès quartzites, cornéennes, dolérites,
- roches dures : grès quartzeux bien cimentés,
- roches à dureté moyenne : roches vertes, quartzites fissurés,
- roches tendres : grès feldspathiques, schistes métamorphiques,
- roches très tendres : grès à plaquettes, granites, pélites, tufs.

Les granites sont considérés comme des roches très tendres car ce sont tous de vieux granites d'âge birrimien déjà bien altérés. Ce sont d'autre part des granites leucocrates à biotite ou à deux micas plus sensibles à l'altération que les autres variétés de granites.

2. Classification lithologique

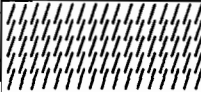
L'étude géologique a permis d'identifier : des granites et gneiss, des grès et quartzites, des roches vertes (roches volcaniques basiques) et des rhyolites (roches volcaniques acides), des dolérites, des schistes, des micaschistes, des cipolins et autres roches carbonatées, des grauwackes, des argilites et pélites.

Les formations carbonatées, que ce soient les cipolins du socle ou les bancs carbonatés du *bassin de Madina Kouta*, constituent toujours des roches bien cristallisées qui résistent mieux à l'érosion que l'encaissant constitué de pélites ou de grès peu cimentés. Par ailleurs, les dolomies calcaires plus tendres du *groupe de Nioro* ne représentent qu'une petite entité géologique située dans une zone désertique quasi-endoréique où l'altération utilise plutôt des mécanismes à caractère physique. Cette famille de roches n'a donc pas été prise en compte.

Finalement, parmi les deux grandes familles chimiques de roches présentes (acides et basiques), six classes lithologiques ont été identifiées : granites, grès, schistes, grès quartzitiques et quartzites pour les roches acides, roches vertes et dolérites pour les roches basiques (tableau 7). *La classe des granites* représente l'ensemble granito-gneissique du socle birrimien, elle constitue la majeure partie du bassin versant supérieur du Niger et le Sud du Fouta Djallon. *La classe des grès tendres* (tous les grès du Protérozoïque terminal et du Paléozoïque) est la plus étendue ; par ordre stratigraphique, on distingue le *groupe de Termesse* (ou *falémien*) de la chaîne panafricaine des Bassarides, le *groupe de Mali* des sillons molassiques panafricains et son équivalent septentrional, le *groupe de Pita* du *bassin Bové*. *La classe des schistes*, de dureté moyenne, est formée de l'ensemble métamorphique du Birrimien inférieur représentant la moitié nord du bassin versant amont du Niger et le grand axe du bassin versant de la Falémé, on la retrouve aussi par îlots dans le Nord du Fouta Djallon et à l'extrémité SE du bassin versant du Sénégal. *La classe des grès quartzitiques et quartzites* correspond à la couverture sédimentaire du Protérozoïque supérieur et à la partie septentrionale de la chaîne panafricaine des Bassarides (ou *série de Bakel-Mbout*) ; elle constitue du Nord au Sud l'Afollé, les plateaux Mandingues

et la partie nord du Fouta Djallon. La classe des roches vertes représente les formations métamorphiques du Birrimien supérieur. La classe des dolérites est constituée de toutes les venues doléritiques du Permien et du Trias, et se retrouve en incrustation dans toutes les formations, cependant on peut distinguer deux grands ensembles : l'un forme le centre du Fouta Djallon et l'autre les reliefs à l'Est de Kayes (fig.13).

Tableau 7 : Unités lithologiques de la zone d'étude

Degré d'altérabilité de la roche	Chimisme de la roche	
	roches acides	roches basiques
roches très dures	quartzites et grès quartzitiques	dolérites
roches de dureté moyenne	schistes	roches vertes
	grès	
roches tendres	granites	

3. Répartition géographique des classes lithologiques

Les roches acides occupent 87% de la superficie totale de la zone d'étude (tableau 8). La classe lithologique la mieux représentée est de loin celle des grès ; ces roches relativement tendres forment 47% de la superficie totale. A l'opposé, les roches vertes sont les moins présentes, elles ne constituent que 1% de la superficie totale. On les rencontre dans les bassins versants du Niger, de la Falémé et au Nord de Kayes dans le bassin versant du Sénégal. Les roches basiques sont donc représentées principalement par les dolérites qui constituent 12% de la superficie totale. Ce pourcentage est inférieur à ceux des grès quartzitiques et des granites qui sont respectivement de 17% et 15% mais il est supérieur à celui des schistes (8%).

Tableau 8 : Répartition des classes lithologiques par bassin versant

Bassin versant	Exutoire	Classes lithologiques					
		Granites	Grès	Schistes	Grès Q.	Dolérites	R. vertes
SENEGAL	Bakel	7 %	31 %	7 %	42 %	12 %	1 %
FALEME	Kidira	15 %	15 %	36 %	16 %	15 %	3 %
NIGER	Siguiri	69 %	-	26 %	-	2 %	3 %
MILO	Kankan	91 %	-	6 %	-	3 %	-
BAFING	Dakka-S.	45 %	6 %	1 %	9 %	39 %	-
FALEME	Satadougou	8 %	-	16 %	34 %	42 %	-
GAMBIE	Kédougou	-	18 %	7 %	45 %	30 %	-
TOMINE	Gaoual	-	86 %	-	-	14 %	-
KONKOURS	Konkouré	-	98 %	-	-	2 %	-
TINKISSO	Tinkisso	96 %	-	-	-	4 %	-
FOUTA DJALON		24 %	34 %	4 %	14 %	24 %	-

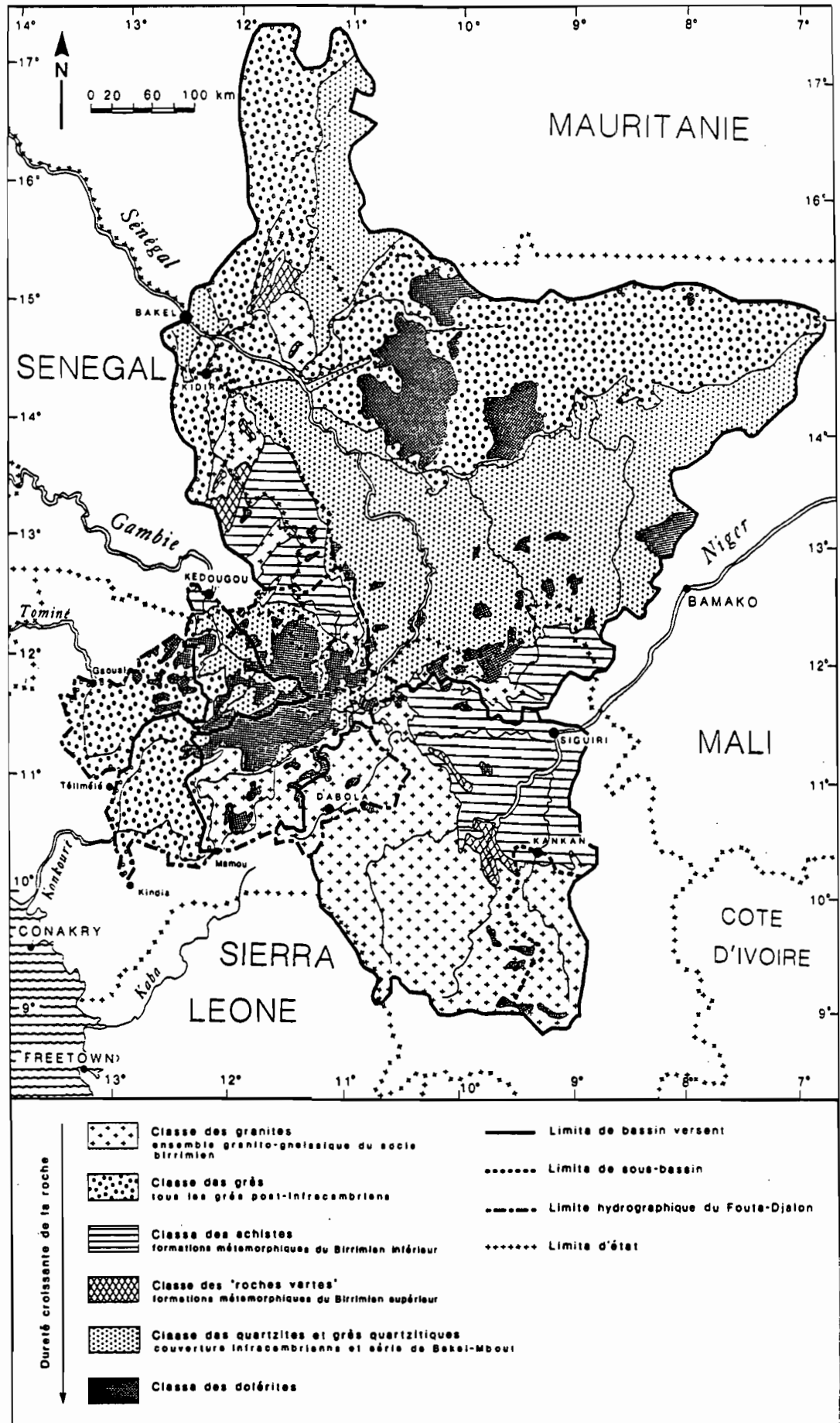


Fig. 13 : Esquisse lithologique du Fouta Djallon et des bassins versants supérieurs du Sénégal et du Niger.

Les bassins du Konkouré, du Tinkisso et du Milo sont des bassins quasi monolithologiques à grès ou granites. Les bassins où les roches basiques ont le plus d'importance sont les bassins de la Gambie et de la Falémé. Sur l'ensemble du Fouta Djalon, les classes lithologiques s'arrangent simplement. Ce massif se divise en trois parts égales entre les grès tendres à l'Ouest, les granites au SE et les grès quartzitiques au NE. Mais dans ce dernier ensemble, on trouve en incrustation un noyau doléritique qui constitue le coeur du massif montagneux, et, au Nord, les schistes birrimiens tendres de l'extrémité méridionale de la fenêtre de Kéniéba (fig.14).

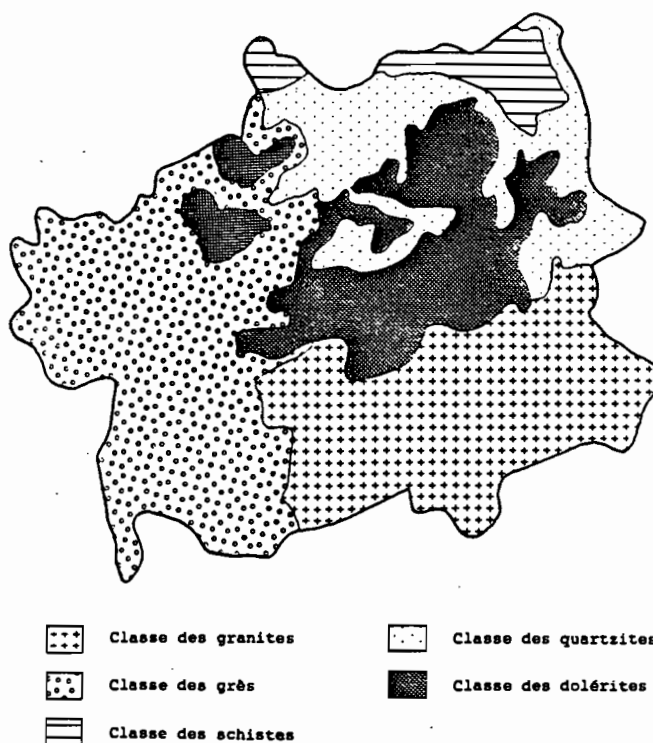


Fig. 14 : Croquis de situation des ensembles lithologiques du Fouta Djalon.

B - COMPOSITION CHIMIQUE MOYENNE DES ROCHES

1. Composition chimique des classes lithologiques

La composition chimique moyenne des six classes lithologiques (tableau 9) a été obtenue en grande partie à partir des 775 analyses chimiques et descriptions pétrographiques d'échantillons de roches provenant d'Afrique de l'Ouest, publiées par BLANCHOT (1958). Les échantillons se situant dans la zone d'étude ou à proximité immédiate ont été sélectionnés ; pour la *classe des roches vertes* uniquement, les compositions chimiques retenues proviennent d'échantillons du Nord de la Côte d'Ivoire et du Burkina Faso (PION, 1989). Pour compléter cette description chimique, les travaux de DARS (1961) et MACHENS (1973) sur les dolérites, de MAINGUET (1972) sur les grès et de MAIGNIEN (1958) ont également été consultés. La classification pétrologique utilisée est la classification des roches cristallines de A. LACROIX.

La *classe des granites* regroupe des granites à majorité calco-alcalins (mais leur chimisme peut évoluer de la granodiorite au granite alcalin), des gneiss et des migmatites ; la moyenne est établie à partir de 18 granites calco-alcalins, d'un granite alcalin, de 4 microgranites et de 3 gneiss. Bien que la *classe des grès tendres* soit la plus largement répandue, nous n'avons trouvé aucune analyse chimique provenant d'échantillons situés dans la zone étudiée. La moyenne fournie dans le tableau 9 a été établie à partir de trois analyses de grès de République

Centre-Africaine (MAINGUET, 1972). Huit schistes et deux micaschistes forment la *classe des schistes*, 20 dolérites, 13 gabbros et 5 andésites la *classe des dolérites*, et 20 métagabbros, 2 pyroxénolites, une dunite et une wehrlite la *classe des roches vertes*. La classe des quartzites a la composition chimique d'un grès quartzitique du plateau de Kita (MICHEL, 1973).

Tableau 9 : Composition chimique des classes lithologiques (en % d'oxydes)

Classes lithologiques	n	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	H ₂ O
GRANITES	26	68,9	15,4	1,4	1,5	0	1,0	2,9	4,4	2,6	0,32	0,13	0,43
GRES	3	94,4	2,8	0,7	0	0,01	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0	1,3
SCHISTES	10	64,1	15,0	3,0	2,6	0,08	2,7	0,8	2,7	2,7	0,8	0,13	3,34
QUARTZITES	1	97,1	0,2	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DOLERITES	38	51,1	15,1	2,9	8,4	0,17	5,4	9,2	2,2	1,0	1,4	0,22	1,9
R. VERTES	24	49,5	14,2	3,9	8,2	0,16	6,1	9,1	2,6	0,37	0,85	0,07	2,2

n : nombre d'échantillons

2. Composition chimique moyenne du substratum rocheux

Pour chaque bassin versant et pour le Fouta Djalon, la composition chimique de la roche moyenne est estimée à partir des compositions chimiques des roches et de leur répartition respective (tableau 10). L'examen des différents groupes lithologiques du soubassement géologique montre que les minéraux primaires qui prédominent dans près de 90% des roches (granites, quartzites, grès et schistes) sont le quartz, les feldspaths et les micas.

Globalement, les roches constitutives des bassins versants du Sénégal, de la Gambie, de la Tominé et du Konkouré ont une composition chimique moyenne très voisine ; les différences notables concernent l'abondance de la silice et, en contrepartie, la pauvreté en alcalino-terreux du substratum des bassins côtiers guinéens. Le bassin versant amont du Niger se distingue largement des autres bassins par la richesse de son substratum en alcalins et alcalino-terreux. Enfin au niveau des sous-bassins du fleuve Sénégal, les roches de la Falémé sont moins siliceuses mais plus alumineuses et, surtout, plus riches en alcalins et alcalino-terreux que celles du Bafing/Bakoye (tableau 10).

Tableau 10 : Composition chimique de la roche moyenne par bassin versant (en % d'oxydes)

Bassin versant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	H ₂ O
SENEGAL	86,0	5,0	2,0	1,4	0,03	1,0	1,5	0,82	0,53	0,29	0,05	0,92
FALEME	72,2	10,8	2,4	2,7	0,06	2,1	2,4	2,1	1,5	0,59	0,10	1,81
BAF/BAK	88,1	4,1	1,9	1,2	0,03	0,8	1,4	0,62	0,38	0,24	0,04	0,78
GAMBIE	80,5	6,2	2,4	2,7	0,06	1,8	2,9	0,87	0,51	0,49	0,08	1,04
TOMINE	88,3	4,5	1,0	1,2	0,03	0,84	1,5	0,39	0,23	0,28	0,03	1,38
KONKOURE	93,5	3,1	0,74	0,17	0,01	0,21	0,38	0,14	0,12	0,13	0	1,31
NIGER	66,7	15,2	1,9	2,1	0,03	1,7	2,7	3,9	2,5	0,48	0,13	1,27
MILO	68,1	15,4	1,5	1,8	0,01	1,2	3,0	4,2	2,6	0,38	0,13	0,65
TINKISSO	68,2	15,4	1,5	1,8	0,01	1,2	3,2	4,3	2,5	0,36	0,13	0,49
FOUTA	77,2	8,9	1,8	2,4	0,05	1,7	2,9	1,7	1,0	0,47	0,09	1,14

BAF/BAK : Bafing + Bakoye

III - HYDROGEOLOGIE

Les régions où le soubassement géologique est constitué de roches éruptives et de roches métamorphiques ont longtemps été considérées comme peu propices à l'existence en quantité facilement exploitable d'eau souterraine. Ainsi selon ROCHETTE (1974), la capacité de rétention du bassin amont du Sénégal (et donc *a priori* des bassins amont de la Gambie et du Niger) est très faible et toutes les formations géologiques doivent être considérées comme imperméables. Or depuis quelques années, les progrès accomplis tant dans le domaine de l'hydrogéologie que dans des disciplines connexes (hydrologie de surface, géomorphologie, pédologie et géochimie) ont montré que, sous certaines conditions, ces formations peuvent contenir des ressources exploitables (BISCALDI, 1968 ; LELONG & LEMOINE, 1968 ; BLOT, 1970 ; WACKERMANN, 1975). De plus, le rôle important joué par ces nappes dans le modelé latéritique (MAIGNIEN, 1958 ; GEORGE, 1968 ; LEPRUN, 1979) justifie de leur porter quelque intérêt.

A - HYDROGEOLOGIE DES ROCHES ERUPTIVES ET METAMORPHIQUES

A l'état sain et massif, ces roches présentent une porosité nulle ou négligeable : SCHOELLER (1962) cite des valeurs de porosité inférieures à 1% pour les schistes, ardoises, granites et roches éruptives profondes. Des exceptions existent et sont loin d'être négligeables. Cependant, en règle générale, l'emmagasinement d'eau n'y est possible que si les roches ont été soumises à des transformations postérieures à leur genèse, d'ordre météorique ou tectonique, y ayant développé une zone d'altération de plus ou moins grande porosité ou un réseau de fissures ou de fractures non colmatées (BISCALDI, 1968). En effet, sous l'action du climat tropical, caractérisé par des températures élevées et l'alternance d'une saison sèche et d'une saison humide, les roches éruptives et les roches métamorphiques subissent une altération météorique qui les transforme en un complexe plus ou moins hétérogène de sables et d'argiles, d'épaisseur variable au-dessus du socle sain. Ce sont ces altérites qui constituent des réservoirs d'eau potentiels et qui forment de bons aquifères si leur épaisseur atteint au moins une dizaine de mètres.

D'autre part, pour que ces nappes puissent se constituer et persister, il est nécessaire que la pluviométrie annuelle soit suffisante pour les recharger. Cette alimentation suppose que la hauteur des pluies excède la hauteur évapotranspirée en surface (interception par la végétation et évaporation au sol) et le déficit d'humidité du sous-sol dû à l'évaporation différée (prélèvements par les racines des végétaux, évaporation souterraine). En effet, toute lame de pluie qui s'infiltre est vite absorbée par les capillaires fins tant que ceux-ci ne sont pas rechargés : l'alimentation des nappes n'intervient qu'après la réhumectation des terrains qui les recouvrent et cette réhumectation consomme beaucoup d'eau dans les régions tropicales à longues saisons sèches. Le seuil de pluies annuelles à partir duquel l'infiltration alimente les nappes est variable selon les zones bioclimatiques. Il est minimum quand les pluies sont très concentrées dans le temps et que le sol est à la fois nu et perméable (zones arides à placages superficielles de sable). Il est maximum quand les pluies sont étalées et que le sol est recouvert d'une végétation grosse consommatrice d'eau (zone tropicale humide forestière) (DEGALLIER, 1965 ; LELONG, 1966). Ce seuil est difficile à définir de façon précise. En Afrique de l'Ouest, sa valeur est voisine de 400 mm dans la zone sahélienne autour du 14^{ème} parallèle (ARCHAMBAULT, 1960) puis semble augmenter progressivement vers le Sud en même temps que la fréquence des pluies : de l'ordre de 600 mm en pays de savanes (LELONG & LEMOINE, 1968).

Les débits ponctuels obtenus dans les nappes d'altération sont souvent très réduits : la capacité de production d'un puits moyen exploitant un à plusieurs mètres d'aquifère varie généralement entre 1 et 10 m³/jour. D'autre part, les altérations ne constituent pas une couverture régulière et aucune relation ne semble exister entre la topographie de surface et la topographie du substratum (BISCALDI, 1968 ; GEORGE, 1968).

B - LA PERMEABILITE DES TERRAINS

L'existence de vides dans un matériau ne suffit pas à assurer sa qualité en tant qu'aquifère ; il faut aussi que les vides communiquent entre eux. Cette notion définit la perméabilité d'un terrain. Si la porosité des arènes et des argiles d'altération est élevée (30 à 45%), leur perméabilité du fait de la finesse des conduits est souvent très faible, parfois même négligeable. Aux six classes lithologiques retenues, il correspond trois types de comportements hydrogéologiques d'après l'échelle de perméabilité établie sur les formations géologiques du bassin versant du Sénégal par SOW (1984). Les granites et les grès sont des roches à circulation de fissures ou à alternance de couches perméables et imperméables ; les roches vertes et schistes sont des roches susceptibles de renfermer des niveaux aquifères ; les dolérites et quartzites sont des roches totalement imperméables.

C - LES AQUIFERES ET LEUR QUALITE CHIMIQUE

Le caractère fondamental de la zone étudiée est donc l'absence de nappes généralisées. Il n'existe aucune nappe profonde, les seules existantes sont celles de la zone d'altération ne dépassant jamais 100 m de profondeur, de la couverture sédimentaire et des formations récentes (alluvions, éluvions et latérites). Ces aquifères sont discontinus et présentent une forte hétérogénéité verticale en fonction de la stratification des zones perméables, donnant naissance à des nappes semi-captives ou captives (BLOT, 1970 ; SOW, 1984 ; TRAORE, 1985). Cette zone d'étude est donc imperméable dans l'ensemble mais entretient des nappes peu importantes et très localisées bien connues des populations locales. Enfin, malgré le déficit pluviométrique actuel de la région, TRAORE (1985) confirme que les nappes se rechargent annuellement.

La qualité chimique des eaux souterraines de cette région ouest africaine a largement été étudiée (BLOT, 1970 ; WACKERMANN, 1975 ; TRAVI & *al.*, 1986). Les eaux du Birrimien constituant le bassin versant supérieur du Niger et le SE du Fouta Djallon sont le plus souvent bicarbonatées calciques et magnésiennes, légèrement acides et toujours diluées ($< 350 \mu\text{S/cm}$). Quelques sulfates peuvent provenir d'aquifères schisteux (AIEA, 1982). Dans le faciès roches vertes, les eaux sont plus minéralisées (2000 à 3000 $\mu\text{S/cm}$). Dans les aquifères gréseux du Précambrien supérieur et terminal, les eaux sont bicarbonatées calciques et magnésiennes ou sodiques avec des teneurs très faibles en chlorures ($< 300 \mu\text{S/cm}$). Les eaux du Protérozoïque terminal sont de nature et de qualité très variables selon les roches encaissantes constituant le réservoir (grès, argilites, dolérites, carbonates) ; la gamme des conductivités s'étend de 100 à 20000 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ mais les valeurs les plus fréquentes oscillent autour d'une moyenne de 600 $\mu\text{S.cm}^{-1}$. De type carbonaté calcique ou sodique dans les aquifères dilués, elles s'acheminent en se concentrant vers des faciès sulfatés sodiques selon leur état de saturation vis-à-vis de la calcite (TRAVI & *al.*, 1986). Signalons l'existence d'eaux franchement saumâtres, hypersulfatées sodiques et présentant un fort déséquilibre chlorures-alcalins ou encore certains aquifères avec des teneurs élevées en nitrates (jusqu'à 2,5 g/l). Enfin, dans le détail, il apparaît des différences sensibles dans la composition chimique des eaux provenant de gisements voisins du fait de la non-communication des nappes phréatiques (BLOT, 1970).

Les caractéristiques physico-chimiques des nappes du Sénégal oriental, en rive gauche de la Falémé, ont été présentées par WACKERMANN (1975) et BLOT (1970, 1980). Ils mettent en évidence les fortes minéralisations des eaux de nappes phréatiques dans un encaissant schisteux (0,5 g/l) et la dilution très importante des eaux souterraines établies sur des formations gréseuses (0,06 g/l). Les eaux du socle (granite et formations volcano-sédimentaires) s'inscrivent en position intermédiaire entre celles des schistes et des grès. Les bicarbonates sont toujours les anions dominants, le calcium et le sodium sont les cations les plus représentés. Les teneurs en silice sont élevées, exception faite des nappes sur grès (GAC & ORANGE, 1990).

Globalement, on peut retenir que les eaux phréatiques des granites sont plus "acides", plus riches en potassium et en chlorures que les eaux d'aquifères "basiques" plus minéralisées et ayant des teneurs plus importantes en bicarbonates, magnésium et calcium.

IV - LA NATURE DES SOLS ET LE DOMAINE DES LATERITES

Le cadre pédologique est esquissé à partir des travaux de VAN ES & BARRETO (1962), CHAUVEL (1967), BARRETO (1974), FELLER & MERCKY (1976), GUPTA (1987) et des cartes de reconnaissance pédologique au 1/500000 du Ministère de l'Agriculture de Guinée (1980-1981). Trois grandes familles de sols à complexe d'altération kaolinique se succèdent en bandes latitudinales du Sud au Nord : les *sols ferrallitiques* dans le Fouta Djalon et ses contreforts septentrionaux, les *sols ferrugineux tropicaux* dans la partie centrale du haut-bassin du Sénégal et les *sols sub-arides* au Nord dans les régions quasi-endoréiques (fig.15). A ses trois familles principales sont associés, en surimposition, des sols squelettiques, des sols minéraux bruts, des sols hydromorphes et des sols à complexe d'altération smectitique (vertisols et sols halomorphes) selon les conditions lithologiques et géomorphologiques (GAC & ORANGE, 1990).

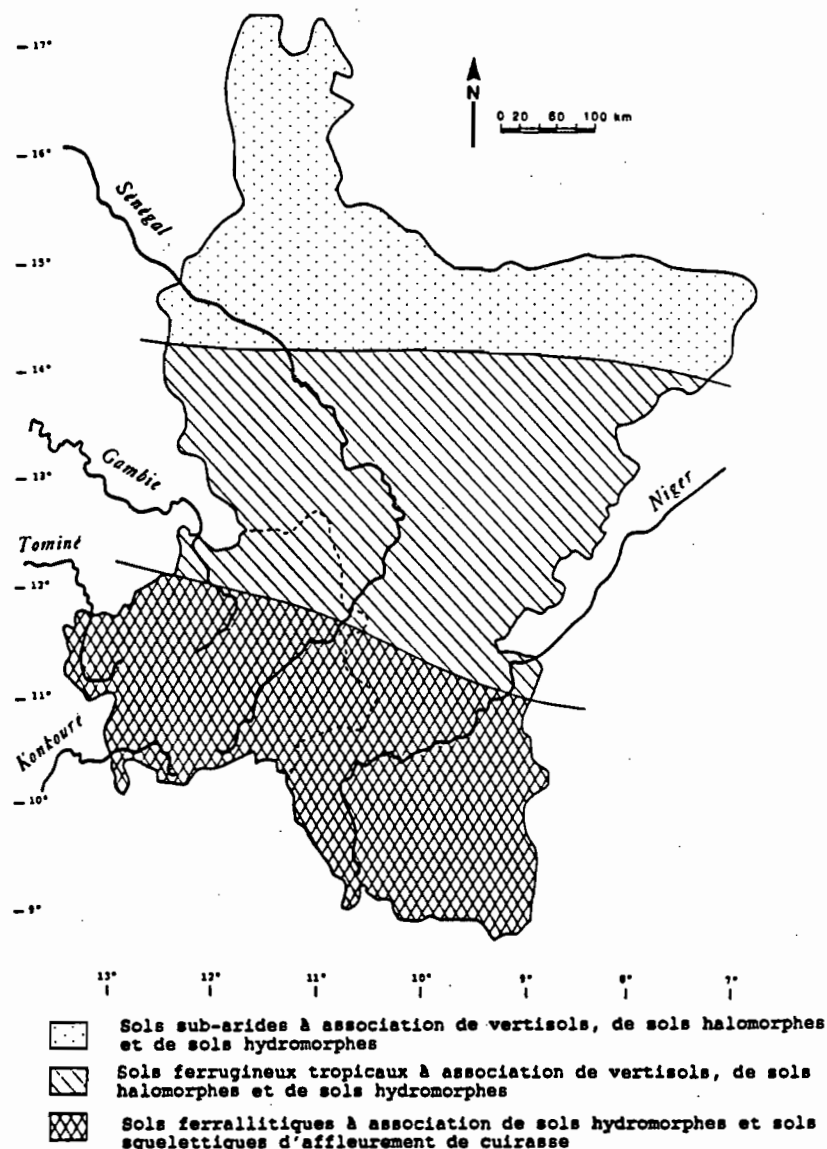


Fig. 15 : Esquisse pédologique du Fouta Djalon, des bassins versants supérieurs du Sénégal et du Niger.

BARRETO (1974) a souligné l'extrême complexité de la répartition des sols dans cette zone géographique et, surtout, les variations très importantes qui apparaissent de façon inattendue entre zones apparemment identiques. Toute extrapolation abusive à partir de secteurs reconnus doit être confirmée au fur et à mesure des travaux de prospection et de cartographie.

Ce préambule donne à cette esquisse pédologique une portée restreinte. Elle n'a pas la prétention de fournir un panorama complet des sols de la région et encore moins de dégager le rôle de ces sols dans la genèse des formes d'écoulement.

A - LE CADRE PEDOLOGIQUE PRINCIPAL

1. Les sols ferrallitiques

Ces sols sont caractéristiques des régions chaudes et humides de la zone intertropicale, ils représentent la grande majorité des sols observés en Guinée. Ils sont profonds (de 3 m à plus de 10 m) et de couleurs vives (rouges, jaunes), leur horizon organique est peu épais ; l'horizon B est caractérisé par la présence abondante de kaolinite (et parfois de gibbsite, hématite et goethite) ; l'horizon C est variable et dépend du type de roche-mère. Ce sont des sols où les silicates sont totalement hydrolysés. Les ions alcalins et alcalino-terreux ont été évacués. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est inférieur à 2.

2. Les sols ferrugineux tropicaux

Ce sont des sols qui se rencontrent au Nord et NE de la Guinée. Ils sont moins épais que les sols ferrallitiques (<3 m), de couleurs beiges et leur horizon de matière organique est toujours assez bien développé. Leur argile constitutive est encore la kaolinite. Ils sont plus ou moins lessivés et donc moyennement pourvus en bases. Enfin, ils sont très sensibles à l'érosion : les horizons meubles sont parfois entièrement décapés laissant apparaître les niveaux indurés. Ils peuvent donc constituer des zones de ruissellement intense. Ce phénomène est accentué par leur mise en culture systématique : ils servent traditionnellement aux plantations de mil, sorgho, arachide, manioc.

3. Les sols sub-arides

Ce sont des sols associés aux paysages steppiques de la zone sahélienne. Ils tirent leurs caractéristiques des conditions climatiques sévères. L'aridité bloque l'évolution des faibles quantités de matière organique apportée par une très maigre végétation. D'autre part, la percolation limitée par le ruissellement, l'évaporation intense et la pluviométrie insuffisante ne permettent qu'une altération très faible. Enfin, l'érosion empêche la différenciation de l'horizon superficiel.

B - LA LITHOLOGIE, LA TOPOGRAPHIE ET LA PEDOGENESE

1. Les sols du complexe d'altération smectitique sur roches basiques

Les vertisols, totalement imperméables, se caractérisent par une fraction argileuse de minéraux gonflants du type montmorillonite, qui exige un milieu générateur basique. De ce fait, ils sont limités aux formations birrimiennes de roches vertes (Kédougou et flanc ouest du bassin versant de la Falémé). En association étroite avec eux, on trouve des sols halomorphes d'origine pétrographique. Ces sols sont particulièrement riches en sodium qui provient de l'altération des minéraux de la roche-mère en milieu basique.

2. Les sols hydromorphes dans les zones planes et les sols squelettiques sur cuirasse

Les sols hydromorphes sont des sols dont l'évolution est marquée par l'eau. Leur horizon superficiel est riche en matière organique et les sesquioxides de fer y migrent avec facilité (MAIGNIEN, 1958). Les phénomènes de cuirassement y sont donc communs. On les trouve sur les surfaces mal drainées (plateaux et cuvettes de Tougué et Dabola) et dans les plaines alluviales (Bafing, Falémé, Gambie, Tinkisso).

Les sols squelettiques, caractérisés par un horizon superficiel de moins de 10 cm et reposant directement sur une roche saine ou cuirasse, se rencontrent indifféremment sur cuirasses, grès ou dolérite, dans tout le Fouta Djalou. Ils sont liés à la capacité de tous les sols de cette région d'être indurés. On les trouve le plus souvent associés aux plateaux cuirassés à pente douce (pente de 10 à 16%) et le long des cours d'eau dans le Nord du Fouta Djalou.

C - LES HORIZONS CUIRASSES : LES LATERITES

Tous ces sols peuvent être recouverts d'une épaisse cuirasse ferrugineuse ou bauxitique. On rencontre ces cuirasses en toute position topographique, indifféremment de la lithologie. Elles forment souvent de vastes plateaux dénudés de toute végétation arbustive : le *bowal*. Ce sont des sols minéraux bruts ne manifestant pratiquement aucune évolution pédologique apparente (MAIGNIEN, 1958 ; LEPRUN, 1979). Leur apparition est liée à la disparition de la forêt ; il se produit alors une modification importante du bioclimat et la formation des complexants organiques suit le rythme des saisons. Les processus de kaolinisation ralentissent avec la dessiccation du milieu alors que l'individualisation du fer reste toujours importante. Il en résulte un concrétionnement et un cuirassement généralisé des sols. En régions sèches, le manque d'humidité ralentit la libération des différents oxydes et le développement de la végétation ; les phénomènes de cuirassement y sont alors moins intenses.

V - CONCLUSION

Dans ces régions tropicales, l'altération profonde des roches du substratum, soumises à des climats contrastés chauds et humides pendant de longues périodes, a donné finalement naissance à un matériau très monotone sur le plan minéralogique. Il est constitué essentiellement de quartz résiduel, de kaolinite et de goéthite. Secondairement, on peut y trouver également divers oxydes et hydroxydes, quelques minéraux lourds plus ou moins altérés et des traces d'illites ou de micas hydratés.

DEUXIEME PARTIE

HYDROCLIMATOLOGIE

"... zone caractérisée par une saison suffisamment humide pour induire les hydrolyses nettes, mais aussi par une saison sèche suffisamment longue pour que les éléments libérés par hydrolyse ne soient pas tous entraînés hors des paysages."

H. PAQUET (1970)

Après avoir décrit les aspects physiques du terrain d'étude, il s'agit dans cette partie d'établir le bilan global de l'eau. Travaillant sur une zone peu étudiée et sur une période récente, il a été nécessaire de collecter sur le terrain les données météorologiques et hydrologiques et d'effectuer les traitements statistiques pour corriger les données brutes et établir des cartes régionales.

Le "*bilan de l'eau*" est la quantification massique des différentes étapes du cycle de l'eau. Il existe un flux permanent d'eau à la surface de la terre, le réservoir ultime étant l'océan. A sa surface, l'eau s'évapore dans l'atmosphère et forme les nuages transportés par les vents. Dans les zones où se forment des courants ascendants, ces masses d'air humides se refroidissent, la vapeur se condense et l'eau, sous forme de pluie ou de neige, retourne directement à l'océan ou se répand sur les continents. L'eau s'écoule alors par gravité des régions hautes vers les régions basses. Une partie de cette eau ruisselle à la surface du sol, une autre partie s'infiltré, une troisième partie s'évapore et regagne l'atmosphère (TARDY, 1986).

Dans un premier temps, afin d'appréhender au plus près la quantité d'eau disponible par bassin versant, le cadre climatique est décrit à travers précipitations et températures, ces deux paramètres imposant les modalités de l'hydrologie fluviale (PAGNEY, 1976). Il faut cependant souligner l'importance du facteur pluie qui, dans ces régions à contexte thermique unitaire, est l'élément essentiel de différenciation des climats (ARLERY & *al.*, 1973). Il joue donc un rôle décisif pour expliquer les modalités de l'écoulement fluvial étudié dans un second temps (FRECAUT & PAGNEY, 1982).

CHAPITRE III

DONNEES CLIMATIQUES ET PARTICULARITE DES ANNEES 1979-1987

I - LE MOUVEMENT DES MASSES D'AIR EN AFRIQUE OCCIDENTALE

La zone étudiée se situe en domaine tropical de l'hémisphère boréal caractérisé par l'alternance de deux grandes saisons annuelles : la saison des pluies en été et la saison sèche en hiver. Ce régime pluviométrique permet de caractériser l'année climatique. Il est assujéti aux interactions de deux types de circulation aérienne : l'*harmattan*, chaud et sec en provenance de l'anticyclone saharien, et la *mousson*, chaude et humide issue de l'Atlantique sud. L'interface de ces deux masses d'air est le Front InterTropical (FIT) ; sa trace au sol constitue l'équateur météorologique. Les déplacements du FIT sont déterminés, au cours de l'année, par les positions respectives des centres de hautes pressions. Ils évoluent en un mouvement de bascule entre deux extrêmes (fig.16).

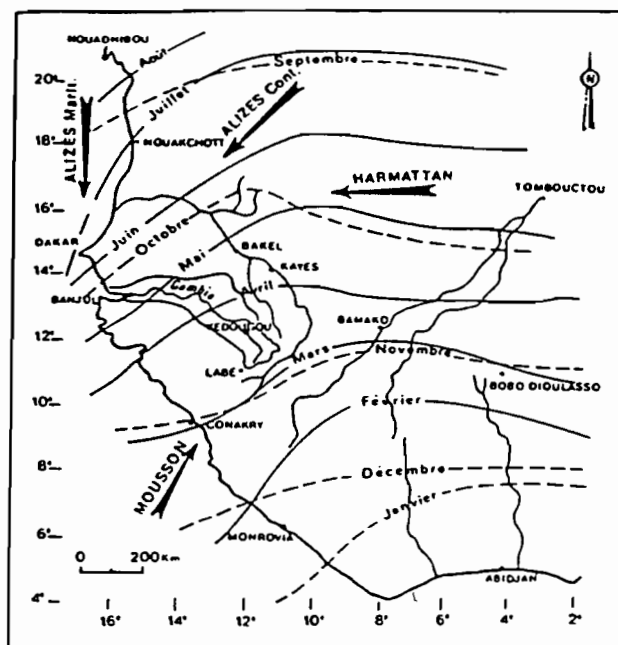


Fig. 16 : Les déplacements du Front InterTropical pendant l'année (MICHEL, 1973).

En hiver, l'anticyclone continental boréal centré sur le Sahara et l'anticyclone des Açores sont puissants : l'équateur météorologique se situe vers 4° de latitude Nord ; cette position méridionale extrême est généralement atteinte en décembre-janvier. L'anticyclone saharien dirige vers les basses latitudes tropicales un flux fort et régulier : l'harmattan souffle en permanence du NE. Il est localement perturbé par des discontinuités d'alizés maritimes engendrés par l'anticyclone des Açores. Les seules précipitations éventuelles durant cette période, le "heug" communément appelé "pluie des mangues", ont une origine extratropicale. En février, le FIT amorce sa migration vers le Nord ; il atteint le Sud du bassin de la Gambie en mars et franchit le 13^{ème} parallèle (limite septentrionale du Fouta Djallon) en mai-juin. Les premières pluies à caractère orageux sont alors provoquées par l'arrivée des lignes de grains.

En été, l'anticyclone subtropical de Sainte-Hélène se renforce : les masses d'air équatoriales, tièdes et humides, couvrent la quasi-totalité du bassin provoquant les averses de la saison des pluies, appelée "hivemage". En août, le FIT atteint sa position la plus septentrionale vers 20° de latitude Nord. L'ensemble de la région reçoit des pluies non orageuses à caractère continu : la mousson prédomine. A l'arrière du front, de puissants mouvements de convection font naître des cumulo-nimbus à grand développement vertical et des cumulus bourgeonnants qui donnent d'abondantes chutes de pluie. La mousson frappe alors de plein fouet les reliefs du Fouta Djallon. Dès le mois de septembre, le mouvement de translation du FIT s'inverse, et ce balancement du Nord vers le Sud détermine la durée effective de la saison des pluies qui s'achève en octobre-novembre.

II - L'INFORMATION DISPONIBLE ET LES RESEAUX METEOROLOGIQUES

Pour les informations climatiques d'ordre générale, citons FRECAUT (1974), PAGNEY (1976), FRECAUT & PAGNEY (1982) et LEROUX (1980). En ce qui concerne plus précisément la zone étudiée, de nombreux empreints sont faits aux thèses de SOW (1984), LO (1984) et BALLO (1984). Ces trois auteurs de l'université de géographie de Nancy ont homogénéisé et valorisé les données hydroclimatiques de l'origine des observations à 1980 sur, respectivement, les bassins versants amont du Sénégal, de la Gambie et du Niger. Leurs résultats sont étendus à l'ensemble de la zone étudiée de 1979 à 1986. Les travaux de MICHEL (1973), ROCHETTE (1974) et BRUNET-MORET & *al.* (1986) ont également été consultés.

L'acquisition des données a été motivée par deux aspects. Premièrement, il s'agissait d'établir une couverture sensiblement uniforme et représentative d'informations météorologiques pour pouvoir déterminer au plus près la lame d'eau écoulée par bassin versant pendant la période étudiée. Deuxièmement, il s'agissait de connaître plus précisément la pluviométrie de certaines stations références (Bakel, Kédougou, Dabola, Kankan et Sigouri). La difficulté de cette démarche réside dans la nécessité d'avoir des informations portant sur une période récente (de 1979 à 1987). De plus, la complexité des recherches est accrue par le fait que la zone d'étude se partage entre quatre états, d'où quatre réseaux d'observations. Les données ponctuelles récentes ont été acquises d'une part, auprès de l'ASECNA (dont la direction pour l'Afrique de l'Ouest se trouve à Dakar), de l'ORSTOM, de la *Direction de l'Hydraulique* du Sénégal, du *Service National de la Météorologie* de Guinée et d'autre part, directement sur le terrain. Afin de combler quelques lacunes, des données concernant la Guinée publiées par la FAO ont également été utilisées.

III - LA PLUVIOSITE ET SA VARIABILITE

A - CRITIQUE DES DONNEES UTILISEES, LE TRACE DES ISOHYETES

1. critique des données et leur extension

Tableau 11 : Corrélations entre les pluies mensuelles, utilisées pour l'extension des données pluviométriques sur la période 1979-86

N° de réf.	Station	Mois à combler	Station et mois de référence	r	P		
42	DABOLA	mars	Bakel MS	.69	.0020		
		avr11	Pita AL	.72	.0040		
		mai	Mamou MI	.65	.0050		
		juin	Kéniéba NE	-.62	.0110		
		juillet	Kidira JT	.61	.0100		
		août	Kéniéba AT	.77	.0004		
		septembre	Kéniéba SE	.69	.0030		
		octobre	Kidira OE	.78	.0006		
		novembre	Pita NE	.73	.0050		
		décembre	Mamou DE	.87	.0001		
		52	DALABA	avr11	Pita AL	.78	.0005
				juillet	Galougo JT	.64	.0080
novembre	Kidira FR			.65	.0050		
38	FALEA	(*)	Kéniéba AN	.70	.0040		
		avr11	Kéniéba AL	.78	.0007		
		mai	Kéniéba JN	.58	.0311		
		juin	(1)				
		juillet	(1)				
		août	(1)				
		septembre	Kédougou SE	.79	.0003		
41	FARANAH	janvier	Mamou JR	.93	.0001		
		février	Tougué JN	.66	.0136		
19	GALOUGO	mars	Kidira MI	.65	.0162		
		avr11	Mamou AN	.77	.0022		
		mai	Faranah MS	.75	.0032		
		juin	Gourbassi JN	.79	.0013		
		juillet	Kouroussa JN	.82	.0005		
		août	Kédougou SE	.68	.0148		
		septembre	Kédougou SE	.83	.0009		
		octobre	Dabola OE	.74	.0055		
		novembre	Mamou NE	.63	.0286		
		45	KANKAN	(*)	Mamou AT	.82	.0006
				janvier	Kayes SE	.78	.0030
				février	Dalaba FR	.85	.0002
mars	Mamou MS			.73	.0048		
avr11	Pita AL			.68	.0292		
mai	Kankan JN			.47	.1082		
juin	Kidira JT			.73	.0049		
juillet	Kéniéba JN			.63	.0209		
août	Dabola SE			-.76	.0027		
septembre	Mamou AT			.66	.0134		
octobre	Kayes OE			.89	.0001		
novembre	Pita NE			.71	.0217		
40	KOUROUSSA	(*)	Bakel OE	.86	.0014		
		mars	Kouroussa AN	.91	.0001		
		avr11	Kankan MS	.63	.0210		
		juin	Bakel MI	.76	.0026		
		juillet	Kankan MI	-.78	.0049		
		août	Dabola AL	.78	.0028		
		septembre	Bakel AN	.84	.0006		
		octobre	Bakel OE	.90	.0002		
		43	TOUGUE	(*)	Kédougou AN	.49	.0790
				avr11	Kissidoug DE	.77	.0032
				mai	Kayes MI	.55	.0344
				juin	Tougué AN	.66	.0098
juillet	Dalaba JT			.63	.0158		
août	Galougo AN			.72	.0024		
septembre	Kédougou AN			.71	.0032		
octobre	Kayes OE			.84	.0001		
novembre	Mamou AN			.71	.0047		
40	KOUROUSSA			(*)	Bakel OE	.86	.0014
				mars	Kouroussa AN	.91	.0001
				avr11	Kankan MS	.63	.0210
		juin	Bakel MI	.76	.0026		
		juillet	Kankan MI	-.78	.0049		
		août	Dabola AL	.78	.0028		
		septembre	Bakel AN	.84	.0006		
		octobre	Bakel OE	.90	.0002		
		43	TOUGUE	(*)	Kédougou AN	.49	.0790
				avr11	Kissidoug DE	.77	.0032
				mai	Kayes MI	.55	.0344
				juin	Tougué AN	.66	.0098
juillet	Dalaba JT			.63	.0158		
août	Galougo AN			.72	.0024		
septembre	Kédougou AN			.71	.0032		
octobre	Kayes OE			.84	.0001		
novembre	Mamou AN			.71	.0047		
43	TOUGUE			(*)	Bakel AN	.78	.0047
				avr11	Faranah AL	.75	.0203
				mai	Labé MI	.96	.0022
		juin	Galougo MI	.70	.0077		
		juillet	Kédougou AT	.72	.0084		
		août	Pita AT	.72	.0084		
		septembre	Dalaba JN	.72	.0056		
		octobre	Tougué AT	-.74	.0151		
		novembre	Kéniéba NE	.78	.0077		
		43	TOUGUE	(*)	Bakel AN	.78	.0047
				avr11	Faranah AL	.75	.0203
				mai	Labé MI	.96	.0022
juin	Galougo MI			.70	.0077		
juillet	Kédougou AT			.72	.0084		
août	Pita AT			.72	.0084		
septembre	Dalaba JN			.72	.0056		
octobre	Tougué AT			-.74	.0151		
novembre	Kéniéba NE			.78	.0077		

r : coefficient de corrélation de Pearson ;
P : degré de signification de la corrélation ou coefficient de Fisher ;

(1) : utilisation de la répartition mensuelle interannuelle ;
(*) : corrélation de la pluviométrie annuelle ;

JR : janvier, FR : février, MS : mars, AL : avr11, MI : mai, JN : juin, JT : juillet, AT : août, SE : septembre, OE : octobre, NE : novembre, DE : décembre, AN : année.

Pour les mois de juillet, août et septembre, les bornes inférieures de l'intervalle de confiance à 95% ont été utilisées pour respecter la corrélation spatiale de la pluviométrie annuelle.

La correction des données pluviométriques par des méthodes statistiques est d'autant plus nécessaire que les données utilisées proviennent de sources diverses. Pour la période 1951-1980, les résultats publiés par LO (1984), SOW (1984) et la FAO (GUPTA, 1987) sont repris ; les corrections y sont déjà effectuées d'après la méthode des doubles cumulés (DUBREUIL, 1974). Pour la période 1979-1986, cette méthode surtout graphique, fastidieuse et longue, n'a pas été appliquée. Sur les 19 stations dites de référence, 6 ont des données complètes sur la période considérée ; pour les autres, certains mois, voire même l'année entière, manquent. Toutes ces données récentes sont corrigées et étendues en effectuant des régressions linéaires simples, à la fois temporelles (de 1968 à 1987) et spatiales (sur l'ensemble des stations références) : au cas par cas, la meilleure corrélation entre la pluie mensuelle de la station i et la pluie mensuelle de la station j est choisie (tableau 11). Le coefficient de Fisher p, indiqué dans le tableau 11, est la probabilité pour que la corrélation ne soit pas significative ; en règle générale, dans les phénomènes naturels, on considère que la valeur du coefficient de corrélation est significative pour $p < 10\%$.

2. Le tracé des cartes d'isohyètes

Tableau 12 : Moyennes pluviométriques interannuelles (en mm/an)

N° de réf.	Stations	Coordonnées			Pluviométrie annuelle		Type de climat
		Lat. N	Long. W	Alt.	1951-80	1979-86	
1	Kiffa	16°35'	11°25'	122	330 (1)		Domaine sahélien P<500 mm
2	Sélibaby	15°14'	12°10'	60	415 (1)		
3	Matam	15°38'	13°15'	15	437 (1)		
4	Nara	15°10'	7°17'	263	440 (1)		
5	Ballé	15°20'	8°35'	285	455 (1)		
* 6	Bakel	14°54'	12°28'	25	499 (1)	448	
7	Mourdiah	14°28'	7°28'	314	504 (1)		Domaine nord-soudanien P<1000 mm
8	Aourou	14°58'	11°35'	65	536 (1)		
9	Ntoro	15°14'	9°36'	235	564 (1)		
10	Yélimane	15°07'	10°34'	97	571 (1)		
11	Koussané	14°53'	11°14'	96	590 (1)		
12	Diéma	14°33'	9°11'	252	610 (1)		
*13	Kidira	14°28'	12°13'	35	675 (1)	505	
*14	Kayes	14°26'	11°26'	46	695 (1)	574	
15	Sandaré	14°43'	10°18'	281	715 (1)		
16	Konfakari	14°34'	10°54'	81	719 (1)		
17	Diamou	14°06'	11°16'	60	757 (1)		
18	Oussoubidiana	14°15'	10°28'	259	789 (1)		
*19	Galougo	13°50'	11°04'	91	840 (1)	657	
20	Kourouninkoto	13°52'	9°35'	267	840 (1)		
21	Bafoulabé	13°48'	10°50'	104	847 (1)		
22	Tambacounda	13°40'	13°41'	49	854 (2)		
23	Toukoto	13°27'	9°53'	177	858 (1)		
*24	Gourbassi	13°24'	11°28'	79	916 (1)	711	
25	Faladye	13°08'	8°21'	337	975 (1)		
26	Néga	12°52'	7°30'	290	996 (1)		
27	Kita	13°04'	9°27'	328	1033 (1)		Domaine sud-soudanien P>1000 mm
28	Saraya	12°47'	11°47'	186	1065 (1)		
29	Sirakoro	12°41'	9°40'	369	1084 (1)		
30	Bamako	12°38'	8°02'	332	1085 (4)		
31	Kangaba	11°56'	8°25'	370	1140 (4)		
32	Koundara	12°29'	13°18'	74	1264 (3)		
33	Bougouni	11°25'	7°30'	350	1270 (4)		
*34	Kédougou	12°33'	12°13'	122	1285 (2)	1110	
*35	Kénédougou	12°48'	11°21'	136	1292 (1)	(1022)	
36	Guénégoré	12°44'	11°01'	240	1303 (1)		
*37	Siguiri	11°26'	9°10'	362	1330 (4)	(1154)	
*38	Faléa	12°16'	11°17'	455	1422 (1)	1099	
39	Dinguiraye	11°17'	10°43'	523	1527 (3)		Domaine guinéen P>1500 mm
*40	Kouroussa	10°39'	9°53'	372	1535 (4)	(1239)	
*41	Faranah	10°02'	10°42'	340	1620 (4)	(1475)	
*42	Dabola	10°45'	11°07'	438	1626 (3)	(1163)	
*43	Tougué	11°26'	11°40'	868	1629 (2)	(1351)	
*44	Labé	11°19'	12°18'	1025	1661 (3)	1440	
*45	Kankan	10°23'	9°18'	377	1685 (4)	(1469)	
46	Malik	12°08'	12°18'	1464	1800 (3)		
*47	Pita	11°04'	12°24'	965	1850 (3)	1389	
48	Gaoual	11°46'	13°12'	81	1879 (3)		
*49	Mamou	10°22'	12°05'	783	1939 (3)	1666	
*50	Kissidougou	9°11'	10°06'	528	2035 (4)	(1900)	
51	Kindia	10°03'	12°51'	250	2091 (3)		
*52	Dalaba	10°43'	12°15'	1202	2180 (3)	1526	
53	Télimélé	10°54'	13°02'	729	2316 (3)		
54	Macenta	8°33'	9°28'	700	2625 (4)		

(1) SOW ; (2) LO ; (3) F.A.O. ; (4) Monographie du Niger ;
() estimation ; * station référence ; Alt. altitude en mètre.

Les données de la période 1951-1980 sont regroupées dans le tableau 12 ; les bassins versants de la Tominé et du Konkouré ne sont pas représentés. Afin de compléter cette information manquante, la carte des isohyètes d'Afrique occidentale publiée par LEROUX (1980) a été utilisée. Pour la période plus récente de 1979-1986, les 19 stations références ne constituent pas un réseau suffisamment dense pour pouvoir tracer les isohyètes. Aussi, la pluviométrie annuelle des 35 autres stations est estimée à partir du pourcentage de péjoration pluviométrique de la période 1979-86 par rapport à la période 1951-80. Ce taux a été déterminé par domaine climatique à partir des stations références (tableau 15). Si P_1 est la pluviométrie de la période 1 et P_2 la pluviométrie de la période 2, alors le pourcentage de péjoration pluviométrique de la période 1 par rapport à la période 2, $\delta(P_1/P_2)$, est donné par :

$$\delta(P_1/P_2) = \left(1 - \frac{P_1}{P_2} \right) \cdot 100$$

B - LA DYNAMIQUE DES PRECIPITATIONS (PERIODE 1951-1980)

La longue série de 1951-80 a l'avantage d'englober deux séquences sèches et deux séquences humides. Sa moyenne interannuelle est donc représentative de la pluviosité de la région.

La zone étudiée est encadrée par les isohyètes 2300 mm, au Sud, et 300 mm, au Nord (fig.17). Au-dessus du Fouta Djalou, les isohyètes ont une orientation SW-NE et se redressent progressivement vers le Nord. On passe rapidement de 2300 mm/an à Téliélé, sur le contrefort occidental, à 1700 mm/an à Labé, au centre du massif. Ensuite, la décroissance est plus lente jusqu'à 1300 mm/an. Dans cette zone, la pluviosité est surtout liée à l'altitude (SOW, 1984). Sur le bassin versant amont du Niger, les isohyètes sont sensiblement orientées E-W et sont régulièrement espacées. L'effet d'altitude ne se fait ressentir que vers Kissidougou, à l'extrême Sud du bassin où l'on passe de 2000 mm/an à 2600 mm/an à Macenta sur une distance de 100 km seulement et pour une augmentation d'altitude de 200 mètres. La décroissance vers le Nord est régulière de 1500 mm/an à 1000 mm/an, surtout à l'Ouest, le tracé étant plus tourmenté à l'Est, vers Kédougou. Au-delà de 1000 mm/an, le tracé est nettement d'axe E-W et la décroissance régulière ; dans cette zone, la pluviosité est principalement expliquée par la latitude (SOW, 1984).

C - UNE GRANDE DIVERSITE DE CLIMATS

Située entre les régions tropicales humides et les confins du Sahara (de 9° à 17°30'N), la zone étudiée présente une grande diversité de climats. De tous les facteurs qui prévalent à la définition des domaines climatiques, la pluviosité et la température ont été choisies conformément à l'optique exposée en introduction de ce chapitre. Cette démarche correspond à celle adoptée par LEROUX (1980). Depuis les reliefs du Fouta Djalou jusqu'aux plaines sableuses mauritaniennes, quatre domaines climatiques se disposent en bande parallèle d'orientation sensiblement E-W. Caractérisées par la pluviométrie annuelle (P), la température moyenne annuelle (T), le taux annuelle d'humidité relative (HR) et la longueur de la saison des pluies, ce sont du Sud au Nord :

- le *domaine guinéen* : $P > 1500$ mm/an, $T = 22-24^\circ\text{C}$, $HR > 50\%$ et la saison des pluies dure huit mois (d'avril à novembre). Ce domaine est parfois désigné sous l'appellation de climat "foutanien" pour faire allusion à l'obstacle vigoureux du massif du Fouta Djalou qui s'oppose à la progression de la mousson et provoque des pluies abondantes (OLIVRY, 1983) ;

- le *domaine sud-soudanien* : $P > 1000$ mm/an, $T > 27^\circ\text{C}$, $HR > 50\%$ et la saison des pluies dure six à huit mois ;

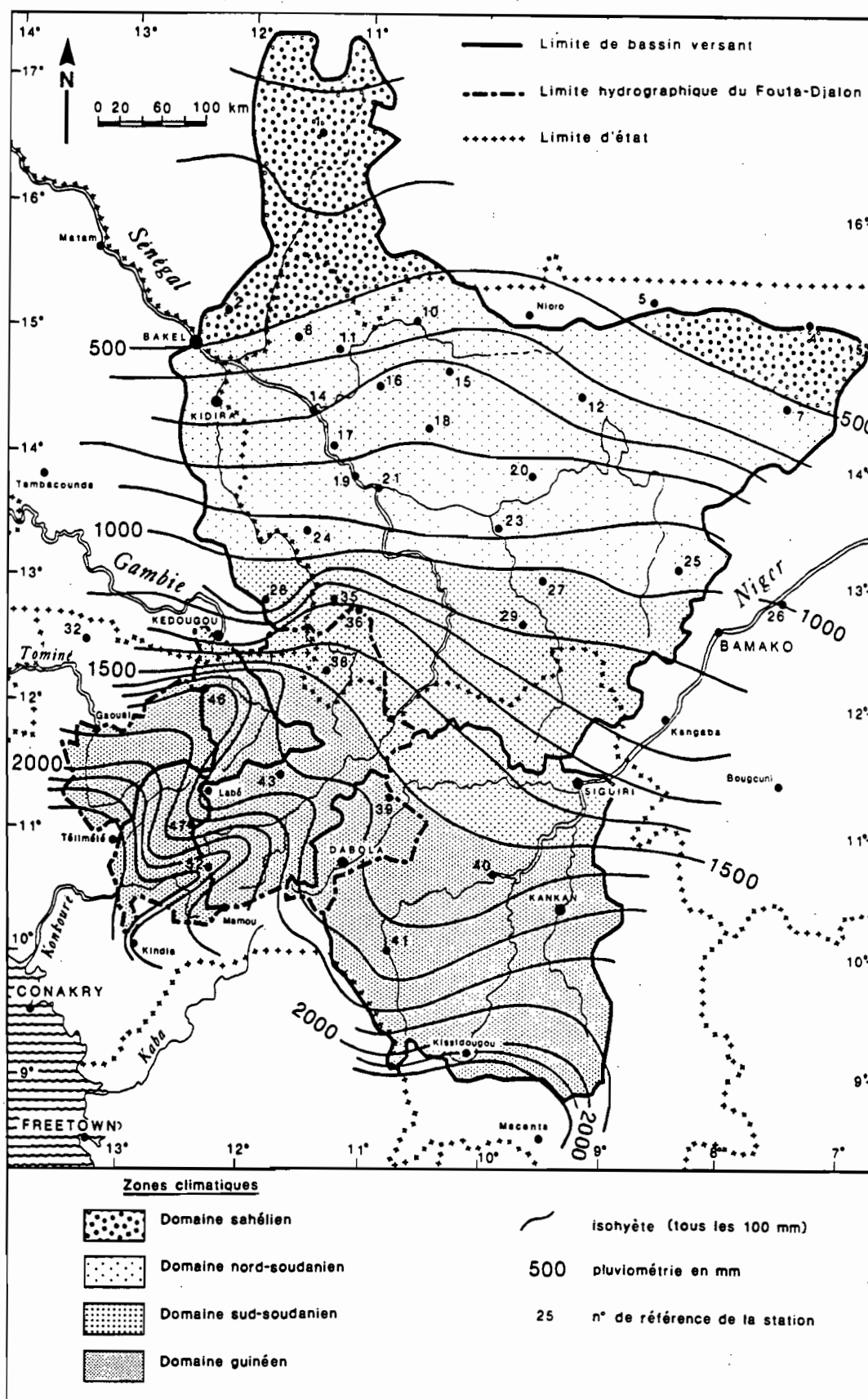


Fig. 17 : Isohyètes interannuelles du Fouta Djallon et des bassins supérieurs du Sénégal et du Niger pour la période 1951-80.

- le *domaine nord-soudanien* : $P < 1000$ mm/an, $T > 27^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} < 50\%$ et la saison des pluies dure quatre à six mois ;

- le *domaine sahélien* : $P < 500$ mm/an, $T > 30^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} < 40\%$ et la saison des pluies dure deux à trois mois (de juillet à septembre).

Les domaines ainsi définis sont délimités géographiquement à partir de la carte des isohyètes établie sur la période 1951-80 (fig.17). Le domaine guinéen englobe la quasi totalité du Fouta Djallon et du bassin amont du Niger ; c'est dans ce domaine que prennent leur source les fleuves majeurs de cette région ouest africaine. Le domaine sud-soudanien couvre les contreforts septentrionaux du Fouta Djallon et le plateau Mandingue. Cette zone s'élargit vers l'Est : elle passe de 100 km de large à l'Ouest à 200 km à l'Est. Ensuite, le domaine nord-soudanien s'étend de Kita à Bakel selon une bande E-W de 250 km de large. Enfin, au Nord de Bakel s'étend le domaine sahélien qui est de plus en plus saharien depuis une quinzaine d'année : ses apports en eau sont négligeables.

D - LA PLUVIOSITE ANNUELLE

Six stations représentatives des quatre domaines climatiques ont servi à l'étude de la variabilité de la pluviosité : Bakel, exutoire du bassin du Sénégal et à la limite du domaine sahélien et nord-soudanien, Kédougou, exutoire du bassin de la Gambie sur les contreforts septentrionaux du Fouta Djallon en domaine sud-soudanien, Labé, au centre du Fouta Djallon en domaine guinéen, Dabola, sur la limite Est du Fouta Djallon, également en domaine guinéen, Kankan et Siguiri, deux stations du bassin du Niger respectivement en domaine guinéen et en domaine sud-soudanien. Le tableau 13 donne les caractéristiques géographiques de ces six stations en même temps que leur pluviosité interannuelle sur la période référence 1951-1980. Les trois stations de Bakel, Kédougou et Labé se situent à la même longitude et sont à des altitudes croissantes du Nord au Sud, la différence d'altitude entre les deux extrêmes étant de 1000 mètres. Leur étude concomitante permet donc de faire une radiographie de l'évolution Nord-Sud de la pluviosité. L'intérêt des trois autres stations est de situer le bassin du Niger par rapport aux bassins du Sénégal et de la Gambie auxquelles les trois stations premièrement citées appartiennent.

Tableau 13 : *Caractéristiques des stations pluviométriques choisies*

Station	Bassin versant	Domaine climatique	Altitude (m)	Distance à l'océan (km)	Lat. Nord	Long. Ouest	Période observée	P (mm/an)
BAKEL	Sénégal	sahélien	25	460	14°54	12°28	1951-80	499
KEDOUGOU	Gambie	S-soudanien	122	350	12°33	12°13	1951-80	1285
LABE	Sénégal	guinéen	1025	235	11°19	12°18	1951-80	1661
DABOLA	Niger	guinéen	438	300	10°45	11°07	1951-80	1626
SIGUIRI	Niger	S-soudanien	362	520	11°26	9°10	1951-80	1330
KANKAN	Niger	guinéen	377	450	10°23	9°18	1951-80	1685

1. La pluviosité annuelle et son irrégularité temporelle

Le tableau 14 donne la pluviométrie annuelle des six stations choisies depuis 1951 ainsi que l'écart pluviométrique annuel, δP , calculé de la façon suivante :

$$\delta P = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \cdot 100$$

où P est la pluviométrie de l'année considérée et \bar{P} la moyenne pluviométrique interannuelle de la période 1951-80.

Tableau 14 : Pluviosité annuelle (P en mm) et écart à la moyenne (δP en %) à Bakel, Kédougou, Labé, Dabola, Siguiri et Kankan

Année	Bakel		Kédougou		Labé		Dabola		Siguiri		Kankan	
	P	δP	P	δP	P	δP	P	δP	P	δP	P	δP
1951	-		1527	+19	2076	+25	1971	+21	1311	-1	1505	-11
1952	-		(1231)	-4	1462	-12	1643	+1	1061	-20	1530	-9
1953	-		1196	-7	1472	-11	1935	+19	1475	+11	1770	+5
1954	-		2160	+68	1785	+7	1669	+3	1460	+10	1911	+13
1955	-		1257	-2	1932	+16	1783	+10	1120	-16	1870	+11
1956	-		1060	-18	1764	+6	1655	+2	1341	+1	1392	-17
1957	-		1553	+21	1902	+15	1864	+15	1445	+9	1960	+16
1958	-		(1090)	-15	2159	+30	1233	-24	1417	+7	1486	-12
1959	-		(1250)	-3	1771	+7	1503	-8	1125	-15	1838	+9
1960	-		(1200)	-7	1484	-11	1678	+3	1240	-7	1807	+7
1961	-		(1390)	+8	1746	+5	1463	-10	1034	-22	1372	-19
1962	-		1444	+12	2090	+26	1763	+8	1415	+6	1876	+11
1963	-		1375	+7	1491	-10	1484	-9	1305	-2	1404	-17
1964	-		1362	+6	1911	+15	1437	-12	1606	+21	1698	+1
1965	-		1372	+7	1533	-8	1411	-13	1615	+21	1485	-12
1966	-		1454	+13	1606	-3	1614	-1	1442	+8	1475	-12
1967	-		1125	-12	2118	+28	1718	+6	1368	+3	1936	+15
1968	484	-3	1147	-11	1579	-5	1313	-19	1258	-5	1727	+2
1969	575	+15	1336	+4	1792	+8	1737	+7	1397	+5	1873	+11
1970	457	-8	1088	-15	1345	-19	1214	-25	1178	-11	1349	-20
1971	540	+8	1180	-8	1476	-11	1578	-3	1147	-14	1490	-12
1972	394	-21	972	-24	1770	+7	1369	-16	1219	-8	1318	-22
1973	396	-21	1211	-6	1487	-10	1393	-14	-	-	1545	-8
1974	681	+36	1297	+1	1537	-7	1382	-15	1379	+4	1862	+11
1975	667	+34	1272	-1	1443	-13	1482	-9	1441	+8	1517	-10
1976	320	-36	1121	-13	1488	-10	1379	-15	-	-	1398	-17
1977	391	-22	1110	-14	1332	-20	1039	-36	-	-	1293	-23
1978	562	+13	1595	+24	1405	-15	1229	-24	-	-	1611	-4
1979	410	-18	959	-25	1365	-18	1205	-26	(1208)	-9	1799	+7
1980	410	-18	1115	-13	1487	-10	1306	-20	1261	-5	1338	-21
1981	535	+7	1295	+1	1592	-4	1148	-29	(1170)	-12	(1534)	-9
1982	573	+15	957	-26	1550	-7	(1236)	-24	1186	-11	(1435)	-15
1983	403	-19	883	-31	1522	-8	(1168)	-28	997	-25	(1460)	-13
1984	251	-50	1224	-5	1227	-26	1055	-35	1062	-20	(1278)	-24
1985	532	+7	1273	-1	1434	-14	1132	-30	1209	-9	(1521)	-10
1986	469	-6	1178	-8	1342	-19	(1056)	-35	(1141)	-14	(1390)	-18

les valeurs entre () sont estimées

Quelle que soit la station considérée, la courbe d'évolution interannuelle de la pluie est une courbe en "dents de scie" sans cyclicité apparente (fig.18). Cette irrégularité interannuelle est caractérisée par l'écart pluviométrique annuel δP ; si on fait la somme des valeurs absolues de δP (soit $\sum \|\delta P\|$), les six stations se classent dans l'ordre croissant suivant : la station la plus stable est Siguiri, puis on trouve Kankan, Labé et Kédougou, Dabola et enfin la plus irrégulière est Bakel. A l'exception de Siguiri, on retrouve là l'évolution Sud-Nord de la pluviosité, caractéristique de la région. Ainsi à une station donnée, l'irrégularité interannuelle s'accroît lorsque la pluviosité diminue, c'est-à-dire lorsqu'on passe du régime guinéen au régime soudanien puis sahélien (ROCHETTE, 1974 ; SOW, 1984 ; BRUNET-MORET & al., 1986).

2. La pluviosité annuelle et son irrégularité spatiale

A l'échelle d'une année, l'irrégularité existe également au niveau spatiale. Il n'apparaît pas de correspondance directe d'une station à l'autre, même si sur une décennie au moins la répartition de la pluviosité reste homogène à l'intérieur d'un domaine climatique.

Pour illustrer cette irrégularité spatiale, considérons le cas des deux stations de Labé et Kédougou. A Labé, la hauteur moyenne annuelle pour la période 1951-1980 s'élève à 1661 mm ; à Kédougou, elle est de 1285 mm pour la même période. L'écart annuel moyen entre les deux stations est donc de l'ordre de 400 mm. Cependant, dans le détail, la répartition annuelle des pluies présente une très grande hétérogénéité. Certaines années (1927, 1939, 1954, 1978), les précipitations ont été plus abondantes à Kédougou qu'à Labé. Cette grande hétérogénéité transparaît aussi dans la comparaison des 10 années à plus faible ou à plus forte pluviosité (GAC & al., 1987a).

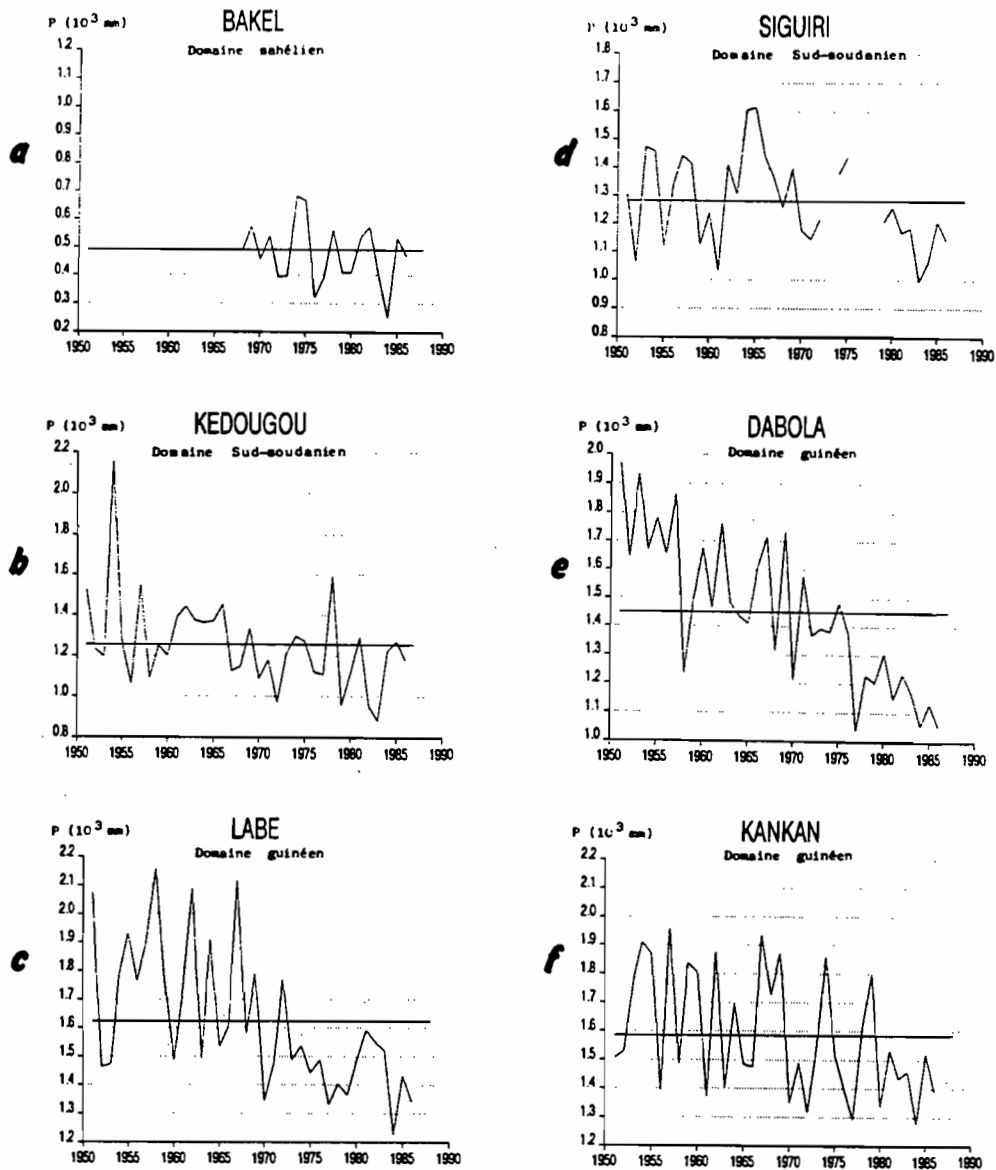


Fig. 18 : Evolution interannuelle de la pluviométrie de 1951 à 1986.
 - a, b, c : section Nord-Sud ; - d, e, f : bassin supérieur du Niger.

La figure 19 permet de visualiser l'irrégularité de l'évolution spatio-temporelle du facteur pluie. Cette figure, établie à partir des écarts à la moyenne δP , montre qu'une année excédentaire peut se trouver au milieu de plusieurs années déficitaires ; que le maximum maximum peut se trouver au sein d'années déficitaires ; que le minimum minimum intervient toujours dans une période déficitaire ; et qu'aucune station depuis le début des observations jusqu'en 1970 n'a connu une seule année ayant le même caractère partout (excédentaire, normale ou déficitaire). Enfin, il apparaît clairement que la période 1970-1986 est la seule période, depuis le début du siècle, à être déficitaire sur l'ensemble de la zone étudiée.

3. Les séquences humides et sèches

Ces divergences ponctuelles d'une station à l'autre et d'une année sur l'autre amènent à analyser la variabilité de la pluviosité en terme de période et non d'année. Ce travail a été fait par SOW (1984). A partir de l'analyse du facteur pluie uniquement, il retrouve les trois grandes périodes de sécheresse de l'Afrique intertropicale définies par SIRCOULON (1976) à partir de l'analyse concomitante des facteurs pluie et débit des fleuves, à savoir : la sécheresse des années "1913" (1907-1914), la sécheresse des années "1940" (1941-1945) et la sécheresse des années "1972" (1968- ?). Cette délimitation est analogue à celle définie par FAURE & GAC

(1981) et GAC & FAURE (1987) dans le bassin du Sénégal à partir de moyennes mobiles sur 5 ans effectuées sur les débits du fleuve Sénégal à Bakel : deux périodes humides allant de 1920 à 1939 et de 1952 à 1968, et deux périodes arides de 1939 à 1952 et depuis 1970.

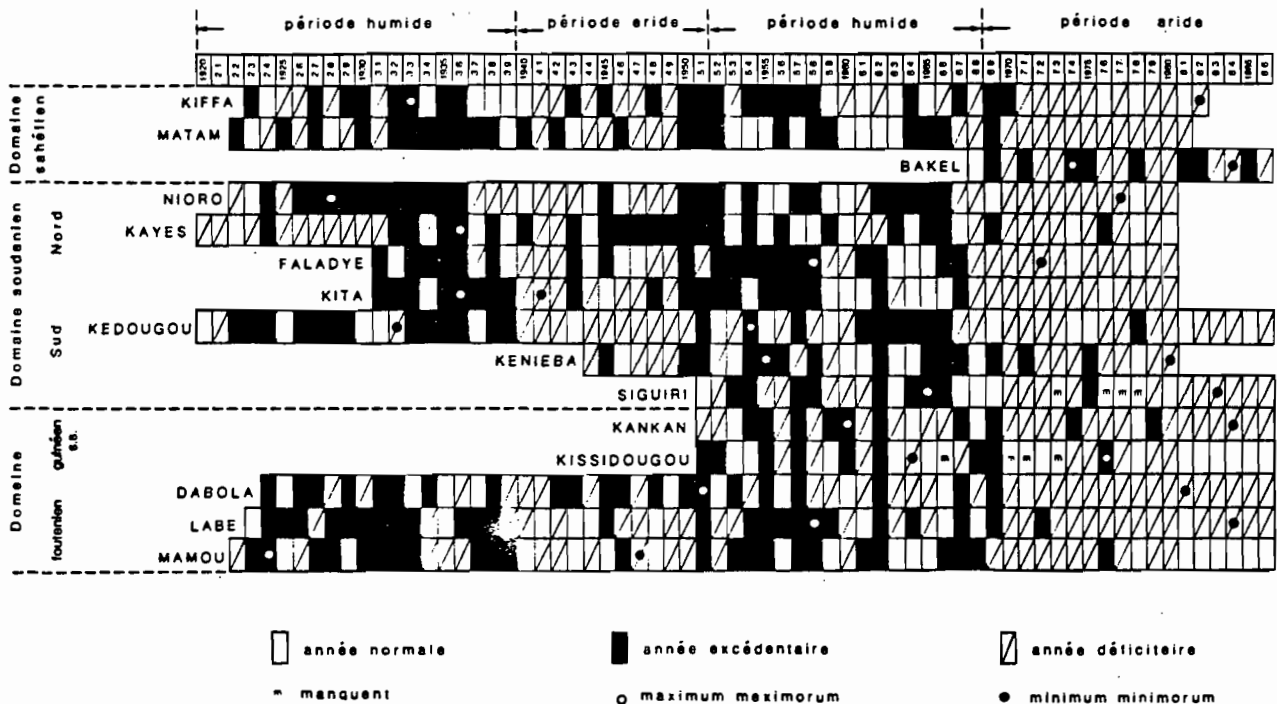


Fig. 19 : Caractéristiques de la pluviosité de quelques stations des bassins supérieurs du Sénégal, de la Gambie et du Niger depuis l'origine des observations.

E - LA PERIODE 1979-1986

1. La carte des isohyètes

La forme des isohyètes de la période 1979-86 (fig.20) n'est pas fondamentalement différente de celle de la période 1951-80. Seule change la pluviosité : la zone étudiée est maintenant encadrée par les isohyètes 200 mm/an et 1900 mm/an, au lieu de 300 mm/an et 2300 mm/an. L'isohyète 500 mm/an est descendue vers le Sud de 40 km à l'Ouest et de 100 km à l'Est, celle de 1000 mm/an de 40 km à l'Ouest et de 120 km à l'Est, enfin celle de 1500 mm/an a pris la place de l'isohyète 2000 mm/an dans le Fouta et de l'isohyète 1700 mm/an dans le bassin du Niger, soit respectivement une descente de 180 km vers le S-W et de 100 km vers le Sud.

Cette brève description souligne que le caractère déficitaire de la période 1979-86 augmente de l'Ouest vers l'Est, mis à part le Fouta Djallon où le déficit est le plus marqué.

2. La période 1979-86 dans la sécheresse des années "70"

Le caractère exceptionnel de la sécheresse actuelle apparaît nettement en comparant les mesures récentes à celles de la série complète des observations (fig.18). A l'exception de l'année 1981 à Kédougou et des années 1981, 1982 et 1985 à Bakel, le déficit pluviométrique est de règle depuis 1979 (fig.19). Le taux de péjoration pluviométrique $\delta(P_3/P_1)$ de la période 1979-86 (P_3) par rapport à la période 1951-80 (P_1) montre que toutes les stations références sont déficitaires : ce déficit varie de 7% à Kissidougou et Faranah (bassin du Niger) jusqu'à 30% à Pita, Dabola et Dalaba (Fouta Djallon) (tableau 15). Ces deux extrêmes se situent dans le domaine guinéen où on peut distinguer deux comportements climatiques différents :

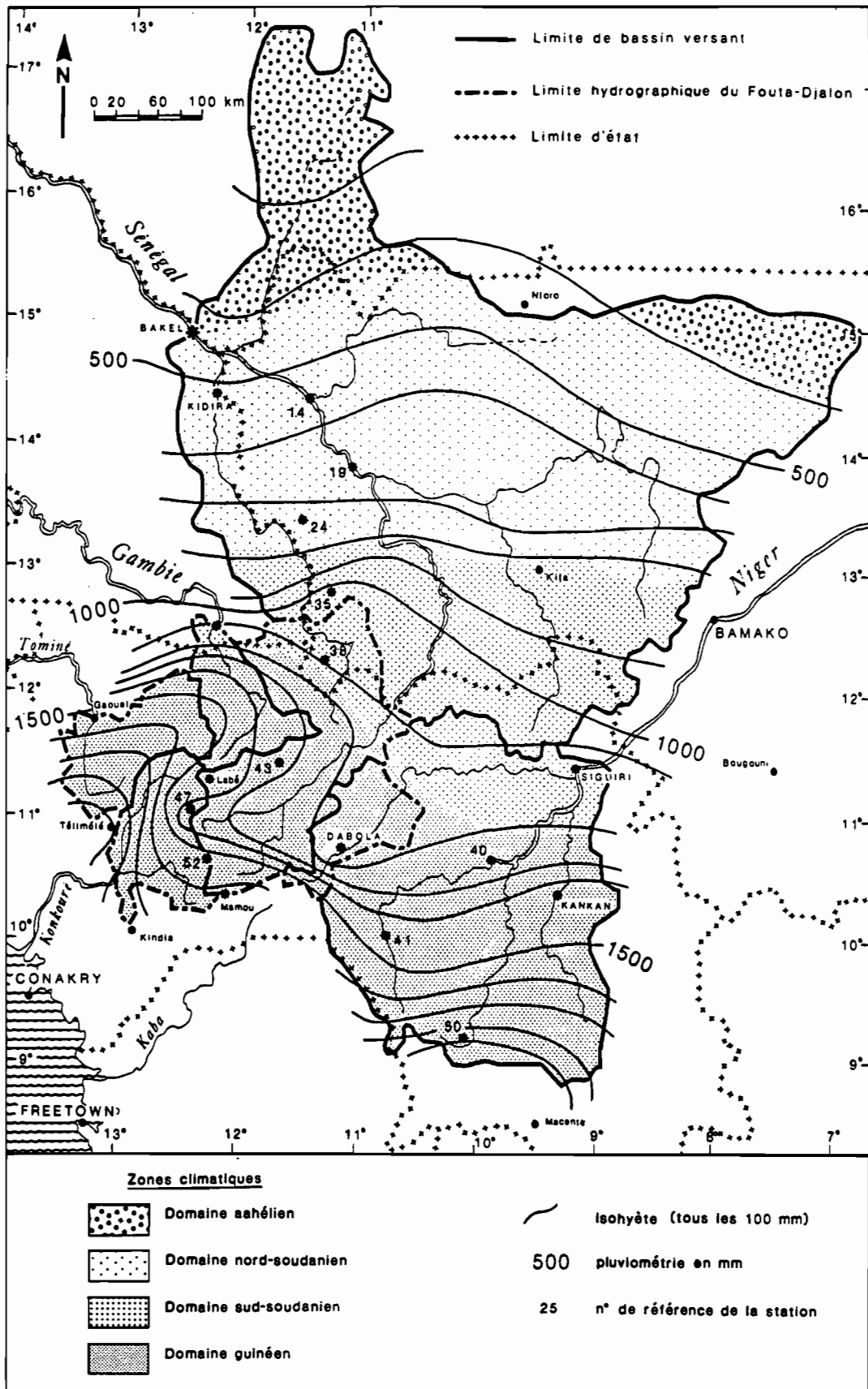


Fig. 20 : Isohyètes interannuelles du Fouta Djalon et des bassins supérieurs du Sénégal et du Niger pour la période 1979-86.

- le sous-régime guinéen s.s. correspond au bassin amont du Niger, l'effet d'altitude y est négligeable et la péjoration pluviométrique y est la moins prononcée, seulement 12% ;

- le sous-régime foutanien correspond au massif du Fouta Djallon, le déficit pluviométrique y est très marqué, de l'ordre de 21%.

Tableau 15 : Péjorations pluviométriques (en %) de la période 1979-86 (P_3) par rapport aux périodes 1951-80 (P_1) et 1970-86 (P_2)

N° de réf.	Station	Pluviosité (mm/an)			Péjoration pluviométrique		Domaine climatique		
		(P_1)	(P_2)	(P_3)	$\delta(P_3/P_1)$	$\delta(P_3/P_2)$			
6	Bakel	499	470	448	10	-	5	-	sahélien
13	Kidira	675	546	505	25		8		nord-soudanien
14	Kayes	695	598	574	17	22 %	4	8 %	
19	Galougo	840	715	657	22		8		
24	Gourbassi	916	802	711	22		11		
34	Kédougou	1285	1161	1110	14		4		sud-soudanien
35	Kéniéba	1292	1083	(1022)	21	18 %	6	5 %	
37	Siguiri	1330	1200	(1154)	13		4		
38	Faléa	1422	1164	1099	23		6		
40	Kouroussa	1535	1251	(1239)	19		1		régime guinéen s.s.
41	Faranah	1620	1517	(1475)	9	12 %	3	2 %	
45	Kankan	1685	1479	(1469)	13		1		
50	Kissidougou	2035	1951	(1900)	7		3		
42	Dabola	1626	1257	(1163)	29		7		régime foutanien
43	Tougué	1629	1405	(1351)	17		4		
44	Labé	1661	1459	1440	13	21 %	1	3 %	
47	Pita	1850	1352	1389	25		-3		
49	Mamou	1939	1719	1666	14		3		
52	Dalaba	2180	1661	1526	30		8		

Dans le domaine soudanien (Sud et Nord), le taux calculé est relativement homogène. Le déficit semble s'accroître du Sud au Nord (de 18 à 22%). Le taux mesuré à Bakel n'a pas été retenu pour le domaine sahélien à cause de la trop courte période enregistrée.

Enfin, pour situer la période 1979-86 dans la sécheresse des années "1970", le taux de péjoration pluviométrique $\delta(P_3/P_2)$ de la période 1979-86 (P_3) par rapport à la période 1970-86 (P_2) a également été calculé. A l'exception de la station de Pita (sur le versant ouest du Fouta Djallon), la période 1979-86 a partout un caractère d'aridité légèrement plus marqué que la période 1970-86 (tableau 15). La plus grande variabilité se situe dans le Fouta Djallon où le taux de péjoration varie de -3% à +8%. Dans les autres domaines climatiques ou sous-régime, le déficit croît du Sud au Nord, de 3% en sous-régime guinéen s.s. à 5% en domaine sud-soudanien et 8% en domaine nord-soudanien.

F - LES REGIMES PLUVIOMETRIQUES SAISONNIERS ET LEUR VARIABILITE

1. Une répartition saisonnière constante

La répartition mensuelle de la pluviosité est caractérisée par l'alternance d'une saison pluvieuse et d'une saison sèche, seule la durée des saisons changeant d'un domaine climatique à l'autre. Les moyennes pluviométriques mensuelles calculées d'une part, sur la période 1951-80 et d'autre part, sur la période 1979-86 montrent que la période récente conserve la même répartition saisonnière des pluies malgré son caractère pluviométrique déficitaire (fig.21).

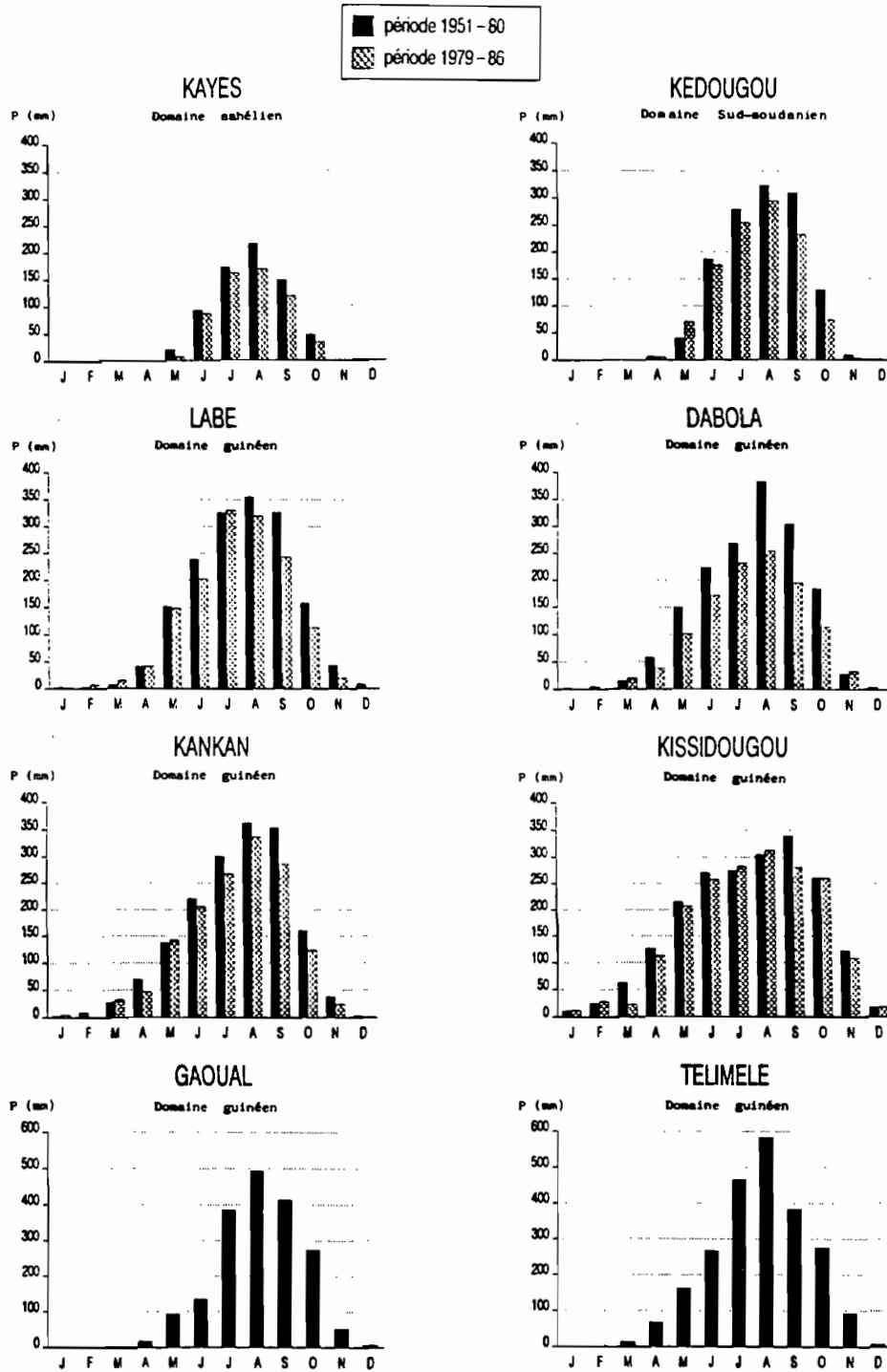


Fig. 21 : Evolution mensuelle de la pluviosité de quelques stations des bassins supérieurs du Sénégal, de la Gambie et du Niger pour la période 1951-80 et la période 1979-86.

Le tableau 16 donne les moyennes pluviométriques mensuelles de toutes les stations références. Le maximum pluviométrique mensuel se situe partout en août, à l'exception de Faranah et Labé où ce mois représente tout de même, respectivement, 17% et 22% de la pluie annuelle. Par domaine climatique, le mois d'août concentre environ 40% des précipitations annuelles en domaine sahélien, 31% en domaine nord-soudanien, 29% en domaine sud-soudanien et 22% en domaine guinéen. Enfin, retenons que l'ensemble de la zone étudiée est essentiellement arrosé de juin à octobre, période durant laquelle il reçoit de 73% (à Kissidougou) à 99% (à Bakel) des précipitations annuelles ; on note encore ici le gradient Nord-Sud d'abondance des pluies.

Tableau 16 : Moyennes pluviométriques mensuelles des stations références pour la période 1979-86

réf.	Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	P(an)
6	Bakel	0	2	0	0	3	33	117	<u>177</u>	98	17	0	1	448
13	Kidira	0	0	0	0	10	53	155	<u>156</u>	117	14	0	0	505
14	Kayes	0	0	0	0	7	86	161	<u>168</u>	118	34	0	0	574
19	Galougo	0	0	0	0	17	88	183	<u>200</u>	127	39	2	1	657
24	Gourbassi	0	0	2	0	25	116	173	<u>225</u>	139	29	2	0	711
34	Kédougou	0	0	0	5	71	176	254	<u>295</u>	233	74	2	0	1110
35	Kéniéba	0	0	1	4	43	194	223	<u>317</u>	176	60	4	0	1022
37	Siguiri	0	0	6	36	92	172	254	<u>317</u>	198	69	8	0	1154
38	Faléa	0	0	0	3	66	165	255	<u>334</u>	203	59	14	0	1099
40	Kouroussa	0	0	5	45	117	171	231	<u>301</u>	251	118	0	0	1239
41	Faranah	1	4	26	77	158	246	<u>293</u>	<u>257</u>	230	128	55	0	1475
42	Dabola	0	0	20	38	102	172	<u>232</u>	<u>254</u>	196	114	34	0	1163
43	Tougué	0	1	6	36	102	205	<u>312</u>	<u>329</u>	235	119	6	0	1351
44	Labé	1	7	15	42	148	202	<u>330</u>	<u>319</u>	243	113	20	0	1440
45	Kankan	5	0	32	47	142	206	<u>267</u>	<u>336</u>	286	124	24	0	1469
47	Pita	0	1	10	47	155	205	275	<u>350</u>	226	86	30	4	1389
49	Mamou	1	5	30	61	141	197	315	<u>420</u>	274	168	54	0	1666
50	Kissidougou	12	28	22	113	207	258	282	<u>312</u>	280	260	108	18	1900
52	Dalaba	0	4	29	57	153	199	305	<u>357</u>	250	134	36	1	1526

2. La variabilité saisonnière interannuelle

Encore une fois, les stations de Labé et Kédougou ont été choisies comme exemple pour illustrer la variabilité saisonnière interannuelle. La figure 22 représente l'évolution des précipitations mensuelles au cours des années les plus excédentaires (1958 à Labé et 1954 à Kédougou) et les plus déficitaires (1984 pour Labé et 1983 pour Kédougou). La variabilité saisonnière interannuelle en un point donné est très importante. Elle est plus importante pour les mois de saison sèche, cependant on ne note pas de relation satisfaisante entre le bilan d'une année et la distribution des pluies au fil des saisons (SOW, 1984 ; GAC & al., 1987a).

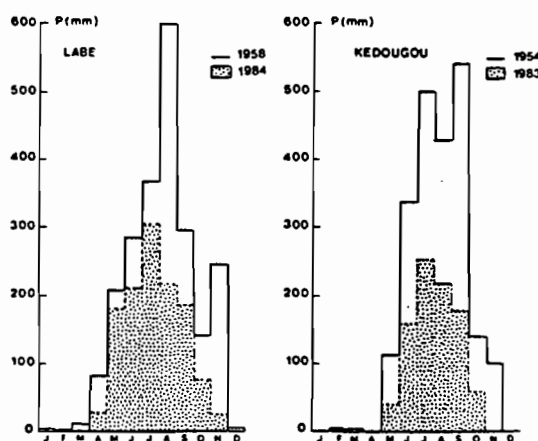


Fig. 22 : Evolution mensuelle de la pluviosité au cours d'années excédentaires (---) et déficitaires (- - -) à Labé et Kédougou.

3. La variabilité saisonnière spatiale

Pour caractériser la variabilité saisonnière spatiale de la pluie, 4 blocs-diagrammes ont été réalisés à partir de la pluviométrie mensuelle de la période 1951-80 (fig.23). Le gradient Nord-Sud d'abondance pluviométrique, déjà noté à l'échelle annuelle, existe à l'échelle mensuelle

(fig.23 a) ; ce gradient Nord-Sud tend à disparaître en domaine guinéen (fig.23 b) et la saison sèche est plus marquée à l'Ouest qu'à l'Est (fig.23 c et d). On voit encore ici une opposition entre le Fouta Djallon et le bassin supérieur du Niger, c'est-à-dire entre le sous-régime foutanien et le sous-régime guinéen s.s..

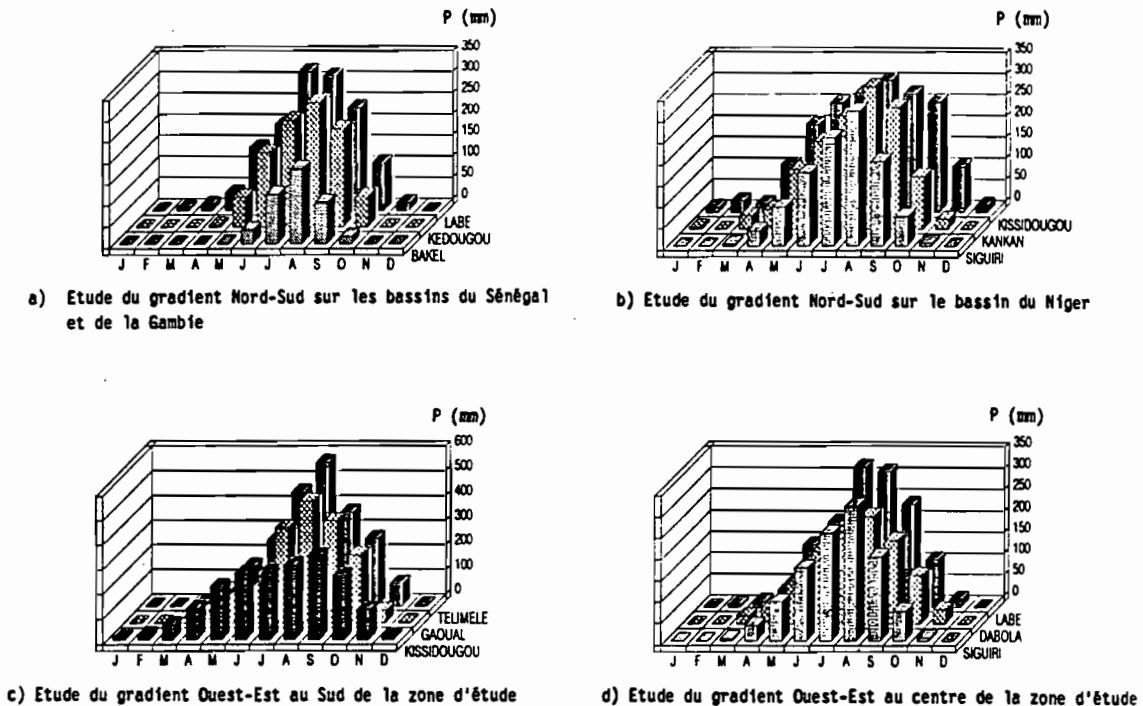


Fig. 23 : Variabilité mensuelle spatiale de la pluviosité.

G - LES PRECIPITATIONS JOURNALIERES

1. L'agressivité des pluies

Pour mieux réaliser l'impact du facteur pluie sur la dynamique du paysage, il est important de connaître la forme et la fréquence des événements pluvieux. En utilisant un simulateur de pluie, ROOSE (1977), ALBERGEL & al. (1985) et COLLINET (1988) ont montré que le premier facteur explicatif du ruissellement, et donc de l'érosion, était l'agressivité climatique, qui est liée à l'intensité et à la durée de la pluie, à la taille, à la vitesse de chute et à la distribution des gouttes.

Pour l'ensemble de la zone intertropicale sèche ouest africaine, l'intensité moyenne est de 4 mm/h (CHARREAU & NICOU, 1971) mais en fait ces auteurs considèrent plutôt la médiane qui est de 27 mm/h (le record est de 740 mm/h, soit 37 mm d'eau en 3 mn le 12-07-61 à Séfa au Sénégal). Or le caractère érosif des pluies existe à partir d'une intensité de 25 mm/h pour CHARREAU & SEGUY (1969) et de 30 mm/h pour ROOSE (1977). Un caractère agressif marqué caractérise donc la majorité des événements pluvieux. De plus, ces intensités sont souvent supérieures à la capacité d'infiltration du sol d'où un fort ruissellement (LELONG & LEMOINE, 1968 ; CHARREAU & NICOU, 1971).

Ainsi, les climats de la zone tropicale ouest africaine comptent parmi les plus agressifs du globe, plus particulièrement au Sénégal où l'indice d'agressivité de la pluie de WISCHMEIER y est l'un des plus forts observés dans le monde. Enfin, il faut ajouter que l'agressivité des pluies ne s'est pas abaissée pendant la période récente de sécheresse, la dégradation de la pluviosité annuelle n'a pas affecté les valeurs extrêmes journalières (ALBERGEL, 1986 ; MIETTON, 1988).

2. La forme des averses

Au Nord de l'isohyète 1000 mm (en domaines nord-soudanien et sahélien), la quasi-totalité des averses sont des tornades. Par contre, au Sud de cette ligne (en domaines sud-soudanien et guinéen), seules les averses du début de saison des pluies sont des tornades ; ils leur succèdent rapidement les pluies de mousson (BRUNET-MORET, 1968).

Les tornades ont, après une période préliminaire de courte durée et d'intensité moyenne (10 à 30 mm/h), un corps de forte ou très forte intensité moyenne (40 à 80, voire 100 mm/h) sur une durée courte ou très courte (10 à 30 minutes). Ce corps comporte généralement une phase paroxysmale d'intensité égale ou supérieure à 150-200 mm/h en cinq minutes ou moins. Le corps de l'averse est souvent suivi d'une traîne à faible intensité, décroissant de 20 à 1 mm/h, qui dure entre 1/2 heure à 2 heures. Chaque fois que le sol n'est pas trop perméable, les fortes intensités du corps de l'averse entraînent un ruissellement important et cela, d'autant plus que les averses ne sont pas trop éloignées les unes des autres, c'est le cas en juillet-août-septembre. Il faut noter également que chaque tornade concerne une superficie limitée.

Par contre, les pluies de mousson couvrent généralement des superficies beaucoup plus vastes. Ce sont des averses à caractère continu, qui durent plusieurs heures avec des intensités moyennes modérées, et qui comportent plusieurs pointes d'intensité comprises entre 50 et 80 mm/h.

3. Le nombre de jours de précipitations dans l'année

En zone tropicale sèche ouest africaine, il existe une corrélation linéaire entre la pluviométrie annuelle et le nombre de jours de pluie (CHARREAU & NICOU, 1971 ; BRUNET-MORET, 1968 ; BRUNET-MORET & *al.*, 1986). D'une façon générale, le nombre de jours de précipitations croît avec le total annuel moyen pluviométrique, il augmente donc régulièrement du Nord au Sud. Il est de 27 jours à Kiffa, de 57 jours à Kayes, de 74 jours à Kita, de 82 jours à Kéniéba et de 122 jours à Labé (ROCHETTE, 1974).

Enfin, les hauteurs de précipitations journalières augmentent progressivement des régions sahéliennes aux régions soudaniennes pour diminuer à nouveau en zone guinéenne où l'étalement de la saison des pluies s'accompagne d'une diminution de l'intensité des précipitations. Le nombre de précipitations journalières supérieures à 10 mm correspond à 40% de l'effectif total jusqu'à l'isohyète 1500, à 30-35% au Sud de cette isohyète. Le nombre moyen de jours de pluie supérieure à 20 mm correspond à 40% de l'effectif global, et seulement 2 à 5% des précipitations journalières dépassent 50 mm (BRUNET-MORET & *al.*, 1986).

H - LA LAME D'EAU MOYENNE PRECIPITEE

La lame d'eau moyenne annuelle précipitée est estimée à partir des cartes d'isohyètes par planimétrie. Après avoir planimétré chaque surface comprise entre deux isohyètes consécutives, un coefficient pluviométrique (défini comme étant la valeur moyenne des deux isohyètes encadrant la surface considérée) est attribué à chacune. La lame d'eau moyenne précipitée sur le bassin supérieur du Sénégal ne représente seulement que la moitié de celles précipitées sur les bassins voisins (tableau 17). Rappelons l'importance du déficit pluviométrique de la période récente 1979-86 par rapport à la période 1951-80 pouvant être considérée comme étant représentative du climat actuel. Ce déficit varie de 13% sur le bassin du Milo à 26% sur celui du Tinkisso.

SOW a utilisé sur le bassin versant supérieur du Sénégal un modèle de calcul permettant à partir d'une équation de régression multiple en fonction de la latitude, de la longitude et de l'altitude, de restituer en tout point d'un même domaine climatique une pluie moyenne annuelle. Ce modèle a été construit à partir des 55 postes pluviométriques répertoriés

dans le tableau 12. Pour la période 1951-80, il obtient une lame d'eau moyenne précipitée sur le bassin supérieur du Sénégal de 818 mm/an. L'écart avec notre résultat est de 6%, il s'explique par le fait que le modèle utilisé sous-estime l'effet d'altitude qui joue un rôle important dans le Fouta Djalou, partie sud du bassin.

Tableau 17 : *Lame d'eau moyenne précipitée (en mm/an) par bassin versant*

Bassin versant	Exutoire	Superficie (km ²)	Pluviométrie		Déficit (%)
			1951-80	1979-86	
SENEGAL FALEME	Bakel	218 000	874	685	22
	Kidira	28 900	1124	874	22
NIGER MILO TINKISSO	Siguiri	67 600	1670	1389	17
	Kankan	9 600	1879	1628	13
	Tinkisso	6 400	1607	1187	26
GAMBIE	Kédougou	7 500	1648	1376	17
TOMINE	Gaoual	9 400	1987	1647	17
KONKOURE	Konkouré	9 900	2062	1612	22

Dans le Fouta Djalou, le gradient positif E-W d'abondance pluviométrique, déjà mis en évidence figure 23, est important (tableau 18). Il y a une nette opposition entre les bassins très arrosés de la Tominé et du Konkouré sur le flanc ouest et les bassins plus secs du Tinkisso et de la Falémé sur le flanc est. Le massif du Fouta Djalou se découpe en trois bandes latitudinales d'intensité pluviométrique décroissante d'Ouest en Est. Durant la période 1979-86, il est tombé sur le Fouta Djalou une lame d'eau moyenne de 1380 mm/an.

Tableau 18 : *Répartition des pluies sur le Fouta Djalou par bassin versant*

Bassin versant	Exutoire	Superficie (km ²)	Pluviométrie (mm/an)		Climat
			1951-80	1979-86	
TOMINE KONKOURE	Gaoual	9 400	1987	1647	zone très humide
	Konkouré	9 900	2062	1612	
GAMBIE BAFING	Kédougou	7 500	1648	1376	zone humide
	Dakkasaïdou	15 700	1665	1313	
TINKISSO FALEME	Tinkisso	6 400	1607	1187	zone sèche
	Satadougou	10 100	1464	1140	
FOUTA DJALON		59 000	1740	1381	//////////

IV - LES CONDITIONS THERMIQUES ET D'EVAPOTRANSPIRATION

La pluie moyenne n'est qu'un terme du bilan hydrologique. Le second terme est le déficit d'écoulement. Il peut être approché par l'évapotranspiration qui est fonction de la température et de l'humidité relative de l'air, c'est-à-dire du vent et de l'insolation. Pour plus d'information, MICHEL (1973) a fait une analyse détaillée des microclimats du Fouta Djalou et des bassins versants du Sénégal et de la Gambie.

A - LES VENTS ET L'INSOLATION MOYENNE

Le régime des vents au sol est calqué sur le mouvement des masses d'air en altitude. Pendant la saison sèche où domine l'harmattan, les vents sont de secteur Est et NE. Durant la saison humide, époque de la mousson, les vents sont du SW et d'Ouest. En général, les vitesses sont assez faibles, de 1 m/s à 4 m/s ; les vitesses allant de 15 m/s à 20 m/s sont exceptionnelles, voire même inexistantes (BRUNET-MORET & *al.*, 1986). Les vents semblent plus forts dans la zone sahélo-soudanienne que dans la zone guinéenne, bien que dans cette région il soit très difficile d'obtenir des chiffres précis et homogènes du fait de l'altitude. Au Nord, l'importance des vents est liée à l'influence de l'harmattan. Outre ces vents réguliers qui soufflent pendant plusieurs heures, il y a des coups de vents très courts et violents qui précèdent les tornades ; ils donnent lieu à des vitesses très élevées et ont un effet beaucoup plus dévastateur que les vents réguliers.

Les variations de la durée d'insolation sont représentées en figure 24 d'après les valeurs de ROCHETTE (1974) et GAC & *al.* (1987a). Ce facteur est suffisamment homogène et représentatif d'une zone latitudinale pour que le peu d'exemples choisies permette d'appréhender l'ensoleillement moyen régnant sur l'ensemble de la zone étudiée. Quel que soit le domaine climatique considéré, la variation de l'insolation est identique : les périodes d'ensoleillement maximum se situent de décembre à avril et l'insolation est minimale pendant la saison des pluies de mai à octobre, le minimum étant atteint en août, mois le plus pluvieux. Il existe également un minimum secondaire en février qui correspond à la période du "heug" ("pluie des mangues"). La diminution précoce en octobre de la durée d'insolation enregistrée à Kayes est imputable à des vents de poussières fréquents dans cette zone.

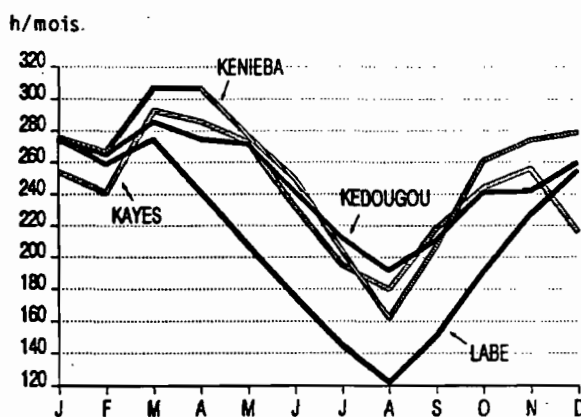


Fig. 24 : Variation de l'insolation mensuelle sur les bassins supérieurs du Sénégal, de la Gambie et du Niger.

Retenons que l'insolation totale annuelle augmente du domaine guinéen au domaine soudanien selon un axe N-S puis diminue légèrement vers le domaine sahélien. Cette diminution ne peut être expliquée par un degré d'humidité plus important de l'air, et traduit l'importance du phénomène des aérosols dans cette bande latitudinale.

B - LA TEMPERATURE DE L'AIR

Les variations de température sont régies par les variations d'incidence des rayons solaires qui conduisent à la séparation de l'année climatique en deux saisons distinctes (l'été et l'hiver) et par le rafraîchissement résultant des pluies. L'importance respective de ces deux facteurs est dépendante de la latitude (BRUNET-MORET, 1968). Mais l'influence de l'altitude devient prépondérante au-dessus de 700 mètres : ce paramètre amène à distinguer le comportement du Fouta Djallon du reste de la zone étudiée. La température moyenne des

stations au-dessus de 700 m est de 21,7°C alors qu'elle est de 25,4°C pour les zones basses du domaine guinéen correspondant en fait aux exutoires du Fouta Djallon (tableau 19).

Tableau 19 : *Températures moyennes interannuelles (en °C) de diverses stations des bassins versants amont du Sénégal, du Niger, de la Gambie, du Konkouré et de la Tominé*

N° de réf.	Stations	Altitude (m)	Moyenne interannuelle				Période observée	Origine des données	Domaine climatique
			T _m	T _x	T _n	δ			
* 6	Bakel	25	30,3	-	-	-	1979-86	ORANGE	sahélien
*14	Kayes	46	29,4	36,6	22,3	14,3	1934-64	ROCHETTE	nord-soudanien
22	Tambacounda	49	28,6	35,6	21,6	14,0	1962-81	LO	
21	Bafoulabé	104	29	36	22	14	1921-48	ROCHETTE	
9	Nioro	235	28,5	36,8	20,2	16,6	1936-64	ROCHETTE	
25	Faladye	337	27	35	19	16	1931-48	ROCHETTE	
*34	Kédougou	122	28,1	34,5	21,5	13,0	1962-81	LO	sud-soudanien
*35	Kéniéba	136	28,3	35,3	21,3	14,0	1943-64	ROCHETTE	
27	Kita	328	28,0	34,3	21,7	12,6	1959-64	ROCHETTE	
*37	Siguiri	362	26,9	33,7	20,1	13,6	1943-57	ROCHETTE	
48	Gaoual	81	25,2	-	-	-	1969-81	F.A.O.	guinéen
51	Kindia	250	25,4	30,9	19,9	11,0	1951-80	F.A.O.	
*45	Kankan	377	26	-	-	-	-	Niger	
*42	Dabola	438	25,2	27,4	23,0	4,4	1950-82	F.A.O.	
39	Dinguiraye	523	25,6	28,0	23,1	4,9	1955-75	F.A.O.	
54	Macenta	700	25	-	-	-	-	Niger	
53	Télimélé	729	22,1	22,6	21,6	1,0	1950-79	F.A.O.	
*49	Mamou	783	23,6	29,9	17,1	12,8	1951-80	F.A.O.	
*43	Tougué	868	22,5	25,0	20,0	5,0	1928-77	F.A.O.	
*47	Pita	965	22,5	29,4	21,5	7,9	1951-80	F.A.O.	
*44	Labé	1025	22,6	28,7	16,4	12,3	1939-57	ROCHETTE	
*44	Labé	1025	22,3	29,2	13,3	15,9	1951-80	F.A.O.	
*52	Da Laba	1202	18,9	20,9	17,1	3,8	1952-81	F.A.O.	
46	Mali	1464	19,2	-	-	-	1958-70	F.A.O.	

* : station référence ; T_m : température moyenne mensuelle ; T_x : moyenne mensuelle des températures maximales journalières ; T_n : moyenne mensuelle des températures minimales journalières ; δ : écart diurne moyen.
ROCHETTE (1973) ; BRUNET-MORET & al. (1986) ; F.A.O. (GUPTA, 1987).

Tableau 20 : *Caractéristiques de la température (en °C) sur les bassins supérieurs du Sénégal, de la Gambie et du Niger*

Stations	Domaine sahélien				Domaine sud-soudanien				Domaine guinéen							
	Bakel (1) (1979-1986)				Kédougou (2) (1962-1981)				Siguiri (3) (1943-1957)				Labé (3) (1939-1957)			
Mois	T _m	T _x	T _n	δ _m	T _m	T _x	T _n	δ _m	T _m	T _x	T _n	δ _m	T _m	T _x	T _n	δ _m
Janvier	25,0	28,0	20,9	7,1	26,0	34,4	17,6	16,8	25	34	15	19	21	30	13	17
Février	27,8	31,4	23,3	8,1	28,5	36,7	20,0	16,7	26	35	18	17	23	31	15	16
Mars	31,0	34,0	27,9	6,1	30,6	38,5	22,6	15,9	30	38	21	17	25	33	16	17
Avril	34,4	37,2	30,8	6,4	31,9	38,9	24,8	14,1	31	38	24	14	25	32	18	14
Mai	35,9	38,1	33,0	5,1	32,0	38,5	25,6	12,9	30	36	24	12	24	31	18	13
Juin	34,4	37,3	29,7	7,6	28,7	34,1	23,2	10,9	27	32	22	10	23	28	18	10
Juillet	31,1	34,8	26,2	8,6	27,0	31,3	22,5	8,8	26	30	22	8	22	26	18	8
Août	29,5	32,3	25,9	6,4	26,4	30,7	22,0	8,7	25	30	21	9	21	25	18	7
Septembre	29,5	31,9	26,3	5,6	26,5	31,4	21,6	9,8	26	31	21	10	22	26	17	9
Octobre	31,0	33,0	28,0	5,0	27,4	33,0	21,7	11,3	27	33	21	12	22	27	17	10
Novembre	28,8	31,4	25,5	5,9	27,1	34,1	19,4	14,7	26	34	18	16	22	28	15	13
Décembre	25,0	28,6	20,9	7,7	25,1	32,1	16,5	15,6	24	33	15	18	21	28	14	14
Moyenne	30,3	33,2	26,5	6,7	28,1	34,5	21,5	13,0	27	34	20	13	23	29	16	12

T_m : température moyenne mensuelle ; T_x : moyenne mensuelle des températures maximales ; T_n : moyenne mensuelle des températures minimales ; δ_m : écarts diurnes moyens.
(1) cette étude ; (2) LO, 1984 ; (3) ROCHETTE, 1974.

Les conditions thermiques interannuelles sont très peu variables. D'après l'O.M.M., la période nécessaire pour aboutir à une moyenne stable est de 8 à 10 ans (LEROUX, 1980). En zone intertropicale, la température moyenne annuelle est élevée. A Labé, en domaine guinéen, elle est de 22,6°C ; à Kédougou, en domaine soudanien, elle s'élève à 28,1°C et à Bakel, en domaine sahélien, elle atteint 30,3°C (tableau 19). Le gradient thermique, croissant du Sud vers le Nord, est accentué par la topographie entre les zones hautes du Fouta Djallon et les zones basses du Sahel. Les amplitudes moyennes annuelles sont peu importantes : de 4°C à l'extrême Sud à 12°C à l'extrême Nord (fig.25). Les amplitudes diurnes moyennes sont beaucoup plus fortes et oscillent entre 7°C et 15°C ; elles augmentent du Sud au Nord et d'Ouest en Est (MICHEL, 1973) (tableau 20).

Enfin, la courbe de variation des températures est partout bimodale, les maxima primaires et secondaires sont respectivement les mois d'avril-mai et d'octobre-novembre ; les minima sont décembre et août (fig.25). La précocité des maxima principaux sur les hauteurs du bassin (en mars) par rapport à ceux des régions basses (en avril-mai) découle de l'évolution progressive de la Mousson du Sud vers le Nord : les précipitations relativement abondantes atteignent le Sud du bassin dès avril, alors que la véritable saison des pluies ne s'installe sur la totalité de la zone étudiée qu'au cours des mois de mai-juin.

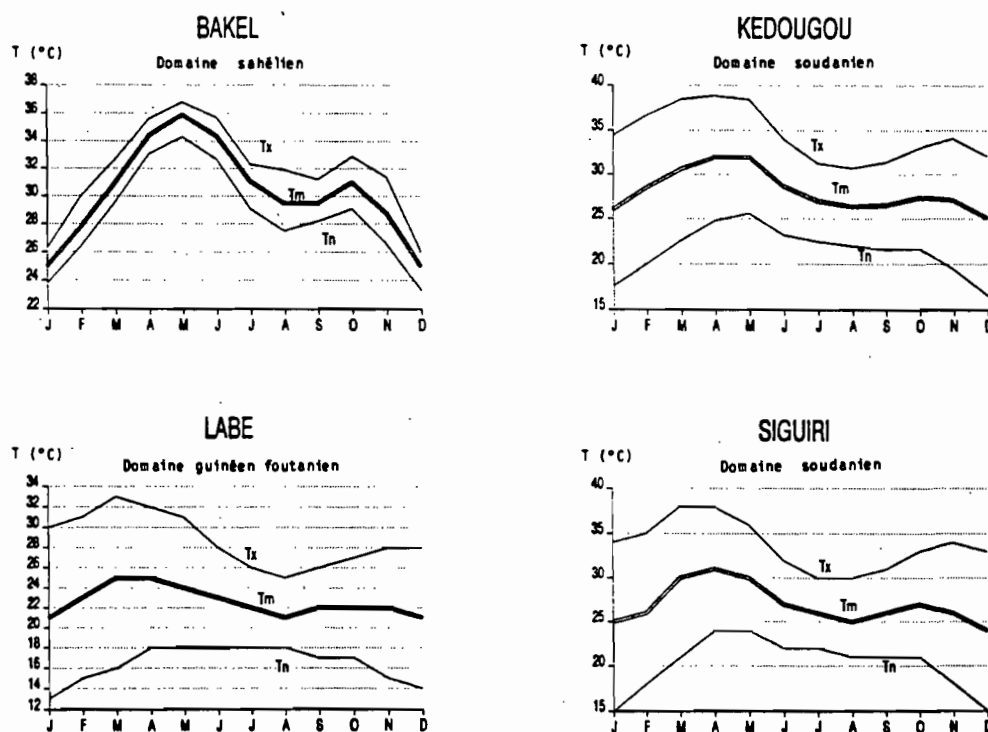


Fig. 25 : Evolution mensuelle de la température.

C - L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

1. L'humidité relative

L'humidité relative est intimement liée à la progression de la Mousson. Sa valeur moyenne annuelle est de 67% à Labé, 55% à Kédougou et 45% à Kayes (quelques kilomètres au Nord de Bakel) (ROCHETTE, 1973 ; GAC & ORANGE, 1990). L'humidité relative passe par des valeurs maximales en saison des pluies (de 98% dans le Fouta Djallon à 80% en milieu sahélien) et des valeurs minimales en saison sèche (de 50% dans le Fouta Djallon à moins de 20% en milieu sahélien). Notons que plus l'humidité relative est importante, moins l'évaporation intervient dans le bilan hydrique.

2. L'évapotranspiration potentielle

L'évaporation est le point de départ du cycle de l'eau. Elle est la résultante des différents paramètres présentés ci-dessus : la pluie, le vent, l'insolation, la température et l'humidité relative de l'air. Sa mesure est une opération difficile à mener.

L'évolution saisonnière de l'évaporation Piche (Ep), mesurée, et celle de l'évapotranspiration potentielle (ETP), calculée selon la formule de TURC, sont similaires et opposées à celle de l'humidité relative. Les plus forts taux d'évapotranspiration potentielle se situent aux mois de mars et les plus faibles au mois d'août. Entre ces deux extrêmes, l'évolution est constante au cours de l'année. On note également le gradient positif Sud-Nord de l'ETP en toutes saisons. L'ETP moyenne annuelle est de 1436 mm à Labé, de 1922 mm à Kédougou et de plus de 2000 mm à Bakel (tableau 21).

Tableau 21 : *Evaporation Piche (Ep) et évapotranspiration potentielle (ETP) en mm*

Station		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	mm/an
KAYES 1940-1980	Ep	272	291	373	386	392	257	118	73	69	126	201	240	2798
	ETP	169	184	<u>251</u>	246	<u>202</u>	140	128	<u>123</u>	129	137	138	134	1981
BAKEL (1) 1979-1986	Ep	234	222	302	314	<u>317</u>	284	225	177	<u>151</u>	187	208	205	2826
KEDOUGOU 1953-1985	Ep	274	288	<u>353</u>	342	278	129	75	55	55	79	149	215	2292
	ETP	183	194	<u>222</u>	212	178	143	130	<u>117</u>	128	136	132	147	1922
LABE 1940-1980	Ep	246	266	<u>302</u>	243	147	83	57	<u>50</u>	53	75	128	195	1845
	ETP	141	148	<u>160</u>	142	128	108	97	<u>82</u>	98	112	109	111	1436
KINDIA 1971-1980	ETP	132	160	<u>187</u>	183	147	120	107	<u>99</u>	109	116	114	118	1592
MAMOU 1971-1980	ETP	170	192	<u>204</u>	173	141	117	99	<u>99</u>	105	109	121	144	1674

(1) : évaporation mesurée sur bac Colorado

V - PREMIERES CONCLUSIONS : LES BILANS HYDRIQUES

L'irrégularité de la répartition annuelle et mensuelle des précipitations et l'hétérogénéité de leur distribution spatiale constituent les caractéristiques essentielles du climat. Au contraire de la pluviosité, les températures et l'évaporation, relativement élevées en général, varient peu d'une année sur l'autre et ne peuvent constituer des facteurs de différenciation des climats dans ces régions tropicales. Cependant, leur étude n'en est pas moins importante car elles interviennent dans le bilan du cycle de l'eau.

A - UNE REGION A FORT DEFICIT HYDRIQUE

Le bilan hydrique résulte du prélèvement de l'évapotranspiration sur la quantité d'eau disponible dans le sol. Dans un premier temps, cette disponibilité en eau peut être appréciée par l'intermédiaire de la lame d'eau moyenne précipitée.

La zone d'étude, qui s'étend du domaine tropical au domaine sahélien, est encadrée par l'isohyète 2300 mm, au Sud, et l'isohyète 300 mm, au Nord. Depuis 1970, il y règne une période de sécheresse ayant eu pour conséquence de descendre vers le Sud l'ensemble des isohyètes de 200 km environ. Ainsi, pour ces dernières années (1979-86), elle est comprise entre les isohyètes 1900 et 100 mm. La température moyenne annuelle est élevée : elle varie du Sud au Nord de 22°C à 30°C. L'évapotranspiration potentielle fluctue entre 1500 mm/an en domaine guinéen à 3000 mm/an en domaine sahélien. Le déficit hydrique existe donc partout à

l'exception du domaine guinéen (tableau 22). Tous ces chiffres traduisent des conditions climatiques difficiles avec une dégradation du Sud au Nord et une importante irrégularité interannuelle. L'accentuation de l'aridité depuis une quinzaine d'année oppose de plus en plus une longue saison sèche à une courte saison pluvieuse chaude avec des précipitations orageuses et donc dévastatrices. D'autre part, dans ce domaine continental, l'air surchauffé très instable s'élève en tourbillons emportant sables et poussières. Ainsi, les vents de sable et les poussières atmosphériques sont de plus en plus fréquents (ORANGE & *al.*, 1986 ; ORANGE & GAC, 1990a).

Tableau 22 : Bilan hydrique par domaine climatique

Domaine climatique	P moy. (mm)	ETP moy. (mm)
sahélien	400 - 200	> 2000
nord-soudanien	400 - 800	> 2000
sud-soudanien	800 - 1200	2000
guinéen	1200 - 1900	1500

B - L'INFORMATION CLIMATIQUE PAR BASSIN VERSANT

1. Le bassin amont du Sénégal : une grande diversité climatique

Situé entre les régions tropicales et les confins du Sahara, le bassin versant du Sénégal présente une grande diversité de climats. La pluviosité varie considérablement à l'intérieur du bassin puisqu'elle passe de 2000 mm/an sur sa bordure méridionale à 250 mm/an seulement sur sa limite septentrionale. La lame d'eau moyenne précipitée est évaluée à 685 mm/an. Du Sud au Nord, la température va de 22°C à 30°C et l'ETP de 1500 à plus de 3000 mm/an.

2. Le bassin versant amont de la Gambie

Le bassin versant amont de la Gambie, situé entre 11° et 13° de latitude Nord, est encadré par les isohyètes 1500 et 1000 mm. Seul son exutoire se situe en domaine sud-soudanien. L'effet d'altitude entre les hauts plateaux du Sud et les bas glacis du Nord accentue cette opposition climatique. De Labé à Kédougou, c'est-à-dire de 1025 m à 120 m d'altitude, la température moyenne annuelle passe de 23°C à 28°C et l'ETP de 1400 à 1900 mm/an. Le déficit hydrique n'existe qu'au Nord du 12^{ème} parallèle, en domaine sud-soudanien. La lame d'eau moyenne précipitée est estimée à 1380 mm/an.

3. Le bassin versant amont du Niger

80% du bassin amont du Niger se situe en domaine guinéen. Il est encadré par les isohyètes 1900 et 1100 mm. La température moyenne annuelle varie, du Sud au Nord, de 22°C à 27°C, et l'ETP moyenne est de l'ordre de 1500 mm/an. La lame d'eau moyenne précipitée est estimée à 1390 mm/an.

4. Le cas particulier du Fouta Djallon

Le Fouta Djallon est presque entièrement situé en domaine guinéen, seule 14% de sa superficie se trouve en domaine sud-soudanien. Son climat est une variante d'altitude du climat guinéen *s.s.*. La saison sèche est tempérée par les brouillards descendant de la montagne et les écarts diurnes de température y sont très grands. Il existe un gradient positif d'abondance pluviométrique d'orientation E-W. Il est encadré par les isohyètes 1000 mm et 1900 mm. Sa température moyenne annuelle va de 22°C sur les plateaux d'altitude à 25°C dans les vallées. L'ETP est de l'ordre de 1500 mm/an. La lame d'eau moyenne précipitée est estimée à 1380 mm/an.

CHAPITRE IV

SECHERESSE ACTUELLE ET BILANS HYDROLOGIQUES

Les données présentées ici proviennent du Département Hydrologie de l'ORSTOM, à l'exception de quelques données ponctuelles acquises sur le terrain dans les services hydrologiques nationaux lors des différentes missions. ROCHETTE (1974), BRUNET-MORET & *al.* (1986) et LAMAGAT & *al.* (1989) décrivent respectivement les réseaux hydrométriques du Sénégal, du Niger et de la Gambie. On admet communément qu'un cycle hydrologique se déroule entre deux périodes de basses eaux. Sa durée est cependant variable puisqu'elle est liée au régime annuel des précipitations. Lorsque la saison des pluies commence tardivement et que les pluies sont peu abondantes, le cycle hydrologique peut, par suite d'un tarissement précoce, s'achever en 11, voire en 10 mois. Inversement, l'arrivée précoce des pluies et une importante réalimentation des réserves souterraines peuvent se traduire par un cycle hydrologique plus long qu'une année civile. Dans cette étude, l'extension du cycle hydrologique a été fixée pour plus de commodité à la période allant du 1^{er} juin au 31 mai de l'année suivante.

I - LE SENEGAL : UN REGIME TROPICAL PUR

A - LES REGIMES DU FLEUVE SENEGAL

Dans le bassin versant supérieur du Sénégal, limité à la station de Bakel, trois régimes hydrologiques du fleuve se succèdent : le régime tropical de transition, le régime tropical pur et le régime sahélien (FRECAUT & PAGNEY, 1982). Le régime tropical de transition concerne une superficie de 28000 km² (soit 13% de la superficie du bassin) où la pluviosité annuelle est supérieure à 1200 mm. Il affecte les 2/3 du Bafing, les 2/5 de la Falémé et le cours supérieur du Bakoye. Ce régime est caractérisé par des variations brutales et une très grande irrégularité dans la date d'apparition des maxima et minima mensuels. Le régime tropical pur, se différenciant du précédent par une saison des hautes-eaux moins longue, concerne une superficie de 108000 km², soit 50% du bassin versant supérieur. Il s'étend sur le bassin inférieur du Bafing, les 3/5 de la Falémé, le Bakoye et l'intégralité du Baoulé. Le régime sahélien concerne toute la zone du bassin où la pluviosité est inférieure à 700 mm. Il couvre la totalité des bassins de la Kolimbiné et du Karakoro, où les écoulements deviennent de plus en plus sporadiques au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers le Nord. Notons que l'augmentation très importante de la superficie du bassin versant théorique qui en résulte, réduit singulièrement les débits spécifiques. Mais l'influence de cette zone sur l'hydraulicité du fleuve est négligeable. Elle a simplement pour effet de freiner très légèrement l'amortissement de la crue entre Gouina et Bakel et d'augmenter l'irrégularité interannuelle en apportant un volume notable en année humide sur la zone sahélienne et pratiquement rien en année sèche. L'influence de la zone tropicale de transition n'est pas très importante non plus. Les apports précoces de cette zone arrivent en juin et juillet à Bakel en même temps que l'écoulement provenant des premières

crues de la zone tropicale pure. La seule influence notable est un léger renforcement du débit d'étiage, surtout en année moyenne ou abondante. Le régime à Bakel correspond donc au régime tropical pur à condition de rapporter les débits à une superficie de 135000 km², correspondant à la superficie active du bassin (RODIER, 1964).

B - L'ABONDANCE FLUVIALE A BAKEL

Parmi tous les fleuves sahéliens, le Sénégal est celui qui dispose de la plus longue série d'observations ; à Bakel, l'information est complète depuis 1903 (ROCHETTE, 1974 ; SOW, 1984 ; ORANGE, 1986 ; GAC & KANE, 1986a). Cette station a une situation géographique très favorable : elle se situe à l'entrée de la plaine alluviale du fleuve, après la confluence de tous les affluents avec le bras principal.

1. Bilan moyen annuel des écoulements et variabilités interannuelle, mensuelle, journalière

Depuis le début du siècle, le module moyen annuel à Bakel est de 709 m³/s, et 93,3% de cet écoulement transite de juillet à novembre (tableau 23).

Tableau 23 : Débits moyens mensuels interannuels à Bakel (en m³/s)

Période	JN	JT	AT	S	O	N	D	JR	FR	MS	AL	MI	Module
1903-88	93	555	2205	<u>3138</u>	1514	518	225	124	71	38	16	<u>9</u>	709
1979-87	24	328	1064	<u>1350</u>	589	194	75	38	17	9	2	<u>1</u>	308

Q_{max} et Q_{min} sont soulignés

L'irrégularité des écoulements constitue la caractéristique principale des fleuves tropicaux. Depuis 1903, les débits moyens annuels à Bakel ont varié dans un rapport de 1 à 6. La valeur maximale a été observée au cours du cycle hydrologique de 1967/68 (1325 m³/s) et la valeur minimale en 1984/85 (216 m³/s) qui est très légèrement inférieure à la valeur de l'écoulement enregistrée en 1983/84 (218 m³/s) (tableau 24). A l'irrégularité interannuelle s'ajoute celle des débits moyens mensuels. Le plus important débit moyen mensuel a été enregistré en septembre 1967 avec 6763 m³/s ; le plus faible au cours du même mois est celui de 1984 avec 571 m³/s, soit 12 fois moins. Signalons enfin que le plus fort débit journalier mesuré au cours du siècle a été de 9430 m³/s en septembre 1936.

L'hydrogramme annuel est toujours monomodal avec, en général, un seul épaulement en août-septembre et une longue courbe de tarissement d'octobre à mai, quelque soit l'hydraulicité de l'année considérée (fig.26).

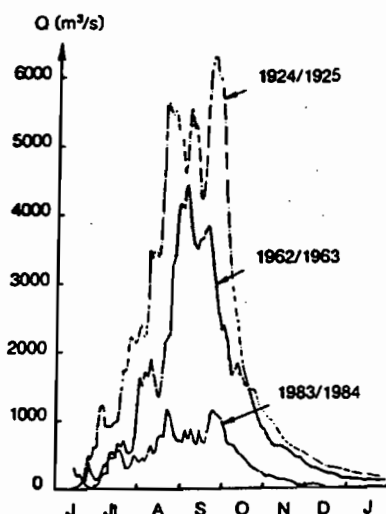


Fig. 26 : Hydrogrammes de crue types du fleuve Sénégal à Bakel.

Tableau 24 : Débits moyens mensuels et annuels à Bakel de 1903 à 1988 (en m³/s)
(QAN : module moyen annuel)

ANNEE	JN	JT	AT	S	O	N	D	JR	F	MS	AL	MI	QAN
1903	120	746	1937	2535	1060	476	202	124	74	40	15	10	611
1904	30	719	2655	3166	1127	586	274	142	85	50	22	10	738
1905	236	977	2735	2303	2342	1072	375	193	111	64	30	15	871
1906	143	1174	5751	4218	1618	838	467	250	140	80	40	10	1227
1907	120	990	960	2177	1311	619	340	185	110	62	28	10	542
1908	81	822	2275	3720	1390	500	235	130	75	42	18	10	774
1909	286	992	3083	4201	1308	591	255	140	83	46	20	10	917
1910	120	590	2233	2942	1231	472	215	120	70	38	16	10	671
1911	120	590	1538	2401	939	432	220	125	72	38	16	10	541
1912	120	590	1471	2352	1298	436	230	135	78	43	18	10	565
1913	120	336	724	936	687	251	121	64	30	10	4	10	274
1914	120	590	1323	1477	1036	360	200	115	70	40	16	10	446
1915	90	653	1956	2418	1225	350	190	105	62	34	12	5	591
1916	4	726	1826	3301	1603	400	210	120	70	38	16	10	693
1917	20	294	2173	3458	1145	330	185	100	68	32	11	10	651
1918	200	883	3633	5322	2556	647	335	202	122	65	30	10	1167
1919	140	404	1704	2221	1029	356	210	115	70	38	15	10	526
1920	120	540	2690	4315	1287	604	290	160	85	52	23	10	848
1921	120	396	1201	2100	740	270	150	90	60	26	10	10	430
1922	40	411	3415	6569	2724	777	316	158	95	53	23	10	1215
1923	90	646	1808	3764	1437	741	272	138	80	44	19	10	754
1924	144	1440	4147	5530	2403	804	384	210	125	70	32	14	1275
1925	103	408	2332	3293	2458	768	325	185	110	65	30	10	840
1926	140	507	1607	1785	973	728	270	130	76	43	18	10	523
1927	120	772	2967	4745	2743	885	380	205	120	70	32	10	1087
1928	50	356	3146	4693	1683	699	241	130	77	39	15	10	928
1929	300	885	3074	4512	1327	434	217	123	71	38	15	10	917
1930	170	649	2621	3412	1929	608	290	167	97	58	25	10	836
1931	170	976	1771	2777	2080	552	270	155	90	50	22	10	743
1932	130	780	2859	3138	1371	445	227	130	75	43	19	10	768
1933	153	1149	3423	3564	1076	386	200	115	68	35	12	10	849
1934	20	270	2501	3503	1311	440	220	130	75	43	19	10	711
1935	120	896	4269	4971	2450	630	265	152	88	50	20	10	1160
1936	85	620	4714	5825	2210	708	335	172	103	61	25	10	1239
1937	120	408	1795	3084	1348	504	230	130	75	41	17	10	646
1938	120	494	1901	4065	1850	794	270	150	88	48	21	2	816
1939	28	368	1992	2071	1362	435	220	125	72	40	16	10	561
1940	50	212	1342	1381	1288	525	230	120	68	38	15	10	437
1941	120	339	1158	2115	740	247	130	75	44	19	6	10	416
1942	120	385	1896	1715	539	266	140	80	45	25	8	10	435
1943	120	366	1867	2951	1801	443	195	110	65	35	14	10	664
1944	120	225	814	1444	663	339	160	95	55	28	10	10	330
1945	120	396	3450	4886	1854	463	195	110	65	35	14	10	966
1946	120	379	2600	2989	1819	580	240	130	75	41	17	10	750
1947	120	343	1877	3418	1516	396	180	105	60	32	12	5	672
1948	31	607	1863	2630	967	398	167	105	60	32	12	5	573
1949	9	335	2111	1905	794	216	123	73	42	20	10	5	470
1950	3	85	3092	5963	3041	778	305	152	85	42	14	4	1128
1951	57	395	1473	2332	3643	1437	423	215	125	64	27	5	849
1952	23	539	1428	2519	3098	597	246	134	71	36	17	4	726
1953	103	818	1607	2924	1250	464	219	139	80	40	14	13	639
1954	253	1012	4166	4394	1624	889	397	197	114	66	41	31	1082
1955	209	648	3672	4149	2596	777	347	204	118	68	33	14	1069
1956	41	506	2305	5421	2159	636	281	167	98	55	23	8	975
1957	218	623	2725	4339	2900	943	251	197	116	66	31	18	1035
1958	176	579	4098	3969	1887	796	446	239	138	82	39	19	1039
1959	165	597	2596	4087	1242	489	224	125	76	41	17	7	805
1960	82	612	1830	2481	1309	504	214	118	74	40	17	5	623
1961	105	621	3000	5249	1328	458	207	120	73	39	13	4	951
1962	86	636	2326	3657	1626	598	263	137	85	42	18	10	782
1963	9	508	1674	2741	1973	635	231	127	71	36	14	3	668
1964	173	633	2066	5841	1934	581	286	166	103	56	25	11	989
1965	87	522	3467	5453	1993	652	290	205	112	49	16	4	1070
1966	81	441	1739	3534	5029	1033	381	208	115	54	15	4	1052
1967	99	695	3068	6763	3426	919	409	254	157	76	24	6	1324
1968	78	515	1257	2238	1038	358	201	98	45	15	3	1	487
1969	49	847	2100	3881	2549	1131	365	186	97	40	12	3	938
1970	21	358	2775	3052	951	337	168	86	42	15	4	2	650
1971	2	584	3266	3272	973	310	151	72	35	11	3	1	723
1972	57	349	978	1315	590	259	131	81	28	8	3	1	315
1973	125	394	2109	1711	588	216	88	42	19	6	2	1	441
1974	4	745	3518	3394	1381	367	155	73	37	18	4	2	807
1975	0	558	1553	3267	1201	380	162	77	38	14	3	1	604
1976	4	490	1456	1147	1145	875	226	109	61	21	6	2	461
1977	2	240	829	1640	759	214	74	36	13	3	1	1	317
1978	8	359	1784	1858	1314	482	153	73	32	9	2	1	503
1979	45	311	983	1276	569	282	104	45	17	4	1	0	303
1980	22	317	1545	1841	484	194	89	38	15	4	1	0	387
1981	29	454	1858	1710	658	224	90	43	19	4	1	0	424
1982	0	235	1132	1376	559	222	81	37	14	3	1	0	305
1983	78	380	682	817	434	139	54	24	8	2	1	0	218
1984	38	470	758	571	640	137	50	17	5	2	1	0	215
1985	0	391	1414	1851	562	155	56	19	9	3	1	0	355
1986	0	267	705	1874	650	254	90	38	16	7	3	1	343
1987	0	124	496	938	842	130	61	40	54	51	4	80	220
1988	104	328	929	2835	701	90	22	8	10	34	35	39	427

2. Le caractère exceptionnel de la sécheresse actuelle

De nombreux auteurs ont étudié la cyclicité des variations du débit moyen annuel du Sénégal à Bakel (SIRCOULON, 1976 et 1985 ; FAURE & GAC, 1981 ; PALUTIKOF & *al.*, 1981 ; OLIVRY, 1983a ; GAC & FAURE, 1987 ; PROBST & TARDY, 1987). Le débit du fleuve à Bakel reflète fidèlement l'évolution de la pluviosité de cette zone climatique. Aussi la recherche des séquences sèches et des séquences humides effectuée à partir du paramètre pluie dans le chapitre précédent donne les mêmes résultats à partir de l'étude des débits. Depuis le début du siècle, deux périodes humides sont recensées : 1920-39 et 1952-68.

Depuis 1968, à l'exception de trois années (1969, 1971 et 1974), toutes les années sont largement déficitaires (tableau 24). Le déficit a atteint son maximum lors des cycles 1983/84 et 1984/85 (70% de déficit). Le caractère exceptionnel de la sécheresse actuelle apparaît en dressant la liste des dix modules moyens annuels les plus bas depuis le début des observations

: 1984 (216 m³/s), 1983 (218 m³/s), 1987 (220 m³/s), 1913 (274 m³/s), 1979 (303 m³/s), 1982 (305 m³/s), 1972 (315 m³/s), 1977 (318 m³/s), 1986 (343 m³/s), 1985 (355 m³/s). Il faut remonter à 1913 pour retrouver un débit moyen annuel inférieur à 400 m³/s.

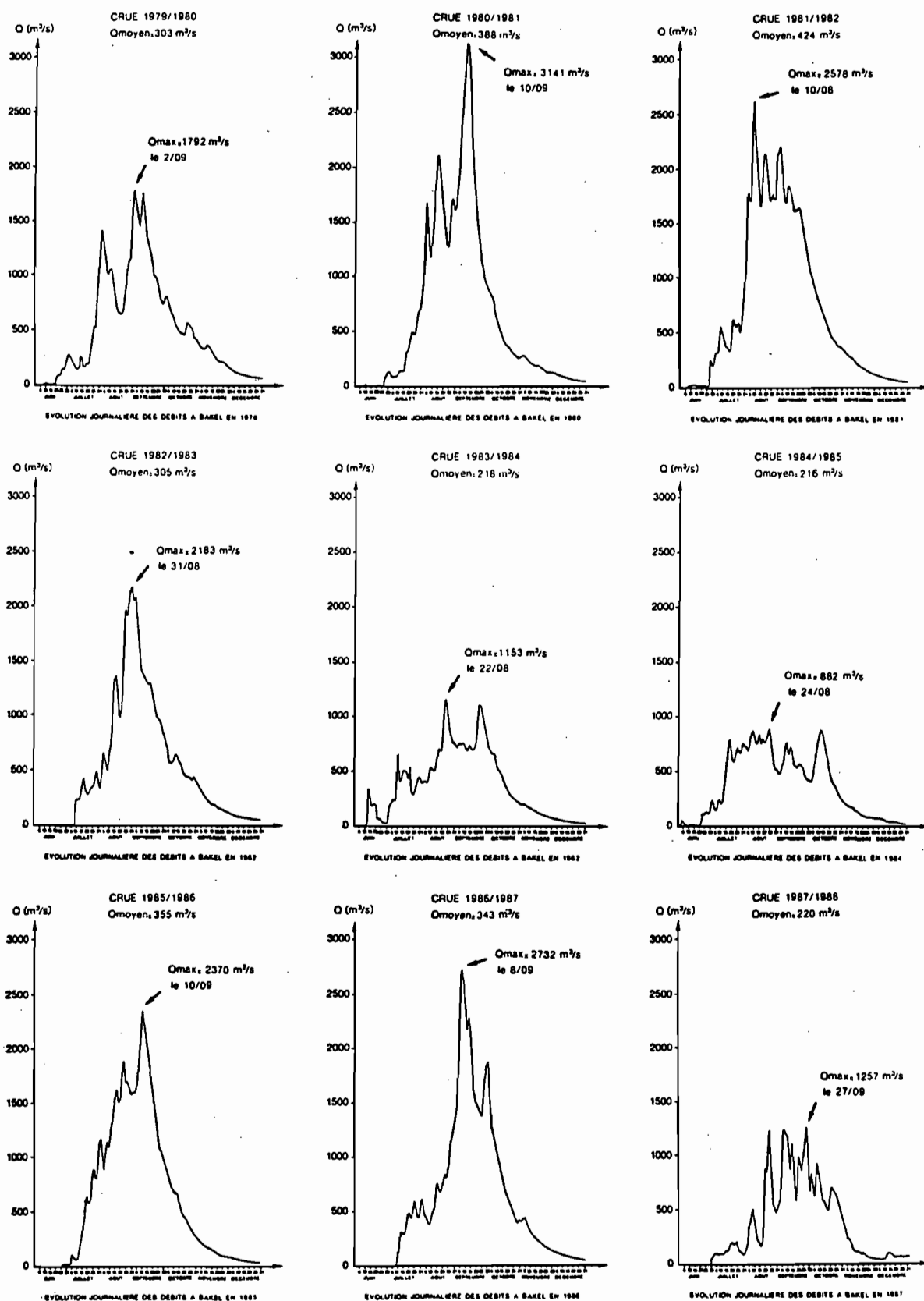


Fig. 27 : Hydrogrammes de crue de 1979 à 1987 du fleuve Sénégal à Bakel.

3. Les cycles hydrologiques de 1979 à 1987

Ces neuf cycles hydrologiques sont étudiés en détail dans le dernier chapitre (chapitre IX) en même temps que l'évolution quotidienne de la température de l'air, de la température de l'eau et de la pluviosité. A chaque fois (fig.27), un premier écoulement fugace annonce l'arrivée réelle de la crue une quinzaine de jours plus tard. En effet, les premiers écoulements arrivant en juin sont absorbés par le sol desséché. Ensuite, la montée des eaux, lente en juillet, s'accélère brutalement début août : elle coïncide avec les premières grandes pluies ; le lit mineur se remplit et les bras secondaires sont submergés. C'est la période de crue. Ensuite, le retrait des eaux s'amorce en octobre et, dans tous les cas, est très rapide. La première baisse résulte de la vidange des eaux accumulées dans le lit majeur. Le véritable tarissement qui correspond à un écoulement d'origine presque uniquement souterraine commence en novembre.

En 1983/84, 1984/85 et 1987/88, la montée des eaux est pratiquement inexistante, les hydrogrammes sont tronqués : il n'y a pas de crue véritable. D'autre part, la sévérité des étiages traduit le très grand épuisement des nappes phréatiques. L'étiage absolu a été atteint à Bakel en 1980, 1981, 1982, 1984, 1985, 1986 ; le fleuve Sénégal s'était précédemment tari uniquement en 1902, 1913 et 1974. On peut également souligner la rapidité de la décrue quelque soit l'hydraulicité de l'année considérée et la faiblesse générale des débits de pointe de 1979 à 1986 (de 3141 m³/s en 1980 à 882 m³/s en 1984 représentant respectivement 65% et 20% d'un débit de pointe d'une année moyenne). Le cycle hydrologique 1987/88 est un cycle artificiel, il correspond à la mise en service du barrage de Manantali situé à 350 km en amont de Bakel sur le Bafing. Sa fonction est de régulariser la crue annuelle pour étaler dans le temps la période des hautes-eaux. L'étude de l'érosion sur le bassin supérieur du Sénégal sera donc faite sur la séquence 1979-86, époque à laquelle ce bassin fonctionnait naturellement.

Le module annuel de 1979 à 1986 est de 319 m³/s, il ne représente seulement que 45% du module annuel établi sur le siècle. Mais la répartition mensuelle des débits au cours de l'année hydrologique reste la même : les mois de juillet, août, septembre, octobre et novembre représentent encore 95% de l'écoulement annuel. En effet, malgré le caractère exceptionnel des écoulements de ces dernières années, la période des hautes-eaux se limite toujours aux mois de juillet, août, septembre et octobre avec un maximum en septembre à l'exception des deux années les plus sèches (1983 et 1984) où il se situe en août du fait de l'écrêtement de la pointe de crue. Malgré ce caractère très marqué de sécheresse de la période étudiée, on peut distinguer : trois cycles hydrologiques secs (1983/84, 1984/85 et 1987/88), quatre cycles hydrologiques moyens (1979/80, 1982/83, 1985/86 et 1986/87) et deux cycles hydrologiques humides (1980/81, 1981/82).

C - QUELQUES INFORMATIONS SUR LES PRINCIPAUX TRIBUTAIRES

Sur la période 1903-1964, le module moyen annuel du Bafing à Dibia est de 433 m³/s, il passe à 620 m³/s à Gouina sur le fleuve Sénégal et enfin il est de 770 m³/s à Bakel ; sur la même période, le module moyen annuel du Bakoye à Kalé est de 159 m³/s et celui de la Falémé à Kidira est de 195 m³/s (tableau 25) (ROCHETTE, 1974). Les apports du Bakoye et de la Falémé représentent respectivement 21% et 25% des écoulements enregistrés à Bakel.

Sur la période récente 1979-86 (tableau 26, fig.28), le déficit d'écoulement par rapport à la période précédente est partout très marqué. C'est sur la branche mère qu'il est le moins important : 50% à Dibia, 60% à Gouina et 59% à Bakel. Le déficit est de 78% sur le Bakoye et de 69% sur la Falémé. Pour cette période, ces deux tributaires représentent respectivement 11% et 20% des écoulements enregistrés à Bakel. En 1987, première année de fonctionnement du barrage de Manantali, sur les 220 m³/s écoulés à Bakel, 9% seulement proviennent du Bakoye et 18% de la Falémé.

Tableau 25 : Modules spécifiques en différents sites du bassin amont du Sénégal sur la période 1903-64 (ROCHETTE, 1974)

Cours d'eau	Exutoire	Superficie du bassin (km ²)	Module annuel (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
SENEGAL	Bakel (1)	(135 000)	770	5,7
	Gouina	128 600	620	4,8
BAKOYE	Kalé	85 600	159	1,9
	Toukoto	16 500	88	5,3
BAFING	Dibia	37 900	433	11,4
	Dakkasaïdou	15 700	288	18,3
FALEME	Kidira	28 900	195	6,7
	Gourbassi	17 100	164	9,6
	Fadougou	9 300	115	12,4

(1) : superficie du bassin versant actif

La notion de débit spécifique est à utiliser avec prudence car dans la partie nord-soudano-sahélienne, de nombreuses zones sont endoréiques. Ainsi les modules spécifiques calculés à l'aval de Gouina sur le Sénégal et à l'aval de Toukoto sur le Bakoye n'ont pas grande signification (RODIER, 1964 ; ROCHETTE, 1974). Le débit spécifique à Bakel a donc été estimé à partir d'une superficie de 135000 km² (RODIER, 1964). Sur la période 1903-64, le débit spécifique moyen annuel à Dibia est de 11,4 l/s/km² ; il continue de décroître jusqu'à la confluence avec la Falémé où il regagne un point : il est de 5,7 l/s/km² à Bakel (tableau 25). Sur la période 1979-86, ces valeurs sont divisées par deux.

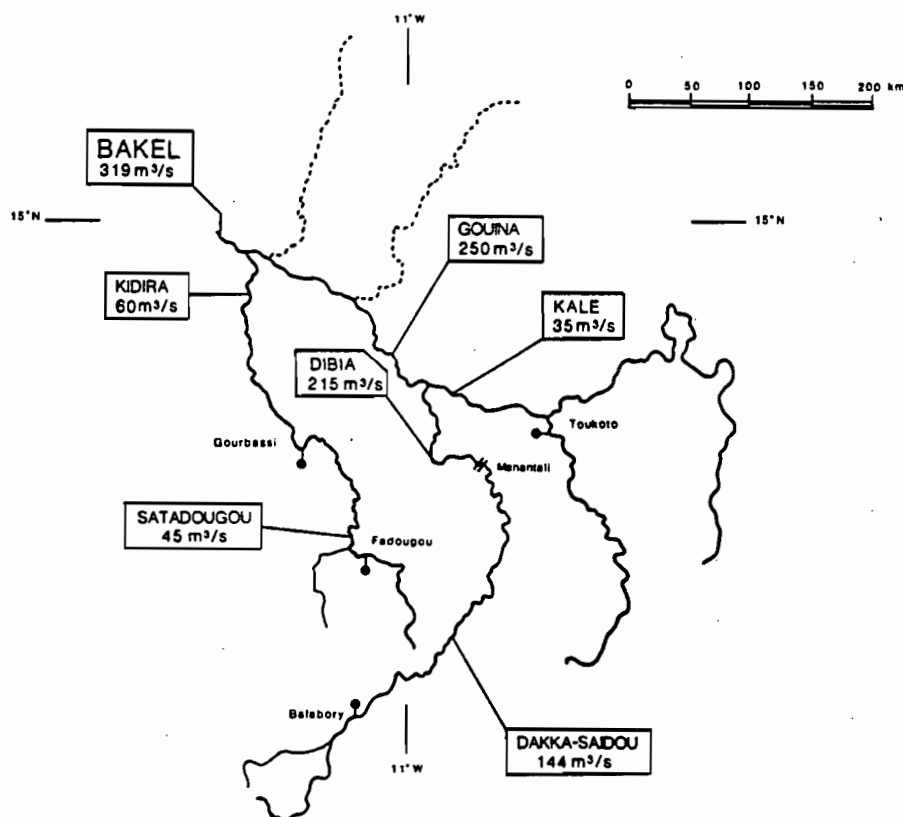


Fig. 28 : Répartition des écoulements dans le bassin versant supérieur du Sénégal et modules annuels de 1979 à 1987.

Tableau 26 : Débits moyens annuels de 1979 à 1987 en différentes stations du bassin versant supérieur du Sénégal (en m³/s)

Cours d'eau	Station	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	module
SENEGAL	Bakel Kayes	303	388	424	305	218	216	355	343	220	319
		(230)	287	297	230	179	174	261	256	153	239
BAKOYE	Kalé	*	49	46	31	14	29	43	35	20	35
FALEME	Kidira Gourbassi	60	86	96	62	23	(36)	(67)	(66)	(40)	60
		(54)	74	75	56	20	29	49	50	31	49

() : valeur estimée

Les écoulements du Bafing et de la Falémé atteignent Bakel en 5 jours, et le plus souvent le temps de propagation se réduit de 2 à 3 jours. La plus grande vitesse de propagation a été observée entre Bafoulabé et Kayes (Sénégal) distant de 127 km en un jour (soit 1,5 m/s) ; la plus faible de Fadougou à Bakel (Falémé) en 5 jours sur une distance de 410 km (soit 0,9 m/s) (ROCHETTE, 1974).

II - LE NIGER : UN REGIME TROPICAL DE TRANSITION

A - LE REGIME DU FLEUVE NIGER

Le Niandan et le Milo dont les bassins supérieurs sont les mieux arrosés et dont la pente est la plus forte, présentent les débits spécifiques les plus élevés. Ces deux cours d'eau appartiennent au régime tropical de transition : la partie supérieure du Niandan et celle du Milo correspondent à la variante méridionale de ce régime avec une période de hautes-eaux très longue, une période de basses-eaux très courte avec quelques petites crues. Dans leur cours inférieur, le Niandan, le Milo et le Tinkisso présentent des plaines d'inondation assez étendues qui contribuent, en année très humide, à laminier les pointes de crues. Seule la partie septentrionale du Tinkisso ressort du régime tropical pur. La faible abondance et l'extrême sévérité des étiages de cette partie du bassin sont compensées par les caractéristiques inverses du Milo et du Niandan supérieur. Finalement, à Siguiri, le régime du Niger correspond au régime tropical de transition classique avec un débit d'étiage soutenu et une longue période de hautes-eaux (RODIER, 1964 ; BRUNET-MORET & al., 1986).

B - L'ABONDANCE FLUVIALE A SIGUIRI

Les données publiées dans la Monographie du Niger (BRUNET-MORET & al., 1986) sont antérieures à 1980. Les débits de 1987, unique année étudiée sur le bassin du Niger, ont été obtenus pour la station de Banankoro auprès de la Direction hydrologique malienne.

1. Le bilan moyen annuel

La station hydrologique la plus proche de Siguiri est Tiguibéry. De 1953 à 1978, le module annuel est de 1119 m³/s pour 67600 km² (16,6 l/s/km²). Le débit annuel maximum a été enregistré en 1969 (1576 m³/s) et le débit annuel minimum en 1977 (618 m³/s). Le module annuel ne varie que dans un rapport de 1 à 2,6. Cette faible variabilité observée à l'échelle annuelle se retrouve aux échelles mensuelle et journalière. Le débit journalier maximum a été enregistré le 20/9/62 à 5927 m³/s ; le débit journalier minimum a été enregistré le 30/3/75 à 15,8 m³/s. L'étiage absolu n'a jamais été atteint au contraire du fleuve Sénégal. Tous ces caractères typiques du régime tropical de transition sont à mettre en opposition avec les caractères de régime tropical pur du fleuve Sénégal.

La répartition mensuelle des écoulements y est plus étalée dans le temps. Les mois de juillet à novembre ne représentent que 88,4% de l'écoulement annuel ; le mois à plus fort débit est septembre, le mois à plus faible débit est avril (tableau 27).

Tableau 27 : Débits moyens mensuels (en m^3/s) mesurés à Tiguibéry (près de Siguiri) sur la période 1953-78 (BRUNET-MORET & al., 1986) et en 1987 (Direction hydrologique malienne)

Période	JR	FR	MS	AL	MI	JN	JT	AT	S	O	N	D	module
1953-78	267	141	82	<u>63</u>	94	332	999	2323	<u>3816</u>	3255	1480	577	1119
1987	72	31	7	<u>3</u>	6	192	482	1459	<u>2203</u>	2062	693	219	622

Q_{max} et Q_{min} sont soulignés

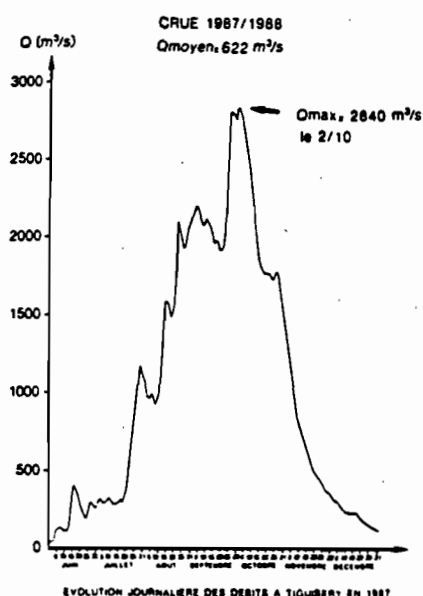


Fig. 29 : Hydrogramme de crue du Niger à Tiguibéry (Siguiri) en 1987.

2. Le cycle hydrologique de 1987

Les débits de 1987 à Tiguibéry sont estimés à partir de ceux enregistrés à Banankoro la même année en leur attribuant une journée de décalage (BRUNET-MORET & al., 1986). Cette année-là, le module annuel est de 622 m^3/s (tableau 27). Le débit maximum est de 2840 m^3/s le 2/10/87 (fig.29).

3. Et la sécheresse ?

Depuis 1968, tous les modules annuels sont inférieurs à la moyenne interannuelle calculée sur la période 1952-78. L'année 1987 fait partie des années au plus faible écoulement. Le caractère de sécheresse de ces dernières années est quantifiable en comparant les moyennes interannuelles. De 1968 à 1978, le module annuel est de 969 m^3/s ; de 1968 à 1987, ce module tombe à 861 m^3/s . On en déduit que le module annuel de 1979 à 1987 est de 753 m^3/s , soit 67% du module annuel de la période 1953-78. Cette sécheresse se retrouve également dans les débits d'étiage qui depuis 1971 n'excèdent jamais les 30 m^3/s alors qu'auparavant ils étaient toujours supérieurs à 50 m^3/s .

C - LES PRINCIPAUX TRIBUTAIRES

Les principaux tributaires sont le Niger (ou Dioliba) à Kouroussa, le Niandan à Baro, le Milo à Diélibakoro et le Tinkisso à Ouaran. Le Milo à Diélibakoro est assimilé au Milo à Kankan (BRUNET-MORET & al., 1986). La distribution du réseau hydrographique est telle que l'égalité suivante sur les débits doit être respectée (BRUNET-MORET & al., 1986) :

$$\text{TIGUIBERY} = \text{KOUROUSSA} + \text{BARO} + \text{KANKAN} + \text{OUARAN}$$

Or à partir des mesures effectuées, cette égalité n'est pas réalisée. Les débits à Tiguibéry sont certainement surestimés alors qu'à Kouroussa ils sont très largement sous-estimés ; il en est probablement de même pour les stations de Ouaran et Baro (BRUNET-MORET & al., 1986). Aussi, les débits présentés ci-dessous ont été corrigés à partir de l'examen des débits spécifiques. Etant donné la similarité de la station de Kouroussa sur le Niger avec la station de Baro sur le Niandan, le même débit spécifique lui a été attribué. Il apparaît alors que les débits à Kouroussa sont sous-estimés de 30%, et que les débits de Tiguibéry sont sur-évalués de 10%. Le tableau 28 est établi à partir des modules corrigés.

Tableau 28 : Débits moyens mensuels corrigés des principales stations du bassin versant supérieur du Niger sur la période 1950-80 (en m³/s)

Cours d'eau	Station	JR	FR	MS	AL	MI	JN	JT	AT	S	O	N	D	module annuel	Qs l/s/km ²
TINKISSO	Ouaran	61	35	14	<u>12</u>	13	37	98	378	<u>644</u>	558	283	97	186	9,9
MILO	Kankan	46	28	<u>20</u>	23	38	101	266	467	<u>645</u>	456	205	86	198	20,6
NIANDAN	Baro	71	39	24	<u>21</u>	40	151	340	550	<u>816</u>	616	336	139	262	20,5
NIGER	Kouroussa	109	52	24	<u>14</u>	21	104	305	589	<u>1070</u>	972	486	227	331	20,0
NIGER	Tiguibéry	240	127	74	<u>57</u>	85	299	899	2091	<u>3434</u>	2929	1332	519	1007	14,9

Qs : débit spécifique ; Qmax et Qmin sont soulignés

Les débits de l'année 1987 aux diverses stations du bassin (tableau 29) sont estimés à partir des moyennes interannuelles corrigées affectées d'un coefficient de 0,67 correspondant au déficit hydrologique enregistré à Siguri pour la période 1979-87. Le Niandan représente 26% des écoulements du Niger enregistrés à Tiguibéry, le Milo 20% et le Tinkisso 18%. Le maximum de crue se situe partout en septembre. Enfin, il faut noter le faible débit spécifique (6,7 l/s/km²) du Tinkisso à Ouaran, comparativement aux autres cours d'eau.

Tableau 29 : Débits moyens mensuels corrigés des principales stations du bassin versant supérieur du Niger en 1987 (en m³/s)

Cours d'eau	Station	JR	FR	MS	AL	MI	JN	JT	AT	S	O	N	D	module annuel	Qs l/s/km ²
TINKISSO	Ouaran	41	23	9	<u>8</u>	9	25	66	253	<u>431</u>	374	190	65	125	6,7
MILO	Kankan	31	19	<u>13</u>	15	25	68	178	313	<u>432</u>	306	137	58	133	13,8
NIANDAN	Baro	48	26	16	<u>14</u>	27	101	228	368	<u>547</u>	413	225	93	176	13,8
NIGER	Kouroussa	73	35	16	<u>9</u>	14	70	204	395	<u>717</u>	651	326	152	222	13,4
NIGER	Tiguibéry	65	28	6	<u>3</u>	5	173	434	1313	<u>1983</u>	1856	624	197	560	8,3

Qs : débit spécifique ; Qmax et Qmin sont soulignés

III - LES BASSINS CONSTITUTIFS DU FOUTA DJALON

A - UN RESEAU HYDROMETRIQUE EMBRYONNAIRE

Le réseau hydrométrique est embryonnaire sur l'ensemble du Fouta Djalon. D'autre part, quand elles existent, les données sont difficilement accessibles et parfois inexploitable. L'adhésion en 1987 de la Guinée à l'O.M.V.G. (Organisation de Mise en Valeur de la Gambie), regroupant déjà les pays voisins (Mali et Sénégal), a relancé l'intérêt pour le contrôle des écoulements sur le bassin versant supérieur de la Gambie par l'ORSTOM (LAMAGAT & al., 1989). Dans les autres secteurs, des mesures ponctuelles ont été réalisées sous couvert de la F.A.O. (GUPTA, 1987).

B - LA GAMBIE A KEDOUGOU

1. L'abondance annuelle et sa variabilité

Les résultats présentés dans le tableau 30 proviennent des observations limnimétriques effectuées entre 1970 et 1988 et d'une reconstitution des débits de la période 1903-1969 par DACOSTA (1985). Depuis le début du siècle, l'écoulement moyen annuel de la Gambie est de 113 m³/s, soit le septième de celui enregistré à Bakel sur le fleuve Sénégal. Au cours de la période récente (1979-87), le module annuel de 60 m³/s traduit un déficit moyen de 47%.

L'évolution des débits moyens annuels dans les deux bassins voisins du Sénégal et de la Gambie est similaire, les deux bassins disposant des mêmes sources d'alimentation en eau dans leur secteur amont. L'analogie avec le fleuve Sénégal se retrouve également au niveau des valeurs extrêmes. Le cycle 1955/56 figure dans la série des cycles les plus excédentaires (193 m³/s) et les écoulements les plus faibles ont également été enregistrés en 1984/85 (34 m³/s).

Tableau 30 : Débits moyens annuels de la Gambie à Kédougou (en m³/s)

Cycles	Q	Cycles	Q	Cycles	Q	Cycles	Q
1903/04	101(4)	25/26	140(3)	47/48	82(3)	69/70	126(2)
1904/05	113 "	26/27	175 "	48/49	93 "	70/71	114 "
1905/06	129 "	27/28	141 "	49/50	67 "	71/72	68(1)
1906/07	171 "	28/29	165 "	50/51	118 "	72/73	69 "
1907/08	88 "	29/30	172 "	51/52	149 "	73/74	77 "
1908/09	117 "	30/31	131 "	52/53	96 "	74/75	110 "
1909/10	133 "	31/32	110 "	53/54	128(2)	75/76	88 "
1910/11	106 "	32/33	115 "	54/55	149 "	76/77	82 "
1911/12	90 "	33/34	143 "	55/56	193 "	77/78	54 "
1912/13	93 "	34/35	101 "	56/57	147 "	78/79	98 "
1913/14	60 "	35/36	150 "	57/58	139 "	79/80	50 "
1914/15	80 "	36/37	168 "	58/59	153 "	80/81	86 "
1915/16	97 "	37/38	138 "	59/60	130 "	81/82	70 "
1916/17	108 "	38/39	145 "	60/61	95 "	82/83	64 "
1917/18	103 "	39/40	107 "	61/62	144 "	83/84	39 "
1918/19	161 "	40/41	68 "	62/63	135 "	84/85	34 "
1919/20	89 "	41/42	82 "	63/64	115 "	85/86	89 "
1920/21	125 "	42/43	50 "	64/65	162 "	86/87	50 "
1921/22	78 "	43/44	118 "	65/66	135 "	87/88	59 "
1922/23	169 "	44/45	87 "	66/67	155 "		
1923/24	124(3)	45/46	133 "	67/68	140 "		
1924/25	166 "	46/47	86 "	68/69	86 "		

(1) valeurs observées de 1971 à 1988 ; (2) valeurs fiables de 1953 à 1970 (LERIQUE, 1975) ; (3) valeurs résultant d'une double extrapolation ; (4) valeurs très douteuses

2. Un régime de type tropical de transition

La période des hautes-eaux dure 4 mois, de juillet à octobre, le maximum se situant toujours en septembre. De février à mai, le niveau d'étiage est sévère, l'étiage absolu pouvant

être atteint. Quelle que soit l'importance de la crue, les débits deviennent inférieurs à $20 \text{ m}^3/\text{s}$ dès le début janvier et jusqu'à l'arrivée de l'onde de crue suivante en juin-juillet. Ce régime est caractéristique du type tropical de transition. L'irrégularité mensuelle interannuelle y est donc importante. Pendant la saison pluvieuse, de juillet à octobre, les écoulements moyens mensuels au cours de la période 1953-1986 ont varié dans un rapport de 7 (en août) à 11 (en juillet). En saison sèche, l'irrégularité est encore plus importante : en avril-mai-juin, les rapports de variation sont supérieurs à 50.

Enfin, l'irrégularité journalière est également très marquée sur ce bassin trop petit pour pouvoir linéariser les impulsions successives de l'écoulement superficiel qui procède par saccades au rythme des précipitations. En conséquence, les hydrogrammes présentent toujours un aspect en dents-de-scie. Lors des cycles secs, l'hydrogramme prend une allure plus affaïssée tout en conservant une amplitude relative de variations journalières du même ordre de grandeur qu'en cycles humides. La Gambie a enregistré son débit journalier maximum de $733 \text{ m}^3/\text{s}$ le 18/09/78.

3. Particularités des deux cycles étudiés (86/87 et 87/88)

a) Allure générale de la crue 1986/87 à Kédougou

L'assèchement du lit mineur s'est achevé en juin avec l'apport des premières averses. Les débits sont cependant restés très modestes jusqu'à l'amorce de l'onde de crue dans les premiers jours de juillet. L'hydrogramme de crue présente son aspect habituel en dents-de-scie avec de nombreuses intumescences jusqu'en octobre. La cote maximum a été observée le 4 septembre pour un débit de $373 \text{ m}^3/\text{s}$ (fig.30) : ce cycle est au troisième rang des plus faibles pointes de crue enregistrées depuis 1970. Après la mi-octobre, les phases de tarissement et d'épuisement se relaient pour aboutir de nouveau à l'assèchement du lit mineur le 3 avril 1987.

En relation avec les faibles précipitations tombées sur le bassin versant (1364 mm à Labé et 1148 mm à Kédougou, soit respectivement 18% et 10% de déficit), la crue 1986/87 a été l'une des plus faibles que la Gambie ait connue depuis le début des relevés hydrologiques. Le débit moyen annuel du cycle 1986/87 est de $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce module place ce cycle au 3^{ème} rang des crues les plus faibles, après celles de 1983 et 1984 (tableau 30).

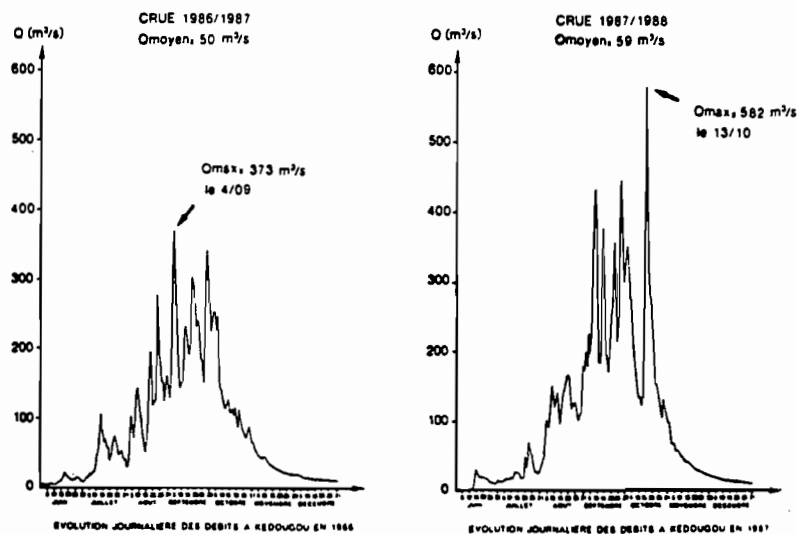


Fig. 30 : Hydrogrammes des crues 1986/87 et 1987/88 de la Gambie à Kédougou.

b) Allure générale de la crue 1987/88 à Kédougou

Les écoulements ont repris le 13 juin 1987. L'hydrogramme de crue a sensiblement la même aspect que celui de l'année précédente (fig.30). La pointe de crue est atteinte une

première fois le 7 septembre à 436 m³/s, puis le 5 octobre à 582 m³/s alors que la décrue semblait amorcée. Cette pointe est remarquable car le débit journalier est passé de 142 m³/s à 582 m³/s en une seule journée ! Le module annuel est de 59 m³/s. Ce cycle, plus humide que le cycle précédent, fait encore partie des cycles les plus déficitaires de ce siècle.

4. Les modalités de l'écoulement à l'intérieur du bassin

Les principaux tributaires sont la Dima, dont l'un des affluents majeurs est la Silamé, l'Oundou et la Liti. Les débits maxima enregistrés à leur confluence respective sont de 56,3 m³/s le 1/09/80 à Nianou pour la Dima, de 38,3 m³/s le 14/09/82 à Matakaou pour la Silamé, de 15,8 m³/s le 8/11/83 à Borokomé pour l'Oundou. Le tableau 31 reproduit les débits spécifiques calculés en plusieurs points du bassin à partir des débits enregistrés à Kédougou de 1970 à 1977 et de corrélations hydropluviométriques (GAC & al., 1987a). 43% des écoulements de la Gambie à Kédougou proviennent de la Dima, 36% de l'Oundou et 21% de la Liti.

Tableau 31 : Modules spécifiques en différents sites du bassin versant supérieur de la Gambie

Fleuve	Exutoire	Superficie du bassin (km ²)	Débit spécifique (l/s/km ²)	Module annuel (m ³ /s)
LITI	confluent Gambie	1080	16,0	17,3
OUNDOU	confluent Gambie	1650	17,3	28,5
DIMA	confluent Oundou	1905	18,4	35,1
GAMBIE	en aval Oundou	3550	17,9	63,6
GAMBIE	en amont Liti	3870	16,8	65,0
GAMBIE	Kouncy	4950	16,6	82,3
GAMBIE	frontière Sénégal	7330	11,4	83,6
GAMBIE	Kédougou	7525	10,9	82,4

C - LA FALEME A SATADOUGOU

Satadougou se situe à la confluence de la Koïlakobé avec la Falémé, une quinzaine de kilomètres en aval de la station hydrologique de Fadougou. D'après les résultats de ROCHETTE (1974) enregistrés sur la période 1903-64, la Koïlakobé semble représenter près de 25% des écoulements de la Falémé à Satadougou. Sur la période 1979-87, on estime le débit moyen annuel à 45 m³/s. La répartition mensuelle des écoulements est extrapolée à partir de celle enregistrée à Gourbassi, station située à 100 km en aval et sans grand affluent entre eux (tableau 32).

D - LE BAFING A DAKKA-SAIDOU

Le Bafing à Dakka-Saïdou a parcouru 280 km. Son module annuel y est déjà relativement élevé : 288 m³/s sur la période 1903-64 (ROCHETTE, 1974). Sur la période récente 1979-87, l'écoulement est estimé en appliquant le coefficient de péjoration hydrologique enregistré à Dibia (50%), station située à une centaine de kilomètres en aval. Le module annuel s'établit ainsi à 144 m³/s et le mois à plus fort débit (septembre) voit transiter 480 m³/s (tableau 32). Son seul affluent important est la Téné qu'il reçoit au km 120 en rive gauche. Aucune information n'existe sur la valeur de ses débits. D'après les observations de terrains, on estime que, à la confluence Téné-Bafing, 30% des écoulements proviennent de la Téné. A 40 km en aval de cette confluence (au bac de Balabory), le débit moyen annuel était de 230 m³/s en 1975 avec un maximum mensuel de 755 m³/s en septembre (ZILIOLI & BRIVIO, 1986). Dans cette région, l'année 1975 pouvant être considérée comme une année moyenne du point de vue hydrologique, on estime donc que, sur la période 1979-87, le module annuel est de 115 m³/s (soit 9,9 l/s/km²), soit un débit moyen annuel pour la Téné de 35 m³/s.

E - LE TINKISSO A TINKISSO

Le Tinkisso à Tinkisso a parcouru 150 km. Sur la période 1955-80, son module moyen annuel est de 75 m³/s (BRUNET-MORET & al., 1986). En appliquant le même coefficient de péjoration hydrologique enregistré à Tiguibéry sur le Niger (0,67), le débit moyen de la période 1979-87 s'établit à 50 m³/s (tableau 32). A Dabola, après 60 km de parcours, le module annuel est estimé pour cette période récente à 11 m³/s (8,7 l/s/km²).

F - LE KONKOURS A KONKOURS

Le module annuel du Konkouré à Konkouré est de 321 m³/s sur la période 1954-78, d'après les relevés journaliers fournis par le Service Hydrologique de l'ORSTOM (JACCON, 1989). Or la péjoration pluviométrique actuelle dans cette région est de 78% ; en appliquant ce coefficient comme péjoration hydrologique, on établit que le débit moyen annuel de la période 1979-87 est de 251 m³/s (tableau 32). Le mois le plus humide est août alors que le mois le plus sec est avril. Dans ces régions, l'étiage absolu n'est jamais atteint ; le débit journalier minimum enregistré entre 1954 et 1978 est de 3 m³/s le 22/04/74. La pointe de crue maximum sur cette même période est de 2900 m³/s le 6/09/58.

G - LA TOMINE A GAOUAL

Nous ne possédons aucune information sur la nature des écoulements de la Tominé à Gaoual. D'après la situation géographique de ce bassin versant, sa superficie et la forme de son réseau hydrographique, le débit de la Tominé à Gaoual doit être intermédiaire entre celui de la Gambie à Kédougou et celui du Konkouré à Konkouré, c'est-à-dire de l'ordre de 150 m³/s. Cette analyse correspond aux estimations régionales de l'écoulement de surface en Guinée données par SUTCLIFFE & PIPER (1986).

Tableau 32 : Débits moyens mensuels aux exutoires du Fouta Djallon estimés sur la période 1979-87 (en m³/s)

Cours d'eau	Station	JR	FR	MS	AL	MI	JN	JT	AT	S	O	N	D	module annuel	Qs l/s/km ²
FALEME	Satadougou	3	1	0	<u>0</u>	0	2	37	175	<u>220</u>	80	19	7	45	4,5
TINKISSO	Tinkisso	11	6	2,7	1,3	<u>0,7</u>	6	31	117	<u>181</u>	157	62	23	50	7,8
GAMBIE	Kédougou	7	2	0,6	0	<u>0</u>	9	66	208	<u>258</u>	121	32	14	60	8
BAFING	Dakkasaïdou	28	18	11	<u>8</u>	12	49	176	448	<u>480</u>	303	129	56	144	9,2
TOMINE	Gaoual	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	(150)	(16)
KONKOURS	Konkouré	46	25	12	<u>10</u>	24	101	384	<u>938</u>	753	414	218	85	251	25,3

Qs : débit spécifique ; * : valeur manquante ; () : valeur estimée ; Qmax et Qmin sont soulignés

IV - CONCLUSIONS : LES BILANS HYDROLOGIQUES

L'équation du bilan hydrologique peut s'écrire : $P = E + DE$, où P est la lame d'eau moyenne précipitée, E la lame d'eau moyenne écoulee et DE le déficit d'écoulement. Le déficit d'écoulement est assimilable à l'évapotranspiration réelle (ETR) ; ce facteur est facilement déductible des résultats acquis dans ces deux derniers chapitres.

Ainsi, sur l'ensemble du Fouta Djalon, pour une lame d'eau moyenne précipitée de 1380 mm/an et un écoulement moyen annuel de 700 m³/s, soit une lame d'eau écoulée de 380 mm/an, ce qui représente un déficit d'écoulement global de 75%, l'évapotranspiration réelle annuelle est de 1000 mm/an. Le bassin de la Falémé montre les conditions climatiques les plus sévères : il ne restitue que 12% des eaux météoriques. Les bassins de la Gambie, du Tinkisso et du Bafing ont des comportements similaires : ils restituent à peine 20% des eaux météoriques. Le bassin de la Tominé a un comportement intermédiaire entre les trois bassins précités et le bassin du Konkouré dont le coefficient d'écoulement est de 50% (tableau 33). Les deux bassins côtiers représentent 57% des écoulements de surface du Fouta Djalon, le bassin versant du Bafing 21% et les trois bassins versant du Tinkisso, de la Gambie et de la Falémé se répartissent en parts égales les 22% restant (fig.31).

Tableau 33 : Bilans hydrologiques du Fouta Djalon sur la période 1979-87

Bassin Exutoire	FALEME Satadougo	GAMBIE Kédougou	TINKISSO Tinkisso	BAFING Dakka-S.	TOMINE Gaoual	KONKOURE Konkouré
P (mm)	1140	1376	1187	1313	1647	1612
Q (mm)	140	252	246	289	503	800
ETR (mm)	1000	1124	941	1024	1144	812
DE (%)	88	82	79	78	69	50

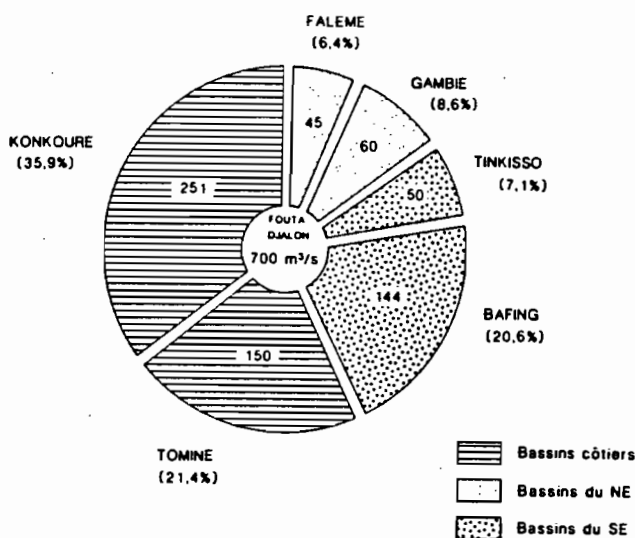


Fig. 31 : Répartition des écoulements de surface dans le Fouta Djalon.

En ce qui concerne les quatre stations principales de suivi géochimique, les stations de Bakel sur le Sénégal et de Kidira sur la Falémé ont les conditions climatiques les plus drastiques. A Siguiri sur le Niger, 19% des eaux météoriques sont restituées et 27% à Kankan sur le Milo (tableau 34). Cette faiblesse des écoulements a naturellement des répercussions sur l'abondance des flux de matières dissoutes et particulaires.

Tableau 34 : Bilans hydrologiques du Sénégal et du Niger sur la période 1979-87

Bassin Exutoire	SENEGAL Bakel	FALEME Kidira	NIGER Siguiri	MILO Kankan
P (mm)	685	874	1389	1628
Q (mm)	46	65	261	437
ETR (mm)	639	809	1128	1191
DE (%)	93	92	81	73

TROISIEME PARTIE

FLUCTUATIONS CLIMATIQUES

ET

TRANSFERTS DE MATIERES

"L'alimentation en matières des milieux sédimentaires dépend de plusieurs facteurs géodynamiques et climatiques interdépendants, au rang desquels on trouve l'activité tectonique globale, la forme et la position des continents, la température moyenne, l'écoulement continental global et la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère."

Y. TARDY (1987)

Le cycle géochimique externe des éléments d'un bassin versant fait intervenir quatre réservoirs principaux qui sont l'atmosphère, la biosphère, le sol et la lithosphère (MEYBECK, 1984). Dans l'écosystème biosphère-sol, les entrées sont représentées par les dépôts secs et humides provenant de l'atmosphère, par les apports dûs à l'érosion des roches de la lithosphère et par les échanges gazeux avec l'atmosphère. Ensuite, les éléments peuvent emprunter deux voies majeures pour sortir du bassin versant. La plus importante, et également la plus facilement quantifiable, est le transport par les rivières des matières dissoutes et particulaires. Mais une part non négligeable peut sortir par émission dans l'atmosphère, les entrées et les sorties par échanges gazeux s'équilibrant (fig.32).

Dans les deux parties précédentes, biosphère, sol et lithosphère ont été caractérisés. Il reste maintenant à décrire les apports atmosphériques avant de présenter les flux de matières transportés par les eaux de surface. L'étape ultime de ce bilan des transferts de matière sera l'estimation de l'érosion et la modélisation de la dynamique de ce vieux paysage latéritique à partir des paramètres hydroclimatiques et géochimiques.

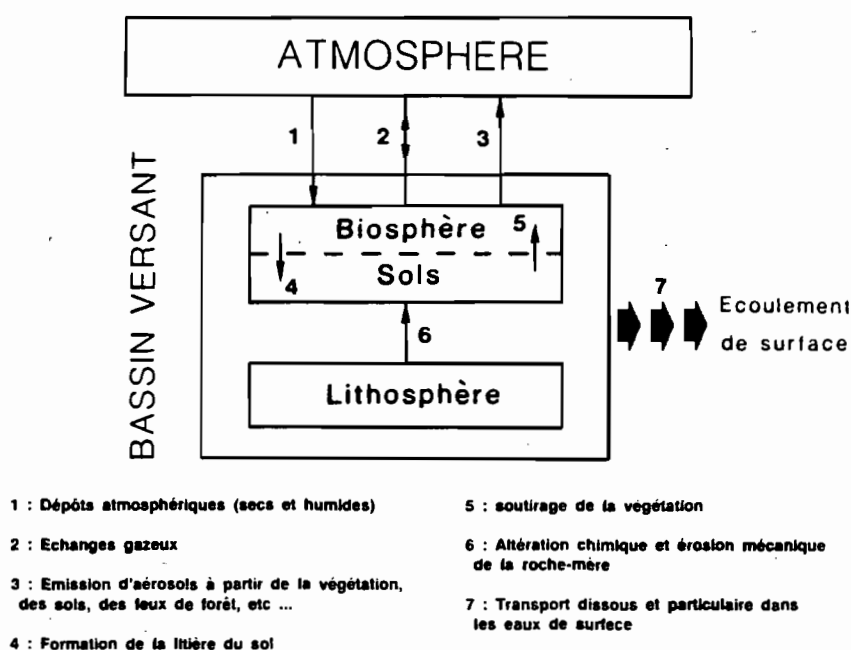


Fig. 32 : Schématisation des interactions entre les réservoirs naturels intervenant dans le cycle des éléments chimiques à la surface des continents (d'après MEYBECK, 1984).

CHAPITRE V

PRESENTATION DES MESURES ET METHODES D'ETUDE

Ce chapitre est consacré à la description des protocoles d'échantillonnage, des stations de prélèvements et des méthodes d'analyses. C'est également dans ce chapitre que sont traités les résultats bruts afin de contrôler la qualité des analyses chimiques des eaux prélevées. Enfin, les méthodes utilisées pour le calcul des flux de matières dissoutes et particulaires sont présentées.

I - ACQUISITION DES DONNEES

A - ETUDE DES APPORTS ATMOSPHERIQUES

1. Les eaux de pluie

Pour apprécier l'importance des apports en éléments chimiques par les précipitations, les eaux de pluie ont été collectées à Bakel en milieu continental sahélien lors de l'hivernage 1983 et à Kédougou en milieu continental soudano-guinéen lors de l'hivernage 1987. Ces deux campagnes de prélèvements rentrent dans le cadre de l'étude du comportement hydrogéochimique des grands bassins versants de la zone tropicale suivi par l'ORSTOM. Une première campagne de prélèvements avait eu lieu en 1981 (TRAVI & *al.*, 1987). Le protocole d'échantillonnage adopté au cours des hivernages 1983 et 1987 a été le même. Des entonnoirs à col étroit, surmontant des flacons teintés, ont fait office de pluviomètres. Les échantillons de chaque averse ont été temporairement conservés dans de volumineux récipients où une fine couche d'huile de paraffine interdisait l'évaporation. Les collecteurs ont été rincés à l'eau distillée après chaque averse et les prélèvements filtrés avant entreposage. Les analyses sont effectuées sur des regroupements bi-hebdomadaires, une à plusieurs semaines après le prélèvement.

2. Les poussières atmosphériques

Devant l'ampleur croissante des phénomènes de brumes sèches et de vents de sable occultant fréquemment le ciel au-dessus du Sénégal, l'ORSTOM a dès 1984 mis en place un réseau d'échantillonnage. Les premiers résultats ont déjà donné lieu aux publications de GAC (1985), ORANGE & *al.* (1986), GAC & *al.* (1986), GAC (1987), ORANGE & GAC (1990a) et ORANGE & *al.* (1990). La technique d'échantillonnage utilisée est présentée dans le chapitre suivant. Les résultats quantitatifs concernent les stations de : Dakar de 1984 à 1989, Mbour en 1986 et 1987, Pété en 1986, Ngnith en 1988 et 1989, et Kédougou en 1987 (fig.33).

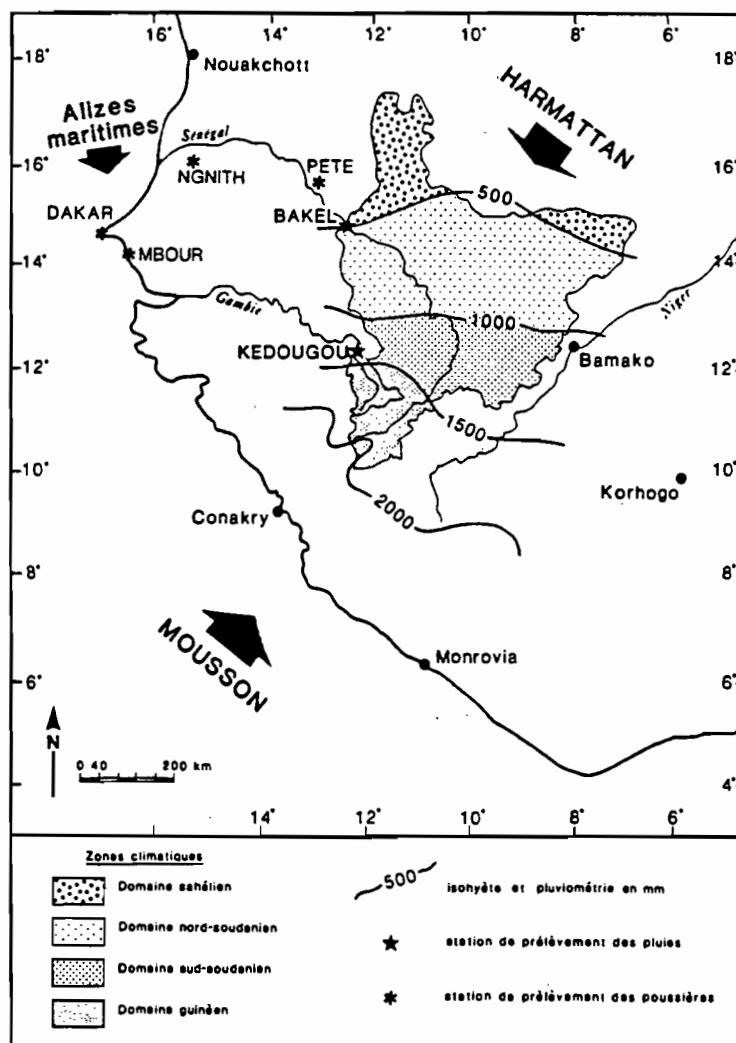


Fig. 33 : Localisation des stations d'étude des apports atmosphériques.

B - ETUDE DES ELEMENTS DISSOUS DES EAUX DE SURFACE

1. Les stations permanentes

Les stations permanentes sont BAKEL sur le fleuve Sénégal, KIDIRA sur la Falémé, KEDOUGOU sur la Gambie, SIGUIRI sur le Niger, KANKAN sur le Milo, DABOLA sur le Tinkisso. Les stations de Bakel et Kidira sont suivies par J-Y GAC depuis 1979 ; j'ai participé à la collecte de leurs échantillons à partir d'août 1985. Le rythme d'échantillonnage s'est adapté au fil des années au cycle hydrologique monomodal caractéristique des cours d'eau de cette zone climatique. Ainsi, les prélèvements passent de tous les 3-4 jours sur toute l'année en 1979 à un prélèvement tous les 2 jours pratiqué uniquement lors de la période de crue en 1985, dernière année de suivi continu à Bakel (tableau 35). A Kidira, les prélèvements ont été réalisés au rythme moyen d'un échantillon tous les 3 jours de 1979 à 1983. A la station de Kédougou, le rythme d'échantillonnage est journalier lors de la saison des hautes-eaux en 1986 ; ensuite en 1987, les prélèvements ont été hebdomadaires de août à décembre. Pour les trois stations guinéennes, le rythme de prélèvement a été régulier et identique : prélèvements hebdomadaires de juin à novembre 1987.

Tableau 35 : Calendrier des prélèvements d'eau effectués sur les stations permanentes pour l'étude des éléments en solution

Stations	Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	nombre d'échantillons	nombre d'analyses
BAKEL	1979	5	7	7	7	-	6	3	8	16	8	7	6	80	24
	1980	1	3	1	4	7	17	9	33	16	2	4	4	101	43
	1981	5	4	4	4	5	13	16	15	15	12	8	7	108	47
	1982	5	4	4	4	4	8	13	9	11	10	6	4	82	36
	1983	5	4	1	-	3	2	8	8	5	2	-	-	38	33
	1984	-	-	-	-	-	14	-	-	-	-	-	-	14	14
	1985	-	-	-	-	-	4	17	12	12	4	-	-	49	29
	1987	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	6	2
	1988	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
KIDIRA	1979	-	-	-	-	-	-	3	5	9	4	5	2	28	17
	1980	1	2	-	-	-	6	7	7	5	-	2	4	34	23
	1981	3	4	4	4	5	2	1	2	4	5	4	4	42	34
	1982	5	4	5	3	5	3	7	4	4	5	4	3	52	34
	1983	5	4	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	5
	1985	-	-	-	-	-	-	10	10	12	-	-	-	32	7
	1987	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1
	1988	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
KEDOUGOU	1986	-	-	-	-	-	-	7	31	30	-	-	-	68	68
	1987	-	-	-	-	-	-	-	2	6	4	3	1	16	16
	1988	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
SIGUIRI	1987	-	-	-	-	-	3	3	5	4	4	2	-	21	21
KANKAN	1987	-	-	-	-	-	5	3	4	3	4	3	-	22	22
DABOLA	1987	-	-	-	-	-	2	3	4	4	4	4	-	21	21

Finalement, le nombre de prélèvements effectués varie énormément d'une station à l'autre, et d'une année sur l'autre (tableau 36). Pour les stations de Bakel et de Kidira, les analyses ont été faites sur des regroupements d'échantillons (en règle générale, les regroupements sont hebdomadaires), ce qui fait un total de 500 analyses.

Tableau 36 : Répartition des prélèvements sur les différentes stations permanentes pour l'étude des éléments en solution

Cours d'eau	Points de prélèvements	nombre d'échantillons	nombre d'analyses	Période
SENEGAL	Bakel	480	231	1979-87
FALEME	Kidira	200	122	1979-85
GAMBIE	Kédougou	86	86	1986-87
NIGER	Siguirí	21	21	1987
MILO	Kankan	22	22	1987
TINKISSO	Dabola	21	21	1987

2. Les stations itinérantes

Les campagnes de prélèvements ont toujours eu lieu en saison sèche, juste avant ou après la saison des pluies pour des raisons de facilité de transport : 183 prélèvements ont été effectués sur 135 stations différentes de 1986 à 1988 (fig.34). Leur répartition est la suivante (tableau 37) : quatre missions (avril 1986, juin 1986, novembre 1986 et décembre 1986) ont permis de réaliser 92 échantillonnages en 1986 ; j'ai effectué une seconde campagne en mai 1987 avec J-M BOUCHEZ (hydrologue ORSTOM) qui a donné lieu à 28 prélèvements ;

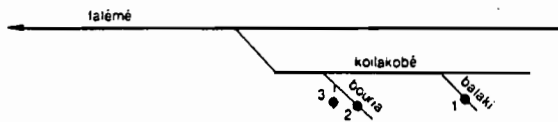
enfin, parti seul avec Ousseynou GUEYE en mars 1988 nous avons ramené 63 échantillons. Les résultats issus de la campagne 1986 ont été présentés par BAMBA (1987) et, plus récemment, par ORANGE & GAC (1990b). En grande partie, l'échantillonnage a été effectué dans les bassins de la Gambie (69) et du Sénégal (54), quelques prélèvements proviennent de la partie amont du fleuve Niger (22). La partie amont des bassins côtiers guinéens (38), qui constituent les flancs occidentaux du Fouta Djalon, a également été échantillonnée. En dépit des difficultés d'accès, le lot d'échantillons a été diversifié aux sources, aux ruisseaux, aux rivières et aux fleuves (tableau 37). Les tableaux 38 à 40 donnent la liste exhaustive des prélèvements par bassin versant.

Tableau 37 : Répartition des prélèvements d'eau ponctuels par année, par type de cours d'eau et par zone géographique

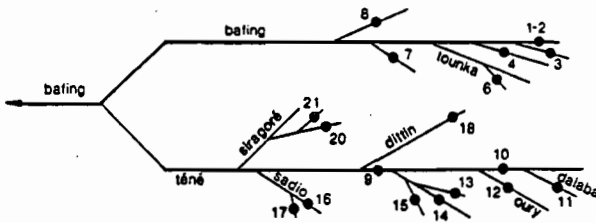
Bassin versant	Nombre total de prélèvements et de stations	TYPE DE REPARTITION DES PRELEVEMENTS								
		PAR ANNEE			PAR TYPE DE COURS D'EAU				PAR ZONE	
		1986	mai 1987	mars 1988	S	Ru	Ri	F	Fouta	Hors Fouta
SENEGAL	54 (49)	24	3	27	13	18	8	15	40 (35)	14 (14)
GAMBIE	69 (42)	43	9	17	14	27	23	5	69 (42)	0
NIGER	22 (20)	0	10	12	1	5	8	8	3 (3)	19 (17)
TOMINE	22 (13)	18	2	2	0	9	9	4	22 (13)	0
KONKOURE	14 (9)	7	2	5	5	5	4	0	14 (9)	0
KABA	2 (2)	0	2	0	0	0	2	0	0	2 (2)
Somme	183 (135)	92	28	63	33	64	54	32	148 (102)	35 (33)

S : source ; Ru : ruisseau ; Ri : rivière ; F : fleuve ; () : nombre de stations échantillonnées.

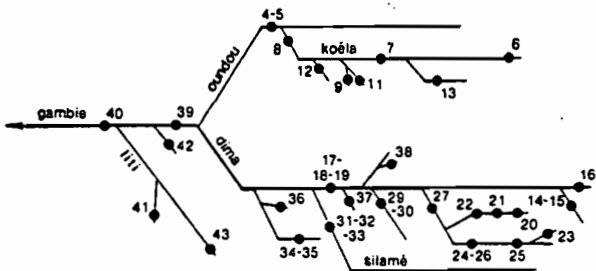
La FALEME



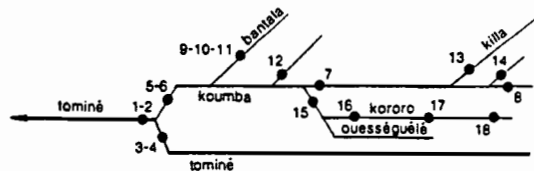
Le BAFING



La GAMBIE



La TOMINE



Le KONKOURE

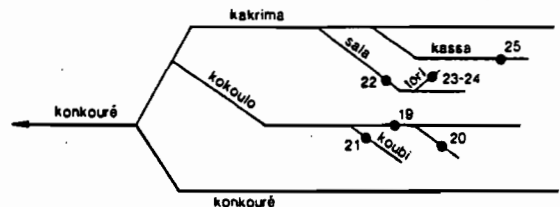


Fig. 34 : Schéma de localisation des prélèvements d'eau de surface dans le Fouta Djalon.

Tableau 38 : Liste des prélèvements ponctuels des eaux de surface du bassin de la Gambie

N° réf.	N° coll.	Sous-bassin versant	Nom du cours d'eau et localité	Coordonnées		Taille	Lithologie	Domaine climat.	Date	Observations	
				Lat.N	Long.W						
AMONT DE KEDOUGOU											
1	D020	Dîma	Dîma à Oré-Niïa	11°24'30"	12°15'30"	S	5	g	21/03/88	source de la Gambie versant N du Limboko	
2	G16	Dîma	Dîma à Séléa	11°24'	12°15'	S	5	g	12/12/86		
3	G14	Dîma	Dîma à Foullasso	11°26'	12°16'	Ru	5	g	11/11/86	lit rouge	
4	G15	"	"	"	"	"	5	"	12/11/86		
-	sec	"	"	"	"	"	"	"	19/03/88		
5	D019	Dîma	Dîma à Téliré	11°27'30"	12°10'	Ri	5	g	20/03/88		
6	D010	Dîma RG	Dadiwell à Tiabé	11°29'30"	12°11'	S	5	g	19/03/88		
7	G20	Dîma RG	Salimé à Gosso	11°30'	12°11'	S	5	g	5/06/86		
8	G21	Dîma RG	Salimé à Auré	11°31'30"	12°10'	S	2	g	5/06/86		
9	G22	Dîma RG	Salimé à Péteï	11°32'30"	12°10'	S	2	g	5/06/86		
10	G23	Dîma RG	Salimé à Piliñini	11°33'	12°09'30"	Ru	2	g	5/06/86		
11	G24	"	"	"	"	"	2	"	11/11/86		
12	D011	"	"	"	"	"	2	"	19/03/88		
13	G25	Dîma RG	Salimé à 2 km de Biwalla	11°34'30"	12°09'	Ri	2	g	5/06/86		
14	D012	"	"	"	"	"	2	"	19/03/88		
15	G28	Salimé RG	Affluent de la Salimé à Niakaya	11°34'30"	12°04'30"	S	5	g	5/06/86		
16	G26	Dîma RG	Salimé à Niakaya	11°34'30"	12°04'30"	Ri	5	g	5/06/86		
17	G27	"	"	"	"	"	5	"	11/11/86		
-	sec	"	"	"	"	"	5	"	19/03/88		
-	sec	Dîma RG	Salimé à Gadafetto	11°35'	12°07'	Ru	5	g	19/03/88		
-	sec	Dîma RG	Salimé à Dansonko	11°35'	12°06'	Ru	5	g	19/03/88		
18	G29	Dîma RG	Siguiton à Tendetta	11°36'	12°00'	Ru	4	g	5/06/86		
19	G30	"	"	"	"	"	4	"	11/11/86		
-	sec	"	"	"	"	"	4	"	19/03/88		
20	G38	Dîma RD	Sougué à Oré Sougué	11°36'	11°55'	Ru	4	g	11/11/86	eau stagnante	
21	G37	Dîma RG	Garama à 2 km de Nianou	11°40'	11°57'	Ru	4	g	11/11/86		
22	G17	Dîma	Dîma à Nianou	11°40'	11°57'	Ri	4	g	13/04/86	H = 0,29 m	
23	G18	"	"	"	"	"	4	"	5/06/86	H = 0,56 m	
24	G19	"	"	"	"	"	4	"	13/11/86	H = 0,90 m	
25	DB22	"	"	"	"	"	4	"	3/06/87	H = 0,35 m	
26	D018	"	"	"	"	"	4	"	20/03/88	H = ?	
27	D013	Dîma RG	Silamé à Belli	11°36'30"	12°08'	Ru	5	g	19/03/88	H = 0,35 m H = 0,62 m H = 0,85 m H = 0,43 m H = 0,44 m	
28	G31	Dîma RG	Silamé à Matakaou	11°42'	11°58'	Ri	4	g	13/04/86		
29	G32	"	"	"	"	"	4	"	2/06/86		
30	G33	"	"	"	"	"	4	"	13/11/86		
31	DB25	"	"	"	"	"	4	"	4/06/87		
32	D014	"	"	"	"	"	4	"	19/03/88		
33	G34	Dîma RG	Salambandé à Salambandé	11°49'	11°54'	Ru	5	g	2/06/86		
34	G35	"	"	"	"	"	5	"	14/11/86		
35	DB26	"	"	"	"	"	5	"	4/06/87		
36	G36	Salambandé RD	Kinia à Hafïa	11°47'30"	11°55'30"	S	4	g	14/11/86		
37	G6	Oundou RG	Koëla à Totiha	11°33'	11°51'	Ru	5	g	12/11/86	près de Koubia	
38	G13	Koëla RG	Songnessa à Songnessa	11°40'	11°43'	Ru	4	g	12/11/86		
39	DB24	"	"	"	"	"	4	"	3/06/87	eau stagnante	
40	D015	"	"	"	"	"	4	"	20/03/88		
41	G7	Oundou RG	Koëla à Kankiran	11°40'	11°39'	Ri	4	g	12/11/86		
42	G10	Koëla RG	Férobé près de Fafaya	11°41'30"	11°41'	S	5	g	12/11/86		
43	D016	"	"	"	"	"	5	"	20/03/88		
44	G11	Koëla RG	Mégnakouré à Mégnakouré	11°43'	11°39'30"	Ru	5	g	12/11/86		
-	sec	"	"	"	"	"	5	"	20/03/88		
45	G9	Koëla RG	RG du Mégnakouré	11°44'	11°39'	S	5	g	12/11/86		
46	G12	Koëla RG	Linguéri à Tioro	11°44'30"	11°37'30"	Ru	5	g	12/11/86		
-	sec	"	"	"	"	"	5	"	20/03/88		
47	G8	Oundou RG	Koëla près de Borokomé	11°46'	11°34'	Ri	4	g	12/11/86	à la confluence après la Koëla	
48	G4	Oundou	Oundou au bac de Borokomé	11°46'	11°34'	Ri	4	g	14/04/86		
49	G5	"	"	"	"	"	4	"	12/11/86	H = 1,09 m	
50	DB23	"	"	"	"	"	4	"	3/06/87		
51	D017	"	"	"	"	"	4	"	20/03/88		
52	G39	Gambie	Gambie au pont à 15 km de Balakï	12°01'	11°50'	F	4	g	14/11/86	après l'Oundou	
-	sec	"	"	"	"	"	4	"	4/06/87		
53	G42	Gambie RG	Miéguéïé à Simbo	11°57'	11°52'	S	5	g	14/11/86	20 km avant la Liti	
54	G43	Gambie RG	Liti à Touleï Sigon	11°44'	12°13'	Ru	2	g	12/12/86		
-	sec	"	"	"	"	"	2	"	18/03/88		
55	D06	Liti RG	Lami à Dounguel Sigon	11°47'	12°12'30"	Ru	2	g	18/03/88		
56	D05	Liti	Liti à Dossanti	11°49'	12°08'	Ri	2	g	18/03/88		
57	D04	Liti RG	Dengia à Bilékéné	12°01'	12°19'	S	5	g	18/03/88		
58	G40	Gambie	Gambie à Kouncy	12°05'	12°00'	F	4	g	15/11/86		pollution ? après la Liti
59	DB27	"	"	"	"	"	4	"	4/06/87		
60	DB28	"	"	"	"	"	4	"	5/06/87		après un orage
61	D03	Gambie RG	Kanta à Kérouané	12°14'	12°20'	Ru	2	ss	17/03/88		
62	G41	Kanta	source au mont Loura	12°07'	12°16'	S	5	g	12/12/86		
AVAL DE KEDOUGOU											
63*	G3	Gambie	Gambie à Samékouta	12°36'30"	12°07'	F	3	ss	15/11/86	en aval de Kédougou	
64*	D02	Tiokoye	Chûtes de Dindéfello	12°23'	12°19'	Ru	4	ss	17/03/88		
65*	D02b	"	"	"	"	"	4	"	17/03/88	ruissellement sur roche pas d'écoulement	
66*	DB1	Gambie RG	Koulountou à 11 km de Koundara	12°29'	13°11'30"	Ri	2	ss	23/05/87		
67*	G1	Koulountou RG	Ousson à Sambaïlo	12°36'	13°22'30"	Ru	2	ss	5/04/86	RG de la Koulountou	
68*	G2	"	"	"	"	"	2	"	15/12/86		
69*	DB2	"	"	"	"	"	2	"	23/05/87		

* : station située hors du Fouta Djallon ; S : source ; Ru : ruisseau ; Ri : rivière ; F : fleuve ; g : climat guinéen ; ss : climat sud-soudanien ; ns : climat nord-soudanien ; RD : rive droite ; RG : rive gauche ;
1 : Granites ; 2 : Grès tendres ; 3 : Schistes ; 4 : Grès durs ; 5 : Dolérites.

Tableau 39 : Liste des prélèvements ponctuels des eaux de surface du bassin du Sénégal

N° réf. coll.	N° coll.	Sous-bassin versant	Nom du cours d'eau et localité	Coordonnées		Taille	Lithologie	Domaine climat.	Date	Observations
				Lat.N	Long.W					
BASSIN DU BAFING										
1	S1	Bafing	Bafing à Morondé	10°28'	12°11'	S	2	g	10/12/86	avant le barrage de Tolo
2	D029	Bafing RD	Kendouma à Tolo	10°30'30	12°11'	S	2	g	22/03/88	avant le barrage de Tolo
3	D031	Bafing	Bafing au barrage de Tolo	10°31'	12°10'30	Lac	2	g	22/03/88	
4	S2	Bafing	Bafing à Carey	10°29'30	12°08'30	Ru	1	g	10/12/86	après le barrage de Tolo
5	D030					"	1	"	22/03/88	
6	S3	Bafing RG	source à Feura	10°36'	12°09'	S	2	g	10/12/86	
7	S4	Bafing RG	source à Galabadi	10°37'	12°07'	S	1	g	10/12/86	
8	S6	Tounga RG	source à 3 km de Sohindé	10°41'	12°06'	S	1	g	10/12/86	
9	S5	Bafing RG	Tounga à Sohindé	10°39'	12°06'	Ru	1	g	10/12/86	
10	S7	Bafing RD	ru à Fadigala	10°29'30	11°57'	Ru	1	g	10/12/86	5 km avant Ballay
11	D032	Bafing	Bafing à Ballay	10°30'30	11°55'	F	5	g	23/03/88	
12	S8	Bafing RD	Béréko près de Dounet	10°32'	11°52'	Ru	1	g	10/12/86	7 km après Ballay
13	DB21	Bafing	Bafing à Sokotora	10°39'30	11°46'	F	1	g	1/06/87	près de Timbo
14	D033					"	1	"	23/03/88	
15	D034	Bafing RD	Diendou à Siffray	10°44'	11°27'30	Ri	1	g	23/03/88	
16	DB20	Diendou RG	Diogouré à 11 km de Siffray	10°45'	11°33'	Ru	1	g	1/06/87	
17	DB7	Téné	Téné à Dalaba	10°40'	12°13'30	Ru	2	g	29/05/87	
18	D028					"	2	"	22/03/88	
19	S11	Téné RG	Dalaba à Doukimagna	10°45'	12°14'	Ru	2	g	10/12/86	
20	S10	Téné	Téné à Guéli	10°49'	12°14'	Ri	2	g	10/12/86	près de Koba
21	D025					"	2	"	22/03/88	
22	S12	Ménié RG	Oury à Bomboli	10°57'	12°21'	Ru	2	g	10/12/86	Ménié = RG de la Téné
23	S15	Hériko RG	ru à Kébafr	10°58'	12°13'	S	1	g	10/12/86	
24	S14	Hériko RG	ru	10°58'	12°14'	S	1	g	10/12/86	
25	S13	Téné RG	Hériko à Pampa	10°58'	12°15'	Ru	1	g	10/12/86	
26	S9	Téné	Téné à Bioubo	10°56'30	12°11'	Ri	1	g	10/12/86	près de Kébaly
27	S19	Ditinn RD	Hériko à Saba	10°52'30	12°09'	S	1	g	10/12/86	
28	D027	Ditinn RD	Hériko à Diambouria	10°53'	12°13'	S	1	g	22/03/88	
29	S18	Téné RG	Ditinn à Ditinn	10°54'	12°11'	Ru	1	g	10/12/86	
30	D026					"	1	"	22/03/88	
31	BG4	Téné RG	Sadio à Banga	11°06'30	12°12'	S	1	g	21/03/88	
32	S16	Sadio RD	ru à Sobéabé	11°05'	12°13'30	Ru	1	g	5/06/86	
33	BG2	Sadio RD	Banga à Banga	11°07'	12°13'	S	1	g	21/03/88	
34	S17	Sadio RD	Banga à Pétawol	11°06'	12°13'	Ru	1	g	5/06/86	
35	S20	Siragoré RG	Toukougna à 17 km de Ditinn	10°47'	12°05'	Ru	1	g	10/12/86	Siragoré = RD Téné
36	S21	Toukougna RG	Boroual à 15 km de Ditinn	10°48'	12°05'30	S	1	g	10/12/86	
37	D037	Bafing	Bafing à Dalabori (au bac)	11°17'	11°20'	F	5	g	23/03/88	sur la route de Tougué
38*	D052	Bafing	Bafing à Manantali-barrage	13°12'	10°25'30	F	4	ss	29/03/88	en amont (lac)
39*	D050	Bafing	Bafing à Manantali-barrage	13°12'	10°26'	F	4	ss	28/03/88	en aval
40*	D051	Bafing	Bafing à Diéguéra (rapides)	13°15'	10°40'	F	4	ss	29/03/88	en aval du barrage
41*	D049	Bafing	Bafing à Mahina	13°45'30	10°50'30	F	4	ns	28/03/88	
42*	D053	Bafing	Bafing à Bafoulabé (amont)	13°48'30	10°49'30	F	4	ns	29/03/88	
BASSIN DU BAKOYE										
-	sec	Bakoye	Ménien (Bakoye) à Mignala	11°38'	9°36'30	Ru	4	ss	25/03/88	
-	sec	Bakoye	Ménien au pont de Koudédi	11°41'30	9°33'	Ru	4	ss	25/03/88	
-	sec	Bakoye RD	Baoulé près de Négala	12°56'	8°38'	Ri	4	ns	25/03/88	
43*	D048	Bakoye	Bakoye à Toukoto	13°27'30	9°53'	Ri	4	ns	28/03/88	ne coule pas
BASSIN DU SENEGAL										
44*	D054	Sénégal	Sénégal à Félou (amont de Kayes)	14°21'30	11°21'	F	4	ns	29/03/88	en aval des chûtes
45*	DS1	Sénégal	Sénégal à Goutioubé	14°45'30	12°12'	F	2	ns	19/08/87	en amont de la Falémé
52*	DS2	Sénégal	Sénégal à la confluence Falémé	14°45'30	12°14'	F	2	ns	19/08/87	
53*	DS3	Sénégal	Sénégal à Aroundou	14°45'30	12°16'	F	2	ns	19/08/87	en aval de la Falémé
54*	DS4	Sénégal	Sénégal à Goumi	14°49'30	12°21'	F	2	ns	19/08/87	
BASSIN DE LA FALEME										
46	F1	Koïlakabé RG	Mangata-Komé à Bagata	12°13'	11°50'	S	5	g	15/11/86	près de Balaki
47	F2	Koïlakabé RG	Dialadia à Bouria	12°19'	11°53'	Ru	5	g	15/11/86	
48	F3	Dialadia RG	Bitari à Kankaméré	12°22'	11°56'	Ru	5	g	15/11/86	
49*	Fsar	Falémé	Falémé à 15 km de Kénéba	12°56'	11°23'	Ri	3	ss	14/10/87	route de Saraya
-	sec	Falémé	Falémé à Nayé	14°25'	12°12'	Ri	2	ns	30/03/88	
50*	DF1	Falémé	Falémé à Dramané	14°35'	12°10'30	Ri	2	ns	19/08/87	
51*	DF2	Falémé	Falémé à Balou	14°45'	12°14'	Ri	2	ns	19/08/87	près de la confluence

* : station située hors du Fouta Djallon ; S : source ; Ru : ruisseau ; Ri : rivière ; F : fleuve ; g : climat guinéen ; ss : climat sud-soudanien ; ns : climat nord-soudanien ; RD : rive droite ; RG : rive gauche.
1 : Granites ; 2 : Grès tendres ; 3 : Schistes ; 4 : Grès durs ; 5 : Dolérites.

Tableau 40 : Liste des prélèvements ponctuels des eaux de surface des bassins côtiers guinéens et du bassin amont du Niger

N° réf.	N° coll.	Sous-bassin versant	Nom du cours d'eau et localité	Coordonnées Lat.N Long.W		Taille	Lithologie	Domaine climat.	Date	Observations
BASSIN DE LA TOMINE										
1	C8	Tominé RD	Koumba à 5 km de Yéguélé	11°39'30"	12°17'	Ru	2	g	11/12/86	
2	D08						2		18/03/88	
3	C14	Koumba RD	Mouré à 3 km de Yéguélé	11°41'	12°17'	Ru	2	g	11/12/86	
4	D07						2		18/03/88	
-	sec	Koumba	Kellé à Kassé	11°58'	12°18'	Ru	5	g	18/03/88	
5	C13	Koumba RD	Killa à Paratual	11°43'	12°20'	Ru	5	g	11/12/86	
6	C7	Tominé RD	Koumba au bac	11°39'	12°45'30"	R1	2	g	8/12/86	avant l'Ouèsséguélé
7	C18	Ouèsséguélé RD	Kororo à Pétef Komo	11°38'	12°31'30"	S	5	g	8/12/86	
8	C16	Ouèsséguélé RD	Kororo à Dantari	11°37'30"	12°36'	Ru	5	g	9/04/86	
9	DB4						5		25/05/87	
10	C17	Ouèsséguélé RD	Kororo à Paniko	11°38'	12°40'	Ru	5	g	8/12/86	
11	C15	Koumba RG	Ouèsséguélé	11°38'30"	12°45'	R1	2	g	8/12/86	à 2 km de la confluence
12	C12	Tominé RD	Koumba à Bomini	11°42'30"	12°49'30"	R1	2	g	8/12/86	
13	C9	Koumba RD	Bantala au bac	11°45'	12°54'	R1	2	g	15/12/85	
14	C10						2		9/04/86	
15	C11						2		8/12/86	
16	DB3						2		24/05/87	
17	C5	Tominé RD	Koumba à Gaoual	11°45'	13°11'	F	2	g	15/12/85	
18	C6						2		9/04/86	
19	C3	Tominé	Tominé à Gaoual	11°45'	13°12'30"	F	2	g	14/12/85	en amont de la Koumba
20	C4						2		9/04/86	
21	C1	Tominé	Tominé à Gaoual, H = 1,31 m	11°46'	13°12'	F	2	g	13/12/85	après la Koumba
22	C2		" " " " , H = 0,89 m				2		9/04/86	
BASSIN DE LA KONKOURE										
1	C25	Kakrima RG	Kassa à Kouramangui	11°31'	12°26'30"	Ru	5	g	8/12/86	
2	D09	Kakrima RG	Sala à 5 km de Labé	11°22'	12°17'	S	2	g	19/03/88	
3	C23	Sala RD	Touri à Touri	11°23'30"	12°16'30"	S	2	g	5/06/86	versant W du Limboko
4	C24						2		11/11/86	
-	sec						2		19/03/88	
5	C22	Kakrima RG	Sala à la concession Lenoir	11°22'30"	12°23'	Ru	2	g	8/12/86	à 3 km de Popodara
6	C19	Kakrima RG	Kokoulo à Dabel	11°06'30"	12°23'30"	R1	2	g	9/12/86	
7	DB5						2		26/05/87	
8	D022						2		21/03/88	
9	D023	Kakrima RD	Kokoulo aux chûtes de Kinkon	11°05'30"	12°26'30"	R1	2	g	21/03/88	au sommet de la chûte
10	C20	Koubi RD	Bantiniel à Bantiniel	11°07'	12°19'	S	2	g	5/06/86	
11	C21	Kokoulo RG	Koubi à Pita	11°04'30"	12°23'30"	Ru	2	g	29/05/87	
12	DB6						2		9/12/86	
13	D024						2		22/03/88	
14	D021	Konkouré RG	Garambé à Dikeling	11°15'	12°22'	S	2	g	21/03/88	
BASSIN DE LA KABA										
KB1*	DB8	Kaba	Kaba à 3 km de Bambafouga	10°11'	11°50'30"	R1	-	g	29/05/87	
KB2*	DB9	Kaba RD	Mongo à 35 km de Ouré Kaba	10°07'	11°24'30"	R1	-	g	29/05/87	
BASSIN DU NIGER										
1*	DB11	Niger	Niger à Faranah	10°02'	10°45'30"	F	1	g	30/05/87	après orage
2*	DB10	Balé	ruissellement près de Salounia	10°01'	10°53'	S	1	g	30/05/87	sur plateau cuirassé
3*	DB12	Niger RD	Mafou à 3 km de Borokoro	9°32'30"	10°24'	Ru	1	g	30/05/87	
4*	D042	Niger	Niger à Babila (gué)	10°39'	9°42'	F	3	g	26/03/88	
5*	DB13	Niger RD	Niandan à Bambaya	9°19'30"	10°05'30"	Ru	1	g	30/05/87	Niandan - RD du Niger
6*	DB14	Niandan RD	Balé à 15 km de Toukounou	9°51'	9°42'30"	R1	1	g	30/05/87	en crue
7*	D043	Niger RD	Niandan à Baro (gué)	10°36'30"	9°42'	R1	3	g	26/03/88	
8*	DB18	Niger	Niger à Irikitri	10°41'	9°39'	F	3	g	1/06/87	au bac de Kouroussa
9*	DB15	Niger	Niger au bac de Niandakoro	11°04'30"	9°14'30"	F	3	ss	31/05/87	avant le Milo
10*	D045						3		26/03/88	
11*	D044	Niger RD	Milo à Mafadjj	10°39'30"	9°15'	R1	3	ss	26/03/88	pollution ?
12*	D041	Niger	Niger à l'amont du Tinkisso	11°21'	9°09'30"	F	3	ss	25/03/88	
13	D035	Niger RG	Tinkisso à Dabola	10°43'	11°05'	R1	1	g	23/03/88	
14	DB19	Niger RG	Tinkisso à Toumanéa	10°58'	10°48'	Ru	1	g	1/06/87	
15	D036	Tinkisso RG	Bouka à Konsondougou	10°57'	11°03'30"	Ru	1	g	23/03/88	
16*	D039	Yro RD	Bouka à Manfara	11°31'	10°11'30"	Ru	3	ss	24/03/88	
17*	D038	Tinkisso RG	Yro au pont de Dafnéra	11°27'30"	10°03'30"	R1	3	ss	24/03/88	
-	sec	Tinkisso RG	Yro près de Dentinia	11°41'	9°54'	Ru	3	ss	25/03/88	?
-	sec	Yro RG	Koudé à Dentinia	11°41'30"	9°54'	Ru	3	ss	25/03/88	
18*	DB16	Niger RG	Tinkisso à la confluence	11°21'	9°10'30"	F	3	ss	31/05/87	à 8 km de Siguiri
19*	D040						3		25/03/88	
20*	DB17	Niger	Niger à Siguiri	11°24'30"	9°09'30"	F	3	ss	31/05/87	
21*	D046	Niger RG	Koba près de Bankan	8°55'30"	11°30'30"	R1	3	ss	27/03/88	
22*	D047	Niger	Niger près de Bamako	12°35'	8°02'30"	F	-	ss	27/03/88	10 km en amont

* : station située hors du Fouta Djallon ; S : source ; Ru : ruisseau ; R1 : rivière ; F : fleuve ; g : climat guinéen ; ss : climat sud-soudanien ; ns : climat nord-soudanien ; RD : rive droite ; RG : rive gauche.

1 : Granites ; 2 : Grès tendres ; 3 : Schistes ; 4 : Grès durs ; 5 : Dolérites.

3. La méthode de prélèvements

Tous ces prélèvements consistent en une prise d'eau d'un litre, effectuée si possible au centre du fleuve à 30 cm sous la surface, à l'endroit où s'observent les courants les plus forts. Ils sont destinés à la seule étude de la chimie des dissous. Tous les échantillons ont été stockés à l'abri de la lumière aussitôt après le prélèvement, puis acheminés au *Laboratoire de Géologie* de l'ORSTOM à Dakar. Après filtration (sur filtres de 0,45 μ), des fractions aliquotes ont été transmises pour analyse au *Laboratoire de Chimie*.

C - ETUDE DES MATIERES EN SUSPENSION

Les filtres issus des filtrations des échantillons d'eau destinés à l'analyse chimique des dissous ont été pesés après séchage afin de déterminer la quantité de matières en suspension présente dans l'échantillon prélevé. Ceci a permis d'avoir une première approximation de la charge solide transportée par les cours d'eau échantillonnés sur l'ensemble du Fouta Djallon.

D'autre part, la charge solide des eaux du Sénégal à Bakel, de la Falémé à Kidira, de la Gambie à Kédougou et du Milo à Kankan a été spécifiquement étudiée. Le tableau 41 donne le calendrier des prélèvements dont le total s'élève à 1785 échantillons : 1238 échantillons concernent le Sénégal à Bakel, 243 la Falémé à Kidira et 194 la Gambie à Kédougou, les stations de Kankan, Siguiri et Dabola dans le bassin du Niger comptabilisent respectivement 62, 24 et 24 prélèvements.

Tableau 41 : Calendrier des prélèvements d'eau effectués sur les stations permanentes pour l'étude des matières en suspension

Stations	Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	nombre d'échantillons
BAKEL	1979	-	-	-	-	-	-	m	j ₂	j ₂	j ₂	h	m	41
	1980	h	h	m	h	h	-	j ₂	j ₂	j ₂	m	h	h	75
	1981	h	h	h	h	h	j ₂	j	j	j	j	j ₂	j	197
	1982	j	h	h	h	h	h	j	j	j	j	j	h	151
	1983	h	h ₂	m	-	m	-	j	j	j	j	j ₂	h	164
	1984	-	-	-	-	-	-	j	j	j	j	h	h	127
	1985	-	-	-	-	-	-	j	j	j	j	j	-	99
	1986	-	-	-	-	-	-	j	j	j	j	j	-	111
	1987	-	-	-	-	-	-	j	j	j	j	j	-	93
	1988	-	-	-	-	-	-	j	j	j	j	j	j	180
KIDIRA	1979	-	-	-	-	-	-	m	h ₂	h	h	h	h	18
	1980	m	h ₂	-	-	-	j ₄	h	h	h	-	h	h	32
	1981	h	h	h	h	h	h ₂	h	h	h	h	h	h	53
	1982	h	h	h	h ₂	h	h	h	h	h	h	h	h	53
	1983	h	h	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10
	1984	-	-	-	-	-	h	h	h	-	-	-	-	14
	1985	-	-	-	-	-	m	j ₃	j ₃	j ₃	-	-	-	32
	1986	-	-	-	-	-	-	j ₃	j ₃	j ₃	-	-	-	31
KEDOUGOU	1974	-	-	-	-	-	j ₃	j ₂	j ₃	j ₃	j ₃	-	-	35
	1986	-	-	-	-	-	j	j	j	j	-	-	-	111
	1987	-	-	-	-	-	-	h	j ₂	j ₂	j ₂	-	-	48
KANKAN	1987	-	-	-	-	-	j	j ₄	j ₄	j ₄	h	h	-	62
SIGUIRI (sur filtre)	1987	-	-	-	-	-	h	h	h	h	h	h	-	24
DABOLA (sur filtre)	1987	-	-	-	-	-	h	h	h	h	h	h	-	24

rythme des prélèvements : j (journalier), j₂ (tous les deux jours), h (hebdomadaire), h₂ (toutes les deux semaines), m (mensuel).

Pour les stations de Bakel, Kédougou et Kankan, chaque prélèvement a consisté en une prise d'eau de 50 litres effectuée à l'aide d'une bouteille à renversement d'un litre munie d'un messenger. En fonction de la position du plan d'eau, les échantillons ont été collectés à différentes profondeurs sur cinq ou sept profils transversaux. Le traitement *in-situ* consiste à ramener rapidement à un litre le volume représentatif à acheminer vers le laboratoire. On procède à partir des 50 litres recueillis, à une première décantation par addition de 5 cm³ d'acide chlorhydrique puis, le lendemain, au siphonnage de l'eau claire surnageante à l'aide d'un tube recourbé. Le volume résiduel (environ 10 litres) est transvasé dans une dame-jeanne transparente qui permet de visualiser le niveau de décantation et de procéder à la dernière opération de siphonnage 24 heures plus tard. Tous ces flacons d'un litre sont ensuite transférés au laboratoire à Dakar où les matières en suspension sont recueillies par centrifugation (en moyenne, quatre lavages successifs à l'eau distillée) puis séchées à 60°C et pesées. Les déterminations des compositions minéralogiques, les analyses chimiques et le dosage de la matière organique des matières en suspension ont été réalisés pour la plupart sur des regroupements hebdomadaires d'échantillons.

II - METHODES D'ANALYSES

A - LES ELEMENTS EN SOLUTION

Toutes les analyses sont réalisées sur le filtrat au *Laboratoire de Chimie* de l'ORSTOM à Dakar (Sénégal) (CHANUT, 1986) à l'exception des eaux de pluie de la station de Bakel, analysées au *Centre de Géochimie de la Surface* du CNRS à Strasbourg (KREMPP, 1988). Les éléments dosés sont : Cl, SO₄, HCO₃, Ca, Mg, K, Na et SiO₂. Le pH et la conductivité sont mesurées au laboratoire sauf exception pour les prélèvements effectués en 1987 et 1988 sur les stations temporaires ; ce paramètre sera alors notée pH_z. Les méthodes d'analyse sont succinctement données dans le tableau 42 avec la limite de détection et l'erreur commise.

Le sulfate n'a pas été systématiquement dosé étant donné sa faible teneur et le peu de précision de la méthode gravimétrique utilisée sur les échantillons de Bakel des années 1979, 1981, 1982 et 1985, et sur les échantillons de Kidira des années 1981, 1983 et 1985. Pour les prélèvements ponctuels, les sulfates n'ont été dosés que sur les échantillons des années 1987 et 1988 par colorimétrie en continu.

La matière organique dissoute n'a pas été étudiée.

B - LES MATIERES EN SUSPENSION

1. Les analyses chimiques

Les analyses chimiques concernent d'une part les éléments majeurs : SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, Mn₂O₄, CaO, MgO, K₂O, Na₂O et la perte au feu (H₂O⁻), et d'autre part les éléments traces : Sr, Ba, V, Ni, Co, Cr, Zn, Cu, Sc, Y, Zr, Mn, La, Ce, Eu, Yb, Lu, Nb. Toutes les analyses ont été faites au *Centre de Géochimie de la Surface* du CNRS à Strasbourg à l'exception des échantillons de la crue 85/86 du Sénégal à Bakel analysés au *Laboratoire d'Hydrogéologie* de l'université d'Orléans sous la responsabilité des professeurs TRICHET et LELONG. Ces analyses ont été effectuées à l'aide d'un spectromètre d'arc à lecture directe (majeurs et traces) et d'un spectromètre d'absorption atomique (dosage des alcalins). Les méthodes de préparation des solutions sont décrites par SAMUEL & ROUAULT (1983).

Tableau 42 : Méthodes d'analyses des eaux échantillonnées

Eléments dosés	Labo	Méthode	Type d'appareil et marque	Précision ($\mu\text{mole/l}$)	Erreur relative
pH	CNRS	Electrode combinée + 1% KCl à 200 g/l	METTLER DL40RC	0,02 unité	-
	ORSTOM	Electrode de verre et électrode de référence KCl saturée	TACUSSEL	-	-
Conductivité	CNRS		SCHOTT CG857	-	-
	ORSTOM	Cellule de conductivité $K=0,088 \text{ cm}^{-1}$, correction de température par sonde à 20 °C	METHROM	-	-
Cl ⁻	CNRS et ORSTOM	Colorimétrie en continu du Hg(SCN) ₂	TECHNICON	1	0,5 %
HCO ₃ ⁻	CNRS	Potentiométrie avec H ₂ SO ₄ N/50 et électrode de verre combinée pH	METTLER DL40RC	-	1 %
	ORSTOM	Potentiométrie avec HCl N/50 et électrode de verre combinée pH	METHROM	-	1 %
SO ₄ ²⁻	CNRS	Colorimétrie en continu du BaCl ₂	TECHNICON	3	1 %
	ORSTOM	Gravimétrie du SO ₄ Ba et conductimétrie	Four à moufle et METHROM	20	-
PO ₄ ³⁻	CNRS	Colorimétrie en continu du molybdate de NH ₄ et de l'acide ascorbique	TECHNICON	0,1	-
NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻	CNRS	Colorimétrie en continu du NH ₄ Cl	TECHNICON	1	0,5 %
NH ₄ ⁺	CNRS	Colorimétrie en continu du salicylate de Na et du chlore en milieu alcalin	TECHNICON	1	0,5 %
Ca, K, Mg, Na	CNRS et ORSTOM	Absorption atomique ou émission de flamme en milieu HCl 1% LaCl ₃ 1%	JL 151 (flamme air-C ₂ H ₂ et N ₂ O-C ₂ H ₂ pour le Ca)	1	0,5 %
H ₄ SiO ₄	CNRS et ORSTOM	Colorimétrie en continu du silico-molybdate d'ammonium	TECHNICON	1	0,5 %

CNRS : analyses effectuées sous la direction de M. KREMPF au Laboratoire de Sédimentologie et de Géologie de la Surface du CNRS à Strasbourg (FRANCE) ; ORSTOM : analyses effectuées sous la direction de M. CHANUT au laboratoire de chimie de l'ORSTOM à Dakar (SENEGAL).

2. Les analyses minéralogiques

Les analyses minéralogiques sont effectuées par diffractométrie des rayons X sur les échantillons bruts et sur la fraction fine inférieure à 2 μm . Elles ont été réalisées soit par moi-même au *Laboratoire de Géologie* de l'ORSTOM à Dakar avec l'aide d'Hubert SANE, soit au *Centre de Géochimie de la Surface* du CNRS à Strasbourg. Pour la fraction fine, la reconnaissance des espèces minérales argileuses a été faite à partir des tests classiques : un enregistrement sur pâte non traité d'un agrégat orienté (N), une saturation à l'aide d'un polyalcool qui élargit l'espace interfoliaire des smectites (G1), un chauffage à 490°C pendant 4 heures qui détruit la kaolinite et déshydrate les smectites et les chlorites (Ch), un traitement à

l'hydrazine-monohydraté qui affecte les espèces minérales du type kaolinite et permet de les distinguer des chlorites (Hyd). L'analyse quantitative est obtenue en estimant la teneur du minéral à partir de la hauteur de son pic principal de diffraction affectée d'un coefficient d'étalonnage empirique, selon la méthode préconisée par MAZALTARIM (1989).

3. Dosage du carbone organique

J'ai réalisé le dosage du carbone organique des matières en suspension de la crue 85/86 du fleuve Sénégal à Bakel au *Laboratoire d'Hydrogéologie* de l'université d'Orléans à l'aide d'un carmograph 8H WOSTHOFF/OHG (ORANGE, 1986). J'ai effectué les autres analyses au *Centre de Géochimie de la Surface* du CNRS à Strasbourg par absorption infrarouge (dosage simultané du carbone et du soufre). Pour les échantillons de la Gambie prélevés à Kédougou lors de la crue 86/87, la matière organique a été dosée au *Laboratoire de Géologie* de l'ORSTOM à Dakar par la méthode ANNE qui consiste en une oxydation du carbone organique par du dichromate de potassium en milieu sulfurique concentré à 230°C.

4. Dosage de la matière amorphe

Le dosage de la matière amorphe a été réalisé par QUANTIN au *Laboratoire des Formations Superficielles* de l'ORSTOM à Bondy. Seul trois échantillons de la crue 86/87 du fleuve Sénégal à Bakel ont été analysés. Deux méthodes ont été utilisées : la méthode BLAKEMORE et la méthode QUANTIN (JEANROY, 1983 ; QUANTIN & BOULEAU, 1983).

5. Les analyses granulométriques

Les analyses granulométriques ont été faites par moi-même au *Laboratoire de Géologie* de l'ORSTOM à Dakar par sédimentométrie. La méthodologie utilisée est décrite par ORANGE (1986).

III - RESULTATS D'ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX ET CRITIQUES

A - PROBLEME DE VALIDITE DES ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX

L'unité $\mu\text{eq/l}$ est préférée au mg/l afin de pouvoir contrôler la qualité des analyses chimiques à l'aide de la balance ionique. Ce contrôle est effectué à partir du calcul du taux de balance ionique τ qui correspond à l'erreur commise sur la balance ionique.

$$\tau = \frac{\Sigma\text{cations} - \Sigma\text{anions}}{\Sigma\text{cations} + \Sigma\text{anions}} * 200$$

Le taux couramment admis est de l'ordre de 5%. Mais en raison du caractère très peu minéralisé des eaux étudiées, la limite de 10% est adoptée, ce qui correspond en général à une balance ionique n'excédant pas, en valeur absolue, 30 à 40 $\mu\text{eq/l}$. Le tableau 43 donne la répartition des échantillons par tranche d'erreur sur la balance ionique. La qualité des analyses chimiques varie largement d'une station à l'autre. Si pour les fleuves Gambie, Milo et Tinkisso il n'y a aucune correction à apporter, il n'en est pas de même pour les fleuves Sénégal et Falémé qui ont tous deux 13% des analyses ayant un taux de balance ionique supérieur à +/- 10% et surtout pour le Niger dont le taux d'erreur critique affecte 33% des analyses.

Tableau 43 : Répartition des échantillons par tranche d'erreur sur la balance ionique

Cours d'eau	Points de prélèvements	Nombre d'échantillons par classe d'erreur						% d'éch/classe		
		<(-10)%	(-10)-(-5)%	(-5)-0%	0-5%	5-10%	>10%	<5%	5-10%	>10%
SENEGAL	Bakel	26	34	60	90	16	5	65	22	13
FALEME	Kidira	8	31	44	34	5	0	64	30	6
GAMBIE	Kédougou	1	19	31	26	9	0	66	33	1
NIGER	Siguiri	7	4	5	5	0	0	48	19	33
MILO	Kankan	0	4	12	6	0	0	82	18	0
TINKISSO	Dabola	0	2	17	2	0	0	90	10	0
Prélèvements ponctuels par bassin versant										
GAMBIE		0	4	19	27	12	1	73	25	2
SENEGAL		1	8	23	19	2	1	78	19	3
NIGER		0	4	10	8	0	0	82	18	0
COTIER		3	3	10	15	2	0	76	15	9

B - CRITIQUES DES RESULTATS BRUTS PAR BASSIN VERSANT

La correction des résultats d'analyse chimique concerne d'une part, les analyses à taux de balance ionique supérieur à 10% et d'autre part, les analyses chimiques pour lesquelles la concentration en sulfate n'a pas été déterminée. Cette première raison est souvent la conséquence de la seconde.

1. Le Sénégal à Bakel

Sur un total de 231 analyses, 31 ont une erreur sur la balance ionique supérieure à 10%. Cinq d'entre elles seulement ont une balance ionique positive, le déficit cationique est alors attribué au calcium : les corrections sur les concentrations en calcium ont donc été faites afin que la balance ionique n'excède pas 30 $\mu\text{eq/l}$. Les 26 autres analyses ont une balance ionique déficitaire en anion. L'analyse des fluctuations saisonnières et interannuelles des concentrations en sulfate, bicarbonate et chlorure ont permis d'attribuer ce déficit à l'une de ces trois espèces ioniques suivant le cas. Les corrections ont été faites en tenant compte de la conductivité et en s'imposant que la valeur absolue de la balance ionique soit inférieure ou égale à 30 $\mu\text{eq/l}$. Cette approche a permis également de combler les valeurs manquantes de sulfate.

2. La Falémé à Kidira

Les 8 analyses dont le taux de balance ionique est supérieur à 10%, sont des analyses effectuées sur des échantillons des années 1979 et 1980, années pour lesquelles les teneurs en sulfate n'ont pas été déterminées. Aussi, le déficit anionique est attribué au sulfate à concurrence d'une balance ionique de 30 $\mu\text{eq/l}$. D'autre part, les analyses réalisées sur les échantillons de 1985 montrent des teneurs en chlorures anormalement élevées par rapport aux années précédentes, aussi il a semblé plus sûr de les retirer de l'étude qui suit, une pollution ayant probablement eu lieu.

3. La Gambie à Kédougou

A cette station, aucune analyse des sulfates n'a été pratiquée. Toutes les autres analyses ont un taux de balance ionique inférieur à 10% à l'exception d'une. Ce bon équilibre de la balance ionique sur la quasi totalité des analyses permet d'affirmer que les sulfates sont négligeables dans les eaux de la Gambie à Kédougou. La seule analyse ayant une balance ionique inférieure à -30 $\mu\text{eq/l}$ montre une concentration en sodium anormalement élevée ; c'est cette concentration qui est corrigée.

4. Les eaux du bassin du Niger

Aux trois stations suivies, les sulfates n'ont jamais été dosés, ce qui peut expliquer que les balances ioniques soient souvent négatives. Cependant, le taux de balance ionique est toujours largement inférieur à la limite imposée de 10% à l'exception de la station de Siguri sur le Niger. Dans ce dernier cas, la déficience cationique est attribuée au sulfate à concurrence d'une balance ionique de $-30 \mu\text{eq/l}$.

5. Les prélèvements itinérants

97% des analyses effectuées sur les prélèvements itinérants ont un taux de balance ionique inférieur à 10%. Pour les eaux du bassin du Niger, aucune correction ni estimation n'a été nécessaire, les sulfates ayant toujours été analysés. Pour les eaux de la Gambie et du Sénégal, trois analyses ont un taux de balance ionique supérieur à 10%, mais leur balance ionique reste dans tous les cas, inférieure à $30 \mu\text{eq/l}$; ce fort taux n'est donc pas significatif et aucune correction n'a été faite. Enfin, pour les eaux des bassins côtiers, trois analyses ont une balance ionique inférieure à $-30 \mu\text{eq/l}$; ce déficit anionique a été attribué au sulfate.

IV - CALCUL DES FLUX DE MATIERES

Les méthodes de calcul des flux de matières dans les cours d'eau ont déjà fait l'objet d'un certain nombre de travaux parmi lesquels ceux de BALLAND (1983, 1984), DUPRAZ (1984), WALLING (1977), WALLING & WEBB (1981) dont ETCHANCHU (1988) fait une synthèse, et FERGUSON (1987). Le choix de la méthode de calcul des flux de matières est très importante. Elle dépend de la fréquence d'échantillonnage. Dans la pratique, on peut distinguer les méthodes stochastiques basées sur l'utilisation des moyennes et les méthodes déterministes utilisant les relations débit-concentration.

Les méthodes stochastiques considèrent que la concentration mesurée dans la rivière au moment d'un prélèvement est représentative de la période séparant deux prélèvements. Ainsi, pour des prélèvements effectués à intervalles réguliers i , la méthode n°1 (tableau 44) est appliquée. Les flux de la période i sont calculés à partir de la concentration mesurée et du débit moyen de la période i en considérant que la concentration mesurée est représentative de la concentration moyenne sur la période i . Par exemple, dans le cas de prélèvements journaliers, le flux journalier est calculé à partir de la concentration mesurée et du débit moyen journalier, ensuite le flux annuel est établi à partir de la somme de ces flux journaliers. Mais, il arrive de posséder plusieurs mesures de concentration alors qu'une seule valeur moyenne du débit est disponible. Dans ce cas, le flux de matières est estimé à partir de la méthode n°2 (tableau 44) : pour un débit moyen de la période i , le flux de la période i est calculé à partir de la moyenne des concentrations mesurées durant cette période i .

Tableau 44 : Méthodes de calcul des flux de matières

Réf.	Méthode
n°1	$T_1 = K_1 \cdot Q_1 \cdot C_j$
n°2	$T_1 = K_1 \cdot Q_1 \cdot (\sum C_j) / n$

T_1 : flux de matières de la période 1
 K_1 : facteur caractérisant la durée de la période 1
 Q_1 : débit moyen de la période 1
 C_j : concentration mesurée.

Ces différentes méthodes sont applicables à la fois aux éléments dissous et aux matières en suspension. Bien sûr, quelle que soit la méthode utilisée, la précision du calcul

augmente avec la fréquence d'échantillonnage. Quand le nombre de prélèvements sera suffisant, nous utiliserons également des méthodes déterministes qui consistent à rechercher les relations existant entre les concentrations et les débits ou encore entre les flux et les débits (HAUBERT, 1975 ; FERGUSON, 1987 ; ETCHANCHU, 1988 ; KATTAN, 1989).

CHAPITRE VI

IMPORTANCE DES APPORTS ATMOSPHERIQUES, PLUIES ET AEROSOLS DESERTIQUES

L'influence des apports atmosphériques sur la composition chimique des eaux de surface n'est plus à démontrer (DOUGLAS, 1968 ; GIBBS, 1970 ; MATHIEU, 1976 ; MEYBECK, 1983). L'importance relative de ces apports est accrue sur les bassins versants à substratum silicaté, car ces bassins livrent alors des eaux de surface très peu minéralisées (MANGIN & *al.*, 1966 ; MEYBECK, 1984).

Si les études complètes de la chimie des eaux de pluie des pays dits tempérés sont nombreuses, celles concernant les tropiques africains sont plus rares (MATHIEU & MONNET, 1971 ; MATHIEU, 1976 ; ROOSE, 1980 ; DELMAS & SERVANT, 1987 ; LACAUX & *al.*, 1987). Le climat et l'activité biologique de ces basses latitudes y créent pourtant des conditions d'apports atmosphériques fort différentes. De plus, l'atmosphère ne contient pas uniquement des gouttelettes d'eau (les nuages au sens habituel) mais aussi des poussières dénommées lithométéores par les météorologues. Dans les déserts chauds (Sahara, Namibie, S-O des Etats-Unis) ou froids (Alaska, Asie centrale, Chine), ces lithométéores y sont particulièrement fréquents, supplantant les nuages classiques au profit des brumes sèches par suite de la plus grande aridité de l'air (MORALES, 1979 ; COUDE-GAUSSEN & ROGNON, 1983). Les apports atmosphériques peuvent donc se présenter sous deux formes. D'une part, ils peuvent être dissous, ce sont les pluies *sensus stricto* et on parlera alors de dépôts humides. D'autre part, ils peuvent être particulaires, on parlera alors de dépôts secs.

On se propose ici de faire un bilan géochimique des apports atmosphériques en zone continentale sahélo-soudano-guinéenne d'Afrique de l'Ouest, limitée par le 10^{ème} degré de latitude Nord. Au Sud de cette limite, la zone savane-forêt constitue un milieu naturel profondément différent et le bilan géochimique s'en trouve fortement modifié (DOMERGUE, 1980 ; DELMAS & SERVANT, 1987 ; LACAUX & *al.*, 1987).

I - LES EAUX DE PLUIE OU LES DEPOTS HUMIDES

A - PRESENTATION ET CRITIQUES DES RESULTATS ANALYTIQUES

Avant de présenter les résultats des analyses chimiques, il faut souligner la difficulté d'appréhension de la qualité chimique d'une eau de pluie ; elle résulte de son caractère d'eau très peu minéralisée et souvent mal tamponnée (BOURRIE, 1978). A la station de Kédougou, le taux de balance ionique dépasse largement 10% lors des mois de juillet, août et septembre (tableau 45). Cet important déficit cationique est probablement dû au fait que les ions sulfate,

nitrate, phosphate et ammonium n'ont pas été dosés. En effet, les résultats enregistrés à Bakel montrent que la balance ionique effectuée sur ces cinq espèces chimiques est toujours déficitaire en anions, le cation ammonium étant toujours largement représenté. Ainsi par analogie, on attribue le déficit de la balance ionique des eaux de pluie de Kédougou, à ces ions non analysés, le principal responsable étant probablement l'ammonium.

Tableau 45 : Composition chimique mensuelle des pluies (en $\mu\text{eq/l}$) à Bakel en 1983 et à Kédougou en 1987

Station	BAKEL					KEDOUGOU				
	JUI	JUL	AOU	SEP	OCT	JUI	JUL	AOU	SEP	OCT
P_p (mm)	73	25	172	38	12	36	267	183	242	206
NP_p	4	1	9	5	3	2	19	17	15	9
pH _{labo}	7,2	7,3	6,8	6,8	7,2	6,7	6,4	6,7	6,5	6,4
Cond(μS)	62	29	19	25	48	13	15	23	24	20
HCO_3^-	415	123	80	75	235	82	96	178	93	88
Cl^-	118	63	61	84	122	13	14	24	34	83
SO_4^{2-}	40	64	28	44	66	<40	<40	<40	<40	<40
NO_2^-	57	<1	<1	<1	2	-	-	-	-	-
NO_3^-	35	12	9	19	31	-	-	-	-	-
PO_4^{3-}	11	3	1	10	14	-	-	-	-	-
Ca^{2+}	246	98	57	103	218	75	57	97	59	98
Mg^{2+}	194	22	15	26	46	16	12	23	16	20
K^+	78	12	8	16	40	3	5	14	14	37
Na^+	149	15	16	34	49	8	13	20	11	20
NH_4^+	1	110	70	46	109	-	-	-	-	-
H_4SiO_4 ($\mu\text{mol/l}$)	40	4	3	8	20	8	2	6	5	15
Σ anions	676	265	179	232	470	95	110	202	127	171
Σ cations	668	257	167	224	462	102	86	153	101	175
b.i.	8	8	12	8	8	-7	24	50	26	-5
τ (%)	1	3	7	3	2	-7	24	28	23	-3
TDS (mg/l)	52,7	18,9	12,4	16,2	35,1	7,9	8,2	15,3	9,4	13,3

P_p : pluie prélevée en mm ; NP_p : nombre d'événements pluvieux ; Cond : conductivité en $\mu\text{S/cm}$ à 20 °C ;
b.i. : balance ionique ; τ : taux de balance ionique ; TDS : minéralisation en mg/l.

B - DESCRIPTION DU FACIES CHIMIQUE DES PLUIES COLLECTEES

Le pH : le pH a été mesuré au laboratoire et ne présente donc pas une grande signification. Au moment de l'analyse, les eaux sont proches de la neutralité.

La conductivité : La conductivité est donnée à la température de 20°C. Elle varie de 17 à 62 $\mu\text{S/cm}$ à Bakel et de 12 à 26 $\mu\text{S/cm}$ à Kédougou. A Bakel, les pluies de début et de fin de saison humide sont les plus minéralisées : la charge totale atteint 1,1 mmol/l au mois de juin lors des premières pluies et 0,8 mmol/l en octobre lors des dernières averses. A l'exception des ces deux extrêmes, les eaux de pluies sont très peu minéralisées. Par contre, les prélèvements effectués à Kédougou ne montrent aucune évolution nette. Cette différence de comportement entre les deux stations se retrouvera pour toutes les espèces chimiques.

Les anions HCO_3^- , Cl^- et SO_4^{2-} : l'anion dominant est en général le bicarbonate ; sa concentration moyenne en milieu de saison des pluies évolue entre 80 et 180 $\mu\text{eq/l}$. De nouveau, on note à Bakel de fortes concentrations en début et fin de saison pluvieuse, contrairement à ce qui est enregistré à Kédougou où le maximum se produit en août. C'est l'ion dont les variations de concentration ont les plus grandes amplitudes. Le chlorure est bien représenté à Bakel où sa concentration peut être supérieure à celle du bicarbonate ; aux deux

stations, sa teneur est relativement stable. Le sulfate n'a été déterminé qu'à Bakel car à Kédougou sa teneur est inférieure à 40 $\mu\text{eq/l}$, limite de détection de la méthode d'analyse utilisée. En ce qui concerne la station de Bakel, l'évolution de la concentration en sulfate semble aléatoire ; la faible concentration du mois de juin comparée aux fortes concentrations des autres espèces ioniques de ce mois est remarquable.

Les cations Ca, Mg, K, Na : le calcium est de loin le cation dominant avec des teneurs parfois supérieures à la concentration en bicarbonate ; ses concentrations évoluent de 60 à 250 $\mu\text{eq/l}$ à Bakel, et de 60 à 100 $\mu\text{eq/l}$ à Kédougou. Les teneurs en Mg, K, Na sont du même ordre de grandeur ; elles évoluent entre 10 et 20 $\mu\text{eq/l}$ à Kédougou, et entre 10 et 50 $\mu\text{eq/l}$ à Bakel, exception faite à cette station des concentrations anormalement élevées du mois de juin. Le potassium est généralement le cation le moins abondant.

La silice : la silice est faiblement représentée à l'exception des deux événements remarquables enregistrés à Bakel en début et fin de saison pluvieuse.

Les ions NO_2 , NO_3 et NH_4 : ces ions n'ont été dosés que sur les échantillons de Bakel. Le nitrite n'apparaît que lors des deux mois exceptionnels de début et fin de saison des pluies, le nitrate et l'ammonium sont toujours présents. Les concentrations en ammonium sont importantes et leur évolution (décroissance des teneurs jusqu'au milieu de saison des pluies puis concentration) est en opposition avec celles des autres éléments.

Le phosphate : analysé uniquement sur les eaux de pluies provenant de Bakel, cet ion est présent sous forme de trace (de 1 à 14 $\mu\text{eq/l}$).

C - EVOLUTION COMPAREE DES DIFFERENTES ESPECES CHIMIQUES

Bien que le petit nombre d'échantillons de pluie prélevés n'autorise pas de calculs statistiques, la matrice de corrélations linéaires entre les différentes espèces chimiques, la quantité de pluie prélevée P_p , le nombre d'événements pluvieux NP_p et la conductivité est établie à partir des 8 lots bi-hebdomadaires analysés. Seules les coefficients de corrélation pour lesquelles la probabilité de non-signification est de 0,01% ont été retenues (soit $r > 0,96$).

A la station de Kédougou, aucune corrélation significative n'apparaît. En revanche, à Bakel, dix couples montrent des évolutions comparables : (Cond, Ca), (Cond, HCO_3), (NO_3 , Cl), (NO_3 , Ca), (H_4SiO_4 , K), (H_4SiO_4 , Na), (K, Na), (H_4SiO_4 , HCO_3), (K, HCO_3) et (Na, Mg). Il est remarquable de constater qu'aucune variable descriptive de la chimie des pluies ne soit corrélée avec la quantité de pluie ou le nombre d'événements pluvieux. TRAVI & al. (1987) font la même constatation sur les prélèvements effectués lors de l'hivernage 1981. Le bicarbonate et le calcium sont corrélés à la conductivité puisque ces deux ions forment la majeure partie de la charge dissoute des pluies. Le nitrate est lié au chlorure et au calcium. La silice, le potassium et le sodium évoluent de manière identique ; mais alors que silice et potassium sont tous deux corrélés au bicarbonate, le sodium est lié au magnésium.

D - DISCUSSION

De cette brève description, il ressort que l'évolution de la chimie des eaux de pluie suit deux comportements différents aux stations de Bakel et Kédougou qui intéressent deux zones climatiques voisines.

A Bakel en milieu sahélien, la saison des pluies dure de juin à octobre ; tout le cycle pluvieux a donc été échantillonné. La charge dissoute totale varie de 12 à 53 mg/l, soit dans un rapport de 1 à 4. Toutes les espèces chimiques (à l'exception de NH_4) ont un comportement analogue : leur teneur diminue du début au milieu de la saison des pluies puis augmente. Cette évolution mensuelle cyclique des différents paramètres mesurés à Bakel met en

évidence l'existence d'un phénomène de concentration dû à l'évaporation des eaux de pluies en cours de chute. Un tel effet d'évaporation a été reconnu en différentes stations des zones tropicales par la mesure du deutérium et de l'oxygène 18 (YURTSEVER & GAT, 1981). TRAVI & *al.* (1987) rappellent les résultats obtenus à Bamako, station sahélienne du réseau OMM-AIEA, qui confirment que les précipitations sur l'intérieur de la zone sahélienne sont profondément modifiées par l'évaporation. En début et fin d'hivernage où les températures de l'air sont les plus élevées, ce phénomène est plus marqué. Cependant, le calcul des rapports ioniques X_i/Cl (tableau 46) montre qu'il ne suffit pas à expliquer les fortes teneurs de juin et d'octobre. En effet, il est généralement admis que le chlorure est exclusivement d'origine marine, ainsi les rapports ioniques X_i/Cl permettent de caractériser les différentes sources des masses nuageuses apportant les pluies (SAVENKO, 1976 ; MEYBECK, 1984). Or à Bakel, les différents rapport X_i/Cl du mois de juin sont nettement supérieurs à ceux des autres mois ; le même constat, à un degré moindre, peut être fait pour les mois de juillet et octobre. Ainsi, surtout en début d'hivernage, il existe une autre source d'apports en éléments chimiques attribuable au phénomène de "self-cleaning of the atmosphere" que PETRENCHUK & SELEZNEVA (1970) ont mis en évidence en URSS : les premiers événements pluvieux nettoient l'atmosphère de toutes ses impuretés ; en fin de saison des pluies, l'espacement plus long entre les événements pluvieux laisse à l'atmosphère le temps de "se salir" avant qu'une nouvelle pluie vienne le "nettoyer". Cette interprétation est confirmée par les fortes teneurs en silice enregistrées en juin et octobre.

Tableau 46 : Rapports mensuelles X_i/Cl des éléments chimiques majeurs X_i (exprimés en équivalent) des eaux de pluie collectées à Bakel et Kédougou

Station	BAKEL					KEDOUGOU					(1)
	JUI	JUL	AOU	SEP	OCT	JUI	JUL	AOU	SEP	OCT	-
SO ₄ /Cl	0,34	1,02	0,46	0,52	0,54	-	-	-	-	-	0,354
HCO ₃ /Cl	3,52	1,95	1,31	0,89	1,93	6,31	6,86	7,42	2,73	1,06	0,023
Ca/Cl	2,09	1,56	0,93	1,23	1,79	5,77	4,07	4,04	1,73	1,18	0,134
Mg/Cl	1,64	0,35	0,25	0,31	0,38	1,23	0,86	0,96	0,47	0,24	0,213
K/Cl	0,66	0,19	0,13	0,19	0,33	0,23	0,36	0,58	0,41	0,45	0,032
Na/Cl	1,26	0,24	0,26	0,40	0,40	0,61	0,93	0,83	0,32	0,24	0,910

(1) : rapports X_i/Cl de l'atmosphère issue de l'océan Atlantique (SAVENKO, 1976).

A Kédougou en milieu soudano-guinéen, la saison des pluies est plus longue : elle s'étend de mai à octobre. Les premières averses de mai n'ont pas été collectées, ce qui peut expliquer l'absence d'un premier signal pluie fortement chargé analogue à celui enregistré en juin à Bakel. L'évolution des teneurs des différents éléments chimiques suivent ici un schéma désordonné à l'exception du chlorure qui augmente du début à la fin de l'hivernage. On en déduit que plusieurs zones sources alimentent les masses nuageuses amenant les pluies à Kédougou. Les rapports X_i/Cl confirment cette hypothèse et permettent de distinguer deux périodes : de juin à août et de septembre à octobre (tableau 46). Enfin, des mesures de deutérium et d'oxygène 18 dosés sur les eaux de pluie de juillet et août 1981 à Tambacounda, station située à 200 km au NW de Kédougou, montrent qu'au coeur de la saison des pluies les précipitations ne subissent pas d'évaporation en cours de chute. Ceci implique qu'à l'échelle mensuelle les variations de la chimie des pluies sont uniquement dues à des effets de source (TRAVI & *al.*, 1987). Un autre type de perturbation due à la couverture végétale peut également intervenir à cette latitude. Kédougou se situe en milieu de savane arbustive, à la limite septentrionale des hauts plateaux du Fouta Djallon d'où viennent les masses nuageuses. Dans cette région, le couvert végétal, réduit en juin, prend vite une grande extension. Les apports chimiques des pluies peuvent donc être fortement influencés par les échanges atmosphère-végétation (ROOSE, 1980 ; DOMERGUE, 1980 ; LEWIS, 1981 ; STALLARD & EDMOND, 1981 ; MEYBECK, 1983 ; DELMAS & SERVANT, 1987 ; LACAUX & *al.*, 1987 ; LACAUX & DELMAS, 1989). D'après ROOSE (1980), les concentrations sous couvert végétal en potassium, magnésium et bicarbonate sont respectivement multipliées de 4 à 10, 1 à

5 et 1,5 à 4, les autres espèces chimiques étant également concentrées mais dans de moindres proportions.

E - COMPARAISON AUX DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES

L'information disponible sur la qualité chimique des eaux de pluie en Afrique de l'Ouest est restreinte. MEYBECK (1984), dans son travail de collecte de données mondiales, ne fournit aucune analyse concernant le continent africain. MATHIEU (1976) puis ROOSE (1980) ont quantifié les apports chimiques dues aux eaux de pluie en Côte d'Ivoire. LEWIS (1981) compare ses résultats obtenus au Venezuela avec ceux de THORNTON (1965) qui a collecté mensuellement les eaux de pluies à trois stations de Gambie en 1963. Pour pouvoir comparer tous ces résultats, la composition chimique moyenne des pluies de Kédougou et de Bakel a été calculé en pondérant la composition chimique de chaque mois par la pluviométrie correspondante. Pour la station de Kédougou, les concentrations en sulfate, nitrate et phosphate ont été estimées à partir de celles mesurées à la station analogue de Korhogo (ROOSE, 1980) ; ensuite, la concentration en ammonium a été arbitrairement fixé afin que la balance ionique soit équilibrée (tableau 47).

Tableau 47 : Composition chimique moyenne des pluies (en mg/l) en différentes stations continentales d'Afrique de l'Ouest

Auteur	ORANGE ¹			TRAVI ²			LEWIS ³	ROOSE ⁴			MATHIEU ⁵		MEYBECK ⁶
Station	BAK	BAK*	KED	BAK*	KED	TAM	Gambie	ADI	KOR	SAR	LOS	AMI	Monde
D (km)	540	-	380	540	380	520	-	30	480	900	600	80	-
Milieu	sah	-	sou	sah	sou	sou	sou	gui	gui	gui	gui	gui	-
Période	1983	-	1987	1981	1981	1981	1963	71/75	71/75	71/75	63/68	63/68	-
P (mm)	402	-	1107	531	1305	568	500	1700	1200	700	1400	1300	1000
pH	7,0	6,9	6,5	6,5	6,3	6,2	-	6,7	6,0	-	5,0	5,9	-
Cond(μS)	31	23	19	28	22	14	-	20	15	11	6	5	-
Cl ⁻	2,7	2,3	1,2	1,9	1,5	0,7	2,2	2,1	0,3	0,3	1,0	1,1	2,6
SO ₄ ²⁻	2,0	2,0	(1,0)	0,9	0,6	0,7	4,6	1,2	1,0	1,6	0,6	0,8	1,4
HCO ₃ ⁻	9,5	5,6	6,5	8,2	8,3	7,4	(0,6)	(4,3)	(4,8)	(4,3)	-	-	-
NO ₂ ⁻	0,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,005
NO ₃ ⁻	1,0	0,7	(0,5)	-	-	-	1	0,3	0,5	-	-	-	0,175
PO ₄ ³⁻	0,2	0,1	(0,3)	-	-	-	0,1	0,3	0,3	0,8	<0,1	<0,1	0,005
Ca ²⁺	2,2	1,5	1,5	2,9	2,8	1,6	0,5	1,8	1,9	2,1	<1	<1	0,3
Mg ²⁺	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,6	0,4	0,1	0,3	<0,1	<0,1	0,3
K ⁺	0,9	0,4	0,6	0,4	0,5	0,2	0,4	0,3	0,2	0,4	<0,5	<0,5	0,1
Na ⁺	1,0	0,4	0,3	0,9	0,6	0,7	0,4	0,8	0,3	0,1	<0,5	<0,5	1,5
NH ₄ ⁺	1,2	1,4	(1,0)	0,03	0,02	0,04	1,2	0,2	0,3	-	-	-	0,225
SiO ₂	0,7	0,2	0,4	0,7	0,6	1,5	(0,3)	0,7	0,7	0,7	1,5	<1	0,3
TDS	22,5	15,0	13,5	16,2	15,9	13,3	11,9	12,4	10,4	>11	>5	>5	>7

1 : ORANGE et al., 1990 ; 2 : TRAVI et al., 1987 ; 3 : LEWIS, 1981 ; 4 : ROOSE, 1980 ; 5 : MATHIEU, 1976 ; 6 : MEYBECK, 1984.

Stations du Sénégal : Bakel (BAK, pour BAK* les mois de juin et octobre ne sont pas pris en compte), Kédougou (KED), Tambacounda (TAM) ; Côte d'Ivoire : Adiopodoumé (ADI), Korhogo (KOR), Losérigué (LOS), Amittoro (AMI) ; Burkina Faso : Sarfa (SAR). D : distance à l'océan ; sah : milieu sahélien à steppe ; sou : milieu soudanien à savane ; gui : milieu guinéen à forêt. Les valeurs entre parenthèses sont estimées.

La charge dissoute totale annuelle est de 22,5 mg/l à Bakel et de 13,5 mg/l à Kédougou. La forte charge annuelle enregistrée à Bakel est due aux premières pluies qui sont fortement minéralisées ; en faisant abstraction des ces cas extrêmes, la pluie à Bakel a une charge dissoute totale de 15 mg/l. Ces résultats sont légèrement inférieurs à ceux publiés par TRAVI & al. (1987) sur les mêmes stations (de 1 à 2 mg/l de différence) avec une répartition sensiblement identique entre les différentes espèces chimiques. Nos prélèvements sont légèrement moins chargés en bicarbonate et calcium. Par contre, ils sont plus chargés en sulfate,

nitrate et surtout en ammonium ; ces fortes teneurs correspondent aux résultats de LEWIS (1981). Enfin, il existe également une bonne concordance avec ceux obtenus par ROOSE (1980) en Côte d'Ivoire et au Burkina Faso, exception faite de l'ammonium dont les teneurs varient considérablement d'un auteur à l'autre. Ceci est lié au fait que cet ion est difficile à conserver dans les eaux.

Il existe donc une signature chimique de la pluie caractéristique du domaine continental sahélo-soudano-guinéen d'Afrique occidentale (fig.35). Les eaux de pluie y sont bicarbonatées, calciques, non acides et fortement minéralisées par rapport à la moyenne mondiale. Plus au Sud, en forêt tropicale, le caractère acide des pluies dû aux feux de brousse est très marqué et modifie largement le bilan géochimique (LACAUX & *al.*, 1987 ; BONSANG & LAMBERT, 1989 ; LACAUX & DELMAS, 1989 ; NGUYEN & *al.*, 1989).

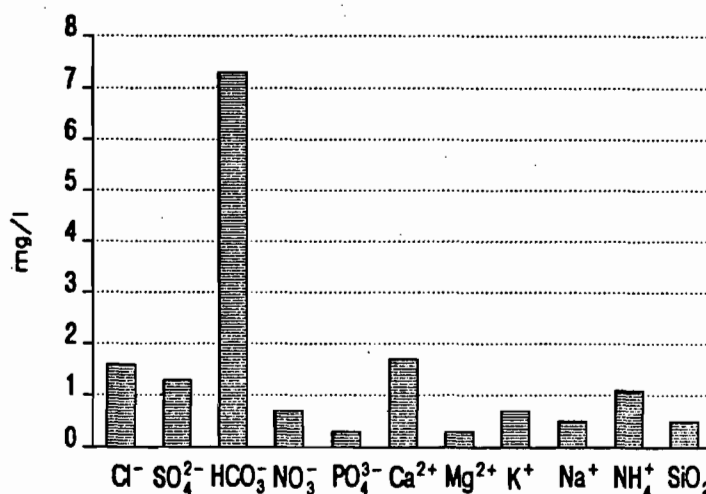


Fig. 35 : Faciès géochimique des pluies en domaine continental sahélo-soudano-guinéen d'Afrique occidentale.

II - LES POUSSIÈRES ATMOSPHERIQUES OU LES DEPOTS SECS

A - BREVE DESCRIPTION DU PHENOMENE

Le transport d'aérosols particuliers désertiques est un phénomène classique dans cette zone géographique et de nombreux travaux en ont montré l'importance (WINDOM, 1969 ; CHESTER & JOHNSON, 1971 ; BERTRAND, 1976 et 1977 ; MORALES, 1979 ; PROSPERO, 1979 ; DOMERGUE, 1980 ; SCHÜTZ, 1980 ; PROSPERO & *al.*, 1981 ; McTAINSCH & WALKER, 1982 ; COUDE-GAUSSSEN & ROGNON, 1983 ; DEEPAK & GERBER, 1983 ; UEMATSU & *al.*, 1983 ; FENN & *al.*, 1984 ; GAC & TRAVI, 1984 ; GAC, 1985 ; D'ALMEIDA, 1986 ; GAC & *al.*, 1986 ; MIKLISHANSKIY & *al.*, 1986 ; TSOAR & PYE, 1987 ; BERGAMETTI, 1987 ; TANRE & *al.*, 1988a ; PYE, 1989 ; LEGRAND, 1990 ; ORANGE & GAC, 1990a). Les zones sources sont les régions arides et semi-arides qui couvrent environ 30% de la surface continentale terrestre. Les deux plus importantes sont le Sahara et le désert d'Asie centrale (RAHN & *al.*, 1979). Les distances parcourues par ces poussières peuvent être supérieures à 5000 km (BETZER & *al.*, 1988) ; à partir du Sahara, elles traversent l'Atlantique en 4-5 jours (SAVOIE & PROSPERO, 1976 ; PROSPERO & *al.*, 1981).

Le Sahara est le plus grand pourvoyeur de poussières du globe (COUDE-GAUSSSEN & ROGNON, 1983). Les poussières sahariennes arrachées aux sols et aux roches effectuent dans l'atmosphère un déplacement et un séjour plus ou moins long avant de se déposer et de

constituer de nouveaux sédiments. TSOAR & PYE (1987) estiment que le taux critique d'accumulation de poussières nécessaire à la formation de loess se situe entre 0,5 et 1 mm/an selon le climat. Vers le Sud, l'agent de transport est l'harmattan (alizé continental chaud et sec de direction NE-SW à E-W) qui répand les poussières principalement sur le Sahel et la zone de savane (fig.36). Plus loin vers les basses latitudes, l'air saharien s'élève au-dessus du coin d'air tropical humide issu du golfe de Guinée (mousson), créant une brume sèche à de fortes altitudes, phénomène bien connu et fort redouté en aéronautique ; les particules les plus grosses n'ayant pas pu s'élever tombent avec la pluie (D'ALMEIDA, 1986). Les poussières font donc partie des grands cycles d'échange de matières entre les grands réservoirs naturels que constituent la lithosphère, l'hydrosphère, la biosphère et l'atmosphère. Les océans reçoivent 25 à 75% de leur phase détritique à partir des retombées de poussières atmosphériques (WINDOM, 1969). Mais leur rôle est longtemps passé inaperçu à côté du cycle de l'eau parce que leur domaine géographique est éloigné des régions tempérées où, historiquement, les recherches de climatologie et des Sciences de la Terre, susceptibles de les étudier, ont pris leur essor.

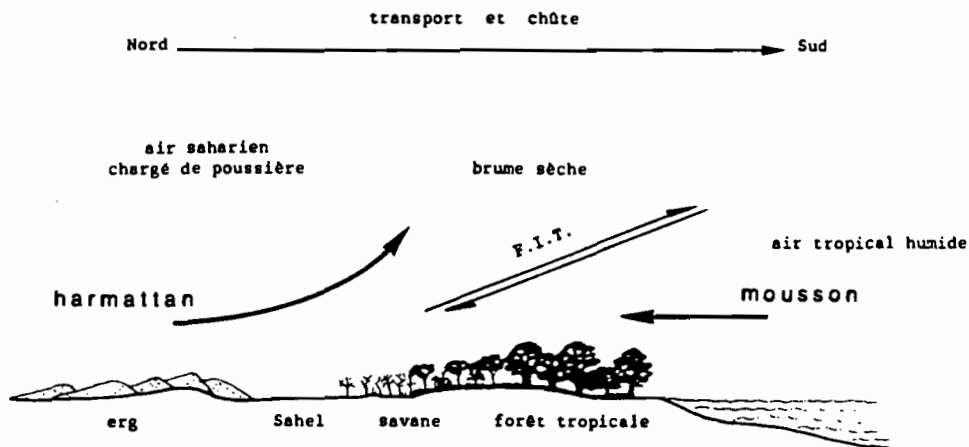


Fig. 36 : Schéma de circulation des poussières atmosphériques en Afrique occidentale (d'après COUDE-GAUSSIN & ROGNON, 1983).

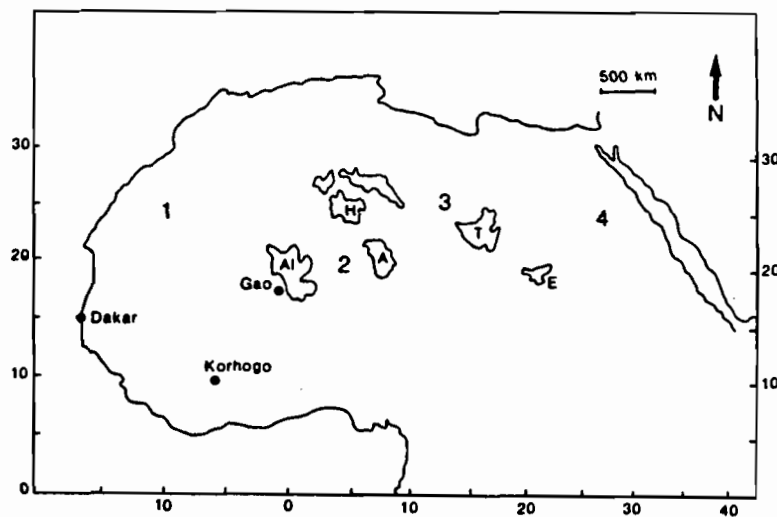


Fig. 37 : Localisation des zones sources principales de poussières sahariennes (1 : Sahara espagnol et Nord Mauritanie ; 2 : Hoggar, Adrar des Iforas et Air ; 3 : Nord Niger et Tibesti ; 4 : Nord Soudan) (d'après D'ALMEIDA, 1986).

D'ALMEIDA (1986) a identifié quatre zones sources principales à partir des cartes d'érosion des sols publiées par l'ONU (fig.37). La première s'étend du Sahara espagnol au Nord de la Mauritanie ; la seconde est localisée à l'intérieur du triangle formé par le

Hoggar, l'Adrar des Iforas et l'Air (NE de Gao) ; la troisième source est située au N-E de la zone précédente dans le Nord du Niger sur le flanc ouest du Tibesti ; enfin, la quatrième source se trouve dans la partie nord du Soudan. De nombreuses autres sources secondaires existent mais leur productivité semble relativement négligeable. Le fonctionnement relatif de ces zones-sources est fonction de la saison. En été, elles sont situées au Nord et les trajectoires d'expulsion de poussières sont de direction E-W ; par contre, en hiver, elles se trouvent plus au Sud et les trajectoires d'expulsion sont alors NE-SW (JANKOWIACK & TANRE, 1989).

B - METHODE D'ETUDE

1. Diversité des techniques d'échantillonnages

Actuellement, les données quantitatives sur les aérosols désertiques se présentent sous diverses formes. Pour permettre la comparaison des résultats des différentes équipes, il serait important, désormais, d'uniformiser la méthode de mesure. En effet, il existe de nombreuses techniques d'échantillonnages, certaines pouvant être très complexes (STEEN, 1979a ; GOODMAN & *al.*, 1979). Cette grande diversité tient à deux raisons principales : l'étude des lithométéores est une science jeune et il faut du temps pour normaliser les méthodes de prélèvements, mais surtout c'est un domaine qui intéresse deux disciplines scientifiques. Les météorologues s'intéressent aux concentrations de poussières en suspension dans l'atmosphère, alors que les géologues, les pédologues et les agronomes veulent quantifier les dépôts de poussières au sol. Deux types de techniques d'échantillonnage sont donc utilisés. Cependant, étant donné la grande importance que revêtent les poussières atmosphériques sur le fonctionnement des climats et la circulation aérienne, ce sont les météorologues qui ont été les premiers à s'intéresser à ce phénomène ; aussi leur méthode de prélèvements est la plus couramment utilisée. Elle consiste à collecter les poussières éoliennes sur filtres millipores par aspiration d'un volume d'air mesuré par compteur, les données sont alors exprimées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Par contre, les techniques mesurant exclusivement les dépôts de poussières au sol utilisent toutes sortes de surfaces naturelles ou artificielles pour piéger les poussières, les données sont alors exprimées en mg/m^2 (STEEN, 1979b). Parmi ces techniques, un appareil simple et facile à confectionner est proposé. Il permettrait une installation rapide et peu onéreuse d'un grand réseau d'observation tout autour du Sahara, qui est la zone-source principale d'aérosols terrigènes à l'échelle mondiale.

2. Description de l'appareil de mesure utilisé : le capteur pyramidal

Le capteur d'aérosols consiste en une cuve pyramidale renversée, de plexiglass, de 40 cm de profondeur avec une surface de réception de $0,25 \text{ m}^2$ (fig.38), placée à 5 mètres au-dessus du sol. Le capteur est lavé quotidiennement, et à heure fixe, à l'eau distillée pour récupérer les poussières déposées dans la cuve. Ensuite, au laboratoire, les poussières sont recueillies par filtration sur filtres millipores de $0,45 \mu\text{m}$ de porosité puis séchées à 70°C et pesées. Cette méthode ne prend en compte que la fraction insoluble des dépôts atmosphériques secs et humides ; pour obtenir des informations sur la fraction soluble, il suffit d'analyser également le filtrat.

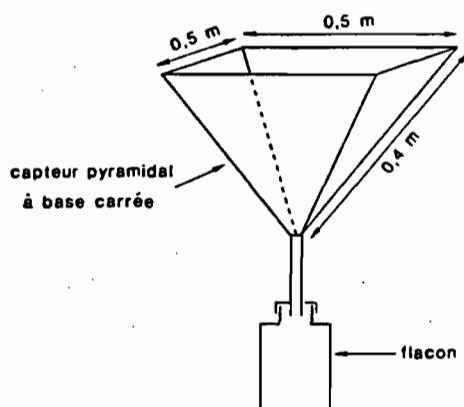


Fig. 38 : Schéma du capteur pyramidal.

3. Comparaison des résultats obtenus avec une méthode classique

a) Présentation des mesures utilisées

Les mesures de dépôt de poussières à l'aide du capteur pyramidal ont été réalisées par l'ORSTOM de 1984 à 1989 à Dakar et de 1986 à 1987 à Mbour, 80 km au Sud sur la côte atlantique. Ce point marque la limite méridionale du Cap-Vert.

A Mbour, de janvier à mai 1986, conjointement à une mission CNRS-CNES de mesures d'épaisseur optique de l'atmosphère lors d'une campagne financée par l'ATP "aérosols désertiques" (TANRE & al., 1988b), cet appareil a été couplé avec une pompe aspirante classique de type Millipore, fonctionnant 23h/24h de 18 h à 17 h le lendemain (ORANGE & al., 1986). Le volume d'air aspiré à travers un filtre circulaire de 35 mm de diamètre est de l'ordre de 20 m³/jour. Les filtres sont pesés après passage à l'étuve, les résultats sont exprimés en µg/m³.

b) Comparaison des variations journalières enregistrées par les deux types d'appareils

La forme des deux courbes d'évolution journalière enregistrées par les deux types d'appareils utilisés à Mbour est sensiblement la même (fig.39). Les différentes pulsations enregistrées par le capteur pyramidal le sont également par le dispositif aspirant. Pour ce dernier système, l'amplitude des pics est moins importante et certains sont écrêtés. En effet, ce système présente un inconvénient majeur : le colmatage rapide des pores de la membrane filtrante. Ceci entraîne une réduction du volume d'air aspiré dans des proportions indéterminables et donc une saturation de la quantité de poussières mesurée. Ce phénomène explique, par exemple, l'absence de pics de la deuxième moitié d'avril, alors que le capteur pyramidal a enregistré de grandes variations mesurées également à Dakar. Ainsi, le système gravitaire à dispositif pyramidal, malgré son côté rudimentaire, mesure bien le dépôt de poussières se produisant à l'échelle régionale.

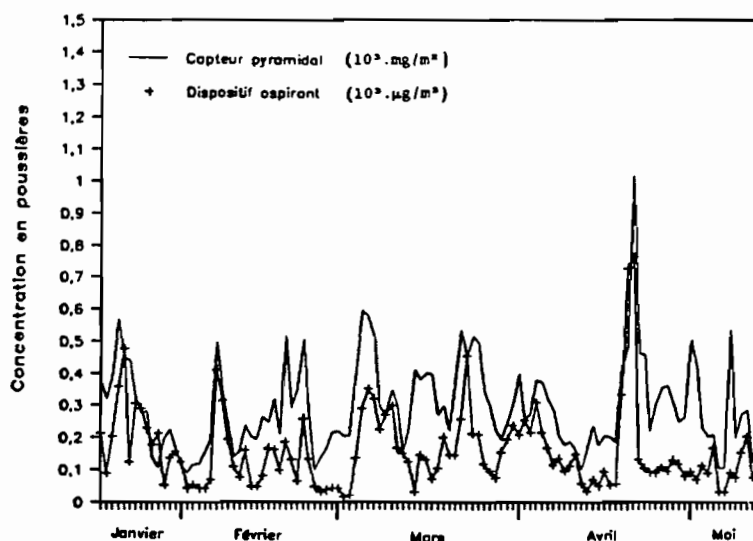


Fig. 39 : Evolutions journalières comparées du dépôt de poussières atmosphériques mesuré par le capteur pyramidal (en mg/m³) et de la concentration en poussières par un dispositif aspirant classique (en µg/m³) à Mbour en 1986.

c) Comparaison des quantités de poussières déposées au sol

A partir des mesures effectuées par le système aspirant, le flux de dépôt s'exprime par la formule : $\Phi = W_a \cdot C$, où W_a est la vitesse de transfert du fluide vers le bas (la masse d'air) et C sa concentration mesurée en µg/m³. Les analyses granulométriques ont montré

que la taille moyenne des poussières collectées était de l'ordre de 10 à 15 μm (GAC & *al.*, 1986). Pour des aérosols de cette dimension, la vitesse moyenne de transfert oscille autour de 2 cm/s pour un couvert végétal d'herbes hautes et fines, caractéristique d'une zone de savane (HICKS, 1976 ; DOMERGUE, 1980). Cette valeur permet d'estimer le flux de dépôt à $264 \pm 38 \text{ mg/m}^2$ sur les cinq mois testés alors que le capteur pyramidal donne une moyenne de $285 \pm 29 \text{ mg/m}^2$. Ces deux résultats sont concordants. La relation exprimant le dépôt de poussières $F_{p(m)}$ mesuré par le capteur pyramidal en fonction du flux $F_{p(e)}$ estimé à partir des mesures du dispositif aspirant est la suivante : $F_{p(m)} = 1,06.F_{p(e)}$. Le coefficient de régression linéaire calculé sur 120 observations est très hautement significatif ($r=0,79$).

Le capteur pyramidal fournit donc une bonne estimation du dépôt de poussières au sol. Il est normal que le système aspirant donne un résultat légèrement inférieur, puisque ce dernier système peut facilement se colmater lors des grands événements d'expulsions de poussières, qui ont cependant une signification régionale puisqu'ils ont été enregistrés à Mbour et à Dakar.

4. Homogénéité régionale des mesures effectuées par le capteur pyramidal

L'évolution journalière des dépôts de poussières est une série de pulsations (fig.40). Chaque pic enregistré à Dakar l'est également à Mbour, ce phénomène est très net en saison sèche ; en saison des pluies, les masses nuageuses perturbent le système et les phénomènes locaux prennent de l'importance, expliquant ainsi les différences de comportement certaines journées entre les deux stations. Les dépôts mesurés aux deux stations sont quasi équivalents durant pratiquement toute l'année, à l'exception des mois de décembre à mars en pleine saison sèche : les dépôts à Dakar sont alors presque deux fois plus importants. Le calage des différents pics enregistrés aux deux stations sur 24 mois confirme que le capteur pyramidal enregistre un phénomène régional global de dépôt de poussières et non des influences locales dépendantes du site choisi.

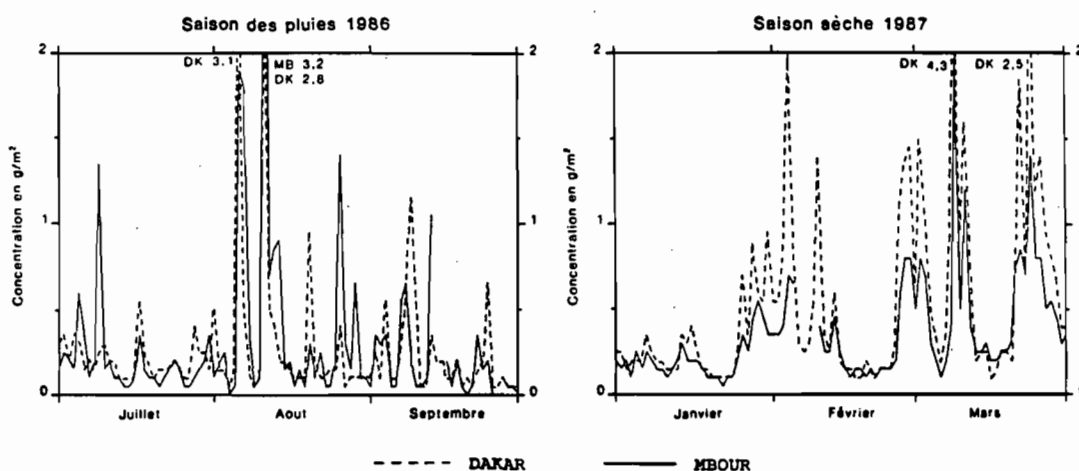


Fig. 40 : Evolutions journalières comparées des dépôts de poussières atmosphériques à Dakar et à Mbour enregistrés par le capteur pyramidal en saison des pluies et saison sèche.

5. Conclusion

La comparaison des résultats acquis par le capteur pyramidal sur deux stations différentes peu éloignées géographiquement et dans des sites analogues, a montré que cet appareil mesurait bien un phénomène régional de dépôt de poussières au sol et non des perturbations locales. Ensuite, la comparaison, sur un même site, des résultats obtenus par le capteur pyramidal avec ceux obtenus par le dispositif aspirant, confirme la réalité des différentes pulsations journalières enregistrées. Enfin, la comparaison quantitative de ces données a montré que le capteur pyramidal donnait un bon ordre de grandeur de la quantité de poussières

déposées au sol. Néanmoins, aucun de ces systèmes ne permet d'estimer la quantité de poussières remobilisées. Le dépôt ainsi mesuré est donc certainement légèrement surestimé. Ce système d'échantillonnage, malgré son côté rudimentaire qui est aussi l'un de ses atouts, semble être le mieux adapté aux conditions de terrain difficiles telles que les zones arides et semi-arides, où les concentrations en poussières sont extrêmement variables (ORANGE & al., 1990).

C - BILAN QUANTITATIF

Maintenant que les mesures effectuées à l'aide du capteur pyramidal ont été validées, les résultats quantitatifs obtenus aux diverses stations sont discutés. Bien que Dakar ne soit pas une station d'étude idéale à cause de l'influence anthropique, elle a été choisie pour la facilité d'obtention des résultats qu'elle permet et surtout pour l'importance et la fiabilité des données météorologiques qui la concerne. C'est la station la plus longuement observée, elle sera donc prise comme référence.

1. Présentation des mesures

Comme sur l'ensemble de l'Afrique occidentale (D'ALMEIDA, 1986 ; JANKOWIACK & TANRE, 1989 ; PROSPERO & al., 1981), les dépôts les plus élevés sont caractéristiques des premiers mois de l'année (de janvier à juin) et les plus faibles s'observent pendant la saison des pluies. A Dakar, la moyenne interannuelle journalière est de 0,54 g/m²/jour, ce qui correspond à un dépôt annuel de 200 g/m²/an. Au milieu de la saison humide, de juillet à septembre, les dépôts de poussières sont de 0,26 g/m²/jour ; ils ont des valeurs intermédiaires les mois de juin et octobre (tableau 48). Les apports de poussières ont souvent été ignorés durant la saison humide, ils représentent pourtant, de juin à octobre, 25% des retombées annuelles. Sur les six années de mesures effectuées à Dakar, le dépôt journalier maximal (enregistré le 23 mai 1984) est de 10,6 g/m². Les deux cycles hydrologiques les plus secs du fleuve Sénégal (1983 et 1984) ont précédé les deux années les plus productrices en poussières, respectivement 1984 et 1985. A Dakar, il existe une corrélation hautement significative entre ces dépôts de poussières et la visibilité horizontale mesurée au sol. Ces deux paramètres climatiques sont liés par la relation : $D.V^{1.35} = 7,77$ où D est le dépôt de poussières en g/m² et V la visibilité en km (ORANGE & al., 1986 ; GAC & al., 1986 ; GAC & al., 1987b).

Tableau 48 : Dépôts moyens mensuels et annuels (en g/m²/jour) de poussières atmosphériques à Dakar, Mbour, Ngnith, Kédougou et Pété

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
DAKAR													
1984	1,03	1,62	1,11	0,65	1,17	-	-	-	-	-	0,46	0,66	(0,74)
1985	0,88	1,53	0,93	1,10	0,70	0,93	0,29	0,14	0,29	0,38	0,32	0,47	0,66
1986	0,89	0,54	1,16	0,56	0,50	0,52	0,21	0,39	0,21	0,48	0,35	0,40	0,52
1987	0,30	0,52	0,85	0,96	1,18	0,43	0,39	0,29	0,35	0,37	0,18	0,37	0,52
1988	0,93	0,87	0,66	0,42	0,53	0,52	0,22	0,16	0,15	0,18	0,17	0,22	0,50
1989	0,36	0,86	0,60	0,65	0,72	0,80	0,22	0,13	0,16	0,15	0,16	0,25	0,42
Moyenne	0,73	0,99	0,88	0,72	0,80	0,64	0,27	0,22	0,23	0,31	0,27	0,40	0,54
MBOUR													
1986	0,29	0,24	0,35	0,31	0,51	0,52	0,20	0,48	0,20	0,31	0,22	0,26	0,32
1987	0,21	0,33	0,54	0,86	1,72	0,62	0,40	0,27	0,29	0,32	0,11	0,23	0,49
NGNITH													
1987	-	-	-	-	-	-	0,32	0,18	0,18	0,29	0,16	0,35	-
1988	0,67	0,56	0,62	0,38	0,38	0,47	0,30	0,05	0,09	0,15	0,14	0,22	0,34
1989	0,36	0,47	0,43	0,42	0,31	0,47	0,14	0,06	0,10	0,16	0,24	0,30	0,29
KEDOUGOU													
1987	-	-	-	-	-	0,08	0,06	0,06	0,03	0,04	0,06	-	-
PETE													
1987	-	0,40	0,45	0,28	0,49	0,35	0,31	-	-	0,27	0,26	0,64	0,38

() : valeur annuelle estimée.

A Mbour, le dépôt annuel de poussières ($150 \text{ g/m}^2/\text{an}$) est inférieur à celui de Dakar, ce qui peut se justifier par l'influence du facteur anthropique qui doit sensiblement augmenter les phénomènes de remobilisation aux environs de Dakar (NICHOLSON, 1988).

2. Problème de la remobilisation

Les phénomènes de remobilisation peuvent être importants. Une étude des relations existant entre la vitesse du vent et le dépôt de poussières au sol en milieu soudano-sahélien a permis d'estimer le taux de remobilisation moyen annuel à 40% (McTAINSH, 1980). Ces phénomènes de remobilisation sont plus actifs dans la seconde période de saison sèche (de janvier-février à mai-juin) alors que la végétation au sol meurt, l'humidité relative décroît, le flux total déposé augmente, les conditions deviennent propices à la remobilisation et au dépôt secondaire. De plus, ce phénomène est accentué par les feux de brousse.

Appliqué à nos résultats bruts, le dépôt de poussières effectif se trouve alors être de $120 \text{ g/m}^2/\text{an}$ à Dakar et de $90 \text{ g/m}^2/\text{an}$ à Mbour.

Si on utilise à la place d'une moyenne arithmétique, une moyenne géométrique afin de ne pas privilégier les événements exceptionnels, nous obtenons un résultat légèrement supérieur : $130 \text{ g/m}^2/\text{an}$. Cette méthode suppose en fait que le phénomène de remobilisation augmente de façon exponentielle avec la quantité de dépôt total, ce qui correspond à l'idée que les fortes expulsions de poussières donnent lieu aux plus forts taux de remobilisation. On accède ainsi directement, par cette méthode, au taux réel d'accumulation au sol.

3. Estimation des flux de poussières déposées

a) Aperçu bibliographique : importance du phénomène

TOBIAS & MEGIE (1981) ont mesuré à N'Djaména lors de la saison sèche de 1977 des teneurs journalières variant de $2,5 \text{ g/m}^2$ à $17,6 \text{ g/m}^2$. Cette période particulièrement productrice de poussières correspond à une descente exceptionnelle du FIT vers le Sud et aux premiers événements de brumes sèches enregistrés à Yaoundé en mars 1977. Au Nord du Nigéria, les chutes de poussières d'harmattan mesurées à Kano de 1976 à 1979 atteignent un total de 137 à 181 g/m^2 pour la seule saison sèche d'octobre à mai (McTAINSH & WALKER, 1982). En ajoutant les 25% de contribution de la saison humide, nous obtenons les valeurs annuelles de 170 et $230 \text{ g/m}^2/\text{an}$ du même ordre de grandeur que celle enregistrée à Dakar ($200 \text{ g/m}^2/\text{an}$), bien que plus proche des zones sources.

En terme de bilan global, 260.10^9 t/an de poussières éoliennes sont expulsées d'Afrique occidentale et 60.10^9 t/an y sont ramenées par les vents (JAENICKE, 1979 ; COUDE-GAUSSSEN & ROGNON, 1983). Selon ce modèle, la concentration en aérosols varie de 100 à $10^4 \mu\text{g/m}^3$ d'air au niveau de la mer à la longitude des côtes africaines (SCHUTZ, 1979) alors qu'au-dessus des côtes américaines elle n'est plus que de 0 à $20 \mu\text{g/m}^3$ d'air, ce qui fait estimer la quantité de poussières transportées au-dessus de l'Atlantique entre 100 et 400 Mt/an (PROSPERO & al., 1981). Plus récemment, D'ALMEIDA (1986, 1989) a modélisé le régime du transport des poussières sahariennes en incluant la taille des poussières, la vitesse des vents dans les zones sources, la circulation générale des masses d'air en Afrique et les enregistrements en dépôts secs et humides. Il obtient une production totale africaine en poussières de 710 Mt/an ; 60% de cette masse se dirige au Sud vers le golfe de Guinée (425 Mt/an), 28% à l'Ouest vers l'océan Atlantique (200 Mt/an) et 12% au Nord vers l'Europe (85 Mt/an). La part la plus importante est déposée sur le continent africain lui-même et ensuite dans l'océan Atlantique et la mer Méditerranée ; il estime que 140 Mt/an se déposent dans l'Atlantique au large des côtes mauritaniennes, 17 Mt/an au large des côtes ivoiriennes, soit respectivement 20% et seulement 2% de la production des zones sources. Cette grande différence entre les deux directions principales de transport des lithométéores est liée à l'intervention de la mousson qui facilite les chutes de poussières.

Tout ceci souligne l'importance des aérosols terrigènes dans le cycle géochimique des éléments naturels. Souvent ignorés, ils devraient systématiquement être pris en compte dans tout essai de modélisation des flux de matières. Ils influencent bien sûr la qualité chimique des pluies (RAHN & *al.*, 1979 ; LEWIS, 1981 ; STALLARD & EDMOND, 1981 ; D'ALMEIDA & SCHUTZ, 1983 ; MEYBECK, 1983 ; BUAT-MENARD & DUCE, 1986), mais aussi la qualité des sols (YAALON & GANOR, 1979) et la qualité des matières en suspension dans les eaux de surface (MIKLISHANSKIY & *al.*, 1986).

b) Recherche d'un gradient Nord-Sud

Au vu des résultats du tableau 48, il n'apparaît pas d'évolution significative du dépôt de poussières entre Pété, station située au Nord du Sénégal en milieu continental et Dakar sur la côte atlantique ; la recherche de corrélations à l'échelle journalière et mensuelle ne montre aucune relation d'évolution entre ces deux stations trop éloignées l'une de l'autre. Par contre, l'évolution journalière est sensiblement la même entre Ngnith et Dakar ($r=0,38$ pour $p=0,01\%$) (fig.41), et Dakar et Mbour ($r=0,59$ et $p=0,01\%$) (fig.40), trois stations situées sur une même longitude, respectivement à 260 km et 80 km l'une de l'autre. Pour les seuls mois de mesures communs aux trois stations de Ngnith, Dakar et Mbour (de juillet à décembre 1987), on retrouve les valeurs du dépôt de poussières à Dakar en faisant la moyenne arithmétique entre les dépôts mesurés à Ngnith et à Mbour. Ce résultat est amélioré lorsqu'il existe un fort gradient N-S comme en juillet, octobre ou décembre. Il est donc justifié d'utiliser Dakar comme "moyenne" du domaine sahélien.

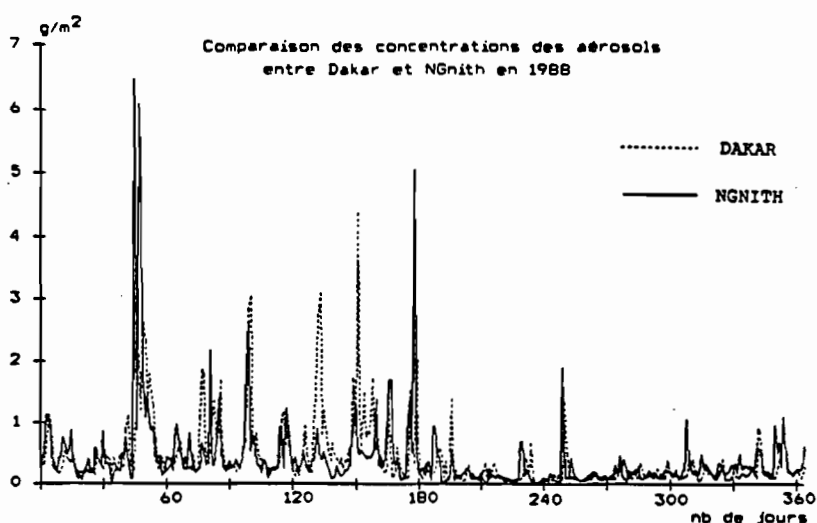


Fig. 41 : Comparaison des dépôts de poussières atmosphériques entre Ngnith et Dakar en 1988 (en mg/m^2).

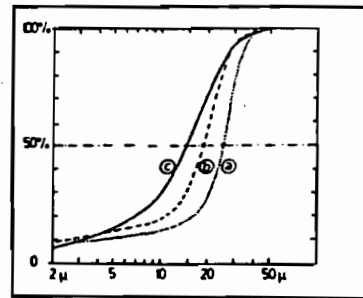
Enfin, la station de Kédougou au Sud du Sénégal, en milieu soudanien de forêt-savane, est le siège de dépôts de poussières nettement moins abondants. Aucune corrélation n'apparaît dans l'évolution journalière du phénomène avec les autres stations étudiées. Sur la base de 25% de retombées annuelles en saison des pluies (entre juin et novembre), le dépôt annuel est estimé à $40 g/m^2/an$. Ce résultat est extrapolé à l'ensemble soudano-guinéen.

c) Calcul du flux de poussières déposées au sol

L'analyse granulométrique effectuée sur les échantillons prélevés à Dakar montre que les poussières atmosphériques ont une granulométrie moyenne de $10-15 \mu m$; 6,5% des particules ont un diamètre inférieur à $2 \mu m$, 91% ont un diamètre compris entre 2 et $50 \mu m$, et seulement 2,5% constituent les sables (fig.42).

Fig. 42 : Distributions granulométriques de trois événements de poussières de 1984.

- a : $C=10,6 \text{ g/m}^2/\text{j}$;
 b : $C=5,1 \text{ g/m}^2/\text{j}$;
 c : $C=2,4 \text{ g/m}^2/\text{j}$.



La densité généralement admise pour une telle répartition granulométrique va de 1 à 2 g/cm^3 . BERTRAND (1976) donne 1 g/cm^3 pour des poussières de Côte d'Ivoire allant de 0,3 à 10 μm ; LOYE-PILOT & *al.* (1986) estime la densité dans une fourchette de 1,25 à 1,65 pour des particules traversant la Méditerranée ; JAENICKE (1979) tranche à 2 g/cm^3 pour l'ensemble de la côte atlantique africaine alors que McTAINSH & WALKER (1982) donnent 0,9 g/cm^3 pour des poussières du centre nigérien. Finalement, pour une densité moyenne de 1,5-2 g/cm^3 , les dépôts éoliens actuels représentent un taux de sédimentation de l'ordre de 70 $\mu\text{m}/\text{an}$ sur l'ensemble du domaine sahélien, ce qui correspond au modèle de JAENICKE (1979) qui estime le dépôt de poussières sur la côte atlantique ouest africaine à 67 $\mu\text{m}/\text{an}$. Mais cette valeur représente le tiers de l'estimation donnée par COUDE-GAUSSEN & ROGNON (1983) pour l'ensemble de l'Afrique occidentale. De toute façon, elle est inférieure à la limite critique (0,5-1 mm) donnée par TSOAR & PYE (1987) pour la formation de loess. En milieu soudanien, cette valeur tombe à 30 $\mu\text{m}/\text{an}$.

L'extrapolation de ces résultats à l'échelle des millénaires paraît hasardeuse. En effet, dans les 50-100 dernières années, les actions anthropiques sur les sols semi-arides et les surfaces désertiques ont profondément modifié le milieu naturel sud-saharien. En le fragilisant, ces actions ont probablement provoqué un accroissement des transports de poussières atmosphériques, particulièrement durant les périodes de sécheresse de ces quinze dernières années (MORALES, 1979 ; MIDDLETON, 1985 ; PROSPERO, 1985). Cependant, dans le passé, au cours du Quaternaire récent par exemple, le taux de sédimentation sur ces zones a été, par périodes, nettement supérieur, puisque d'importants dépôts loessiques y sont décrits et datés, d'une part dans la partie méridionale du bassin du lac Tchad (MALEY, 1981, 1982 ; McTAINSH, 1984) et d'autre part dans les bassins versants du Sénégal et de la Gambie (MICHEL, 1973).

D - BILAN QUALITATIF

Les résultats d'analyse chimique des poussières atmosphériques récoltés à Dakar et Pété sont comparés à ceux obtenus sur des poussières prélevées à Kano (Nigéria) par DOYNE & *al.* (1938) et McTAINSH & WALKER (1982) (tableau 49). Les différentes analyses font ressortir le caractère essentiellement siliceux des lithométéores ; la silice est exprimée sous forme de quartz (60%) ou intégrée aux réseaux argileux (de 15 à 20%). Des observations par microscopie électronique ont montré la présence importante de frustules de diatomées (TOBIAS & MEGIE, 1981 ; McTAINSH & WALKER, 1982). A Dakar et à Kano, le potassium est l'élément majeur après la silice, l'alumine et les oxydes de fer ; le calcium, le magnésium et le sodium ont des teneurs moindres mais restant relativement élevées. A Pété, il y a deux fois moins de potassium et surtout dix fois moins de sodium ; le calcium dont la moyenne est inférieure à celle enregistrée à Dakar, montre d'importantes variations de teneurs (de 0,16 à 2,7%). Globalement, la composition chimique des lithométéores est comparable à celle du matériau pédologique que l'on peut rencontrer à la surface des sols situés sous cette bande climatique (TOBIAS & MEGIE, 1981 ; COUDE-GAUSSEN, 1989).

Tableau 49 : Géochimie des poussières atmosphériques collectées en Afrique occidentale (en % d'oxydes)

Station	PETE ¹ (Sénégal)			DAKAR ² (Sénégal)	IBADAN ³ (Nigéria)	KANO ⁴ (Nigéria)	
	moy.	max.	min.				
SiO ₂	(1)	58,55	52,60	64,30	72,51	49,34	66,03
	(2)	18,07	15,00	21,05			
Al ₂ O ₃	10,38	9,00	12,40	10,57	10,34	11,08	
Fe ₂ O ₃	5,19	4,50	5,90	3,65	4,14	4,45	
TiO ₂	0,91	0,75	1,03	0,72	0,66	0,73	
MnO ₂	0,10	0,07	0,12	-	-	0,10	
P ₂ O ₅	0,15	0,11	0,17	-	-	0,17	
CaO	0,87	0,16	2,70	2,18	5,28	1,13	
MgO	1,32	1,05	1,75	1,81	2,07	0,82	
K ₂ O	1,09	0,90	1,32	2,30	1,62	2,04	
Na ₂ O	0,14	0,09	0,21	1,31	0,80	0,91	
H ₂ O ⁻	(3,23)	(2,40)	(7,74)	4,40	24,81	12,79	
Total	100,00	-	-	99,45	99,06	100,25	
source	S ₁			S ₁	S ₂	S ₂	

1 : ORANGE & al., 1990 ; 2 : ORANGE & al., 1986 ; 3 : DOYNE & al., 1938 ; 4 : McTAINSH & WALKER, 1981.

(1) : silice sous forme de quartz ; (2) : silice intégrée aux réseaux argileux ; H₂O⁺ : perte à 1000 °C, pour la station de Pété elle est estimée par bouclage à 100 % ; S₁ : Sahara espagnol, Mauritanie, Tamanrasset ; S₂ : Bilma, Faya Largeau, Tibesti.

Minéralogiquement, une étude par diffraction aux RX a souligné bien sûr la prédominance du quartz et a montré également la présence de minéraux phylliteux. Les différents auteurs s'accordent pour donner la répartition suivante des diverses phases argileuses : illite (57%) et kaolinite (23%). Les 20% restants se partagent entre la chlorite et la smectite : l'abondance relative des ces deux minéraux est fonction de la zone source et de la distance parcourue (CHESTER & JOHNSON, 1971 ; PROSPERO & al., 1981 ; PAQUET & al., 1984). Les minéraux secondaires sont par ordre d'importance la calcite, les plagioclases, les feldspaths alcalins, les amphiboles. L'abondance des grains de carbonate dans les poussières a amené COUDE-GAUSSIN (1986) à prendre en compte la participation des apports éoliens à la formation des encroûtements calcaires. Il faut noter également la présence de minéraux lourds titanifères tels que l'anatase et le rutile. D'autre part, CHESTER & JOHNSON (1971) soulignent la présence de dolomite et PROSPERO & al. (1981), TOBIAS & MEGIE (1981) des traces de gypse, de gibbsite et de goethite. Enfin, le taux de matière organique est souvent relativement important (DOMERGUE, 1980) ; TOBIAS & MEGIE (1981) en ont dosé 2,6% sur les poussières prélevées à N'Djamena.

En définitive, l'étude des constituants des aérosols désertiques montre une grande variété dans les produits transportés. Cette diversité est le reflet des différents paysages géologiques de l'Afrique de l'Ouest d'où elles sont issues (PAQUET & al., 1984 ; COUDE-GAUSSIN, 1989). On retiendra d'une part, la présence largement dominante de la silice sous forme de cristaux de quartz mais également de résidus de diatomées et, d'autre part, l'abondance des minéraux argileux surtout représentés par l'illite, minéral ubiquiste par excellence puisqu'il est statistiquement le plus représenté dans les roches mères.

V - BILAN DES APPORTS ATMOSPHERIQUES

A - INFLUENCE DES POUSSIÈRES ATMOSPHERIQUES SUR LA CHIMIE DES PLUIES

25% des retombées annuelles de poussières atmosphériques se produisent pendant la saison des pluies. Lors des averses, les lithométéores vont donc modifier la chimie des précipitations humides par le simple effet de "self-cleaning" en dissolvant une part non négligeable des constituants des poussières (LEWIS, 1981 ; STALLARD & EDMOND, 1981).

En effet, si elles sont surtout siliceuses, les poussières atmosphériques ont également des teneurs importantes en bases échangeables (Ca, Mg, K, Na) et contiennent de la matière organique qui apporte phosphate et nitrate (DOMERGUE, 1980 ; TOBIAS & MEGIE, 1981). Ces caractéristiques suffisent à expliquer les teneurs élevées en silice, bases échangeables, phosphate, nitrate et bicarbonate des pluies d'Afrique de l'Ouest. Les poussières atmosphériques interfèrent également sur le pH des eaux de pluie en les rendant plus basiques (GORHAM, 1955 ; MATHIEU & MONNET, 1971 ; LOYE-PILOT & *al.*, 1986 ; LACAUX & *al.*, 1987).

L'influence des poussières atmosphériques sur la chimie des pluies explique également que l'évolution de la silice soit bien corrélée à la fois au bicarbonate, au potassium et au sodium, tous trois composants fortement solubles des poussières. L'absence de corrélation avec le calcium peut être due au fait que ses teneurs dans les poussières soient très variables. LEWIS (1981) fait la même remarque à propos de la qualité chimique des apports atmosphériques du Venezuela.

B - QUALITE CHIMIQUE DES APPORTS ATMOSPHERIQUES EN AFRIQUE DE L'OUEST

Si l'homogénéité du faciès chimique des différents exemples, aussi bien pour les pluies que pour les poussières, autorise à parler d'une tendance africaine de la qualité chimique des apports atmosphériques, il existe cependant une qualité chimique des eaux de pluie caractéristique de chaque zone climatique. En effet, la charge totale dissoute de ces eaux de pluie passe de 22 mg/l en milieu sahélien à 14 mg/l en milieu soudanien et 10 mg/l en milieu guinéen. La composition chimique moyenne des apports atmosphériques dissous en Afrique de l'Ouest continentale sahélo-soudano-guinéenne est donc estimée à partir de la composition chimique moyenne des eaux de pluie recueillies à Bakel, Kédougou et Korhogo pondérée par la lame d'eau moyenne précipitée à chacune des stations (respectivement 400 mm, 1100 mm et 1200 mm) ; les apports particuliers sont calculés par moyenne arithmétique à partir des compositions chimiques moyennes des poussières prélevées à Dakar et Pété (tableau 50).

Tableau 50 : Composition chimique moyenne des apports atmosphériques en domaines sahélien (sah), soudanien (soud) et guinéen (guin)

ions	APPORTS DISSOUS (en mg/l)				APPORTS PARTICULAIRES	
	sah.	soud.	guin.	MOY	oxydes	% d'oxydes
Cl ⁻	2,7	1,2	0,3	1,0	Al ₂ O ₃	10,5
SO ₄ ²⁻	2,0	1,0	1,0	1,1	Fe ₂ O ₃	4,4
HCO ₃ ⁻	9,5	6,5	4,8	6,2	TiO ₂	0,8
NO ₃ ⁻	1,0	0,5	0,5	0,6	MnO ₂	0,1
PO ₄ ³⁻	0,2	0,3	0,3	0,3	P ₂ O ₅	0,15
Ca ²⁺	2,2	1,5	1,9	1,8	CaO	1,5
Mg ²⁺	0,6	0,2	0,1	0,1	MgO	1,6
K ⁺	0,9	0,6	0,2	0,5	K ₂ O	1,7
Na ⁺	1,0	0,3	0,3	0,4	Na ₂ O	0,7
NH ₄ ⁺	1,2	1,0	0,3	0,7	H ₂ O ⁻	3,95
SiO ₂	0,7	0,4	0,7	0,6	SiO ₂	74,6
Total	22,0	13,5	10,4	13,3	Total	100,0

MOY : moyenne sahélo-soudano-guinéenne.

La charge totale moyenne des apports dissous en milieu continental sahélo-soudano-guinéen d'Afrique occidentale est de 13 mg/l. En terme d'équivalent, l'ordre d'importance des cations solubles est : Ca > NH₄ > K > Na > Mg ; pour les anions solubles, l'ordre est HCO₃ > Cl > SO₄ > NO₃ > PO₄. Toutes espèces ioniques confondues, le bicarbonate est largement l'ion dominant : il représente 47% des apports dissous. C'est une caractéristique importante des pluies africaines par rapport aux données mondiales publiées par MEYBECK (1984). LEWIS (1981) au Venezuela, travaillant également en milieu continental tropical, note aussi cette

prédominance des bicarbonates, liée à la présence d'aérosols terrigènes dans l'atmosphère de ces zones tropicales. Cet auteur donne en terme d'équivalent la même répartition des anions mais trouve nettement plus de sodium et magnésium, ce qui met ces deux éléments en tête des apports en cations solubles.

En ce qui concerne les apports particuliers, la silice contribue à 75% de la masse totale, l'alumine à 10% et les oxydes de fer à 5%, le reste se partage entre les oxydes de calcium, magnésium, potassium, sodium et phosphore (fig.43).

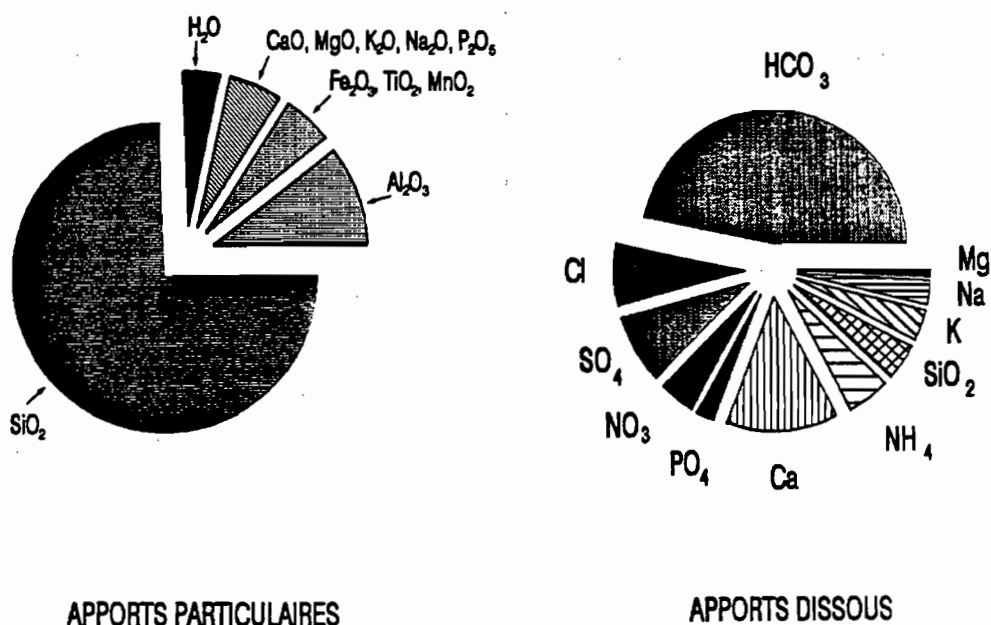


Fig. 43 : Qualité chimique des apports atmosphériques dissous et particuliers en domaine continental sahélo-soudano-guinéen d'Afrique occidentale.

C - BILAN CHIMIQUE QUANTITATIF DES APPORTS ATMOSPHERIQUES

En milieu sahélien, pour une lame d'eau précipitée de 636 mm/an, le dépôt humide spécifique représente 10 g/m²/an alors que le dépôt sec spécifique est de 200 g/m²/an. Par contre, en domaine guinéen, l'écart entre les deux types d'apports atmosphériques est nettement moins important. Pour une lame d'eau précipitée de 1380 mm/an, le dépôt humide spécifique est estimé à 14 g/m²/an et le dépôt sec spécifique à 40 g/m²/an.

Ainsi, sur l'ensemble du bassin versant du fleuve Sénégal, soit sur une superficie totale de 218.10³ km² dont 15700 km² seulement se trouve en domaine guinéen, pour une lame d'eau moyenne précipitée de 685 mm/an (chapitre III) et une épaisseur de dépôts secs de 70 μm/an, l'apport atmosphérique en matières dissoutes représente un flux de 110 kg/ha/an (2,4.10⁶ t/an) et l'apport atmosphérique en matières particulières 1235 kg/ha/an (26,9.10⁶ t/an), soit 11 fois plus. Les poussières constituent 92% des apports atmosphériques totaux. Au Venezuela, à 5000 km des zones sources africaines, LEWIS (1981) estime l'apport des poussières atmosphériques à 139 kg/ha/an, soit 9 fois moins. Cette différence est de l'ordre de grandeur de la perte subie par les nuages de poussières lors de leur traversée de l'océan Atlantique (COUDE-GAUSSEN & ROGNON, 1983).

Sur le Fouta Djallon, se situant entièrement en domaine guinéen, les dépôts humides sont estimés à 0,8.10⁶ t/an et les dépôts secs à 2,4.10⁶ t/an ; ces derniers représentent encore 74% des apports atmosphériques totaux.

Malgré la pluviosité plus abondante sur le Fouta Djalon que sur l'ensemble du bassin versant du Sénégal, l'apport atmosphérique en éléments dissous est d'importance équivalente sur ces deux entités géographiques (de 140 à 150 kg/ha/an). Ces chiffres sont du même ordre de grandeur que celui obtenu par LEWIS (1981) sur un bassin versant vénézuélien. D'autre part, la similitude de comportement du flux relatif des différentes espèces chimiques, entre ces deux zones géographiques situées sur des continents différents mais dans un environnement comparable, est remarquable et souligne encore une fois l'importance des aérosols détritiques sur la chimie des dépôts humides (ORANGE & GAC, 1990a).

En terme de bilan massique des dépôts atmosphériques totaux, la répartition des espèces chimiques entre les deux formes d'apport, dissous et particulaire, dépend du domaine climatique (ORANGE & GAC, 1990a). Cependant, dans tous les cas, le chlore, le carbone inorganique, l'azote et le soufre sont apportés uniquement sous forme dissoute, alors que l'aluminium, le fer et le titane le sont sous forme particulaire. Le phosphore et le silicium se répartissent entre les deux formes d'apports, le premier choisissant principalement la forme dissoute alors que le second est presque uniquement amené sous forme particulaire. Les autres éléments (Na, Ca, K, Mg) se répartissent entre les deux modes de dépôts (fig.44).

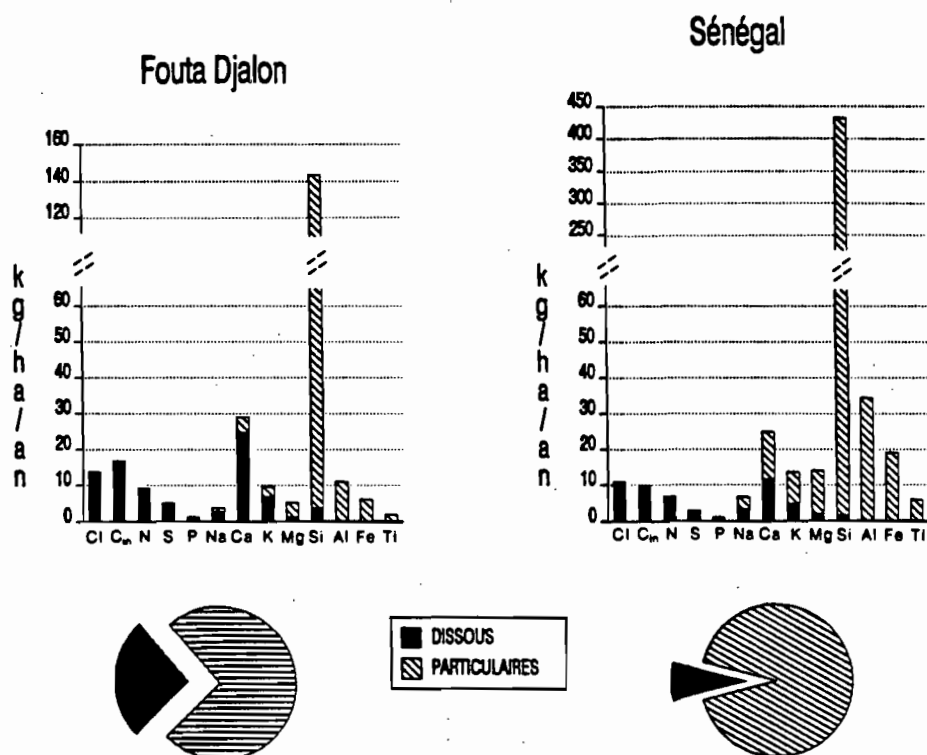


Fig. 44 : Bilan chimique des apports atmosphériques dissous et particulaires sur le bassin versant amont du Sénégal (domaine sahélien) et sur le Fouta Djalon (domaine soudano-guinéen).

VI - CONCLUSIONS

La comparaison de nos données avec les résultats obtenus dans d'autres régions du globe montre qu'il existe une signature africaine de la chimie des pluies. Dans cette région tropicale à saisons sèche et humide bien individualisées, il est habituel de dissocier l'apport atmosphérique dû aux pluies de celui dû aux poussières sahariennes. Cependant, il apparaît que

25% des apports annuels en poussières se font en saison humide et qu'elles modifient largement la nature chimique des pluies. Il est donc préférable de parler de dépôts humides et de dépôts secs.

Les dépôts humides en domaine continental sahélo-soudano-guinéen sont bicarbonatés, calciques, non acides et fortement minéralisés (de 10 mg/l/an à 22 mg/l/an) par rapport à la moyenne mondiale. Les apports dissous ont été évalué à 13 mg/l/an sur l'ensemble sahélo-soudano-guinéen. A l'échelle régionale, il existe des différences de comportement de la chimie des pluies entre la zone sahélienne et la zone soudano-guinéenne. En domaine sahélien, les précipitations sont largement modifiées par l'évaporation en cours de chute et par le phénomène de "self-cleaning" qui intervient surtout en début de saison des pluies ; la masse nuageuse productrice de pluie semble toujours avoir la même origine. En zone soudano-guinéenne, le phénomène d'évaporation est peu important et ce sont plusieurs zones sources qui expliquent les variations de la chimie des pluies au cours de l'hivernage. Globalement, la silice et la charge dissoute augmentent avec l'aridité et la rencontre des masses nuageuses de la mousson avec les vents d'harmattan chargés de lithométéores. Enfin, la comparaison avec des données provenant d'un autre continent mais dans un environnement similaire au milieu sahélo-soudanien montre qu'il existe probablement une homogénéité de la réponse chimique des apports atmosphériques dissous caractéristiques de ces zones à faible pluviométrie (environ 700 mm/an) et à saisons contrastées.

Le Sahara est le plus grand pourvoyeur de poussières du globe. Au niveau de Dakar, les dépôts sont de l'ordre de 200 g/m²/an, dont près de 40% sont remobilisés. Ceci représente une épaisseur de limon de 70 µm/an. Les poussières sont composées de 60% de silice exprimée sous forme de cristaux de quartz et de résidus de diatomées. Le cortège argileux est surtout représenté par l'illite, minéral ubiquiste par excellence, et par la kaolinite. La présence de carbonate de calcium (et de magnésium), d'oxydes de fer et d'aluminium semble plus aléatoire et être fonction de la zone source. La grande diversité des produits secondaires transportés est le reflet des différents paysages géologiques de l'Afrique de l'Ouest d'où ils sont issues. Ces aérosols terrigènes influencent largement la qualité chimique des dépôts humides, et, la répartition des différentes espèces chimiques entre la phase dissoute et la phase solide, en même temps que le bilan total des apports atmosphériques globaux.

Ainsi, sur l'ensemble du bassin versant amont du Sénégal (représentatif du milieu soudano-sahélien), l'apport atmosphérique total est de 1345 kg/ha/an (soit 29,3.10⁶ t/an), dont 92% est due aux seules poussières sahariennes. Pour le Fouta Djallon, représentatif du milieu guinéen, les dépôts secs sont nettement moins importants. L'apport atmosphérique total n'est plus que de 540 kg/ha/an (soit 3,2.10⁶ t/an), les aérosols terrigènes représentent tout de même près de 75% de cette masse. Le silicium, avec un taux d'accumulation allant de 100 à 400 kg/ha/an est de loin le principal élément apporté par l'atmosphère. Ensuite, l'ordre des différents éléments chimiques dépend de l'importance des apports éoliens.

Les deux caractéristiques fondamentales des apports atmosphériques en domaine continental sahélo-soudano-guinéen sont la forte concentration en bicarbonates dans les eaux de pluies et l'importance du flux de silice déposé sur les sols de cette zone géographique. Cet apport majeur de poussières atmosphériques, souvent négligé dans les bilans géochimiques, apporte un éclairage nouveau sur la dynamique d'altération de ces régions tropicales.

CHAPITRE VII

TRANSPORTS DE MATIERES DISSOUTES ET PARTICULAIRES SUR LES BASSINS AMONT DU SENEGAL, DE LA GAMBIE ET DU NIGER

Pour comprendre l'évolution des transports de matières par les fleuves, un suivi pendant une longue période est nécessaire. C'est à partir de neuf années de mesures de la chimie des eaux et des sédiments du fleuve Sénégal à Bakel, de cinq ans de mesures sur la Falémé à Kidira et de trois ans de mesures sur la Gambie à Kédougou que la compréhension de l'acquisition de la charge dissoute et de la charge solide par les eaux fluviales en domaine sahélo-soudano-guinéen est tentée. Une seule année de mesures sur le bassin amont du Niger permet uniquement de corroborer les résultats précédents.

I - DESCRIPTION DE LA QUALITE CHIMIQUE DES FLUX DE MATIERES TRANPORTEES PAR LES EAUX DE SURFACE EN DOMAINE SAHELO-SOUDANO-GUINEEN

Les méthodes statistiques fondées sur l'analyse des corrélations totales ou sur les analyses factorielles fournissent des renseignements importants concernant les relations entre les différentes variables qui contrôlent la composition chimique des eaux et des sédiments (DAWDY & FETH, 1967 ; HITCHON & al., 1971 ; REEDER & al., 1972 ; SABATON, 1983). Tous les traitements statistiques ont été effectués par l'intermédiaire du logiciel S.A.S. (SAS Institute Inc., 1985).

A - RELATIONS ENTRE LES DIFFERENTES VARIABLES DE QUALITE DES EAUX

1. Composition chimique moyenne des eaux prélevées

a) Les eaux du Sénégal à Bakel

La moyenne arithmétique des 229 analyses effectuées permet de classer les eaux du fleuve Sénégal à Bakel dans la catégorie des eaux bicarbonatées magnésiennes et calciques. Les bicarbonates et la somme Mg-Ca représentent respectivement 88% de la somme des anions Σ^- et 73% de la somme des cations Σ^+ , soit à tous les trois 72% de la charge pondérale totale dissoute. La silice dissoute est également bien représentée, elle constitue 14% de la charge pondérale totale dissoute. Les variations de composition peuvent être importantes (tableau 51). La minéralisation totale fluctue dans un rapport de 4, entre 29 mg/l et 133 mg/l ; le sulfate a le coefficient de variation le plus important (160%), ensuite dans l'ordre décroissant on trouve le chlorure (80%), le potassium (64%), le magnésium (57%), le sodium (56%), le bicarbonate (47%), le calcium (42%) et la silice (33%). La forte variabilité des teneurs en sulfates et chlorures est caractéristique d'un apport exclusivement atmosphérique. Le pH indiqué a été mesuré au laboratoire.

Tableau 51 : Moyenne arithmétique des analyses chimiques effectuées sur les eaux du Sénégal à Bakel, de la Falémé à Kidira, de la Gambie à Kédougou, du Tinkisso à Dabola, du Milo à Kankan et du Niger à Siguiri

Variables de qualité		SENEGAL n=229		FALEME n=122		GAMBIE n=85		TINKISSO n=21		MILO n=22		NIGER n=21	
		Moy.	STD _M	Moy.	STD _M	Moy.	STD _M	Moy.	STD _M	Moy.	STD _M	Moy.	STD _M
μeq/l	Cl ⁻	64	3	316	87	17	1	14	2	25	2	22	2
	SO ₄ ²⁻	17	2	27	5	0	0	0	0	0	0	6	2
	HCO ₃ ⁻	576	18	1015	105	332	5	462	17	300	14	294	13
	Σ ⁻	657	-	1358	-	349	-	476	-	325	-	322	-
	Ca ²⁺	238	7	399	22	167	3	115	2	103	6	96	4
	Mg ²⁺	241	9	394	40	109	2	225	11	76	3	107	4
	K ⁺	61	3	108	15	24	1	25	1	35	3	36	3
	Na ⁺	120	4	477	109	53	1	126	5	117	5	98	6
	Σ ⁺	660	-	1378	-	353	-	491	-	331	-	337	-
	mg/l	SiO ₂	8,6	0,2	8,7	0,3	10,8	0,1	13,6	0,4	13,8	0,4	11,1
TDS		59,7	1,6	111,1	12,6	38,5	0,4	51,2	1,6	30,1	1,5	37,0	1,6
EC (μS) pH _{1,ab0}	EC (μS)	64	2	132	16	35	0	44	1	32	1	33	1
	pH _{1,ab0}	7,4	0	7,6	0	7,3	0	7,6	0	7,3	0	7,2	0

STD_M : déviation standard sur la moyenne ; EC : conductivité en μS/cm à 20°C

b) Les eaux de la Falémé à Kidira

La moyenne arithmétique des 122 analyses effectuées montre que les eaux de la Falémé à Kidira sont bicarbonatées sodiques (tableau 51). Le sodium est l'élément le plus fluctuant devant les bicarbonates et les chlorures, leurs concentrations variant d'un facteur 300 à 800. Ceci est dû au fait que certains prélèvements ont été effectués en saison sèche alors que l'écoulement était nul. Or à cet endroit, toute la ville utilise les eaux du fleuve pour les besoins domestiques ; les fortes concentrations enregistrées dénotent en effet une pollution anthropique importante. Ces prélèvements ne sont pas pris en compte par la suite. La minéralisation totale fluctue donc dans des proportions importantes, de 32 mg/l à 800 mg/l. Cette borne supérieure n'a aucune signification pour les raisons évoquées ci-dessus. La borne inférieure est supérieure à celle enregistrée à Bakel sur le Sénégal (29 mg/l). Les eaux de la Falémé apparaissent donc comme plus chargées que les eaux du Sénégal.

c) Les eaux de la Gambie à Kédougou

Les différentes analyses effectuées montrent peu de variation de la qualité chimique des eaux de la Gambie à Kédougou, ceci est probablement dû au fait qu'il n'y a qu'un seul prélèvement effectué en saison sèche. La moyenne arithmétique classe ces eaux dans la catégorie des eaux bicarbonatées calciques (tableau 51). Les bicarbonates représentent 95% de la somme des anions et le calcium 47% de la somme des cations. On note l'absence de sulfate et la relative importance de la silice dissoute qui représente 28% de la charge pondérale totale dissoute. La minéralisation totale fluctue entre 32 mg/l et 51 mg/l, la borne inférieure est encore du même ordre de grandeur que celle des deux autres fleuves étudiés. Les ions bicarbonates sont, en toutes saisons, les formes anioniques dominantes en contribuant pour près de 50% à la minéralisation totale des solutions. La faible variabilité des teneurs en chlorures indique que les eaux du bassin sont très peu affectées par l'influence océanique. Les concentrations en silice varient très peu autour d'une teneur moyenne de 10,8 mg/l. Le potassium est le cation le moins abondant (GAC & al., 1987a ; ORANGE & GAC, 1990b).

d) Les eaux du Tinkisso à Dabola, du Milo à Kankan et du Niger à Siguiri

Les eaux du Tinkisso à Dabola sont bicarbonatées magnésiennes alors que celles du Milo à Kankan et du Niger à Siguiri sont bicarbonatées calco-sodiques (tableau 51). Ces trois cours d'eau ont été échantillonnés aux mêmes dates, entre juin et novembre 1987 ; leur charge dissoute totale fluctue dans les mêmes proportions, de 30 à 60 mg/l. La teneur en silice dissoute y est plus importante que les eaux des trois fleuves précédents.

2. Analyse factorielle en composantes principales

Le traitement statistique des analyses chimiques (données multivariées) par analyse factorielle permet de visualiser les principales associations entre les espèces chimiques (variables de qualité) des eaux et, ainsi, d'appréhender les principaux facteurs qui contrôlent la chimie des eaux (DOMERGUE, 1980 ; SABATON, 1983 ; KATTAN, 1989).

a) Les eaux du Sénégal à Bakel

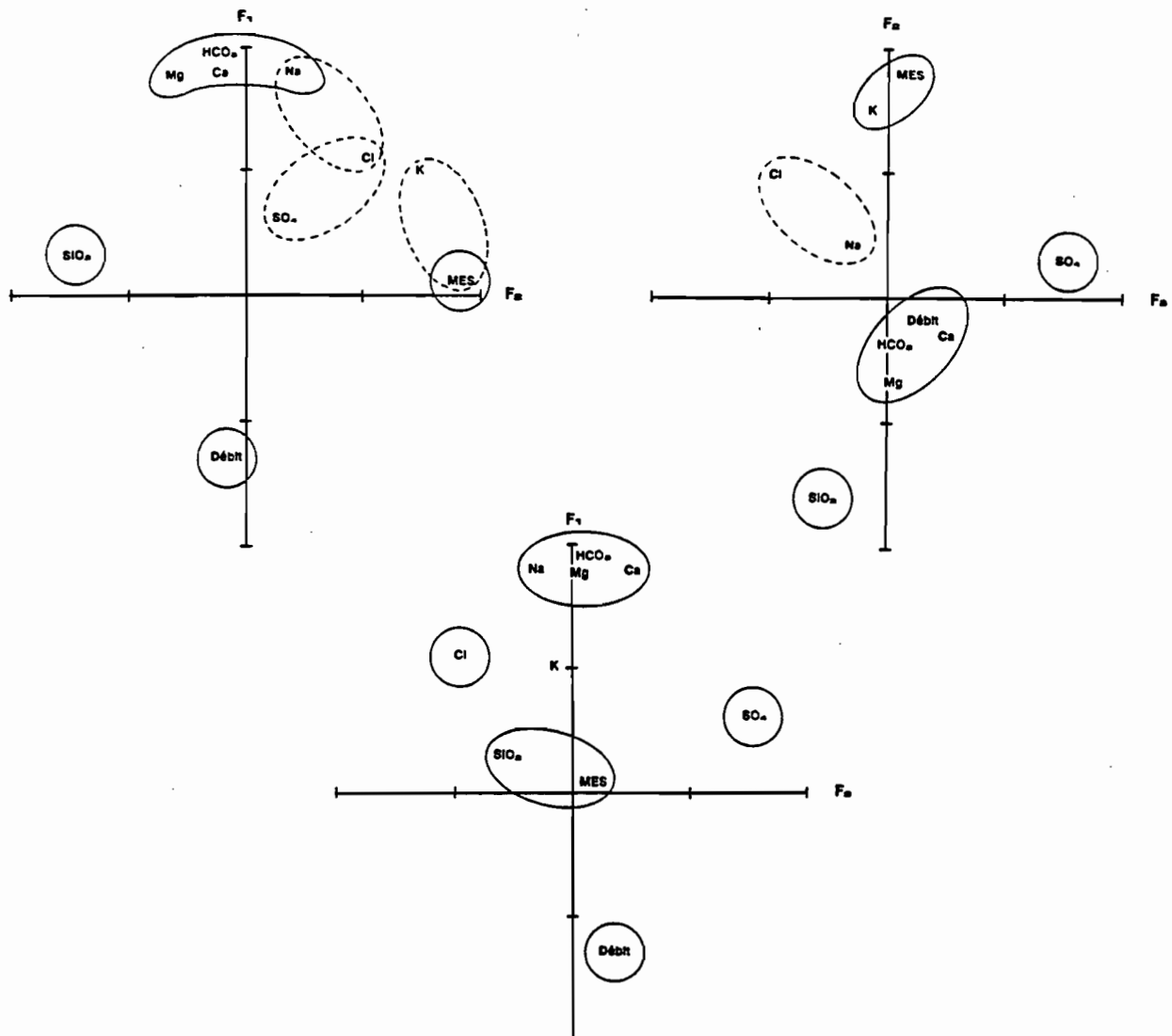


Fig. 45 : Analyse en composantes principales des eaux du Sénégal à Bakel de 1979 à 1988 (n=229).

La figure 45 présente les différents paramètres géochimiques testés sur les trois principaux plans factoriels : F₁-F₂, F₂-F₃ et F₁-F₃. Les trois premiers facteurs expliquent 80%

de la variance totale. Le facteur F_1 représente 51% de la variance totale ; il met en évidence l'influence primordiale du débit sur les concentrations en éléments dissous. Il matérialise la dilution des eaux de nappe, par les eaux de surface lors des périodes de crue. Plusieurs groupes d'éléments s'individualisent. Bicarbonates, magnésium, calcium, sodium (et donc la charge totale dissoute TDS et la conductivité EC) sont les plus influencés par le débit ; ces quatre espèces chimiques sont celles qui mesurent le mieux l'altération des roches du bassin versant par les eaux d'infiltration, bien que le sodium semble légèrement lié aux chlorures et sulfates, tous deux provenant de l'atmosphère. A l'opposé, les teneurs en matières en suspension (MES) ne sont pas influencées par le débit ; le potassium, situé entre ces deux pôles, a donc des origines diverses. Enfin, la silice est également indépendante du débit mais corrélée négativement aux MES. Le facteur F_2 représente 20% de la variance totale. Il matérialise l'opposition très nette SiO_2 -MES et l'association MES-K ; ce facteur souligne la faible importance du débit sur ces trois éléments. Le facteur F_3 ne représente que 9% de la variance totale ; il montre le comportement isolé des sulfates et l'opposition SO_4 -Cl. Finalement, ce facteur met en évidence les différentes provenances des éléments chimiques des eaux : sulfates provenant exclusivement de pollutions domestiques ponctuelles, chlorures provenant en partie d'apports atmosphériques et les autres variables de qualité testées provenant de l'érosion et de l'altération du substratum rocheux du bassin versant.

La séparation de l'année hydrologique en trois périodes : *montée des eaux* (juillet-août), *descente des eaux* (septembre-novembre) et *basses-eaux* en saison sèche (décembre-juin) permet de moduler les comportements des différentes espèces chimiques et des MES selon le débit du fleuve puisqu'il est apparu comme le facteur déterminant des concentrations dans les eaux. Le débit contribue à 83% de la variance totale en début de crue, à 68% en fin de crue et à 80% en période de *basses-eaux*. Les chlorures et sulfates ne sont associés qu'en début de crue, le reste de l'année les sulfates ont un comportement indépendant du débit. Bicarbonates, magnésium et calcium évoluent toujours ensemble en sens inverse du débit, le sodium y est associé en début de crue alors qu'il est associé aux chlorures en fin de crue. La silice est toujours opposée aux MES, surtout en début de crue. Enfin, les MES sont indépendantes du débit en début de crue puis ces deux facteurs sont parfaitement liés en fin de crue et *basses-eaux*.

Cette étude permet de mettre en évidence l'origine des éléments chimiques transportés par les eaux de surface et de schématiser leur comportement. Les sulfates proviennent de pollutions domestiques ponctuelles ; les chlorures sont d'origine atmosphérique ; et le cortège HCO_3 -Mg-Ca-Na, les MES, le K et la SiO_2 proviennent de l'érosion et de l'altération du bassin. Dans ce dernier ensemble, on note que :

- le cortège HCO_3 -Mg-Ca-Na est dilué par le débit ;
- les MES sont indépendantes du débit en début de crue, puis diluées par celui-ci ;
- le K a un comportement intermédiaire entre celui des MES et celui des autres espèces dissoutes du cortège HCO_3 -Mg-Ca-Na ;
- la silice dissoute, indépendante du débit, semble inversement liée aux MES, ce qui peut justifier une origine biogéochimique.

b) Les eaux de la Falémé à Kidira

Les trois premiers facteurs expliquent 82% de la variance totale selon la répartition suivante : 62% pour F_1 , 12% pour F_2 et 8% pour F_3 . Comme pour les eaux du Sénégal à Bakel, quatre pôles se distinguent : le débit, les MES, la silice et l'ensemble des autres espèces dissoutes à l'exception des sulfates qui ont encore un comportement distinct dû à leur apport par des pollutions domestiques. Cependant, l'effet de dilution par le débit est nettement moins prononcé et il influence surtout l'ensemble des espèces dissoutes. Le facteur F_2 représente encore l'opposition SiO_2 -MES, il met également en évidence l'association due aux apports

atmosphériques Na-Cl-SO₄. Enfin, le facteur F₃ confirme le comportement distinct vis-à-vis du débit, des MES et de la silice par rapport aux autres espèces dissoutes (y compris le potassium). La distinction entre les différentes périodes hydrologiques ne met pas en évidence de comportements différents.

c) Les eaux de la Gambie à Kédougou

Les trois premiers facteurs n'expliquent que 75% de la variance totale, ceci est dû à la faible contribution du débit dans l'évolution des concentrations des différentes variables de qualité des eaux : le premier facteur ne représente que 39% de la variance totale. Le facteur F₂ (20% de la variance totale) correspond encore à l'opposition SiO₂-MES alors que le facteur F₃ met en évidence une opposition silice-chlorures. Dans ces eaux de la Gambie, le potassium est toujours associé aux chlorures, les MES aux débits et il faut noter le comportement singulier du sodium qui semble lié à la silice. Il apparaît donc ici un comportement différent des variables de qualité de ces eaux du domaine soudano-guinéen par rapport à celui des variables de qualité des eaux du domaine sahélien. Les variations sont moins nettes, le système évolue plus lentement d'où des oppositions plus floues dans le comportement des différentes variables de qualité et d'où l'association remarquable des MES avec le débit. La séparation de la crue en deux périodes : *montée des eaux* et *descente des eaux* montre que l'association Cl-Na-K est plus forte en début de crue et met également en évidence l'importance en début de crue de la silice dissoute sur la charge totale. Durant cette période, l'association HCO₃-Ca-Mg est moins forte.

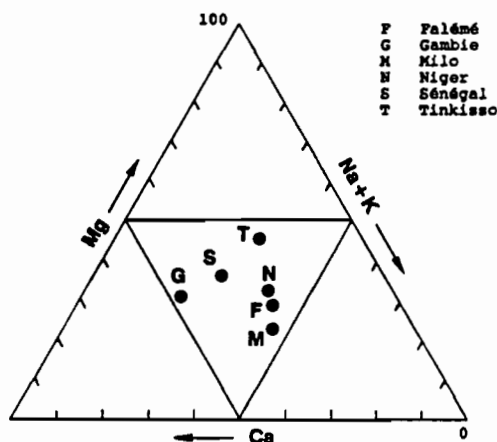
3. Etude des corrélations inter-éléments des eaux du Niger

Sur le Niger à Siguiri, le débit a une forte influence négative sur les teneurs des différentes espèces dissoutes et, dans une moindre mesure, sur les MES. Sur l'ensemble du bassin amont du Niger, la silice est bien corrélée au sodium. Les chlorures ne montrent aucune corrélation significative.

4. Utilisation du diagramme de Piper

Les moyennes arithmétiques sont reportées sur un diagramme de Piper afin de voir dans quelle domaine géochimique se situent ces eaux (fig.46). Les eaux des six cours d'eau étudiés sont en équilibre entre les trois pôles, calcique, magnésien et sodi-potassique. La Gambie serait plutôt à tendance calcique, le Tinkisso à tendance magnésienne et le Milo à tendance sodi-potassique.

Fig. 46 : Diagramme de Piper sur les eaux du Sénégal (S), de la Falémé (F), de la Gambie (G), du Tinkisso (T), du Milo (M) et du Niger (N).



B - QUALITE CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION

1. Caractères granulométriques

A Bakel, la fraction argileuse prédomine dans tous les prélèvements à l'exception de trois regroupements correspondant chacun à des échantillons de la fin du mois de septembre, respectivement en 1981, 1982 et 1983 ; cette exception n'est pas enregistrée lors de la crue de 1985 (tableau 52). A chaque fois, elle correspond à une augmentation brutale de la fraction sableuse ; en 1983, cet événement est associé à une deuxième pointe de crue tardive, mais rien de tel pour les deux années précédentes. Cette légère prédominance de la fraction sableuse sur la fraction argileuse semble donc être ponctuelle.

Tableau 52 : *Granulométrie (en % de l'échantillon sec) des matières en suspension du Sénégal à Bakel durant les crues 81/82, 82/83, 83/84 et 85/86*

Référence	Date	Argiles <2 μ	Limons		Sables >20 μ	Référence	Date	Argiles <2 μ	Limons		Sables >20 μ
			fins 2-6,3 μ	moyens 6,3-20 μ					fins 2-6,3 μ	moyens 6,3-20 μ	
Crue 81/82						Crue 85/86					
B81-1	12/06-11/07	71	23	4	2	B85-1	1/07- 5/07	91	3	5	1
B81-2	12/07-29/07	70	20	5	5	B85-2	6-	90	7	2	0
B81-3	30/07-16/08	67	19	10	4	B85-3	11-	93	4	3	1
B81-4	17/08- 3/09	57	21	12	10	B85-4	16-	77	13	8	1
B81-5	5/09-25/09	63	18	11	8	B85-5	21-	71	12	14	3
B81-6	26/09-31/01	25	23	26	26	B85-6	26-	59	9	13	18
Crue 82/83						B85-7	31/07- 4/08	55	7	24	14
B82-1	25/06-17/07	67	25	7	1	B85-8	5-	63	11	9	17
B82-2	19/07-31/07	82	12	4	2	B85-9	10-	60	11	13	16
B82-3	2/08-16/08	57	27	9	7	B85-10	15-	54	17	14	15
B82-4	18/08- 2/09	67	18	9	6	B85-11	20-	57	11	22	11
B82-5	3/09-19/09	48	27	16	9	B85-12	25-	53	13	23	12
B82-6	21/09-31/05	24	20	18	38	B85-13	30/08- 3/09	54	11	21	14
Crue 83/84						B85-14	4-	60	9	17	14
B83-1	14/06-25/06	71	22	5	2	B85-15	9-	50	10	24	15
B83-2	26/06-30/06	93	5	2	0	B85-16	14-	54	9	21	16
B83-3	1/07- 6/07	83	12	3	2	B85-17	19-	59	9	21	11
B83-4	7/07-10/07	47	17	23	13	B85-18	24-	64	12	16	8
B83-5	11/07-17/07	72	15	9	4	B85-19	29/09- 3/10	64	12	17	8
B83-6	18/07-21/07	57	18	11	14	B85-20	4/10- 5/10	61	7	22	10
B83-7	22/07-31/07	63	19	12	6						
B83-8	1/08- 5/08	54	17	13	16						
B83-9	6/08-12/08	58	15	12	15						
B83-10	13/08-18/08	57	20	11	12						
B83-11	19/08-24/08	66	15	9	10						
B83-12	25/08-31/08	68	17	7	8						
B83-13	1/09- 9/09	61	20	13	6						
B83-14	10/09-24/09	44	22	18	16						
B83-15	25/09-30/09	27	15	23	35						
B83-16	1/10-28/11	42	20	16	22						

Finalement, on retiendra que la fraction argileuse prédomine en toutes saisons ; elle est mieux représentée lors des premiers écoulements de la crue (de 93% à 70% de l'échantillon total) et diminue au cours de la *montée des eaux* au profit des fractions limoneuses et sableuses. Elle ne représente plus que 50% à 60% de l'échantillon total à la pointe de crue. En début de décrue, elle ré-augmente légèrement pour atteindre en fin de décrue, c'est-à-dire au début de la période d'alluvionnement, son maximum secondaire au détriment de la fraction sableuse, la fraction limoneuse restant relativement constante. L'équilibre entre les différentes fractions granulométriques est alors atteint : les argiles représentent un peu plus de 60%, les limons 30% et les sables moins de 10%. Cette évolution correspond à celle enregistrée par LO (1984) sur la Gambie à Gouloumbou, à 200 km en aval de Kédougou.

La quasi totalité des flux particuliers s'écoulant en période de *hautes-eaux*, la moyenne granulométrique est établie sur la période allant de juin à septembre. Ce découpage permet de comparer ces résultats avec les études antérieures (tableau 53). En moyenne, les MES du

Sénégal à Bakel sont constituées de 65% d'argiles ($<2\mu\text{m}$), de 18% de limons fins (entre $2\mu\text{m}$ et $6,3\mu\text{m}$), de 9% de limons grossiers (entre $6,3\mu\text{m}$ et $20\mu\text{m}$) et de 7% de sables ($>20\mu\text{m}$). Cette répartition correspond à celle de la Gambie (LO, 1984), du Chari (GAC, 1980) et des rivières ivoiriennes (MONNET, 1972).

Tableau 53 : *Granulométrie moyenne des matières en suspension du Sénégal à Bakel et comparaison avec d'autres fleuves ouest africains (en % de l'échantillon sec)*

Date	Cycle	Argilles <2 μ	Lîmons		Sables >20 μ
			2 à 6,3 μ	6,3 à 20 μ	
Sénégal supérieur					
12/6-25/9	81/82	66	20	8	6
25/6-19/9	82/83	64	22	9	5
14/6- 9/9	83/84	65	16	10	8
1/7- 5/10	85/86	65	15	10	10
moyenne	81-86	65	18	9	7
Sénégal (KANE, 1985)	81/82	76	17	5	2
Gambie (LO, 1984)	83/84	64	26	10	
Chari (GAC, 1979)	70-74	65	18	17	
Bandama (MONNET, 1972)	67-70	62	25		13

2. Composition chimique des MES

L'étude de la composition chimique des matières en suspension transportées par les eaux de surface est peu répandue. Cette composition chimique est beaucoup moins variable que celle des eaux. L'ordre quantitatif des éléments y est toujours le même, dominance de la silice, de l'aluminium puis du fer (HOLEMAN, 1968 ; GAC & PINTA, 1973 ; MARTIN & MEYBECK, 1979 ; GAC, 1980 ; PROBST, 1983 ; MEYBECK, 1984 ; GAC & KANE, 1986a ; KATTAN, 1989 ; ORANGE & GAC, 1990b). Cependant, on peut noter des différences dues à la lithologie, à la taille des particules transportées, à la nature des écoulements et aux vitesses relatives des érosions chimiques et mécaniques.

a) Composition chimique moyenne des MES

Dans le tableau 54, les compositions chimiques des matières en suspension du Sénégal à Bakel, de la Falémé à Kidira et de la Gambie à Kédougou sont pondérées par le débit. Ces moyennes sont comparées à celles d'autres fleuves africains et à la moyenne mondiale. Bien que toutes ces compositions chimiques soient sensiblement semblables, quelques enseignements peuvent être tirés de ces comparaisons inter-africaines. Les suspensions du Sénégal à Bakel, de la Falémé et de la Gambie à Kédougou ont des compositions chimiques similaires, à l'exception cependant du calcium dont la teneur est cinq fois plus élevée dans les sédiments de la Falémé. D'autre part, les matières en suspension arrivant à l'embouchure du Sénégal sont moins siliceuses, plus alumineuses et ferrifères. Tous ces fleuves ont des matières en suspension semblables à celles du Niger. Par contre, les MES du Milo à Kankan ne sont constituées que de 44% de silice (58% à Bakel) et le taux moyen d'alumine atteint les 29% (19% à Bakel) ; cette composition est semblable à celle du Chari amont, et se rapproche de celle de l'Oubangui et du Congo où les teneurs en fer sont beaucoup plus élevées. On voit transparaître dans ces regroupements l'impact de la zone climatique. Effectivement, du Sénégal au Congo, on passe du domaine tropical sec au domaine équatorial humide, ce qui se traduit dans les MES des fleuves par un appauvrissement en éléments mobiles dû à un lessivage plus important des paysages les plus humides (TARDY, 1969 ; GAC, 1980). Enfin, par rapport à la moyenne mondiale, toutes ces rivières africaines ont des MES pauvres en Ca, Mg, Na, K et silice, et riches en Al et Fe. Ces compositions chimiques moyennes traduisent une altération globale très

avancée des sols des différents bassins drainés. Ce degré d'altération peut être mesuré par les deux paramètres suivants :

$$R_1 = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) \quad \text{et} \quad \text{CH}_M = \text{Al} / (\text{Na} + \text{Mg} + \text{Ca}).$$

R_1 mesure la vitesse de départ de l'alumine et du fer par rapport à la silice : plus sa valeur est petite, plus le niveau d'altération atteint est important. Au contraire, le "chemical maturity" (CH_M) de KONTA (1985), qui mesure la vitesse de départ des bases échangeables par rapport à l'alumine, augmente avec l'altération : on parle alors de maturité chimique du sédiment. Bien sûr, les suspensions qui présentent la plus grande maturité chimique, résultent de l'altération ferralitique des roches cristallines. Les MES des cours d'eau étudiés se classent comme suit par ordre croissant de maturité :

Monde <<< Falémé <<< Sénégal < Sénégal_{amont} < Gambie_{amont} <<< Chari_{amont} < Milo.

Cet arrangement par rapport à la moyenne mondiale traduit le lessivage intense des sols de tous ces bassins, le Milo étant le cours d'eau drainant la bassin versant le plus appauvri en éléments chimiques. Les MES de la Gambie et du Sénégal ont un degré de maturité intermédiaire. Enfin, il est remarquable de voir les MES de la Falémé plus immatures que ces dernières, cette position étant due à leur forte teneur en calcium.

Tableau 54 : Comparaison des compositions chimiques des MES de quelques cours d'eau africains et de la moyenne mondiale (oxydes en % et traces en ppm)

Fleuve	Sénégal amont (1)	Sénégal (2)	Gambie amont (1)	Falémé (1)	Milo (1)	Niger (3)	Chari amont (4)	Oubangui (5)	Congo (6)	Monde (7)
MAJEURS	n=76		n=13	n=9	n=5					
SiO ₂	57,9	50,2	52,2	57,2	44,4	60,4	44,1	45,3	50,7	60,1
Al ₂ O ₃	19,3	24,0	18,9	18,8	29,1	26,3	28,6	27,9	30,0	17,0
Fe ₂ O ₃	8,0	9,7	9,3	7,5	8,0	7,8	8,5	21,9	13,6	7,4
TiO ₂	1,0	0,9	1,0	0,9	0,9	0,6	1,3	1,45	0,8	1,0
Mn ₂ O ₄	0,04	0,04	0,05	0,09	0,04	0,08	0,05	0,23	0,15	0,13
CaO	0,14	0,25	0,10	0,61	0,10	0,50	0,20	0,41	0,80	3,43
MgO	0,94	1,22	0,91	1,03	0,38	1,7	0,46	0,53	1,2	1,8
Na ₂ O	0,27	0,20	0,11	0,34	0,13	-	0,22	0,21	-	0,96
K ₂ O	1,60	1,72	1,78	1,68	0,71	1,1	0,94	1,23	1,1	2,5
P ₂ O ₅	0,21	-	0,23	0,003	0,21	0,7	-	0,69	0,48	-
H ₂ O ⁻	10,4	11,6	15,5	11,5	16,5	-	15,5	-	-	-
Sum	99,80	99,83	100,08	99,65	100,47	-	99,87	-	-	-
pH ₂ O	2,1	-	3,1	3,3	3,1	-	-	-	-	-
COP	1,2	-	5,1	2,0	2,7	-	-	-	-	-
SOP	0,02	-	-	0	0,009	-	-	-	-	-
TRACES									(5)	
Sr	56	55	-	73	32	-	34	41	76	150
Ba	324	336	-	461	236	-	228	473	439	600
V	149	172	-	140	129	-	104	157	136	170
Ni	64	107	-	66	75	-	82	93	71	90
Co	16	17	-	18	18	-	18	27	24	20
Cr	187	221	-	163	176	-	113	142	109	100
Zn	73	88	-	149	88	-	76	716	395	350
Cu	44	51	-	49	38	-	38	207	94	100
Sc	20	27	-	20	15	-	-	21	16	18
Y	31	31	-	33	17	-	-	30	25	-
Zr	291	179	-	272	171	-	-	193	265	-
Mn	265	-	-	698	299	-	-	-	-	-
Sum	1520	1204	-	2142	1294	-	-	-	-	-
R ₁	2,0	1,5	1,9	2,2	1,2	1,8	1,2	0,9	1,2	2,5
CH _M	7,3	6,4	8,6	4,3	22,1	-	15,1	12,1	4,8	1,2

H₂O⁻ perte en eau à 1000°C ; pH₂O perte en eau à 110°C ; COP Carbone Organique Particulaire ; SOP Soufre Organique Particulaire ; R₁=SiO₂/(Al₂O₃+Fe₂O₃) ; CH_M=Al/(Na+Mg+Ca)
(1) cette étude ; (2) GAC & KANE, 1986 ; (3) MARTINS, 1982 ; (4) GAC, 1980 ; (5) GOMA, 1988 ; (6) SHOLKOVITZ & al., 1978 ; (7) MARTIN & HEYBECK, 1979

Tous les éléments traces ont des concentrations inférieures aux moyennes mondiales, à l'exception du chrome. On notera les forts taux en Mn, Zn et Ba des MES de la Falémé, qui

restent, cependant, inférieurs aux moyennes mondiales. Ce caractère souligne encore une fois le côté plus immature des matières en suspension de cette rivière. Dans ce domaine sahélo-soudano-guinéen, on ne retrouve pas les teneurs élevées en Zn et Cu de l'Oubangui situé en zone beaucoup plus humide, éléments associés aux phases ferrifères dans les profils latéritiques (MOSSER, 1980 ; BEAUVAIS & MAZALTARIM, 1988). A notre avis, l'érosion sévissant dans ces régions ne semble pas suffisamment intense pour que les MES soient une image non déformée des profils latéritiques drainés dans ces paysages.

Par rapport à la composition chimique des sols de cette zone (ROQUIN & *al.*, 1990), les MES sont enrichies en alcalins et alcalino-terreux et cet enrichissement est d'autant plus important en milieu nord-soudanien et sahélien, c'est-à-dire dans les zones les plus sèches. Deux explications concomitantes, qui mériteraient d'être vérifiées, sont proposées. D'une part, dans ces zones arides, les dépôts de poussières atmosphériques sont plus abondants et peuvent donc polluer les MES et leur apporter ainsi les éléments chimiques absents du paysage amont car déjà lessivés. D'autre part, toujours dans ces zones arides, les argiles du type smectite-vermiculite sont plus fréquentes et leur capacité à stocker dans leur réseau les bases échangeables peut participer à une accumulation différentielle de ces cations retrouvés dans les MES.

b) Les MES du Sénégal à Bakel

Les alluvions du fleuve Sénégal à Bakel ont été échantillonnées en août 1987 (tableau 55). Silice, Mn, Ca, Na, K y sont plus concentrés de même que les éléments traces Sr, Ba et Zr ; Ti, P, Co et Y y sont en proportions équivalentes ; et les autres espèces chimiques y sont moins abondantes.

Tableau 55 : Composition chimique des MES du fleuve Sénégal à Bakel (de 1980 à 1987)
(oxydes en % et traces en ppm)

Eléments	Alluvions Sénégal	Montée des eaux	Descente des eaux	Basses eaux	Moyenne annuelle		
					n=76	Min	Max
MAJEURS	n=4	n=44	n=28	n=4	n=76	Min	Max
SiO ₂	73,9	56,7	58,8	51,3	57,9	45,2	72,8
Al ₂ O ₃	11,5	19,9	18,9	23,7	19,3	12,3	26,0
Fe ₂ O ₃	4,9	8,2	7,8	9,4	8,0	5,1	11,3
TiO ₂	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	0,7	1,2
Mn ₂ O ₄	0,09	0,05	0,04	0,05	0,04	0,03	0,12
CaO	0,37	0,14	0,14	0,27	0,14	0,10	0,60
MgO	0,75	1,01	0,89	1,22	0,94	0,50	1,57
Na ₂ O	0,44	0,27	0,27	0,16	0,27	0,11	0,48
K ₂ O	1,73	1,63	1,57	1,66	1,60	1,19	2,22
P ₂ O ₅	0,18	0,20	0,22	0,20	0,21	0,0	0,46
H ₂ O*	5,2	10,7	10,2	11,5	10,4	6,6	16,6
Somme	99,96	99,80	99,83	100,36	99,80	-	-
pH ₂ O	1,0	2,4	1,9	3,7	2,1	0,9	4,9
COP	0,5	1,1	1,2	1,0	1,2	0,6	1,8
SOP	0,007	0,003	0,04	0,01	0,02	0,0	0,08
TRACES							
Sr	89	56	57	59	56	46	73
Ba	525	328	321	364	324	257	506
V	98	155	145	158	149	95	195
Ni	52	72	59	84	64	34	136
Co	18	17	16	20	16	10	25
Cr	119	190	184	186	187	144	231
Zn	50	79	69	97	73	48	431
Cu	25	51	39	59	44	19	132
Sc	13	22	20	24	20	13	30
Y	31	32	31	34	31	20	42
Zr	498	254	316	182	291	163	449
Mn	625	273	260	332	265	176	404
Somme	2143	1529	1517	1599	1520	1520	1520
R ₁	4,53	1,85	2,30	1,51	1,99	-	-
CH _w	3,45	7,37	7,76	6,05	7,32	-	-

H₂O* perte en eau à 1000°C ; pH₂O perte en eau à 110°C ; COP Carbone Organique Particulaire ;
SOP Soufre Organique Particulaire ; R₁=SiO₂/(Al₂O₃+Fe₂O₃) ; CH_w=Al/(Na+Mg+Ca)

La séparation de l'année hydrologique en trois saisons ne montre aucun changement fondamental de la composition chimique des MES au cours du temps. Cependant, il est remarquable que tous les éléments traces aient leur concentration minimale au cours de la descente des eaux à l'exception du Zr qui atteint sa teneur maximale durant cette période, et du Sr dont la teneur semble constante au cours de l'année. En ce qui concerne les éléments majeurs, Al, Fe, Mg, K et H_2O^- évoluent en sens contraire de la silice qui est le seul élément majeur à avoir sa concentration maximale en descente des eaux, ce qui correspond à l'époque où la fraction granulométrique sableuse est la plus importante. Ces tendances se traduisent par des rapports R_1 et CH_n élevés en milieu de crue. Cette variabilité au cours des crues est reproductible d'une année sur l'autre (GAC, 1980 ; PROBST & BAZERBACHI, 1986 ; KATTAN, 1989).

c) Les relations inter-éléments

L'analyse en composantes principales portant sur les éléments majeurs et traces, le COP (Carbone Organique Particulaire), la concentration en MES et le débit est effectuée sur une population de 58 échantillons. 70% de la variance totale est expliquée par les trois premiers facteurs. Le premier facteur représente 43% de cette variance ; il matérialise une opposition très nette entre un pôle Si et un pôle Al-Fe auquel est associée l'eau de la perte à 1000°C ; ce dernier pôle représente donc un pôle argileux et l'autre un pôle sableux. Ainsi, ce facteur visualise les espèces chimiques associées aux différentes classes granulométriques. Si, Zr, Na, et dans une moindre mesure Sr et Ba, sont liés aux sables. Par contre, Mg, Mn, Cu, Cr, Co, Zn, V, Sc et Y accompagnent les argiles ; en effet, d'après MOSSER & al. (1985), ces éléments s'accumulent préférentiellement dans l'horizon argileux (PINTA & OLLAT, 1961 ; MOSSER & al., 1974 ; MOSSER, 1980, 1987). Le Zr est un élément lourd et son association avec le quartz est due à une accumulation de ces deux éléments dans les zones basses situées à la périphérie des plateaux latéritiques, suite à un lessivage des particules argileuses les plus fines (ROQUIN & al., 1990). Au contraire, le vanadium est un marqueur utilisé en prospection géochimique pour caractériser les zones hautes à accumulations kaoliniques. Le facteur F_2 explique 19% de la variance totale ; il matérialise l'opposition d'évolution entre le COP et les MES. Le facteur F_3 ne représente que 8% de cette variance, et il est difficile de déterminer le processus qui le contrôle. L'association de Na avec la phase sableuse ou les plus forts débits n'a pu être expliquée.

L'analyse des tableaux de corrélation permet de préciser certains points. Al et Mg sont les deux seuls éléments à être influencés par le débit avec lequel ils sont corrélés négativement. Il est intéressant également de noter que les teneurs en Mn, Ti, Mg, Y, Ba et Sr augmentent avec la concentration en MES, que le P est lié positivement au Mg et à la perte à 1000°C et négativement à la silice, signifiant donc qu'il accompagne le cortège argileux bien qu'il ne soit, curieusement, lié à aucun élément trace, seul élément majeur dans ce cas. Conformément aux prospections géochimiques réalisées dans les paysages latéritiques du SW malien (ROQUIN & al., 1989), l'opposition plus marquée entre Si et Al, qu'entre Si et Fe, confirme que les MES proviennent essentiellement des zones basses du paysage (zones de flat).

La séparation de la période de crue en montée des eaux et descente des eaux montre clairement que, en fin de crue, les MES augmentent avec le débit alors que le COP diminue : cette évolution est classique alors que le système est stabilisé. Par contre, en début de crue, les MES qui évoluent indépendamment du débit brouillent toute l'information.

d) Les Terres Rares

Les Terres Rares ont été analysées sur deux échantillons du Sénégal à Bakel, sept échantillons de la Falémé à Kidira et cinq échantillons du Milo à Kankan (tableau 56). Pour tous les fleuves et quel que soit le débit ou l'époque de l'année, l'abondance relative est toujours la suivante : $Ce > La > Nb > Yb > Lu$. Le lutétium et l'ytterbium sont mieux représentés dans les suspensions du Sénégal et de la Falémé, le lanthane et le cérium sont plus abondants dans le bassin du Niger, le niobium est quasi constant d'un fleuve à l'autre,

l'euporium est non détecté. Lanthane, ytterbium et cérium sont dilués par le débit alors que le lutétium semble augmenter avec celui-ci et que le niobium en est indépendant. Deux groupes s'opposent : l'association Yb-Lu qui est liée positivement à la concentration en MES, et l'association La-Ce-Nb. Le premier groupe est lié positivement à la silice, au potassium et au sodium, et négativement à l'aluminium, au phosphore et à l'eau de constitution. Ces caractéristiques montrent que ce groupe de *Terres Rares* est lié à l'exportation du quartz dans les fractions granulométriques les plus grossières, l'exportation de ces fractions grossières est également liée à l'intensité des débits (corrélation positive entre Lu et Q). A l'opposé, le deuxième groupe (La, Ce, Nb) est associé aux minéraux argileux caractérisés par l'eau de constitution et l'alumine, de même que par le phosphore qui est fortement adsorbé par les argiles (HALL & BAKER, 1971 ; GOLTERMAN, 1978 ; PROBST, 1985 ; LE ROUX & al., 1987). Enfin, ces quelques analyses des *Terres Rares* confirment l'association du Na, Zr, Sr et Ba à la phase sableuse.

Tableau 56 : Composition chimique en Terres Rares des MES du Sénégal à Bakel, de la Falémé à Kidira et du Milo à Kankan (de 1983 à 1987)

An	Réf.	Q _d (m ³ /s)	C _{MES} (mg/l)	ppm de Terres Rares					
				La	Ce	Eu	Yb	Lu	Nb
SENEGAL									
83	B83-23	963	336	28,5	54,1	1	2,8	0,5	18,8
83	B83-25	748	241	28,0	53,2	1	2,6	0,5	17,2
FALEME									
84	K161	4	566	38,8	66,8	1	3,1	0,3	17,1
85	K175	99	750	49,3	88,6	1	3,4	0,4	20,5
85	K185	236	312	37,5	63,2	1	3,1	0,4	15,7
85	K195	296	223	37,4	59,7	1	3,0	0,4	15,8
85	K200	349	265	32,2	56,1	1	3,0	0,2	15,1
86	K207	33	397	46,8	70,3	1	3,0	0,3	18,5
86	K217	254	211	38,4	64,3	1	3,1	0,1	17,8
MILO									
87	KK-1	-	104	54,6	108,0	1	1,9	0,2	19,2
87	KK-2	-	121	61,7	105,0	1	1,9	0,1	20,1
87	KK-3	-	61	56,7	88,9	1	1,8	0,1	18,3
87	KK-4	-	81	45,0	81,0	1	1,3	0,2	19,3
87	KK-5	-	37	39,1	71,4	1	1,3	0,1	18,8

Q_d débit journalier ; C_{MES} concentration en MES

3. Le carbone organique particulaire (COP)

La quantité de matière organique dans les matières en suspension est évaluée à partir du taux de COP. Il est généralement admis que ce COP représente 50% de la masse totale de matière organique (MEYBECK, 1982). Les bassins versants amont du Sénégal, de la Gambie et du Niger étant constitués essentiellement de roches cristallines, le COP est issu de la matière organique détritique allochtone provenant des sols et de la matière organique autochtone formée dans la rivière (MEYBECK, 1984). C'est dans les MES du Sénégal que le pourcentage de COP est le plus bas (1,2%), ensuite on trouve la Falémé (2%), le Milo (2,7%) et la Gambie (5,1%) (tableau 54). Cette particularité de la Gambie est liée au faible taux de MES exportés par ce fleuve. En effet, l'analyse en composantes principales a montré que le principal facteur de variation des teneurs en COP est la concentration en MES. Ce phénomène de dilution de la matière organique détritique récente par les suspensions inorganiques lors des crues (fig.47) est une caractéristique mondiale (MEYBECK, 1984 ; MARTINS & PROBST, 1990) ; les points représentatifs du Sénégal, du Milo et de la Gambie s'inscrivent parfaitement sur la courbe moyenne d'évolution mondiale déterminée par MEYBECK (1984), les quatre points de la Falémé sont légèrement au-dessus (fig.48). Les plus faibles charges solides (5 mg/l) correspondent à des taux de COP de 8% et les plus fortes (2000 mg/l) à des valeurs de 0,6%.

Par rapport aux grands fleuves du Monde, les MES du Sénégal ont un faible taux de COP : 1,8% pour l'Amazone (EDMOND & al., 1981), 2,4% pour le Yang-Tse-Kiang (MILLIMAN & al., 1984), 2,5% pour l'Orénoque (DEGENS, 1982). Bien sûr, des investigations plus approfondies sur la nature du carbone organique particulaire et sur les formes d'origine planctonique mériteraient d'être précisées. Mais en première approximation, en l'absence de

mesures sur la chlorophylle, abstraction a été faite de la production d'algues et il est admis dans les calculs ultérieurs d'érosion mécanique que la totalité du COP est issue des horizons supérieurs des sols du bassin. Cette hypothèse, vraie en période de crue mais pas en période de *basses-eaux*, semble justifiée du fait de la répartition annuelle des écoulements dans cette zone géographique (chapitre IV).

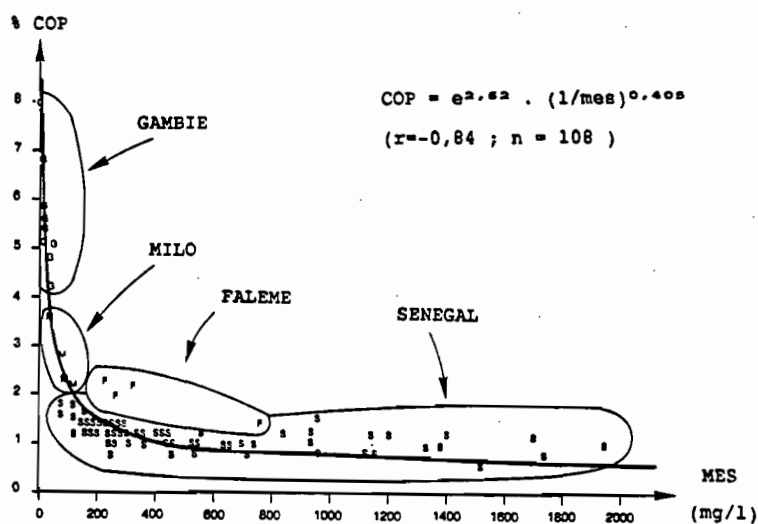


Fig. 47 : Evolution du COP en fonction des MES dans les bassins versants du Sénégal, du Niger et de la Gambie.

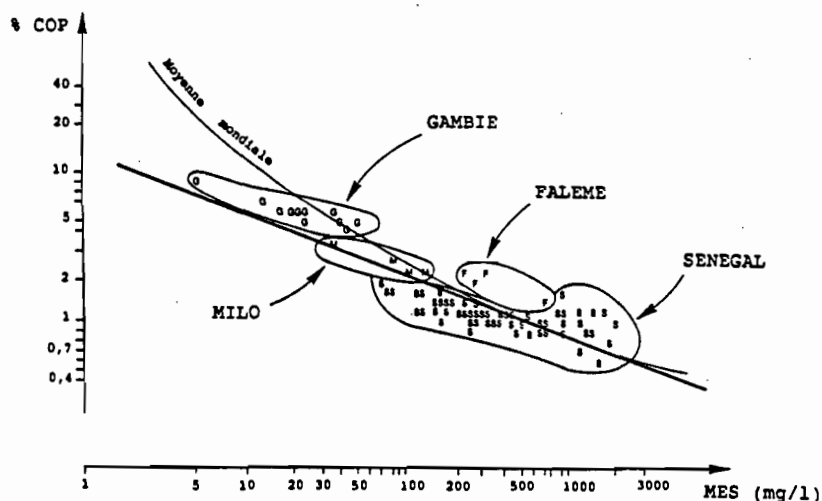


Fig. 48 : Comparaison de l'évolution du COP en fonction des MES dans les bassins versants du Sénégal, du Niger et de la Gambie avec la moyenne mondiale.

4. Minéralogie des MES

a) Les matières amorphes

Les constituants amorphes des MES ont rarement été étudiés du fait de la difficulté de la détermination qualitative et quantitative de ces produits minéraux secondaires (SEGALEN, 1968 ; QUANTIN & BOULEAU, 1983). Sous le vocable "*produits amorphes*", des produits très divers sont regroupés, le passage de l'état amorphe *sensus stricto* à l'état cristallisé étant progressif. Les trois échantillons analysés de MES du Sénégal (B86-1, B86-14 et B86-18) indiquent qu'il n'y a quasiment pas de silice de type allophane, un peu d'hydroxyde d'alumine non cristallisé ou para-cristallin (0,5% en Al_2O_3) et, en proportion variable, un peu d'oxy-

hydroxydes de fer para-cristallin très fins (de 0,4 à 0,7% de Fe_2O_3). Ceci donne un total de 1% de matières amorphes dans les suspensions du Sénégal. Ces résultats sont largement inférieurs à ceux publiés par GAC (1980) sur les MES du Chari : 0,3 à 1,2% de SiO_2 , 0,6 à 1,4% de Al_2O_3 , 2,7 à 3,5% de Fe_2O_3 et une moyenne totale de 3,7% des MES. Cette grande différence est due à la méthode d'analyse utilisée ; les résultats obtenus sur le Chari sont largement surestimés, la méthode dite de "Ségalen" étant trop forte et détruisant déjà quelques édifices cristallins (QUANTIN, 1989).

b) L'information fournie par les diffractogrammes RX

L'analyse par diffractométrie RX confirme la faible variabilité minéralogique des matières en suspension des fleuves (CARRE, 1972 ; MARTIN & MEYBECK, 1979 ; GAC, 1980 ; MARTINS, 1982 ; PROBST, 1983). Le quartz et la kaolinite sont, dans cette zone géographique, les deux espèces minérales dominantes (tableau 57). Sur le bassin amont du Sénégal, le quartz semble mieux représenté en période de *descente des eaux* alors que la kaolinite est la plus abondante en *basses-eaux*. Sur le bassin amont du Niger, la kaolinite est nettement plus abondante que le quartz. L'analyse de l'échantillon total ne permet pas de quantifier les autres espèces minérales : illite, smectite et feldspath sont toujours reconnus, la goethite est difficile à voir mais semble toujours être présente ; l'hématite, déterminée à l'état de trace, n'a été identifiée nettement que sur les suspensions de la Falémé ; la gibbsite enfin n'a été trouvée que dans les suspensions du Niger.

L'analyse de la fraction fine a permis de quantifier cinq minéraux (tableau 57). En plus des trois espèces argileuses classiques (kaolinite, illite et smectite), le quartz et la goethite y sont toujours représentés. Sur la Falémé, le Milo et dans les *basses-eaux* du Sénégal, le quartz est peu représenté. Une analyse en composantes principales montre que la goethite est associée à la phase argileuse à l'opposé du quartz. La proportion d'illite semble légèrement supérieure à celle de smectite. On note une diminution de la quantité d'illite au cours de la période de crue. Ainsi, en *basses-eaux*, il y a alors beaucoup plus de smectite que d'illite. Les smectites identifiées font partie de la famille des interstratifiés irréguliers 10-14 Sm.

Tableau 57 : Analyse minéralogique par diffractométrie RX des MES du fleuve Sénégal à Bakel (de 1980 à 1987), de la Falémé et du Milo

Minéral	Alluvions Sénégal	Sénégal à Bakel				Moyenne	Falémé à Kédra	Milo à Kankan
		ME	DE	BE				
ECHANTILLON TOTAL								
	n=4	n=40	n=21	n=4	n=65	n=11	n=5	
Quartz	+++++	+++	++++	+++	+++	+++	+++	
Kaolinite	+++	++++	++++	++++	++++	+++	++++	
Illite	+++	+++	+++	++++	+++	+++	+++	
Smectite	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++	
Feldspath	++	+	++	+	+	++	+	
Goethite	tr	+	tr	+	+	++	+	
Hématite	tr	tr	tr	tr	tr	+	tr	
Gibbsite	-	-	-	-	-	-	+	
FRACTION < 2μ (en %)								
Quartz	20	32	34	2	33	8	2	
Kaolinite	29	39	39	50	39	52	90	
Illite	32	15	13	13	14	17	5	
Smectite	16	11	10	33	11	19	1	
Goethite	3	3	4	2	3	4	2	

ME montée des eaux ; DE descente des eaux ; BE basses-eaux

Comparativement à la minéralogie des alluvions du fleuve Sénégal, les matières en suspension sont appauvries en quartz, feldspaths, illite et enrichies en kaolinite et goethite.

c) Reconstitution de la minéralogie des MES à partir de leur composition chimique

La composition minéralogique des MES est peu étudiée (ANGINO & *al.*, 1974 ; GAC, 1980 ; BRADLEY, 1982 ; GAC & KANE, 1986a ; KATTAN, 1989). Une méthode de reconstitution de la distribution des espèces minéralogiques à partir de la composition chimique des matières en suspension est proposée. C'est une variante de la méthode utilisée par GAC & KANE (1986a) et ORANGE (1986). La différence fondamentale consiste à distribuer le potassium entre une illite et une smectite au *pro rata* des proportions mesurées sur les enregistrements RX de la fraction fine (MAZALTARIM, 1989), alors que ces premiers attribuaient tout le potassium à une illite. Ainsi, après avoir retiré la faible part d'oxydes d'aluminium et de fer revenant à la matière amorphe dont le taux est fixé à 1% (50% Al_2O_3 et 50% Fe_2O_3), une illite et une smectite sont bâties simultanément. L'illite choisie est du type de celle trouvée dans les grès des Vosges (MOSSER & *al.*, 1971) : SiO_2 (52,6%), Al_2O_3 (25,2%), Fe_2O_3 (3,5%), TiO_2 (0,68%), Mn_2O_4 (0,09%), K_2O (8,17%), MgO (2,7%), CaO (0,5%), Na_2O (0,16%) et H_2O^- (5,82%). La smectite est une montmorillonite pure des Vosges (TARDY, 1969) : SiO_2 (54%), Al_2O_3 (25,6%), Fe_2O_3 (5,8%), TiO_2 (0,26%), Mn_2O_4 (0,05%), K_2O (1,64%), MgO (2,2%), CaO (1,2%), Na_2O (0,6%) et H_2O^- (9,47%). Le magnésium, le calcium ou le sodium peuvent être des facteurs limitant ; dans ce cas, le potassium restant sera attribué à la matière organique. Après déduction des fractions d'oxydes liées à ces deux minéraux, la quantité restante de magnésium est utilisée pour fabriquer une vermiculite classique (MILLOT, 1964) : SiO_2 (30,2%), Al_2O_3 (15,4%), Fe_2O_3 (24,2%), MgO (12,1%) et H_2O^- (18,1%). Ensuite, on forme successivement de l'albite avec le sodium, de l'anorthite avec le calcium, de la goethite avec le fer, de la kaolinite avec l'aluminium et du quartz avec le silicium. Le résidu de potassium et de phosphore est ajouté au résidu d'eau de constitution pour former de la matière organique. Il reste une part d'oxydes de titane et de manganèse non utilisée inférieure à 1%, elle peut être négligée car ces éléments sont associés à des minéraux déjà formés.

Tableau 58 : Reconstitution minéralogique des MES du fleuve Sénégal à Bakel (de 1980 à 1987), de la Falémé, du Milo et de la Gambie à Kédougou

Minéral	Alluvions Sénégal	Sénégal à		Bakel BE	Moyenne	Falémé à K1d1ra	Milo à Kankan	Gambie à Kédougou
		ME	DE					
ECHANTILLON TOTAL	n=4	n=47	n=30	n=6	n=83	n=13	n=5	n=13
Amorphes	1	1	1	1	1	1	1	1
Illite	19,4	8,9	8,3	12,5	8,6	17,2	9,3	9,2
Smectite	8,2	5,9	4,8	17,0	5,4	16,9	0,3	4,5
Vermiculite	0,3	5,1	4,5	4,1	4,8	2,3	1,1	4,7
Albite	3,0	1,9	2,0	0,4	1,9	1,6	1,2	0,5
Anorthite	0,8	0,1	0,2	0,1	0,1	1,9	0,2	0
Goethite	3,9	6,4	6,3	6,1	6,4	6,5	8,9	7,9
Kaolinite	8,6	36,7	35,6	37,7	36,1	26,0	61,5	36,1
Quartz	52,4	29,5	32,6	17,1	31,1	20,0	9,2	26,0
M.organique	2,4	4,5	4,7	4,0	4,6	6,6	7,3	10,1

Par cette méthode, on retrouve la distribution annoncée par les RX (tableau 58). D'autre part, le taux de matière organique ainsi estimé est en accord avec les mesures de COP ; il semble que la matière organique représente 3 à 4 fois le taux de COP du Sénégal, 2 à 3 fois celui de la Falémé et du Milo et 2 fois celui de la Gambie. C'est dans les MES du Sénégal que le quartz est le mieux représenté ; il faut noter également l'importance de la kaolinite dans les MES du Milo, l'importance de l'illite et smectite dans les MES de la Falémé, l'importance de la matière organique dans les MES de la Gambie (fig.49). La comparaison avec la minéralogie des alluvions du Sénégal montre que celles-ci sont largement plus riches en quartz et illite, et appauvries en kaolinite, goethite et matière organique (fig.50). Kaolinite, vermiculite, goethite, feldspath et matière organique sont évacués en proportion constante au cours de la crue (époque où le courant est le plus fort) et l'ensemble illite-smectite en période de *basses-eaux* (fig.50).

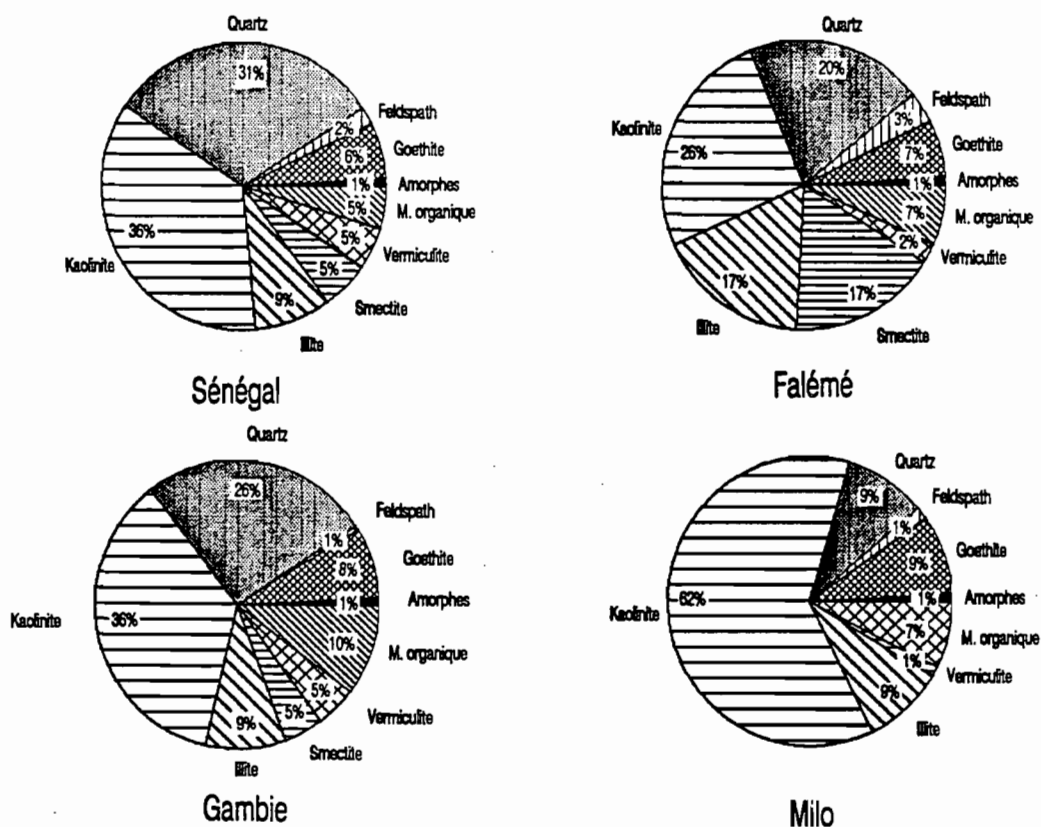


Fig. 49 : Reconstitution de la minéralogie des MES du Sénégal à Bakel, de la Falémé à Kidira, de la Gambie à Kédougou et du Milo à Kankan.

Alluvion du Sénégal

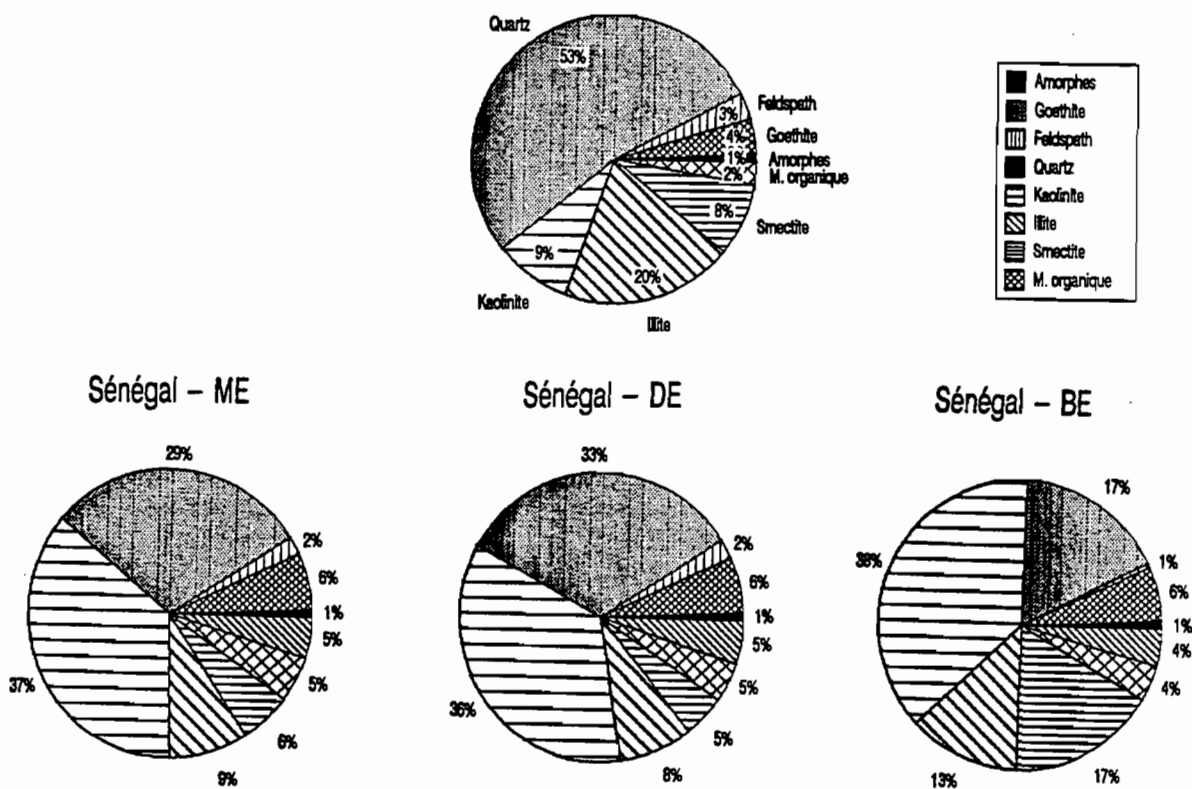


Fig. 50 : Reconstitution de la minéralogie des alluvions du Sénégal à Bakel et de ses MES au cours de la crue.

II - LES FLUX DE MATIERES DANS LES BASSINS DU SENEGAL, DE LA FALEME, DE LA GAMBIE ET DU NIGER

A - DESCRIPTION DES FLUX DE MATIERES DU SENEGAL A BAKEL

Le débit d'un cours d'eau est sa variable descriptive la plus facilement accessible. Il est donc intéressant d'avoir une méthode qui permette d'estimer les flux de matières à partir de la seule connaissance du volume d'eau écoulée à un exutoire donné. Cet objectif peut être atteint en deux étapes. Dans un premier temps, il s'agit de comprendre l'acquisition de la charge dissoute et particulaire par les eaux de surface, et ensuite, de quantifier le flux de matières exportées. Ainsi, pour chaque variable de qualité testée, la meilleure relation débit-concentration est recherchée.

1. Evolution des concentrations au cours de la crue et origine des éléments dissous

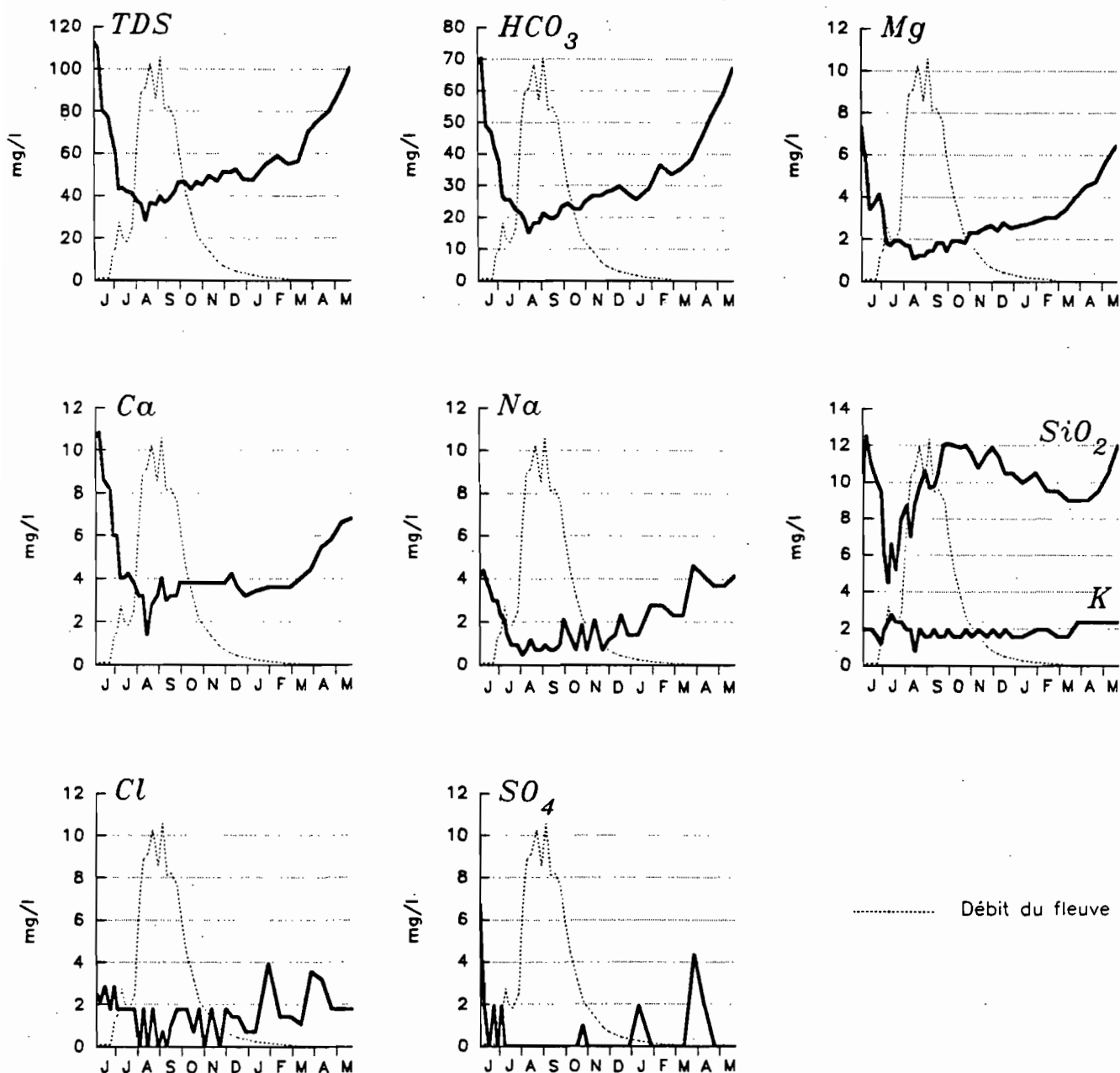


Fig. 51 : Variation annuelle des concentrations journalières des espèces dissoutes du fleuve Sénégal à Bakel au cours de l'année 1981.

a) Variations des concentrations au cours de l'année

Les neuf années de suivi de la chimie des eaux du fleuve Sénégal montrent que l'évolution journalière des concentrations en éléments dissous est progressive au cours de l'année, à l'exception des sulfates et des chlorures qui proviennent de pollutions domestiques et atmosphériques. La figure 51 représente l'évolution journalière des différentes espèces dissoutes au cours de l'année 1981, année ayant eu le plus grand nombre de prélèvements (chapitre V). Les bicarbonates, le magnésium, le calcium, le sodium et la charge dissoute totale TDS ont des comportements analogues : il y a augmentation régulière des concentrations jusqu'à l'arrivée de l'onde de crue qui a pour effet de diluer les eaux. Le potassium est un élément ayant une concentration relativement constante et les quelques variations enregistrées sont corrélées à celles de la silice. Pour ces deux espèces chimiques, l'arrivée de l'onde de crue se traduit par une augmentation de la concentration puis celle-ci chute à son minimum au milieu de la période des hautes-eaux. Enfin, les évolutions en dents-de-scie des chlorures et sulfates confirment leur apport uniquement par voie atmosphérique ou domestique. Ainsi, les fluctuations saisonnières des concentrations sont dues principalement aux variations des débits et dans une moindre mesure aux processus biogéochimiques internes au cours d'eau, qui suivent des cycles saisonniers superposables aux cycles hydrologiques.

La faible variabilité des concentrations pour la plupart des espèces chimiques autorise à calculer les flux de matières par une méthode stochastique, à la seule condition de faire des prélèvements hebdomadaires en début de crue, un prélèvement mensuel étant suffisant pour les autres mois de l'année.

b) Les relations débit-concentration des éléments dissous

A l'exception des sulfates, du potassium et de la silice, la meilleure corrélation existe entre le log de la concentration et le log du débit, ce qui signifie que la concentration est toujours une fonction puissance du débit (tableau 59).

Tableau 59 : Relations débit-concentration des variables de qualité des eaux du Sénégal à Bakel

Variables	Relations	r	p	n
TDS	$C = 86,38 \cdot Q^{-106}$	-0,84	0,01%	221
HCO ₃	$C = 54,11 \cdot Q^{-126}$	-0,83	0,01%	221
Mg	$C = 4,68 \cdot Q^{-144}$	-0,83	0,01%	221
Na	$C = 4,43 \cdot Q^{-147}$	-0,73	0,01%	221
Ca	$C = 6,53 \cdot Q^{-096}$	-0,67	0,01%	221
Cl	$C = 3,35 \cdot Q^{-123}$	-0,50	0,01%	221
MES	$C = 27,8 \cdot Q^{-278}$	0,46	0,01%	221
K	$C = 3,36 - .22 \text{ Log}Q$	-0,38	0,01%	221
SO ₄	$C = 2,73 - .14 \text{ Log}Q$	-0,36	0,1%	80
SiO ₂	-	0,24	0,04%	221

C en mg/l ; Q en m³/s ; r : coefficient de corrélation ;
p : niveau de signification ; n : nombre d'observations

Pour la charge totale dissoute, les bicarbonates, le magnésium, le sodium, et dans une moindre mesure pour le calcium et les chlorures, la dispersion des points observés autour de la relation calculée est faible (fig.52) ; cette estimation est alors hautement significative. En ce qui concerne le calcium, les quelques points largement au-dessus de la courbe résultent de pollutions : l'analogie avec les pollutions en sulfates laisse penser à des apports en gypse provenant de l'activité humaine du bâtiment. Ces cinq espèces chimiques et la charge totale dissoute sont diluées par le débit.

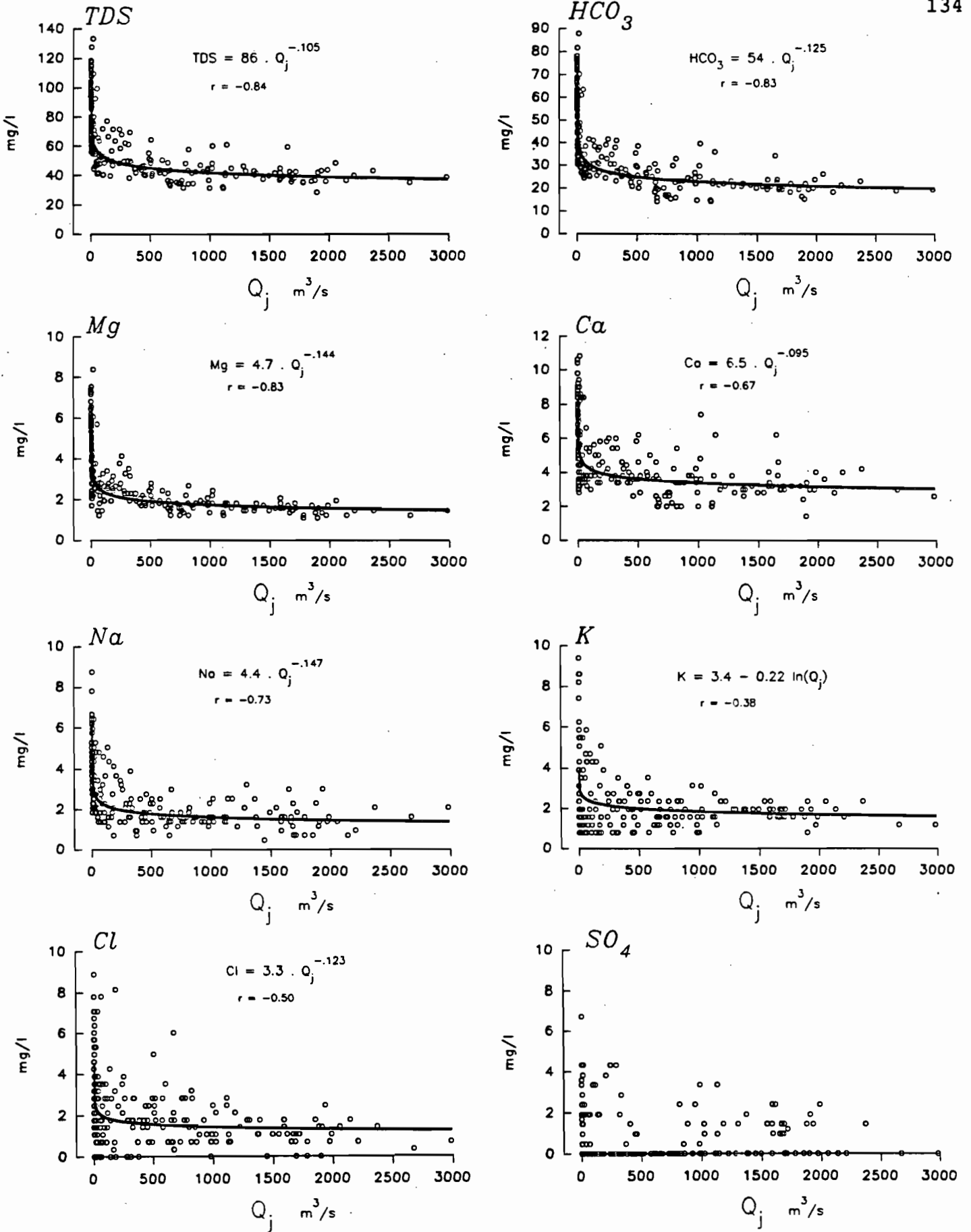


Fig. 52 : Relations débit-concentration des différentes espèces chimiques dissoutes des eaux du fleuve Sénégal à Bakel.

La concentration en potassium est une fonction log du débit, ce qui correspond à une dilution moins rapide que les éléments précédents. Le nuage de points diffus pour les débits inférieurs à 1000 m³/s (fig.52) fait que le coefficient de corrélation est faible mais son niveau de signification est encore de 0,01% (tableau 59). La décomposition de l'année en trois périodes permet d'améliorer nettement ce modèle ; la corrélation entre valeurs prédites et valeurs observées passe de 0,38 à 0,62 (fig.53). Il y a dilution en période de *hautes-eaux* puis à partir de septembre, alors que le débit diminue, la concentration diminue également jusqu'en février, au coeur de la saison sèche. Entre mars et le début de la crue en juin, il y a concentration des eaux par évaporation.

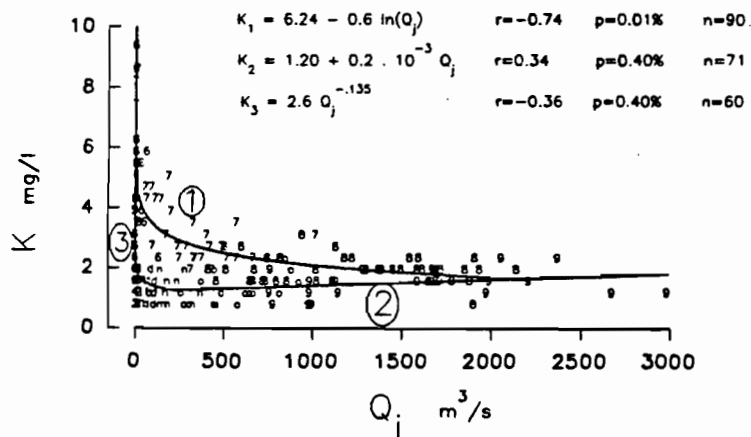


Fig. 53 : Estimation des teneurs en potassium des eaux du fleuve Sénégal à Bakel en fonction du débit journalier.

En ce qui concerne les sulfates, leur apport par pollution anthropique et la faible sensibilité de la méthode analytique utilisée font que cette espèce chimique ne peut donner une bonne information sur l'érosion et l'altération régnant dans le paysage étudié. Leur étude ne montre donc ici que peu d'intérêt.

Finalement, toutes les espèces chimiques dissoutes se comportent en première approximation comme si la contribution des eaux de ruissellement aux apports dissous était négligeable.

c) Le cas particulier de la silice dissoute

L'évolution particulière de la concentration en silice dissoute a déjà été soulignée ; aucune relation satisfaisante n'existe entre cette espèce chimique et le débit. Cette particularité du comportement de la silice dissoute est bien connue et beaucoup d'études y ont été consacrées aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire mais les résultats sont assez contradictoires et les opinions très divergentes (MONNET, 1972 ; SHOLKOVITZ, 1976 ; ASTON, 1983 ; WOLLAST & MACKENZIE, 1983 ; GAC & KANE, 1986b). La silice dissoute provient en majeure partie de l'altération des silicates (MACKENZIE & GARRELS, 1966 ; ERHART, 1973 ; MEYBECK, 1984) et sa chute de concentration juste avant l'arrivée de l'onde de crue est souvent attribuée à une prolifération de diatomées. Cependant, une étude menée à 300 km en aval de Bakel en 1988 n'a pas montré de variations significatives du plancton au cours de l'année hydrologique en fonction de la silice dissoute (CECCHI, 1989) : en toute saison, on observe un peuplement complexe formé surtout de cyanophycées filamenteuses (*Anabbaena sp.*), de diatomées pennées (*Synedra sp.* et *Navieula sp.*) et centriques (*Melosia sp.*). Enfin, l'augmentation de la concentration en silice dissoute au cours de la période des *hautes-eaux* peut correspondre aux apports dissous de surface dûs au développement important de la végétation (BARTOLI & SOUCHIER, 1978).

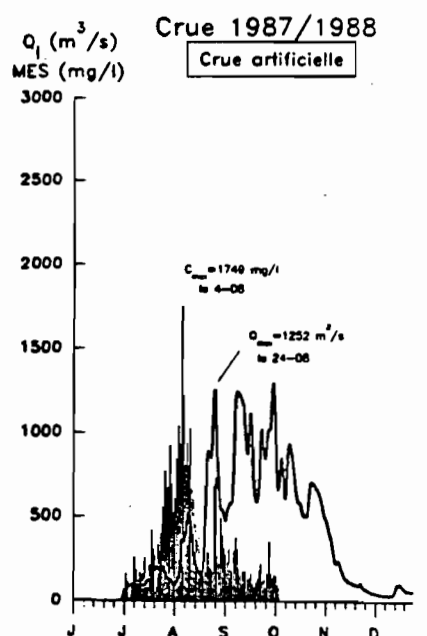
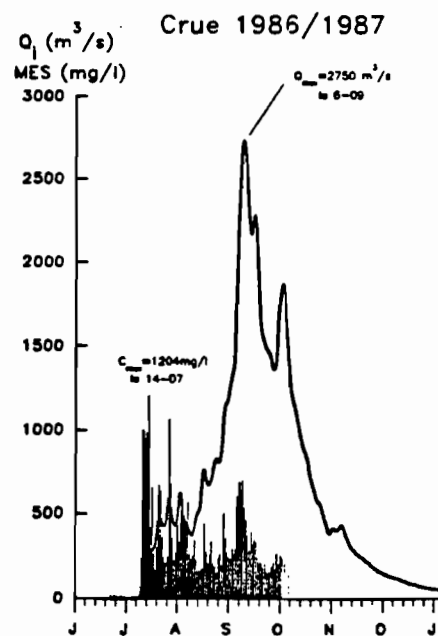
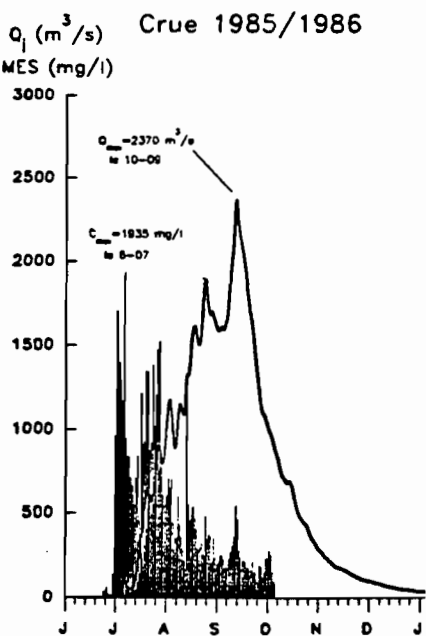
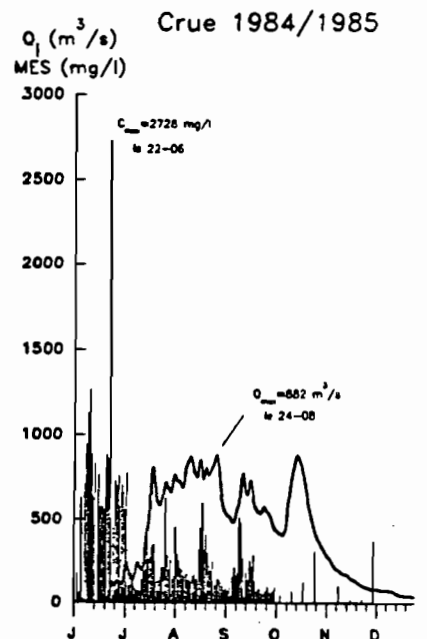
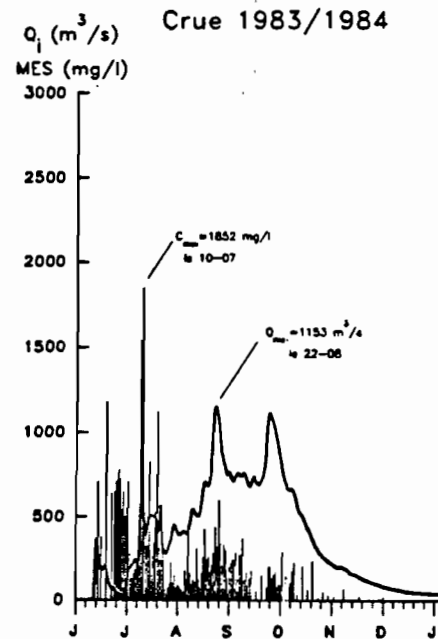
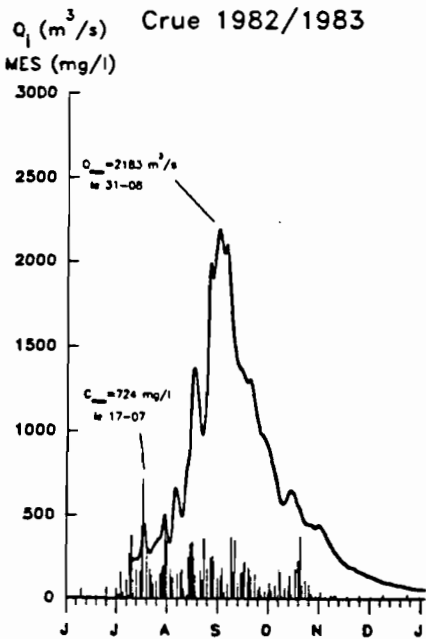
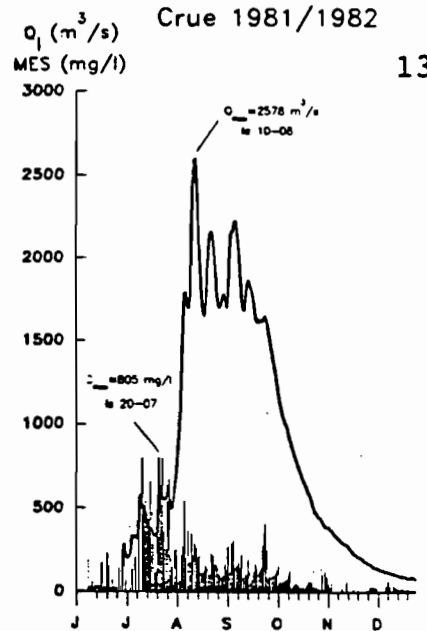
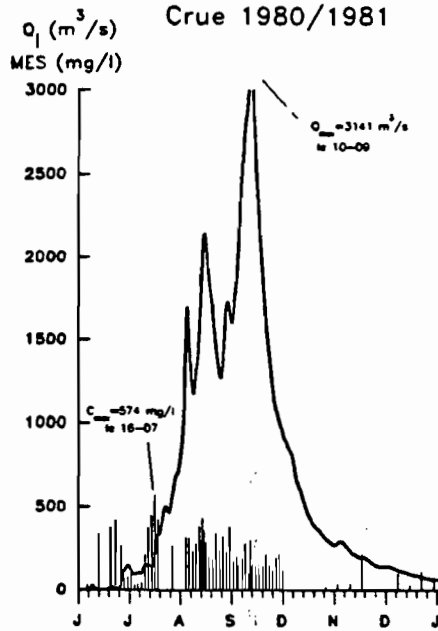
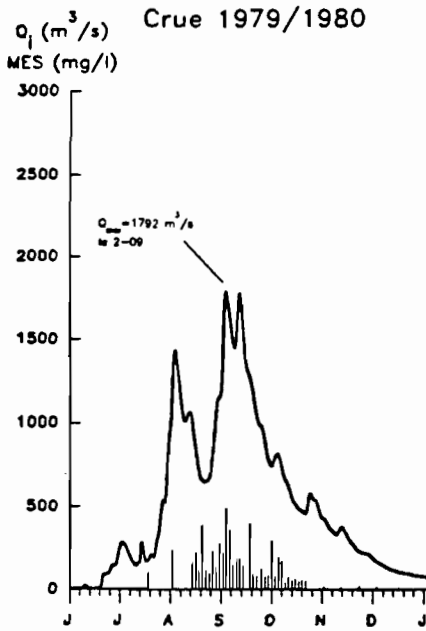


Fig. 54 : Evolution journalière des MES du fleuve Sénégal à Bakel de 1979 à 1988.

- la première onde de crue est la plus érosive, les sols après une longue saison sèche sont sans végétation et sont exposés à la battance des premières averses ;

- la troisième remarque concerne la grande variabilité des turbidités au début des écoulements et le temps nécessaire pour qu'elles deviennent significatives ; c'est là que se situe la difficulté majeure pour appréhender les mécanismes qui déterminent l'acquisition de la charge solide par les fleuves des régions tropicales.

b) Recherche de corrélations

Tout ceci fait que les relations entre MES et débit sont complexes. Cependant, les remarques précédentes montrent que l'évolution des concentrations en MES peut être liée à celle du débit en dehors du début de crue, époque à laquelle les eaux ont une turbidité difficilement prévisible et largement indépendante de celui-ci. On a alors :

$$\text{MES} = 27,8 \cdot \frac{Q^{0,276}}{\text{m}^3/\text{s}} \quad (r=0,76 ; p=0,01\% ; n=483).$$

Cependant, l'analyse en composantes principales a montré que le potassium avait un comportement intermédiaire entre les MES et les autres espèces dissoutes. En effet, durant les premiers mois de la crue (juin, juillet et août), les MES sont corrélées au potassium de la manière suivante :

$$\text{MES} = - 114 + 163 \cdot K \quad (r=0,72 ; p=0,01\% ; n=103).$$

Ainsi, lors des premiers écoulements de la crue, les fortes expulsions de MES peuvent être appréciées par la concentration en potassium dissous dans les eaux du fleuve. Ceci est dû au fait que les MES sont composées principalement d'argiles dans lesquelles le potassium est un élément facilement mobilisable du fait de sa position interfoliaire. Ce modèle peut être amélioré et étendu à l'année entière en introduisant la silice dissoute comme paramètre supplémentaire. L'analyse en composantes principales avait montré que ces trois éléments évoluaient de concert. La relation est alors :

$$\text{MES} = 363 + 127 \cdot K - 47 \cdot \text{SiO}_2 \quad (r=0,80 ; p=0,01\% ; n=179).$$

Le niveau de signification est de 0,01% pour 179 observations, le coefficient de régression, hautement significatif, est de 0,80. Cette approche sous-estime encore certains pics de concentration qui sont apparus juste avant l'arrivée de l'onde de crue (fig.55).

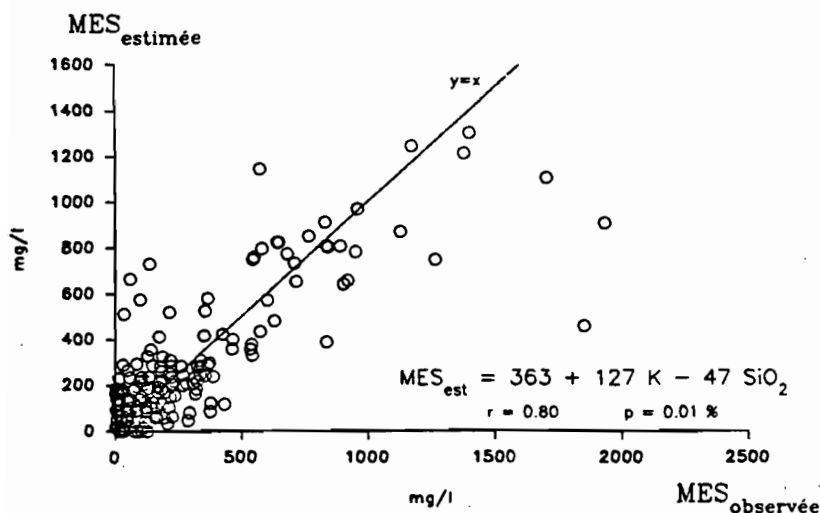


Fig. 55 : Estimation des MES du fleuve Sénégal à Bakel à partir du potassium et de la silice dissoute.

3. Calcul des flux de matières transportées par le Sénégal à Bakel

a) Calcul des concentrations moyennes mensuelles par une méthode stochastique

Les flux de chaque espèce chimique dissoute et des MES sont estimés à partir du calcul de la concentration mensuelle par la méthode stochastique n°1 du tableau 44 (chapitre V). Etant donné que le pas de temps des prélèvements n'est pas régulier (de journalier en août 1980 à hebdomadaire, voire même mensuel en mars 1983 pour les éléments dissous par exemple), la concentration moyenne mensuelle est obtenue en divisant la somme des tonnages journaliers des jours prélevés par la somme des débits des jours prélevés :

$$C_m = \frac{\sum_j C_j * Q_j}{\sum_j Q_j}$$

avec C_m = concentration moyenne mensuelle, Q_j = débit journalier, C_j = concentration instantanée mesurée du jour j .

b) Calcul des concentrations moyennes mensuelles par une méthode déterministe

Certains mois n'ont donné lieu à aucun prélèvement (chapitre V). Ainsi, il a été intéressant de tester une méthode d'estimation des flux de matières des eaux du fleuve Sénégal à partir de la seule connaissance du débit. Cette démarche déterministe est rendue possible par le grand nombre de prélèvements effectués, qui permet de couvrir toutes les gammes de débit. Les relations utilisées pour la charge dissoute totale, HCO_3 , Mg, Ca, Na, Cl et K sont celles décrites dans le paragraphe précédent ; les MES sont estimées à partir du débit et du potassium, et la silice à partir des MES et de $1/Q$.

c) Conclusion

La comparaison à l'échelle mensuelle des deux méthodes est très satisfaisante pour tous les éléments, y compris les MES, à l'exception des chlorures et de la silice. Finalement, la méthode déterministe a été retenue pour le calcul des flux de matières en lui attribuant les valeurs journalières observées des concentrations des différents éléments. Les concentrations moyennes mensuelles et annuelles sont déduites à partir de ces flux calculés.

B - LES FLUX DE MATIERES EN DOMAINE SAHELO-SOUDANO-GUINEEN

1. Présentation des flux de matières exportées par le Sénégal à Bakel

Le flux moyen annuel de matières exportées s'élève à $2,68.10^6$ tonnes, dont $0,418.10^6$ t en dissous et $2,26.10^6$ t en suspension (tableau 60). Si les flux dissous ont peu varié autour de cette valeur moyenne (de 305.10^3 à 555.10^3 t/an), les flux particuliers sont passés de 1370.10^3 t/an l'année la plus sèche à 4 millions de t/an l'année suivante, qui correspond à une reprise des écoulements après les deux années les plus sèches du siècle.

Tableau 60 : Flux dissous et particuliers (en 10^3 t/an) du Sénégal à Bakel de 1979 à 1987

Cycles	79/80	80/81	81/82	82/83	83/84	84/85	85/86	86/87	87/88	Moy.
F(TDS)	418	515	555	415	305	309	471	456	317	418
F(MES)	1850	2620	2380	1650	1650	1370	4000	3170	1630	2260
Q (m^3/s)	303	387	424	305	218	215	355	343	220	308

De ces neuf années de suivis, il ressort que les flux dissous sont parfaitement corrélés à l'hydrologie du fleuve au contraire des flux solides (fig.56) pour lesquels il est confirmé que la quantité de matières particulières transportées par le fleuve dépend non seulement du débit

de la crue considérée mais aussi du débit des crues précédentes. Ainsi les flux annuels de matières dissoutes transportés par le Sénégal à Bakel peuvent être estimés à partir du débit annuel du fleuve d'après la relation suivante (fig.57) :

$$F_{TDS} = 52,5 + 1,187 \cdot Q \quad (r=0,99)$$

$10^3 \text{ t/an} \qquad \qquad \qquad \text{m}^3/\text{s}$

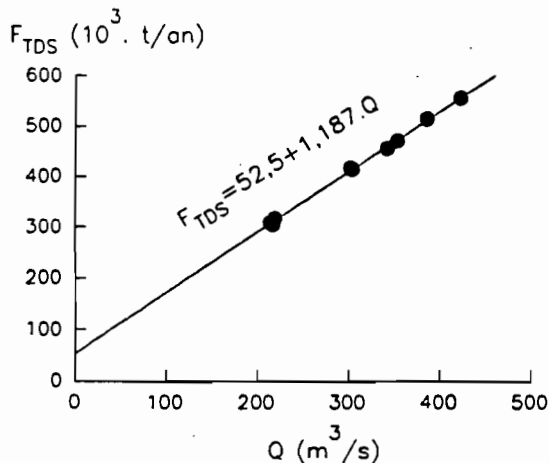


Fig. 57 : Estimation des flux annuels de matières dissoutes exportées en fonction du débit annuel du fleuve Sénégal à Bakel.

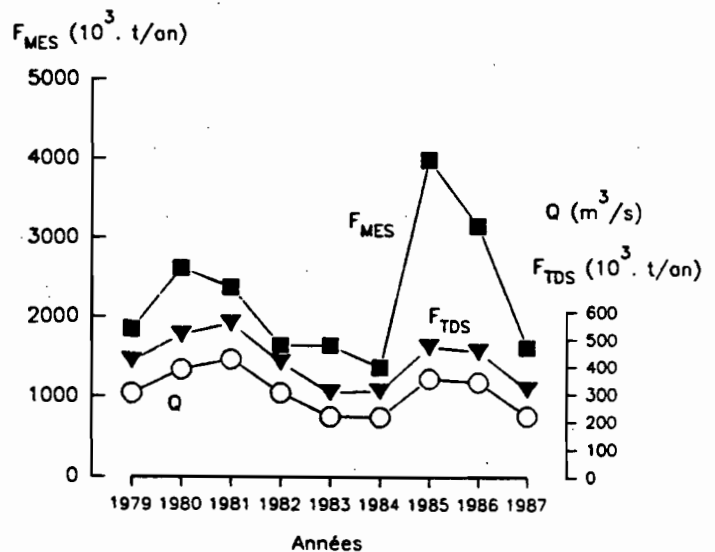


Fig. 56 : Evolution des flux annuels de matières solides et dissoutes du fleuve Sénégal à Bakel de 1979 à 1987.

Tableau 61 : Concentrations moyennes interannuelles des eaux du Sénégal à Bakel (en mg/l)

	Jn	Jt	At	Se	Oe	Ne	De	Jr	Fr	Ms	Al	Mi	IA
HCO ₃	46,5	26,2	22,7	<u>22,1</u>	24,2	28,0	31,5	34,3	38,2	43,9	49,9	54,7	23,6
Cl	2,9	1,7	1,4	<u>1,4</u>	1,5	1,7	2,0	2,1	2,3	2,7	3,1	3,4	1,5
SO ₄	2,2	1,8	1,6	<u>1,6</u>	1,7	1,9	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	1,6
Mg	4,0	2,0	1,7	<u>1,7</u>	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,7	4,3	4,8	1,8
Ca	5,8	3,8	3,4	<u>3,3</u>	3,6	4,0	4,3	4,6	5,0	5,6	6,1	6,6	3,5
Na	3,8	1,9	1,6	<u>1,5</u>	1,7	2,0	2,3	2,6	2,9	3,5	4,0	4,5	1,7
K	3,2	2,7	2,1	<u>1,5</u>	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	2,1	2,4	2,6	1,7
SiO ₂	8,3	<u>7,3</u>	8,1	8,5	8,8	<u>8,9</u>	<u>9,1</u>	<u>9,2</u>	<u>9,2</u>	9,3	9,5	10,1	8,4
TDS	81,4	46,9	41,7	<u>40,8</u>	44,0	49,5	54,7	58,9	64,3	72,4	80,7	87,0	43,0
MES	358	440	283	<u>206</u>	138	110	82	68	60	46	33	<u>33</u>	232

les minima sont soulignés

La répartition annuelle de ces flux de matières est, à l'image de celle des débits, saisonnière et invariable d'une année sur l'autre : 88% des flux annuels dissous et 95% des flux annuels en suspension sont exportés entre les mois de juillet et octobre. Comme pour les débits, le mois de septembre est le mois qui contribue le plus aux apports dissous, il représente 34% des apports dissous annuels. Par contre, pour les suspensions, le mois le plus abondant est août qui exporte 36% des flux solides annuels. Les concentrations mensuelles interannuelles montrent que mai est le mois où les eaux sont les plus concentrées pour tous les éléments dissous à l'exception du potassium qui est plus concentré en juin en même temps que les MES (tableau 61). En septembre, les eaux sont les plus diluées : la charge mensuelle totale dissoute passent de 87 mg/l en mai à 41 mg/l en septembre (fig.58) alors que la charge mensuelle en suspension va de 33 mg/l en fin de saison sèche à 440 mg/l en début de crue. Ce type d'évolution est une constante des eaux des fleuves de la zone tropicale sèche. En effet, on retrouve dans les trois domaines climatiques étudiés, la même répartition mensuelle des

flux et des teneurs en éléments dissous exportés (fig.58). La concentration en éléments dissous est toujours maximale en fin de saison sèche à cause de l'évaporation, et l'exportation de flux dissous est toujours maximale en septembre, mois durant lequel le débit des fleuves de ces régions est le plus fort.

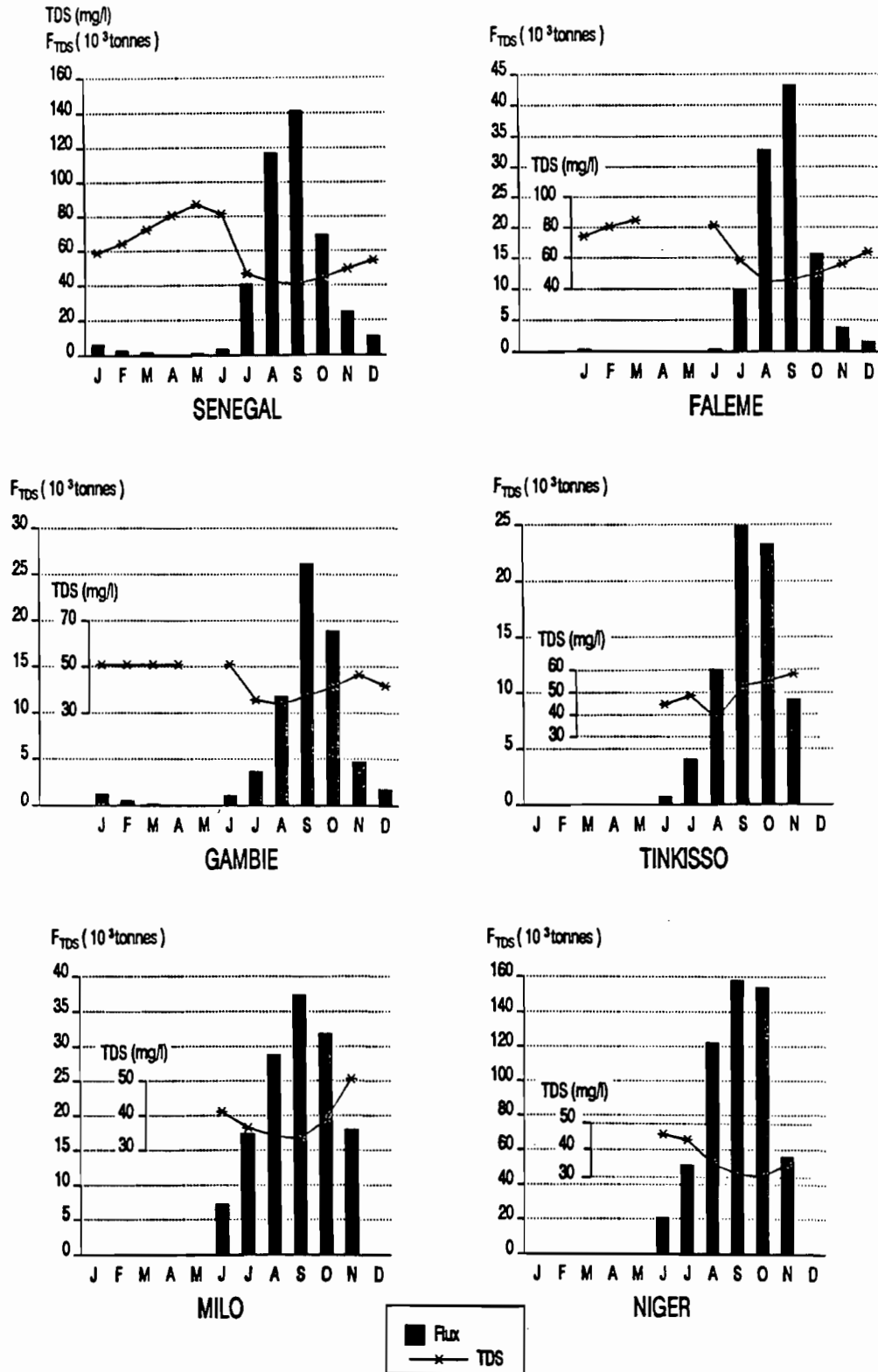


Fig. 58 : Variations mensuelles des tonnages dissous exportés et de la charge totale dissoute du Sénégal à Bakel, de la Falémé à Kidira, de la Gambie à Kédougou, du Tinkisso à Tinkisso, du Milo à Kankan et du Niger à Siguiri lors d'une année moyenne.

2. Tonnages exportés et qualité chimique des eaux

En raison du plus petit nombre d'observations, les flux de matières de la Falémé, de la Gambie et des trois cours d'eau du bassin du Niger ont été calculés par la méthode stochastique. Cependant, on peut noter que les types de relation débit-concentration sur la Falémé à Kidira sont les mêmes qu'à Bakel, et par contre, que le fonctionnement semble plus complexe sur la Gambie à Kédougou.

L'importance relative des transports dissous et particulaires peut être définie en fonction du domaine climatique. Les fleuves du domaine sahélien ont des apports particuliers largement supérieurs aux apports dissous (plus de 80%) ; les fleuves du domaine soudanien ont des apports particuliers légèrement supérieurs aux apports dissous (de l'ordre de 60%), et enfin les fleuves du domaine guinéen ont des apports particuliers légèrement inférieurs aux apports dissous (de l'ordre de 40%) (tableau 62).

Tableau 62 : Tonnages moyens annuels exportés par les eaux fluviales

Climat	sahélien		soudanien		guinéen	
	SENEGAL	FALEME	GAMBIE	TINKISSO	MILO	NIGER
FLUX TOTAL .en 10 ³ t	2680	590	120	130	360	1400
FLUX DISSOUS .en 10 ³ t	418	108	70	80	156	589
.en %	16%	18%	58%	61%	43%	42%
FLUX SOLIDES .en 10 ³ t	2260	479	48	51	205	806
.en %	84%	82%	42%	39%	57%	58%

En terme de concentration, la Falémé possède les eaux les plus chargées avec 60 mg/l et le Niger les eaux les plus diluées avec 33 mg/l ; les eaux de la Falémé sont caractérisées par de fortes teneurs en calcium (comme pour les MES), potassium, chlorures et bicarbonates, et les eaux du Tinkisso sont les plus concentrées en magnésium, sodium et silice (tableau 63). Le Sénégal et la Falémé ont une charge en suspension nettement plus élevée que celle des autres cours d'eau, respectivement 232 mg/l et 267 mg/l. La Gambie et le Tinkisso, exutoires Nord et Est du Fouta Djallon, ont une charge solide identique, qui est la plus faible des cours d'eau étudiés (30 mg/l). Enfin, à l'exception des eaux de la Falémé, ces fleuves véhiculent des eaux peu minéralisées comparativement à la moyenne africaine (tableau 63). Par ailleurs, à Kankan, deux méthodes de mesures des MES ont été utilisées (chapitre V) ; elles donnent des résultats analogues, 45 mg/l à partir des prélèvements de 20 litres après centrifugation et 51 mg/l à partir des prélèvements de un litre après pesée des filtres.

Tableau 63 : Concentrations moyennes annuelles des eaux fluviales (en mg/l)

Eléments	SENEGAL		FALEME		GAMBIE		TINKISSO	MILO	NIGER	AFRIQUE
	IA	1987	IA	1987	IA	1987	1987	1987	1987	(1)
HCO ₃	23,6	25,3	32,3	-	21,4	21,8	28,0	16,9	16,5	26,7
Cl	1,5	1,6	3,6	-	0,8	0,8	0,4	0,8	0,8	3,3
SO ₄	1,6	1,8	1,2	-	0	0	0	0	0,1	3,5
Mg	1,8	2,0	2,5	-	1,5	1,5	2,7	0,9	1,3	2,1
Ca	3,5	3,7	5,6	-	3,6	3,7	2,3	1,9	1,8	5,2
Na	1,7	1,8	2,8	-	1,3	1,3	2,9	2,5	2,0	3,8
K	1,7	1,7	2,3	-	1,0	1,0	0,9	1,2	1,1	1,4
SiO ₂	8,4	8,4	9,7	-	11,1	11,3	13,5	12,9	9,8	12,1
TDS	43,0	45,6	60,1	-	40,7	41,3	50,8	37,1	33,3	58,1
MES	232	234	267	-	28	32	-	45	-	-
MES _r	-	-	-	-	-	-	32	51	46	-
Q _m	308	220	57	-	54	59	50	133	560	-

TDS : charge dissoute totale ; MES : matières en suspension ; MES_r : matières en suspension par filtration ; Q_m : débit moyen annuel en m³/s ; (1) : MEYBECK, 1979

La figure 59 représente l'évolution des concentrations de chaque élément majeur dissous des eaux des six bassins versants étudiés en fonction de la charge totale en solution. Plusieurs points importants méritent d'être soulignés :

- la concentration des eaux est surtout due aux teneurs en bicarbonates et silice ;
- le calcium et la silice évoluent en sens inverse du fait de leur dualité lithologique, le calcium résultant essentiellement de la dissolution des roches calcaires et la silice de l'hydrolyse des minéraux silicatés des roches granito-gneissiques et gréseuses (GARRELS & MACKENZIE, 1971) ;
- le potassium est l'élément le plus constant, caractéristique déjà soulignée par MEYBECK (1984) sur les eaux des pays tempérés.

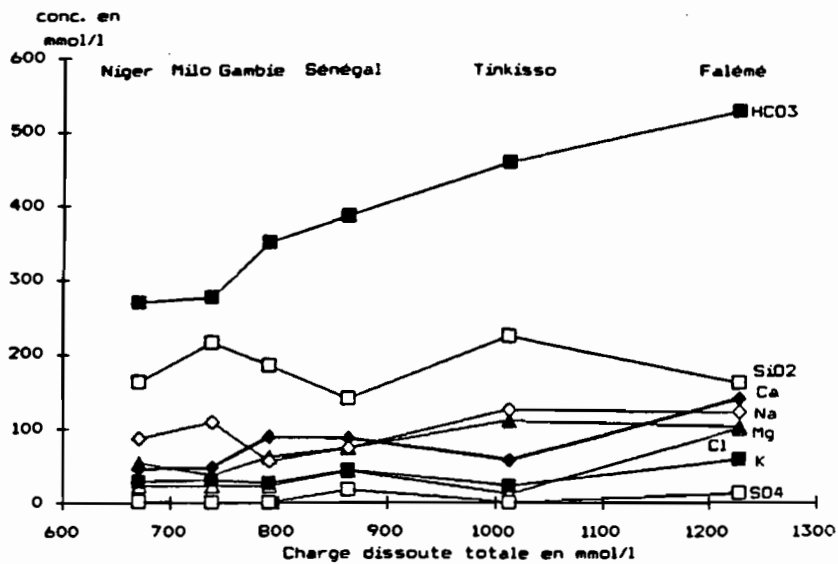


Fig. 59 : Evolution de la concentration des éléments en solution en fonction de la minéralisation totale des six bassins versants étudiés.

3. Les flux de MES de la Gambie

Les turbidités des eaux de la Gambie à Kédougou ont été mesurées en 1974 par LERIQUE (1975), en 1986 par BAMBA (1987) et en 1987 pour cette étude. L'évolution des concentrations au cours des deux premières crues observées est tout à fait dissemblable.

Lors du cycle hydrologique 1974/1975, les premiers écoulements ont eu lieu au cours de la première semaine de juillet. Les charges solides, qui oscillaient fin juin entre 20 et 30 mg/l, se sont rapidement élevées en juillet pour atteindre la valeur maximale de 298 mg/l le 16/07. Les concentrations se sont ensuite stabilisées entre 50 et 100 mg/l, à l'exception des deux événements du 21/08 et du 5/10 où des turbidités de 168 mg/l et de 163 mg/l ont été enregistrées (fig.60). Lors du cycle hydrologique 1986/1987, les variations de la charge solide ont été suivies quotidiennement du 12/06 au 30/09/86. Cette crue présente deux particularités. Contrairement aux observations habituelles, les plus fortes turbidités n'ont pas été observées lors des premiers écoulements. La concentration maximale, de 81 mg/l seulement, a été mesurée le 12/09, huit jours après le passage de la pointe de crue, et des maxima secondaires ont été notés à chaque recrudescence des débits en août et septembre (fig.60). Le deuxième fait qui mérite d'être souligné réside dans les très faibles concentrations mesurées. Les premiers flots de juillet fournissent des charges solides invariables entre 15 et 20 mg/l, et les multiples reprises de débits en août et septembre ne se sont traduites que par des concentrations de l'ordre de 30 à 40 mg/l. En 1987, les suspensions n'ont été mesurées qu'à partir de la mi-août. La

concentration maximale enregistrée est de 98 mg/l alors que pour le même mois en 1986 elle avait été de 38 mg/l. Cependant, pour le mois de septembre, les concentrations mesurées lors de ces deux dernières crues sont analogues.

Au stade de nos observations, le caractère singulier de la crue 86/87 paraît difficilement explicable. Aucun argument ne peut venir étayer l'hypothèse d'un ralentissement des processus d'érosion sur les parties amont du bassin.

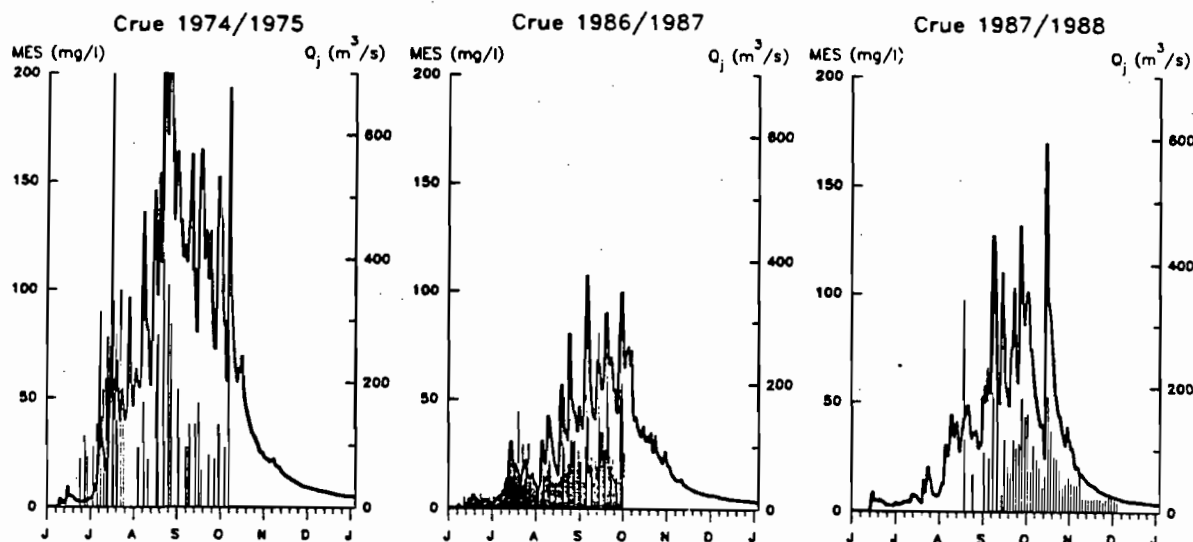


Fig. 60 : Evolution de la charge en suspension et des débits de la Gambie à Kédougou en 1974, 1986 et 1987.

C - ALTERATION CHIMIQUE ET EROSION MECANIQUE EN DOMAINE SAHELO-SOUDANO-GUINEEN

En l'absence de roches carbonatées dans le soubassement géologique du bassin et en raison de l'éloignement des océans, l'*altération chimique spécifique* est calculée à partir de la somme cations+silice présents dans les eaux de surface. En effet, les bicarbonates, chlorures et sulfates, qui ne transitent qu'à l'état soluble sont pour l'essentiel d'origine externe au bassin ; le soutirage chimique qui affecte le manteau d'altération depuis la surface jusqu'à la roche saine se limite donc aux seuls cations et à la silice (TARDY & al., 1973 ; GAC, 1980). L'*érosion mécanique spécifique* est directement évalué à partir du flux total annuel de MES.

1. Evolution de l'érosion mécanique et de l'altération chimique sur le bassin du Sénégal de 1979 à 1987

Entre 1979 et 1987, sur l'ensemble du bassin versant amont du Sénégal, l'érosion mécanique spécifique est passée de 6,3 t/km²/an en 84/85 à 18,4 t/km²/an le cycle suivant, en 85/86 (tableau 64). Comme nous l'avons déjà vu, ces deux cycles correspondent à des situations hydrologiques particulières. Le cycle 84/85 est le cycle le plus sec ; par contre, le cycle 85/86 est un cycle humide faisant suite à trois années sèches. Il est remarquable également de constater que l'année la plus humide (cycle 81/82) n'a un taux d'érosion mécanique que de 10,9 t/km²/an ; ce faible taux est attribuable au fait que ce cycle suit un cycle également humide. Ainsi, l'érosion mécanique n'est pas seulement tributaire de l'hydrologie de la crue considérée mais aussi de l'hydrologie de la crue précédente. En année moyenne, cette érosion mécanique spécifique est de l'ordre de 10 t/km²/an.

Contrairement à l'érosion mécanique, l'altération chimique spécifique varie peu d'une année sur l'autre (ORANGE & GAC, 1987). Ses fluctuations, comme celles des flux dissous (fig.56), suivent parfaitement celles du débit (tableau 64). Sur la période 1979-87, l'altération

chimique spécifique va de 0,5 t/km²/an l'année la plus sèche à 1 t/km²/an l'année la plus humide, elle est en moyenne de 0,8 t/km²/an.

Tableau 64 : *Erosion mécanique spécifique (E_m), altération chimique spécifique (E_c) (en t/km²/an) du Sénégal à Bakel*

Cycles	79/80	80/81	81/82	82/83	83/84	84/85	85/86	86/87	87/88	Moy.
Q (m ³ /s)	303	387	424	305	218	215	355	343	220	308
Em	8,5	12,0	10,9	7,5	7,5	6,3	18,4	14,5	7,5	10,4
Ec	0,72	0,92	0,99	0,72	0,53	0,53	0,82	0,79	0,56	0,76

2. Altération chimique et érosion mécanique par domaine climatique : importance de l'érosion mécanique sur le plateau Mandingue

Bien sûr, en terme de flux spécifiques (tableau 65), on retrouve sur l'ensemble des six cours d'eau étudiés, les trois regroupements fonction du domaine climatique : la Gambie et le Tinkisso ont un taux d'exportation de matières dissoutes supérieur au taux d'exportation de suspensions ; au contraire, la Falémé et le Sénégal ont un taux d'exportation de suspensions largement supérieur au taux d'exportation d'éléments dissous, et le Milo et le Niger montrent une situation intermédiaire. En flux spécifique total (dissous et particulaire), le Milo a largement le plus fort taux d'exportation de matières ; on trouve ensuite par ordre décroissant, le Niger, le Tinkisso, la Falémé, la Gambie et le Sénégal. Enfin, il faut souligner les faibles flux spécifiques des différents éléments dissous transportés par le Sénégal et la Falémé par rapport aux autres fleuves étudiés, ce qui traduit la faiblesse de l'altération chimique régnant dans les bassins versants de ces deux fleuves sahéliens.

Tableau 65 : *Flux annuels spécifiques de matières exportés, altération chimique spécifique (E_c) et érosion mécanique spécifique (E_m) (en t/km²/an)*

Eléments	SENEGAL		FALEME		GAMBIE		TINKISSO	MILO	NIGER
	IA	1987	IA	1987	IA	1987	1987	1987	1987
HCO ₃	1,05	0,81	2,01	-	4,92	5,42	6,93	7,42	4,30
Cl	0,07	0,05	0,23	-	0,17	0,20	0,11	0,37	0,20
SO ₄	0,07	0,06	0,07	-	-	-	-	-	-
Mg	0,08	0,06	0,15	-	0,34	0,38	0,66	0,39	0,33
Ca	0,16	0,12	0,35	-	0,82	0,91	0,58	0,84	0,46
Na	0,07	0,06	0,17	-	0,30	0,33	0,72	1,08	0,52
K	0,08	0,05	0,14	-	0,22	0,25	0,23	0,52	0,29
SiO ₂	0,37	0,27	0,61	-	2,55	2,80	3,33	5,65	2,57
TDS	1,92	1,46	3,73	-	9,33	10,3	12,55	16,28	8,71
E _c	0,76	0,56	1,42	-	4,23	4,67	5,52	8,48	4,17
E _m	10,36	7,48	16,57	-	6,40	7,92	8,02	21,32	11,93
Q _a	1,41	1,01	1,97	-	7,27	7,88	7,83	13,91	8,29
Superficie	218 000		28 900		7 500		6 400	9 600	67 600

TDS : charge dissoute totale ; Q_a : débit spécifique en l/s/km² ; superficie en km²

L'altération chimique spécifique passe de 8,5 t/km²/an pour le Milo à 5,5 t/km²/an pour le Tinkisso, à 4,2 t/km²/an pour le Niger et la Gambie, à 1,4 t/km²/an pour la Falémé et à seulement 0,8 t/km²/an pour le Sénégal (tableau 65). Il apparaît donc qu'elle décroît lorsqu'on passe des bassins plus arrosés et plus accidentés, aux bassins plus secs et aux reliefs moins accusés.

Cet agencement n'est pas conservé pour l'érosion mécanique car un troisième facteur intervient : il s'agit de la compétence des sols dont la nature est dépendante de la zone climatique (chapitre II). A l'exception du Milo dont le fort taux d'érosion mécanique (21,3 t/km²/an) est due à l'importance de la lame d'eau précipitée sur ce bassin versant semi-montagneux, la présence du plateau Mandingue sur le cours moyen des autres rivières est le facteur explicatif du taux d'érosion mécanique. En effet, le plateau Mandingue, situé en zone soudanienne, est constitué de sols ferrugineux tropicaux très sensibles à l'érosion mécanique en ravines et rigoles (ROOSE & SARRAILH, 1989). Par contre, en domaine guinéen, les sols ferrallitiques sont beaucoup plus résistants. Ainsi sur les bassins de la Gambie et du Tinkisso, situés entièrement en domaine guinéen, l'érosion mécanique y est la plus faible, respectivement 6,4 t/km²/an et 8,0 t/km²/an. Par contre, sur les bassins versants du Sénégal, du Niger et de la Falémé, dont les exutoires étudiés sont situés à l'aval du plateau Mandingue, l'érosion mécanique est plus importante (respectivement 10,4 t/km²/an, 11,9 t/km²/an et 16,6 t/km²/an) (tableau 65).

III - ROLE DES NAPPES ET IMPORTANCE DU RUISSELLEMENT

A - ACQUISITION DE LA CHARGE SOLIDE EN DOMAINE SAHELO-SUDANAIEN : CAS DU FLEUVE SENEGAL

1. Pulsations journalières des concentrations en MES

Les trois grandes phases déjà décrites (*érosion précoce*, *érosion et transport*, *alluvionnement*) correspondent à des à-coups journaliers des teneurs en MES. Afin de mettre en évidence d'une part, la succession dans le temps de ces trois phases et d'autre part, les paramètres qui règlent cette succession, les valeurs moyennes de concentration en MES sur un pas de temps de 5 jours sont représentées en fonction du débit (ORANGE, 1986). Ce pas de temps correspond au temps moyen d'une pulsation et, de plus, il est un juste compromis entre une échelle mensuelle qui masque par sa durée les événements majeurs se situant à l'échelle journalière et une échelle journalière difficile à manipuler. Trois cycles hydrologiques correspondant à trois cas de figure différents ont été choisis : le cycle 81/82 est un cycle humide suivant un cycle humide, le cycle 84/85 est un cycle sec suivant un cycle sec, le cycle 85/86 est un cycle humide suivant un cycle sec (fig.61).

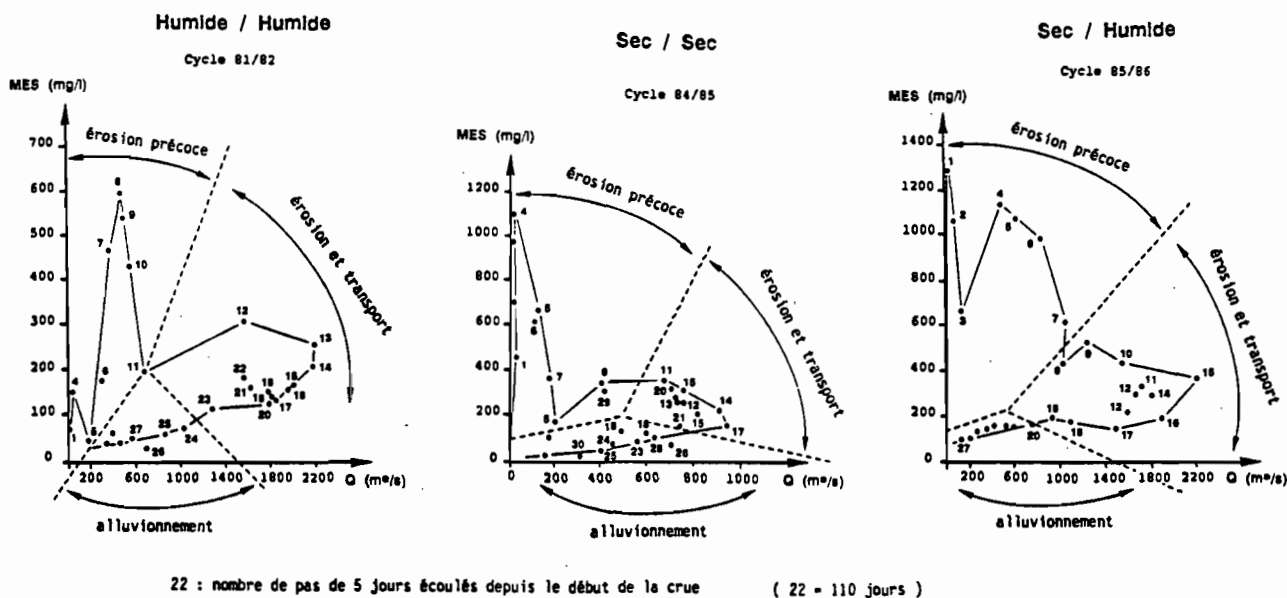


Fig. 61 : Variations journalières des concentrations en MES en fonction des débits du Sénégal au bief de Bakel.

Les figures obtenues décrivent des boucles analogues à des pulsations. Elles sont liées aux variations des débits et au laps de temps écoulé depuis l'amorce de la crue. Pour les deux cycles faisant suite à un cycle sec, les premiers débits sont caractérisés par de fortes concentrations ; par contre en 81/82, cette première impulsion est réduite car ce cycle suit une année humide. Une deuxième pulsation est enregistrée en 81/82 et 85/86. Elle est absente en 84/85 car c'est un cycle sec : tout se passe comme si la tête de l'hydrogramme avait été rasée, ce qui se traduit ici par l'absence de la deuxième impulsion. Cette seconde boucle de l'érosion précoce est centrée sur les débits de 500 m³/s et traduit la rapidité de la montée des eaux : plus cette montée est rapide et brutale, plus le ruissellement qui en résulte est érosif. La dernière boucle, toujours présente, marque dans un premier temps la période d'érosion et transport puis d'alluvionnement. Elle est caractérisée par des concentrations toujours inférieures à 500 mg/l et les débits les plus importants de la crue considérée. Cette boucle se termine par un pseudo-palier qui traduit la phase d'alluvionnement qui dure tout le reste de l'année jusqu'à la crue prochaine. Apparemment, cet alluvionnement commencerait dès que les concentrations sont inférieures à 200 mg/l.

La période d'érosion précoce se termine entre le 40^{ème} (en 85/86) et le 55^{ème} (en 81/82) jour. Ensuite la pulsation d'érosion et transport s'étend jusqu'aux environs du 110^{ème} jour.

Ainsi, ce qui commande la succession dans le temps des différentes phases d'érosion n'est pas seulement la valeur du débit mais aussi le laps de temps écoulé depuis l'amorce de la crue. Il apparaît également que les caractéristiques annuelles d'une crue sont acquises lors de la phase d'érosion précoce dont la physionomie est fortement dépendante de l'intensité de la crue de l'année précédente et de la répartition des pluies de l'année considérée.

2. Relations entre volumes d'eau écoulés et tonnages solides exportés

Cette importance du laps de temps écoulé depuis l'amorce de la crue a conduit à rechercher la relation existant entre la somme des tonnages solides exportés (ΣT) et la somme des volumes d'eau écoulés (ΣV). Les courbes ainsi obtenues matérialisent l'évolution des concentrations en MES dans les eaux du fleuve. Les sept années étudiées (de 1981 à 1987) ont été reportées sur le même graphique (fig.62).

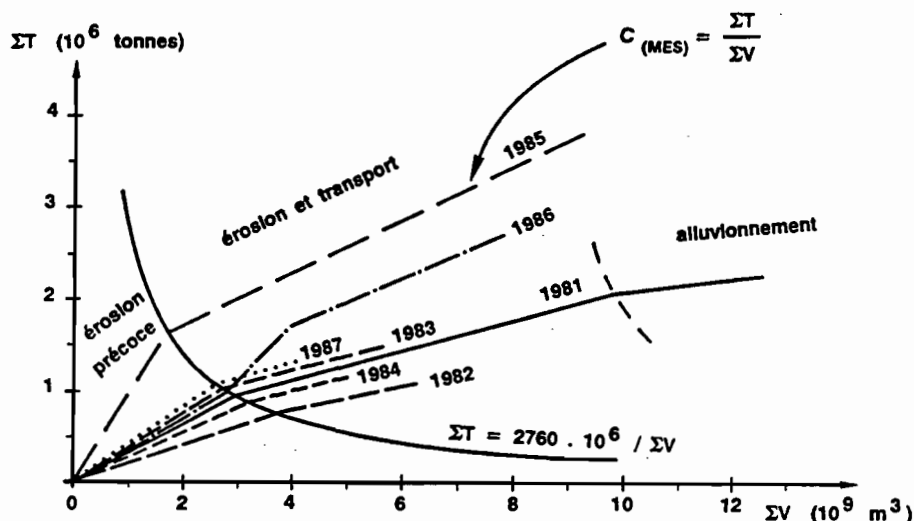


Fig. 62 : Evolution des tonnages en suspension cumulés en fonction des volumes d'eau écoulée cumulés.

Chaque courbe est décrite par deux segments de droite ; ce changement de pente correspond au changement de la capacité de réponse du bassin versant au cours de la crue. Il

est remarquable que ces points de rupture de pente s'alignent sur une courbe fonction de $1/\Sigma V$. Cette courbe particulière caractérise l'aptitude du bassin versant à répondre aux stimulations des pluies. En deçà de cette courbe, les différents cycles étudiés décrivent un éventail caractérisant les modalités de l'année considérée. Au delà du point de rupture de pente, l'évolution d'une année sur l'autre est sensiblement identique ; les courbes décrivent alors une droite, ce qui signifie que la charge est constante durant cette période du cycle. D'autre part, ces droites sont plus ou moins parallèles, ce qui signifie que cette concentration est une constante intrinsèque du bassin versant. Si on avait prolongé les prélèvements journaliers dans l'année, il semble que les courbes montreraient un palier à cause du manque de disponibilité du matériel à éroder au bout d'un certain laps de temps, ce qui correspondrait dans le fleuve à la phase d'*alluvionnement*. On en devine une amorce lors du cycle 81/82. Enfin, la concentration est toujours plus importante (parce que la pente plus forte) dans la première phase. Pour certaines années particulières, on peut envisager que la concentration observée durant la première phase soit égale à celle de la seconde phase, on observerait alors une droite et on peut supposer que cette concentration est la concentration minimale caractéristique du bassin versant. Pour le Sénégal, cette concentration limite minimale est de l'ordre de 160 mg/l.

Finalement, le cumul des transports solides journaliers et des volumes d'eaux qui les véhiculent fournit une vision nouvelle sur le déterminisme des processus d'érosion. La courbe représentative de l'évolution comparée de $\Sigma T/\Sigma V$ présente une rupture de pente majeure qui manifestement est liée à une modification radicale des capacités érosives des averses. Ce changement de pente indique de manière remarquable le passage d'une phase d'*érosion précoce*, dont les expulsions solides consistent surtout en du matériel repris, à une phase d'*érosion et transport*, qui concerne l'érosion effective du bassin. De plus, cette transition est accentuée par "*l'explosion*" de la végétation, dont le développement peut constituer un frein puissant à l'exportation lointaine des horizons superficiels des sols.

B - APPLICATION DU MODELE DE MELANGE AU SENEGAL

La charge en suspension d'un fleuve est souvent corrélée à son débit. Mais la composante principale du transport solide fluvial étant le ruissellement superficiel sur les versants, il est intéressant de déterminer les relations entre la charge en suspension du fleuve et le débit du ruissellement superficiel (PIEST & *al.*, 1975 ; PROBST, 1983 et 1986 ; PROBST & BAZERBACHI, 1986 ; PROBST & SIGHA, 1989). Le problème est alors double : d'une part, il s'agit de déterminer le volume d'eau ruisselée et d'autre part, de quantifier la charge en suspension du ruissellement.

Après une averse, l'eau qui n'est pas perdue par évapotranspiration, a la possibilité d'emprunter trois itinéraires différents avant d'atteindre l'exutoire du bassin. Elle peut tout d'abord ruisseler à la surface du sol et gagner le fond des vallées par simple écoulement superficiel. Elle peut s'infiltrer dans les horizons supérieurs des sols et participer dès lors à l'écoulement hypodermique. Elle peut enfin, après un laps de temps variable, atteindre la nappe souterraine dont elle assure la recharge (TARDY, 1986). La détermination de la part, qui revient à chacune de ces trois composantes dans l'écoulement total à l'exutoire, n'est réalisable directement que dans le cas de petits bassins versants équipés d'un réseau piézométrique suffisamment dense pour suivre les variations du niveau de la nappe. Cependant, à l'aide de quelques hypothèses simplificatrices, il est possible d'accéder à une connaissance grossière de ce bilan, soit en analysant la forme de l'hydrogramme de crue, soit en utilisant les données acquises sur les matières dissoutes et les matières en suspension.

A partir du découpage des hydrogrammes de crue du fleuve Sénégal à Bakel de 1979 à 1985, selon la méthode de PROBST (1983), le ruissellement superficiel a été évalué en moyenne à 14% du volume total écoulé, l'écoulement hypodermique à 20% et la contribution des nappes est prédominante avec 66% (KATTAN, 1984). Ce résultat est en accord avec les différentes études hydrologiques réalisées dans cette région sahélo-soudanienne où les coefficients

annuels de ruissellement superficiel mesurés vont de 10 à 20% (MUELLE & SENE, 1987 ; PEREZ & SARR, 1990).

1. Découpage de l'hydrogramme annuel par analyse spectrale de Fourier

La méthode utilisée ici pour séparer les écoulements est inspirée des travaux de JACKSON (1974), MANGIN (1981) et REJO (1985). Elle consiste à appliquer l'analyse spectrale de Fourier aux séries chronologiques des débits moyens mensuels (PROBST & SIGHA, 1989). L'analyse spectrale est utilisée pour détecter les composantes sinusoïdales d'une série temporelle. Ici, le débit moyen mensuel est assimilé à une somme de signaux $x(t)$ d'amplitudes (A et B) et de fréquences (f) différentes, pouvant se décomposer sous la forme :

$$x(t) = A \sin(f.t) + B \cos(f.t).$$

Le tracé du périodogramme permet de mettre en évidence la ou les fréquences ayant la plus forte contribution à la variance du signal testé. Dans le cas des débits moyens mensuels du fleuve Sénégal, le système est simple : il n'apparaît qu'une seule fréquence de coupure (f_c) ; elle est de $2\pi/12$ rd, ce qui correspond à une période de 12 mois (fig.63). Dans ces régions à saison des pluies annuelle unique, il est normal de ne voir apparaître qu'une seule périodicité annuelle dans l'écoulement des eaux fluviales.

Cette fréquence de coupure sépare les signaux de basses fréquences, qui correspondent aux événements à fluctuations lentes, des signaux de hautes fréquences, qui correspondent aux événements à fluctuations rapides. Ils représentent l'écoulement superficiel alors que les basses fréquences matérialisent l'écoulement de nappe.

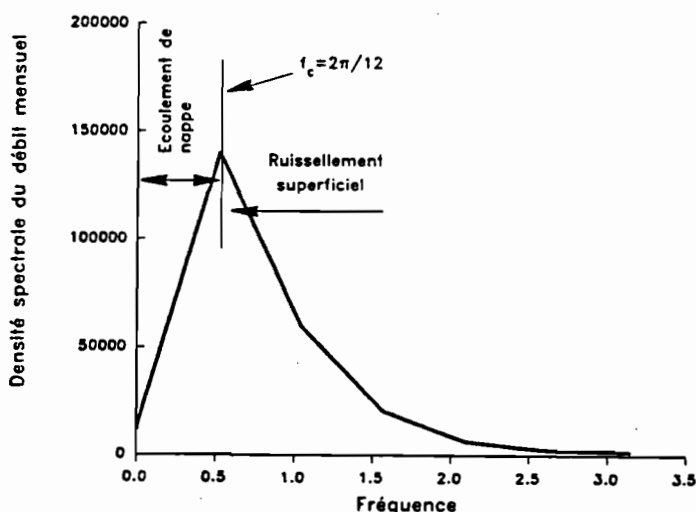


Fig. 63 : Périodogramme des fluctuations interannuelles des débits moyens mensuels du fleuve Sénégal.

En reconstituant par une transformée de Fourier le signal dû aux écoulements lents, on détermine, par différence avec le signal réel, la contribution annuelle des eaux de ruissellement superficiel. Le coefficient annuel de ruissellement superficiel K_r obtenu varie de 35% lors du cycle le plus humide en 80/81 à 6% lors du cycle le plus sec en 84/85 (fig.64) ; sur la période étudiée, il est en moyenne de 23% (tableau 66).

Par rapport aux résultats de KATTAN (1984), cette méthode surestime légèrement la contribution du ruissellement superficiel à l'exception du cycle sec 83/84. D'autre part, la comparaison des deux méthodes confirme que les événements à fluctuations lentes correspondent à l'écoulement de nappe additionné de l'écoulement hypodermique.

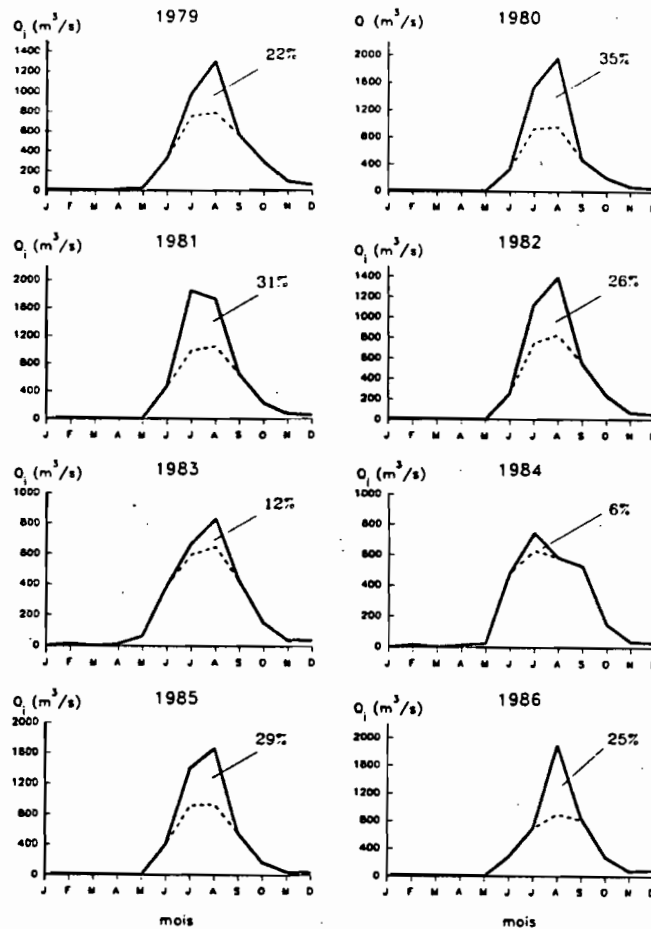


Fig. 64 : Découpage par analyse spectrale de Fourier des hydrogrammes de crue du fleuve Sénégal de 1979 à 1986 et coefficient annuel de ruissellement superficiel (K_r).

2. La charge en suspension annuelle du ruissellement superficiel et l'érosion des berges

Si l'on considère que la majorité des sédiments exportés par les fleuves sont produits par l'érosion mécanique et le ruissellement superficiel sur les versants, on peut calculer pour chaque bassin la charge moyenne en suspension du ruissellement de la manière suivante :

$$C_r = C_{ex} \cdot V_{ex} / V_r$$

où ex et r désignent respectivement l'exutoire et le ruissellement superficiel, C les concentrations et V les volumes d'eau correspondants (GAC, 1980 ; PROBST, 1983 ; PROBST & SIGHA, 1989). Ce modèle ne tient pas compte, en première approximation, du tonnage de sédiments produits par l'érosion des berges.

Le calcul est effectué à partir du volume ruisselé déterminé par l'analyse spectrale. La charge en suspension annuelle du ruissellement superficiel varie de 600 mg/l en année humide à 3300 mg/l en année sèche (tableau 66). Ce maximum d'érosion est dû à une montée rapide des eaux de la crue faisant suite à un cycle hydrologique déjà largement déficitaire. En année moyenne, la charge en suspension annuelle est de l'ordre de 1,3 g/l.

Mais pour comprendre la dynamique de l'érosion, il est nécessaire de faire la part entre ce qui est exporté par ruissellement et ce qui revient à l'érosion des berges, définie comme étant le détachement de sédiment du lit et des rives du cours d'eau causé par le courant (WHITE, 1982). L'estimation de cette érosion à partir de la charge solide en suspension est difficile. En fait, l'érosion des berges dépend de plusieurs facteurs tels que la pente, le débit, la végétation et la taille des particules transportées (ROBINSON, 1977 ;

EMMETT, 1981). KATTAN & al. (1987) estiment à partir des mesures effectuées entre 1979 et 1984 par J-Y GAC, que l'érosion des berges du Sénégal à Bakel représente 20% de la masse totale annuelle exportée en suspension. Cette estimation est faite en considérant qu'en dehors des périodes de ruissellement superficiel, les sédiments qui sont transportés par le fleuve sont essentiellement arrachés au lit et aux berges. On obtient alors une charge en suspension annuelle moyenne du ruissellement superficiel de 1 g/l. Ce résultat converge vers l'idée d'un ruissellement à charge solide annuelle constante d'environ 1 g/l pour l'ensemble du monde (PROBST & SIGHA, 1989). Cependant, l'analyse détaillée des huit cycles hydrologiques montre de grandes fluctuations autour de cette constante mondiale, fluctuations dues à la situation climatique particulière de chaque cycle.

Tableau 66 : Coefficient annuel de ruissellement superficiel (K_r) et charge en suspension annuelle du ruissellement superficiel (C_r)

Cycle	Q (m ³ /s)	K_r (%)	C_{ex} (mg/l)	C_r (mg/l)	KATTAN (1984)		
					E_r (%)	E_n (%)	E_s (%)
1979/80	303	22	193	860	10	12	78
1980/81	387	35	215	610	19	27	54
1981/82	424	31	178	580	11	19	70
1982/83	305	26	171	650	16	26	58
1983/84	218	12	238	1920	13	14	73
1984/85	215	6	202	3270	-	-	-
1985/86	355	29	358	1210	-	-	-
1986/87	343	25	293	1170	-	-	-
Année moyenne	319	23	231	1300	14	20	66

Q module annuel ; C_{ex} charge en suspension des eaux du fleuves ; E_r , E_n , E_s contribution des eaux de ruissellement, hypodermiques et de nappe à l'écoulement total

3. Contribution saisonnière des différents écoulements en année moyenne

La composition chimique des eaux de surface n'est pas très différente de celle des eaux de l'écoulement hypodermique (TARDY, 1967, 1969 ; LENOIR, 1972 ; GAC, 1980). Le bilan des exportations en solution peut donc se modéliser à partir d'un modèle à deux réservoirs par :

$$C_{ex} \cdot V_{ex} = C_n \cdot V_n + C_s \cdot V_s \quad \text{et} \quad V_{ex} = V_n + V_s$$

où ex, n et s désignent respectivement l'exutoire, la nappe et les eaux de surface, C les concentrations et V les volumes correspondants. C_{ex} et V_{ex} sont connus, il reste à déterminer C_n , C_s , V_n ou V_s . Dans ce modèle, les eaux de surface englobent les eaux hypodermiques et les eaux ruisselées.

Cette première approche considère les concentrations des eaux de nappe et de surface comme constantes au cours du cycle hydrologique. Par analogie avec la répartition des précipitations, il est logique de penser que l'écoulement de surface est nul pendant les derniers mois de la saison sèche, de février à mai (GAC, 1980). La concentration C_n est donc donnée par l'écoulement du premier mois où l'écoulement de surface s'annule ; les mois suivants, les eaux sont concentrées par évapotranspiration, d'où les valeurs très élevées en mai. Ainsi C_n est fixée à 60 mg/l. On admet d'autre part, que les eaux de surface ont la concentration des eaux de pluie ($C_s = 15$ mg/l), ce qui revient à considérer que l'interface sol/air est une surface chimiquement neutre. Cette valeur de la concentration représente en fait la valeur minimale de la concentration des eaux de surface, on détermine donc par cette méthode la contribution minimale des eaux de nappe à l'écoulement total (tableau 67).

Tableau 67 : Estimation des variations saisonnières de la contribution minimale des eaux de nappe à l'écoulement total à partir de la charge dissoute des eaux de surface ($C_s=15$ mg/l) et des eaux de nappe ($C_n=60$ mg/l) (en année moyenne)

MOIS	Cex (mg/l)	En (%)	VOLUMES ($10^6 \cdot m^3$)		
			Vex	Vn	Vs
Juin	81,4	100	62,2	62,2	0
Juillet	46,9	71	878,5	623,0	255,5
Août	41,7	59	2849,8	1686,3	1163,5
Sept.	40,8	57	3499,2	2011,1	1488,1
Octobre	44,0	65	1577,6	1017,8	559,8
Nov.	49,5	77	502,8	386,8	116,0
Déc.	54,7	89	200,9	177,8	23,1
Janvier	58,9	97	101,8	98,8	3,0
Février	64,3	100	41,4	41,4	0
Mars	72,4	100	24,1	24,1	0
Avril	80,7	100	5,2	5,2	0
Mai	87,0	100	2,7	2,7	0
Total annuel	-	63	9746,2	6137,2	3609,0

Cex charge totale dissoute des eaux du fleuve ; En contribution des eaux de nappe à l'écoulement de surface ; Vex volume total écoulé à l'exutoire ; Vn, Vs volume des eaux de nappe et de surface s'écoulant à l'exutoire

Finalement, les nappes contribuent au minimum à 63% de l'écoulement total annuel, ce chiffre est à rapprocher des 66% estimés par KATTAN (1984). En septembre et en août, la contribution de l'écoulement de nappe est minimale, respectivement 57% et 59% de l'écoulement total (fig.65). A l'échelle journalière, ce même calcul montre que les nappes ne contribuent qu'à 5% des premiers écoulements, ensuite leur contribution ne fait qu'augmenter tout au long de la crue pour s'établir à plus de 90% dès le mois de décembre (ORANGE, 1986).

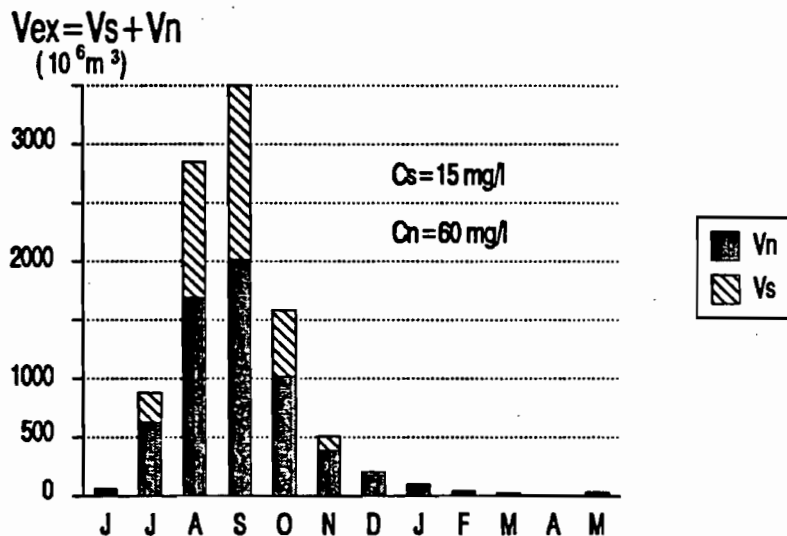


Fig. 65 : Contribution saisonnière des différents écoulements à l'exutoire du bassin amont du Sénégal en année moyenne (V_n écoulement de nappe, V_s écoulement de surface, C_n charge dissoute des eaux de nappe, C_s charge dissoute des eaux de surface).

IV - CONCLUSIONS

Les eaux de surface du domaine sahélo-soudano-guinéen ont une charge dissoute totale moyenne annuelle faible, pratiquement constante d'une année sur l'autre malgré la forte irrégularité des débits moyens annuels. Les eaux du Sénégal sont bicarbonatées magnésiennes et calciques, celles de la Falémé sont bicarbonatées sodiques, celles de la Gambie sont bicarbonatées calciques, celles du Tinkisso sont bicarbonatées magnésiennes et celles du Milo et du Niger sont toutes deux bicarbonatées calco-sodiques. Tous les éléments qui composent ces eaux sont dilués par le débit et se comportent donc comme si la contribution des eaux de ruissellement aux apports dissous était négligeable. Mais dans le détail, trois types de comportement s'individualisent : l'ensemble $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca-Na}$ est dilué par le débit quelle que soit la saison, les MES sont dépendantes du débit et de l'état de surface du bassin versant, la silice fait intervenir des mécanismes biogéochimiques. Le potassium se situe entre ces trois classes de comportement, et, les chlorures et sulfates ont un comportement désordonné caractéristique d'un apport essentiellement atmosphérique. Quel que soit le domaine climatique considéré, on observe la même répartition au cours de l'année des teneurs et des flux en éléments dissous : concentration maximale en fin de saison sèche et flux maximal en milieu de saison humide. Enfin, l'amplitude de variation des concentrations est faible.

Au contraire, les MES sont caractérisées par une grande variabilité journalière de leur concentration malgré un rythme saisonnier immuable. Elles sont constituées principalement de quartz, kaolinite et illite-smectite ; la fraction argileuse, qui prédomine en toutes saisons, est mieux représentée lors des premiers écoulements où le minéral dominant est alors la kaolinite. L'association illite-smectite est exportée en période de *basses-eaux* alors que le quartz est exporté lorsque le débit est le plus fort. A la fraction argileuse, sont associés P, Mg, Mn, Cu, Cr, Co, Zn, Y et La-Ce-Nb alors que Na, Zr, Sr, Ba et Y-Lu accompagnent la fraction sableuse. Les teneurs en carbone organique particulaire (COP) diminuent en fonction des concentrations en MES comme sur la plupart des fleuves du Monde, et la matière organique représente entre 5% et 10% de la masse totale des suspensions. Enfin, le quartz est le plus abondant dans les MES du Sénégal, la kaolinite dans les MES du Niger, l'illite et smectite dans les MES de la Falémé, la matière organique dans les MES de la Gambie. La chimie des MES reflète la composition chimique de sols appauvris par un lessivage intense, à l'exception peut-être du bassin versant de la Falémé. Cependant, malgré cette pauvreté chimique par rapport à la moyenne mondiale, elles sont tout de même enrichies en alcalins et alcalino-terreux par rapport aux sols dont elles sont issues. Cette enrichissement est attribué à l'influence des poussières atmosphériques et à la présence d'argiles de type smectite-vermiculite dans les zones de vallées, surtout en domaines nord-soudanien et sahélien.

L'érosion mécanique spécifique qui affecte le bassin amont de la Gambie et du Tinkisso est une des plus faibles du continent africain, et donc du monde. Ces valeurs extrêmement faibles sont à mettre en relation avec la nature cristalline du substratum rocheux et la couverture pédologique ferrallitique de toute cette zone amont que constitue le massif latéritique du Fouta Djallon. Pour le Niger, la Falémé et le Sénégal, l'érosion mécanique est plus importante à cause de la traversée dans leur cours moyen, du plateau Mandingue. Cette érosion mécanique spécifique passe de 7 t/km²/an à plus de 10 t/km²/an. Par contre, l'altération chimique, qui est également une des plus faibles au monde, est fortement influencée par l'hydrologie de la zone considérée : elle est donc dépendante du domaine climatique. En domaine sahélien, elle est de l'ordre de 1 t/km²/an alors qu'en domaine guinéen elle atteint 5 t/km²/an.

Le découpage de l'hydrogramme de crue par analyse spectrale a permis d'estimer le coefficient de ruissellement superficiel annuel moyen (K_r) à 23%. La répartition annuelle de cet écoulement superficiel est bien sûr inégalement répartie dans l'année, à l'image des pluies. A partir de la chimie des eaux fluviales, on a pu estimer que l'écoulement de nappe varie de 57% en septembre à 97% en janvier pour s'établir à 100% de février à juin.

La principale contribution au transport en suspension des rivières est apportée par l'érosion des versants et le ruissellement superficiel dont la charge en suspension annuelle moyenne a été calculée à 1 g/l pour le Sénégal à Bakel. Cette concentration du ruissellement superficiel est diluée dans les eaux du fleuve par les eaux provenant de l'écoulement de nappe et de l'écoulement hypodermique. Pendant ce temps, la charge en suspension est augmentée par l'érosion des berges et plus particulièrement par la reprise des laissés-de-crue dans le lit du fleuve lors des premiers flots. Cette contribution provoque dans les eaux de rivières un maximum de concentration se produisant avant la pointe de crue. L'évolution annuelle des MES peut donc se décomposer en trois phases : une phase d'*érosion précoce* durant un à deux mois selon les années, une phase d'*érosion et transport* se terminant toujours au quatrième mois après le début de la crue quelle que soit la longueur de la phase précédente, et une phase d'*alluvionnement* durant les huit mois restant de l'année. Cette importance du laps de temps écoulé depuis l'amorce de la crue dans la succession des différentes phases de la crue annuelle nous a conduit à déterminer l'évolution de la somme des flux solides exportés en fonction de la somme des flux liquides écoulés. On met ainsi en évidence le changement de capacité de réponse à l'érosion du bassin versant entre la phase d'*érosion précoce* et la phase d'*érosion et transport*. Si dans la première phase, la concentration exportée est dépendante du cycle hydrologique considéré et de l'intensité de la crue précédente, au contraire dans la seconde phase la charge solide moyenne des eaux fluviales est une constante intrinsèque du bassin versant, estimée à 160 mg/l pour le Sénégal au bief de Bakel.

CHAPITRE VIII

GEOCHIMIE DES EAUX DE SURFACE DU FOUTA DJALON, EROSION MECANIQUE ET ALTERATION CHIMIQUE EN DOMAINE SOUDANO-GUINEEN

Ce chapitre commence par l'étude de la qualité chimique des eaux de surface du Fouta Djalon. Puis, l'utilisation de modèles géochimiques caractérise la dynamique générale actuelle d'altération régnant sur l'ensemble de ce paysage guinéen. Ensuite, les flux de matières dissoutes et particulaires sortant du Fouta Djalon sont quantifiés. Enfin, l'importance des apports atmosphériques sur la qualité chimique des eaux de surface est discutée, les taux d'altération chimique et d'érosion mécanique sont estimés, et l'importance relative des deux mécanismes concurrentiels, que sont l'érosion des sols et l'approfondissement des profils, est appréciée pour chaque type de roches.

I - RECONNAISSANCE GEOCHIMIQUE DES EAUX DE SURFACE DU FOUTA DJALON

La première reconnaissance géochimique des eaux du Fouta Djalon faite par BAMBA (1987) puis ORANGE & GAC (1990b) est complétée ici par un plus grand nombre de prélèvements.

A - LA QUALITE CHIMIQUE DES EAUX

Près de 70% de l'écoulement total annuel du Fouta Djalon se fait durant la saison des pluies, de juillet à septembre (chapitre IV). Or, la plupart des prélèvements ont été effectués avant ou après cette période. Ainsi, les moyennes présentées ci-dessous ont été calculées en pondérant chaque prélèvement par un coefficient qui tient compte de cette répartition annuelle des écoulements.

1. Des sources aux fleuves

La composition chimique des eaux de surface en allant de l'amont des bassins vers l'aval fournit un "*profil-en-long chimique*" des eaux de surface du Fouta Djalon (tableau 68). Depuis les sources jusqu'aux fleuves en passant par les ruisseaux et les rivières, la minéralisation totale passe de 31 mg/l à 52 mg/l. Cette augmentation de la charge dissoute totale s'accompagne d'une augmentation significative du pH. La teneur en chlorures est sensiblement la même dans les eaux de sources, de ruisseaux et de rivières, mais elle est largement supérieure dans les eaux des fleuves. La principale source de chlorures est l'atmosphère, il y a donc concentration des eaux fluviales par évaporation. Ce processus s'ajoute aux apports dus à l'altération chimique tout au long du cheminement des eaux vers l'aval, et confère une minéralisation totale plus élevée aux eaux fluviales : *l'amont nourrit l'aval* (PAQUET, 1970).

Tableau 68 : Composition chimique moyenne des eaux de sources, de ruisseaux, de rivières et de fleuves du Fouta Djalon

Taille du bassin versant	n	anions		cations				SiO ₂ (µmol/l)	pH _z	Cond (µS/cm)	Σanion (µeq/l)	Σcation (µeq/l)	TDS (mg/l)	R _E
		Cl	HCO ₃	Ca	Mg	K	Na							
Sources	28	22	229	89	92	18	52	188	6,7	25	251	251	30,8	1,4
Ruisseaux	59	19	295	129	115	18	54	171	6,9	31	314	316	35,0	1,8
Rivières	48	22	410	168	159	37	82	175	7,2	43	432	446	45,3	2,4
Fleuves	31	42	478	210	176	52	106	166	7,5	53	520	544	51,9	2,8

n : nombre d'échantillons analysés ; Cond : conductivité à 20°C ; TDS : charge totale dissoute ;
 $R_E = (6 \cdot K_2O + 6 \cdot Na_2O + 2 \cdot CaO - SiO_2) / (K_2O + Na_2O + CaO)$ en moles d'oxyde.

Ainsi, au cours de leur cheminement des sources aux rivières, les eaux de surface acquièrent une charge dissoute supplémentaire due essentiellement à l'altération chimique. Par contre, en ce qui concerne les eaux des fleuves, l'augmentation des concentrations est principalement réglée par l'évaporation, mise en évidence par la brusque augmentation des teneurs en chlorures.

2. Composition chimique des eaux par bassin versant

Pour tous les bassins versants ou sous-bassins versants, la concentration des eaux en fin de saison sèche (de janvier à juin) est supérieure à celle des eaux prélevées après la saison des pluies (d'octobre à décembre) (tableau 69). Tous les éléments majeurs suivent ce schéma à l'exception de la silice dans les bassins du Konkouré et de la Gambie.

Sur le flanc ouest du Fouta Djalon, les deux bassins versants côtiers guinéens ont des caractéristiques chimiques différentes. Les eaux de la Tominé sont deux fois plus minéralisées que celles du Konkouré. Les eaux de la Tominé sont bicarbonatées magnésiennes alors que celles du Konkouré sont bicarbonatées calciques.

A l'intérieur du bassin de la Gambie, la Dima et l'Oundou ont des eaux de qualité chimique différente. A l'Ouest, les eaux sont neutres (pH=6,9) et faiblement minéralisées (30,7 mg/l) ; à l'Est, les eaux ont des pH plutôt basiques (pH=7,2) et sont plus minéralisées (46,5 mg/l). Cette différence est imputable à la présence largement dominante du calcium et des bicarbonates dans les eaux. A l'aval de la confluence de ces deux rivières, les eaux ont déjà acquis la composition des eaux transitant au bief de Kédougou. Toutes ces eaux sont bicarbonatées calciques. Ce caractère calcique est à corrélérer avec le caractère calcique des eaux de la Falémé dont les prélèvements proviennent de la même zone géographique.

En effet, la prédominance de ces ions apparaît encore plus marquée dans le bassin versant de la Falémé, où trois prélèvements seulement ont été effectués dans la partie occidentale du bassin (attenante au bassin de l'Oundou) en domaine gréseux quartzitique durant le mois de novembre, avant que les eaux soient concentrées par évaporation. Ainsi leur moyenne donne sûrement une bonne idée de la qualité chimique moyenne annuelle des eaux issues de cet ensemble lithologique dont le caractère gréseux quartzitique ne peut justifier ces fortes charges dissoutes. La seule explication possible est la dissolution des bancs carbonatés du bassin de Madina-Kouta largement représenté dans ces deux bassins versants (chapitre II).

Les eaux du Bafing sont plus minéralisées que celles de son affluent principal, la Téné, dont la charge totale dissoute est du même ordre de grandeur que celle du Konkouré. La répartition relative des différentes espèces chimiques entre ces deux affluents est sensiblement la même à l'exception des chlorures qui semblent légèrement plus concentrés dans le sous-bassin versant de la Téné. Les eaux du Bafing après la confluence sont largement plus minéralisées du fait de la présence largement dominante des dolérites dans la partie aval. Toutes ces eaux sont bicarbonatées magnésiennes.

Enfin, les trois prélèvements du bassin versant du Tinkisso ont été effectués en fin de saison sèche, en mars et juin, et leurs eaux bicarbonatées magnésiennes sont fortement concentrées.

Tableau 69 : Composition chimique moyenne des eaux des bassins versants constitutifs du Fouta Djallon avant la saison des pluies (B) et après la saison des pluies (A)

Bassin versant	n	anions		cations				SiO ₂ (μmol/l)	pH _e	Cond (μS/cm)	Σanion (μeq/l)	Σcation (μeq/l)	TDS (mg/l)	
		Cl	HCO ₃	Ca	Mg	K	Na							
KONKOURE	B	9	46	162	66	52	28	65	82	6,6	23	208	211	21,0
	A	5	26	117	49	35	13	50	95	6,6	15	143	147	16,9
TOMINE	B	4	23	547	199	284	33	55	160	7,2	60	570	571	53,8
	A	13	19	259	99	110	20	56	123	7,0	28	278	285	29,3
GAMBIE Dima	B	22	26	272	107	106	25	55	173	6,7	28	298	293	33,7
	A	12	15	227	109	88	10	29	193	6,9	25	242	236	30,3
Oundou	B	4	9	554	253	186	39	84	200	7,2	51	563	562	56,9
	A	8	4	359	193	108	12	46	271	7,2	38	363	359	45,1
Gambie	B	6	24	726	348	283	46	98	163	7,3	68	750	775	69,8
	A	5	16	278	130	110	14	38	203	7,2	31	294	292	35,0
FALEME	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A	3	20	423	217	159	15	52	333	7,4	47	443	443	54,5
BAFING Bafing (amont)	B	7	25	470	126	232	37	109	195	7,2	47	495	504	50,8
	A	8	22	297	91	140	17	72	145	6,8	29	319	320	33,5
Téné	B	8	29	188	69	84	20	45	121	6,7	21	217	218	24,1
	A	10	28	151	55	73	17	41	106	6,8	18	179	186	20,2
Bafing (aval)	B	1	56	519	183	272	28	93	150	7,4	55	575	576	52,9
	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TINKISSO	B	3	28	820	202	439	59	154	276	7,6	76	848	854	83,2
	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

n : nombre d'échantillons analysés ; Cond : conductivité à 20°C ; TDS : charge totale dissoute ;
 $R_e = (6 \cdot K_2O + 6 \cdot Na_2O + 2 \cdot CaO - SiO_2) / (K_2O + Na_2O + CaO)$ en moles d'oxyde.

3. La qualité chimique des eaux sortant du Fouta Djallon

Après avoir répertorié les différents types chimiques des eaux de surface du Fouta Djallon, il importe ici de donner la qualité chimique des eaux sortant de ce massif. Deux cas se présentent. Soit la qualité chimique des eaux à l'exutoire est suivie dans le temps, on calcule alors la moyenne pondérée par le débit des compositions chimiques enregistrées à cette station, c'est le cas de Kédougou pour la Gambie et de Dabola pour le Tinkisso (chapitre VII). Soit il n'y a pas de suivi à l'exutoire, on calcule alors la moyenne des compositions chimiques des eaux de l'ensemble du bassin versant considéré en affectant à chaque sous-bassin versant un coefficient qui tient compte de sa contribution à l'écoulement total enregistré à l'exutoire. Le peu de prélèvements effectués sur l'ensemble du bassin versant de la Falémé et le caractère trop localisé de ses prélèvements ne permettent pas d'utiliser cette méthode. Il semble préférable de prendre la composition chimique de l'eau obtenue sur un échantillon prélevé en octobre sur la Falémé à Saraya, quelques kilomètres à l'aval de l'exutoire du bassin.

Les eaux drainant l'Est du Fouta Djallon sont deux fois plus minéralisées que celles drainant l'Ouest de ce massif (tableau 70). Des six fleuves qui drainent le Fouta Djallon, le Konkouré est de loin celui qui a les eaux les moins concentrées, leur minéralisation est proche de celle des eaux de pluie (chapitre VI). Cette très faible charge dissoute est bien sûre à mettre en relation directe avec le substratum entièrement gréseux de ce bassin versant. Pour la Tominé, la présence de 14% de dolérite explique une plus forte concentration de ses eaux, qui restent cependant encore relativement peu concentrées. A l'opposé, sur le rebord oriental du Fouta Djallon, les bassins versants de la Falémé, du Bafing et du Tinkisso sont drainés par des

eaux beaucoup plus minéralisées et du même ordre de grandeur. Enfin, les eaux de la Gambie ont une minéralisation totale intermédiaire.

Tableau 70 : Composition chimique moyenne des eaux sortant du Fouta Djalón

Bassin versant	anions		cations				SiO ₂ (μmol/l)	pH _e	Cond (μS/cm)	Σanion (μeq/l)	Σcation (μeq/l)	TDS (mg/l)	R _e
	Cl	HCO ₃	Ca	Mg	K	Na							
KONKOURE	31	127	53	39	16	53	92	6,6	17	158	161	17,8	2,8
TOMINE	20	324	122	149	23	56	131	7,0	34	344	350	34,8	2,3
GAMBIE	23	351	180	121	26	57	185	7,3	35	374	384	40,7	1,9
FALEMÉ	30	400	180	130	30	90	248	7,4	51	430	430	48,8	1,9
BAFING	56	519	183	272	28	93	150	7,4	55	575	576	52,9	2,6
TINKISSO	11	459	115	222	23	126	225	7,6	44	470	486	50,8	2,6
EAUX DU FOUTA	32	310	118	136	22	70	140	7,0	34	342	346	35,0	2,4

Cond : conductivité à 20°C ; TDS : charge totale dissoute ; $R_e = (6 \cdot K_2O + 6 \cdot Na_2O + 2 \cdot CaO - SiO_2) / (K_2O + Na_2O + CaO)$ en moles d'oxyde.

Cette séparation du Fouta Djalón en deux régions est le résultat de la concomitance de deux facteurs indépendants : la lithologie et la pluviosité. Les bassins versants à substratum gréseux, formant la partie ouest, livrent les eaux les moins concentrées ; dans les autres bassins versants, la présence de dolérite, de granite pour le Bafing et le Tinkisso, de schistes pour la Falémé peut expliquer une charge ionique plus importante dans les eaux de surface. De plus, l'isohyète 1500 mm suit de près la ligne de crête séparant les deux bassins versants côtiers guinéens des autres bassins versants constitutifs du Fouta Djalón : la pluviométrie augmente vers la côte et diminue au contraire vers l'Est (chapitre III). Ainsi, il y a un phénomène de dilution par les eaux de pluie sur les deux bassins versants côtiers guinéens, qui se superpose à l'influence de la lithologie. Par contre, il y a concentration par évaporation sur les autres bassins versants, à l'exception sûrement du bassin de la Gambie où l'isohyète 1300 mm se trouve déjà à l'extrémité nord du bassin (chapitre III).

Cependant, ces phénomènes de dilution ou de concentration ne changent en rien les rapports des différents éléments chimiques entre eux. Les eaux de la Falémé et de la Gambie sont bicarbonatées calciques alors que pour les autres bassins versants les eaux sont bicarbonatées magnésiennes à l'exception du Konkouré où les eaux sont, du fait de leur très faible minéralisation, bicarbonatées calciques. Rappelons que ce caractère bicarbonaté calcique des eaux de la Falémé et de la Gambie est attribuable à la présence de séquences argilo-carbonatées dans l'ensemble gréso-quartzitique du bassin de Madina-Kouta (chapitre II).

4. Caractéristiques moyennes des eaux de surface du Fouta Djalón

La caractéristique essentielle des eaux qui drainent le massif du Fouta Djalón est leur très faible minéralisation qui, en moyenne annuelle, reste inférieure à 50 mg/l. Le regroupement de tous les prélèvements donne pour les eaux du Fouta Djalón une charge totale dissoute moyenne de 35 mg/l. Ce résultat n'est pas sans liaison avec la nature essentiellement gréseuse du substratum et l'importance des niveaux cuirassés "stériles".

En résumé, les hauteurs du Fouta Djalón livrent actuellement aux provinces de l'aval, des eaux proches de la neutralité et faiblement minéralisées, dans lesquelles prédominent les bicarbonates, le calcium et le magnésium. Les eaux du Konkouré et de la Tominé sont calco-magnésiennes, celles de la Gambie et de la Falémé sont calciques alors que celles du Bafing et du Tinkisso sont plutôt magnésiennes.

5. L'exportation des matières en suspension

L'exportation des matières en suspension hors du Fouta Djallon a été suivie à Kédougou sur la Gambie et à Dabola sur le Tinkisso. Ces résultats ont été discutés dans le chapitre précédent (chapitre VII). Rappelons que les concentrations journalières, moyennes mensuelles et moyennes annuelles sont très faibles comparativement aux exportations de MES par les cours d'eau de la zone soudano-sahélienne. En période de basses-eaux, les concentrations mesurées sur filtres à partir des prélèvements itinérants fluctuent de 2 à 10 mg/l sur l'ensemble du Fouta Djallon. En début de crue, le phénomène de "chasse-d'eau" ne semble pas très important sur ces terrains cuirassés. Les charges en suspension maximales enregistrées à Kédougou et à Dabola sont du même ordre de grandeur, respectivement 88 et 74 mg/l. Pour ces deux bassins versants étudiés (de superficie sensiblement égale), la concentration moyenne annuelle est de 32 mg/l, ce qui donne un flux spécifique d'érosion mécanique de 8 t/km²/an. Cette valeur est extrapolée à l'ensemble du Fouta Djallon.

Enfin, la qualité chimique des MES de la Gambie à Kédougou a été présentée également dans le chapitre VII. A défaut d'autres analyses, cette composition est attribuée à l'ensemble des exportations solides du Fouta Djallon.

B - CARACTERISATION DES GRANDS TYPES D'ALTERATION

1. Les diagrammes d'équilibres et les modèles thermodynamiques

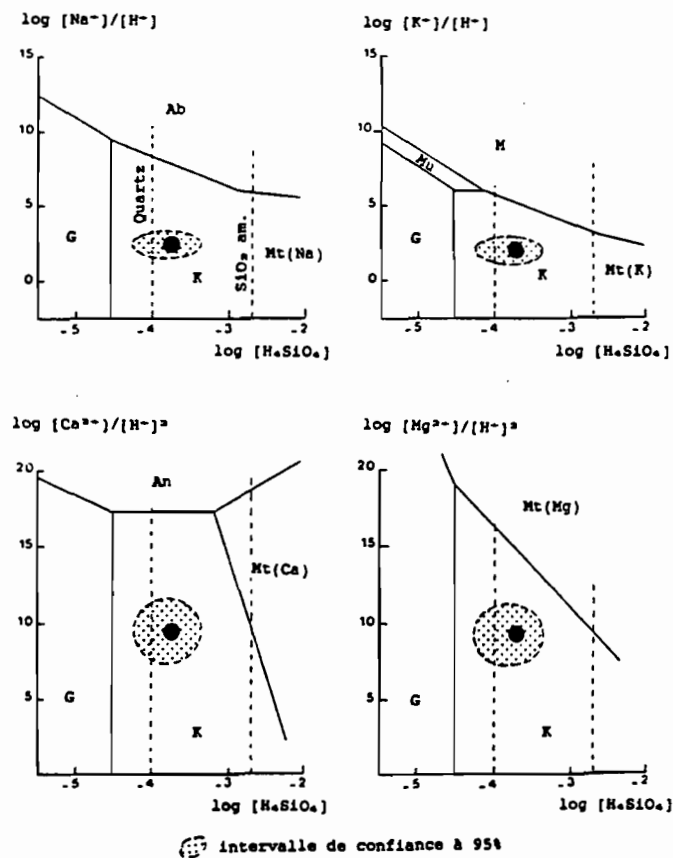


Fig. 66 : Position moyenne des eaux du Fouta Djallon dans les diagrammes de stabilité des minéraux silicatés (Ab : albite ; An : anorthite ; G : gibbsite ; K : kaolinite ; M : microcline ; Mt(Na/K/Ca/Mg) : montmorillonite ; Mu : muscovite).

Le type d'altération peut être précisé par une approche thermodynamique qui repose, essentiellement, sur l'hypothèse selon laquelle les eaux qui transitent dans les profils de sols sont en équilibre avec les minéraux qui s'y trouvent. Dans le cas des eaux de sources, de ruisseaux, de rivières et de fleuves, les témoignages de ces équilibres passés entre les solutions et les minéraux silicatés se sont "*dissipés*" mais on admet en première approximation qu'elles en sont encore le reflet pas trop lointain. En effet, les eaux météoriques modifient rapidement leur composition pour acquérir le faciès du milieu qu'elles traversent ; cet équilibre établi, la composition chimique se modifie plus lentement lors de son passage dans un milieu différent : les réactions qui réajustent l'équilibre se font plus lentement (TARDY & *al.*, 1973 ; LENOIR, 1978 ; GAC, 1980). Le modèle thermodynamique utilisé est celui décrit par FRITZ (1975). Les différents diagrammes d'équilibre sont bâtis à partir des constantes d'équilibre (à 25°C et 1 atm) et des réactions d'hydrolyses utilisées par GAC (1980).

Les eaux moyennes du Fouta Djallon se situent dans le domaine de stabilité de la kaolinite (fig.66). Elles sont sursaturées par rapport au quartz et sous-saturées par rapport à la silice amorphe. Ce caractère est mis en évidence par le tracé du cercle de confiance établi à l'aide du test de Student pour un intervalle de confiance de 95%.

2. Utilisation d'un rapport géochimique

Le type d'altération peut également être précisé par l'utilisation de rapports géochimiques (PEDRO, 1964, 1966, 1979 ; TARDY, 1969 ; GAC, 1980 ; DARMENDRAIL, 1984). Les différents types d'altération régnant sur les bassins versants, qui drainent le Fouta Djallon, ont été déterminés par la méthode TARDY (1969, 1971). Elle consiste à évaluer le rapport moléculaire $R_E = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de l'ensemble des minéraux secondaires présents dans les sols (ou résidu d'altération) à partir de la quantité de cations basiques et de silice contenus dans les eaux de lessivage. La valeur du rapport R_E permet de préciser le type d'altération dominant. Lorsqu'il est nul, l'aluminium et le fer sont les seuls éléments fixés sous forme d'hydroxydes insolubles : c'est le domaine de l'allitisation (la gibbsite et les différents hydrates d'alumine persistent seuls dans les profils, témoignant du lessivage complet de la silice et des cations basiques dans des proportions relatives identiques à celles des roches-mères). La monosiallisation correspond à un rapport R_E égal à 2 : le lessivage des bases est total alors que seule une partie de la silice se retrouve dans la phase soluble, l'aluminium et la silice résiduels s'organisent dans les profils en néoformant des phyllosilicates de type 1/1 comme la kaolinite, mais une telle valeur n'exclut pas la présence d'argiles du type 2/1 et de gibbsite. Lorsque le rapport est nettement supérieur à 2 (domaine de la bisiallisation), les bases et la silice ne sont que partiellement lessivées ; la quantité de silice qui demeure dans les profils est plus importante que n'en nécessite la formation de la kaolinite, conduisant ainsi à la naissance de minéraux argileux 2/1 du type smectite ou vermiculite.

Cette méthode ne fournit que des indications sur la tendance à l'évolution des sols d'altération. En effet, il ne s'agit que d'une simple reconstitution de l'évolution géochimique des sols à partir de collectes d'eaux de surface supposées être le reflet fidèle des eaux de nappe. D'autre part, le rapport R_E choisi a été établi pour des substratums de type granito-gneissique ; de ce fait, on néglige le rôle joué par le magnésium plus facilement mobilisable dans les roches basiques.

Pour l'ensemble du Fouta Djallon, la valeur du rapport R_E (2,4) indique une tendance générale à la monosiallisation : la kaolinite est le minéral dominant dans les sols. L'influence de la différence entre roches basiques et roches acides sur ce type d'altération est faible ; la kaolinite reste toujours l'argile de néoformation prédominante, GAC (1980) faisait d'ailleurs la même remarque sur l'ensemble des paysages amont du bassin du lac Tchad. Cependant, l'évolution est différente selon les sous-bassins régionaux (tableau 70). Les eaux de la Falémé et de la Gambie avec un R_E légèrement inférieur à 2 témoignent d'une altération à caractère monosiallitique dominant et allitique ménagé. En revanche, pour le Bafing, le Tinkisso et les deux bassins côtiers, les eaux indiquent une monosiallisation avancée avec une tendance à la

bisiallisation, ce qui se traduit dans les sols par une prédominance de la kaolinite accompagnée localement de montmorillonite.

La distinction entre sources, ruisseaux-rivières et fleuves (tableau 68) définit un gradient amont-aval de la nature chimique des solutions et met en évidence une évolution du type d'altération entre les points hauts et les points bas du paysage. La valeur du rapport R_e croît avec la longueur du cheminement des eaux de surface dans le bassin : sources (1,4), ruisseaux (1,8), rivières (2,4) et fleuves (2,8). Les sols des hauteurs sont à dominante gibbsitique et bauxitique alors que la dynamique de la silice et des cations traduit l'apparition de la kaolinite le long des pentes et l'association kaolinite-montmorillonite dans les bas fonds. On retrouve le schéma classique des successions systématiques des différents types de sols entre l'amont et l'aval des paysages : gibbsite, kaolinite et montmorillonite (TARDY, 1969 ; PAQUET, 1970 ; BOCQUIER, 1973 ; BOULET, 1974 ; LEVEQUE, 1979 ; GAC, 1980). Bien sûr, dans le détail, conformément aux observations de KALOGA (1983) en Haute-Volta, des tendances régionales plus complexes apparaissent (ORANGE & GAC, 1990b).

C - PREMIERES CONCLUSIONS

Deux enseignements majeurs ressortent de cette reconnaissance géochimique des eaux drainant les versants du Fouta Djallon. Premièrement, les hauteurs du Fouta Djallon évacuent actuellement vers les régions aval, des eaux proches de la neutralité et faiblement minéralisées (moyenne de 35 mg/l) où prédominent les bicarbonates, le calcium et le magnésium. Deuxièmement, la dynamique d'altération dominante dans les sols est de type monosiallitique avec une prédominance très marquée de la kaolinite. Cependant, dans le détail, les eaux drainant le Nord du Fouta Djallon sont fortement bicarbonatées calciques et pauvres en chlorures ; ailleurs, les eaux sont bicarbonatées magnésiennes. D'autre part, la dynamique de la silice et des cations contenus dans les eaux met en évidence une régionalisation des types d'altération. Le Nord du Fouta Djallon (bassins de la Gambie et de la Falémé) semblent être à caractère bauxitique marqué alors que les bassins côtiers à l'Ouest sont dominés par la bisiallisation et que, à l'Est, sur les bassins du Sénégal et du Tinkisso règne la monosiallisation. Enfin, la distinction entre sources, ruisseaux et fleuves confirme la succession classique des différents types d'altération entre les points hauts et les points bas du paysage : allitisation avec individualisation de gibbsite et formation éventuelle de bauxite sur les hauts reliefs, bisiallisation avec néoformation d'argiles gonflantes dans les bas-fonds et monosiallisation entre ces deux pôles le long des pentes.

II - BILANS D'ALTERATION CHIMIQUE ET D'EROSION MECANIQUE DANS LE FOUTA DJALON

A - LES FLUX DE MATIERES SORTANT DU FOUTA DJALON

1. Les flux de matières en solution

Près de 770 000 t/an de matières en solution sont exportées hors du Fouta Djallon. 30% de ce flux total annuel transite par le Bafing ; la Tominé et le Konkouré exportent chacun 20% du total, et la Gambie, la Falémé et le Tinkisso se répartissent en parts égales les 30% restant (tableau 71). Le tonnage représente un flux spécifique dissous moyen de 13 t/km²/an sur l'ensemble du Fouta Djallon. Le flux spécifique est plus faible sur les bassins versants de la Falémé (7 t/km²/an) et de la Gambie (10 t/km²/an) alors qu'il est maximal sur la Tominé (17 t/km²/an). Le facteur déterminant semble donc être l'intensité de la lame d'eau précipitée, et donc du domaine climatique considéré, ce qui est une caractéristique des bassins versants à substratum cristallin (DARMENDRAIL, 1984).

Tableau 71 : Flux dissous (T_D) et particulaires (T_S) dans les bassins versants qui drainent le Fouta Djallon et flux spécifiques correspondants (F_{TDS} et F_{MES})

Bassin versant	TDS (mg/l)	T_D (t/an)	F_{TDS} (t/km ² /an)	MES (mg/l)	T_S (t/an)	F_{MES} (t/km ² /an)
KONKOURE	17,8	140 900	14,2	10	(79 200)	-
TOMINE	34,8	164 600	17,5	16	(75 200)	-
GAMBIE	40,7	77 000	10,3	32	60 000	8
FALEME	48,8	69 300	6,9	60	(80 800)	-
BAFING	52,9	240 200	15,3	28	(125 600)	-
TINKISSO	50,8	80 100	12,5	32	51 200	8
EAUX DU FOUTA	35,0	772 100	13,1	21	(472 000)	(8)

() : valeurs estimées en prenant 8 t/km²/an comme flux particulaire spécifique.

2. Les flux de matières en suspension

Sur la base d'un flux spécifique moyen annuel de 8 t/km²/an sur l'ensemble du Fouta Djallon pour la période étudiée de 1979 à 1986, on obtient un flux total des MES sortant du Fouta Djallon de 470 000 t/an, ce qui représente une concentration moyenne de 21 mg/l (tableau 71). Cette hypothèse d'uniformité de réponse à l'érosion mécanique de l'ensemble du Fouta Djallon est en accord avec les résultats d'une étude antérieure effectuée par la *Société Energo-Projet* (GUPTA, 1987). Après avoir effectué des mesures journalières de concentration des MES de juillet à septembre sur le Bafing à Balabory, le rapport conclue à une concentration moyenne annuelle de 26 mg/l, ce qui est très proche des 28 mg/l trouvés par nos calculs (tableau 71). D'autre part, cette dilution des teneurs en MES dans les eaux (conséquence de l'hypothèse de calcul) correspond aux observations de terrains et aux données plus complètes sur les exportations en éléments dissous. Les deux extrêmes sont représentées par les eaux très claires du Konkouré (10 mg/l) et par les eaux les plus chargées de la Falémé (60 mg/l).

3. Importance relative des transports dissous et particulaires

En année moyenne, le flux total de matières exportées hors du Fouta Djallon est de 1,2 millions de tonnes par an, dont 62% sous forme dissoute. Ce chiffre représente un flux spécifique total de 21 t/km²/an ; 29% de ce flux total transite par le Bafing, 19% et 18% respectivement par la Tominé et le Konkouré, 12% par la Falémé, et la Gambie et le Tinkisso exportent chacun 11% du total (fig.67).

Les contributions respectives des transports minéraux dissous et des transports particulaires sont comparées pour les principaux éléments exportés (fig.68). Le carbone inorganique, le chlore, le sodium, le calcium et le magnésium sont principalement exportés sous forme dissoute. L'aluminium et le fer sont essentiellement entraînés sous forme particulaire. Plus de la moitié du silicium (57%) et seulement 15% du potassium sont exportés sous forme particulaire. Les faibles contributions de ces deux éléments au transport particulaire soulignent la faiblesse des exportations de MES hors de ce paysage soudano-guinéen.

Toutes formes de transport confondues, l'ordre d'importance des tonnages d'éléments exportés est le suivant : Si > C_{inorg.} > Ca > Mg > Na > Cl > Al > K > Fe.

Le flux de carbone organique particulaire est calculé à partir du taux de COP mesuré dans les MES de Kédougou, soit 5,1% (chapitre VII). On obtient alors une exportation annuelle de COP de 24000 t/an, soit un flux spécifique de 0,4 t/km²/an de carbone.

Enfin, la comparaison avec d'autres bassins africains montre que les flux spécifiques dissous et particulaires du Fouta Djallon (respectivement 13 t/km²/an et 8 t/km²/an) sont du même ordre de grandeur que ceux de l'Ouham, dont l'environnement géologique et climatique est semblable (respectivement 13 t/km²/an et 10 t/km²/an) (GAC & PINTA, 1973). Par contre,

ces chiffres sont largement inférieurs à la moyenne africaine (respectivement 24 t/km²/an et 17 t/km²/an) (GARRELS & MACKENZIE, 1971).

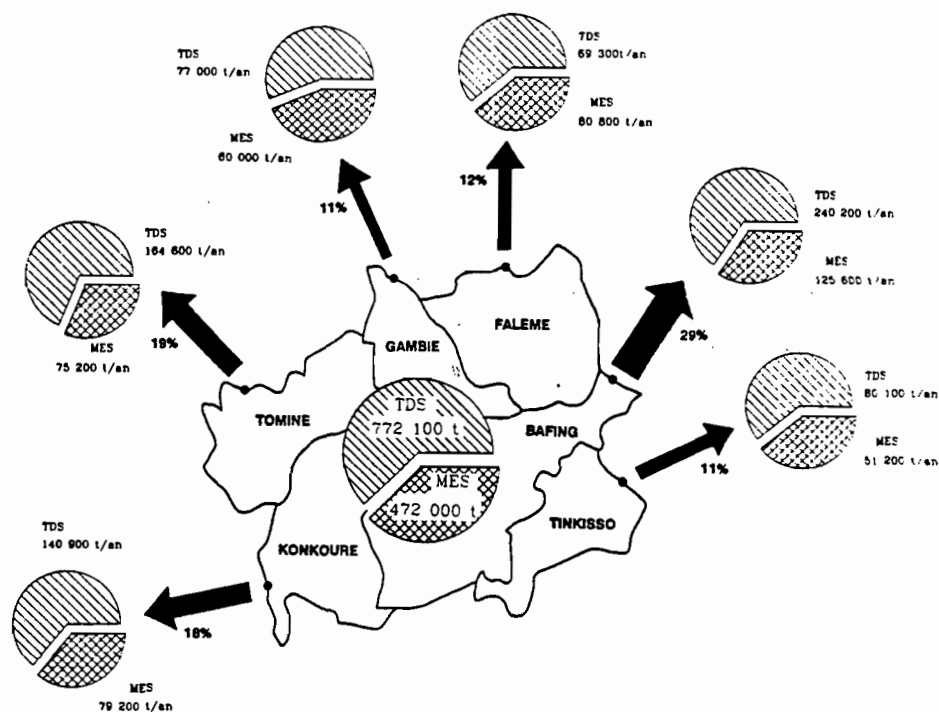


Fig. 67 : Répartition des exportations de matières dissoutes et particulaires hors du Fouta Djallon.

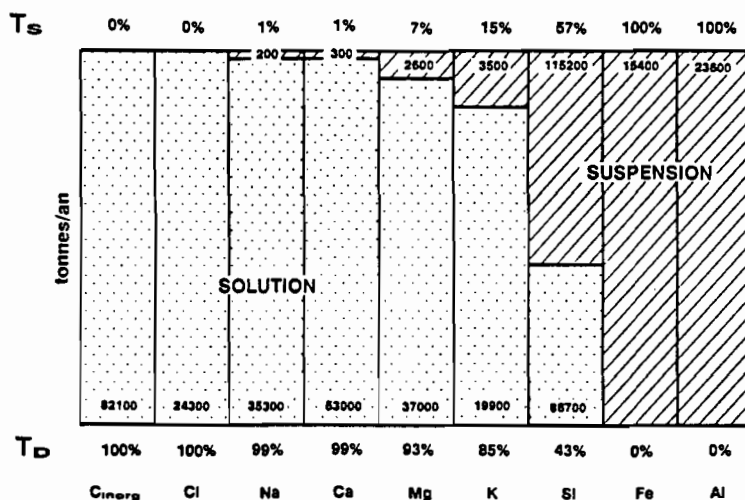


Fig. 68 : Importance relative des exportations de matières dissoutes et particulaires hors du Fouta Djallon.

B - L'ÉROSION ACTUELLE DANS LE FOUTA DJALON

L'érosion mécanique et l'altération chimique s'associent pour évacuer les éléments hors du profil pédologique. Certains éléments sont exportés en solution, d'autres sont temporairement retenus, complètement ou partiellement, dans les minéraux secondaires néoformés ou dans les minéraux résiduels. Au fur et à mesure que l'altération chimique progresse en profondeur, les minéraux résiduels ou secondaires s'accumulent. Ceci correspond à l'approfondissement des profils et s'oppose ainsi à l'ablation mécanique qui tend, en surface, à réduire l'épaisseur des sols.

L'importance de ces deux mécanismes concurrentiels est ici déterminée pour l'ensemble du Fouta Djalou.

1. L'impact des poussières atmosphériques

Une partie seulement des transports dissous a pour origine l'altération chimique des roches et des sols. Une part importante de la charge dissoute est liée aux apports atmosphériques, aux pollutions et au CO₂ atmosphérique utilisé lors des processus d'altération et de dissolution des roches (FRITZ, 1975 ; BOURRIE, 1978 ; MEYBECK, 1984). D'autre part, l'importance des aérosols détritiques dans cette zone géographique (chapitre VI) influence également l'exportation de MES. Mais leur contribution y est difficilement quantifiable. Pour toutes les espèces chimiques, le flux particulaire sortant du Fouta Djalou est inférieur à l'apport atmosphérique particulaire (fig.69). Le calcium et le sodium sont les éléments les moins exportés, on retrouve à la sortie seulement 2% à 3% de leur masse totale initiale. Par contre, le fer est l'élément le plus restitué (50%) ; entre ces deux extrêmes, les éléments s'arrangent dans l'ordre croissant suivant : Mg < Si < K < Al.

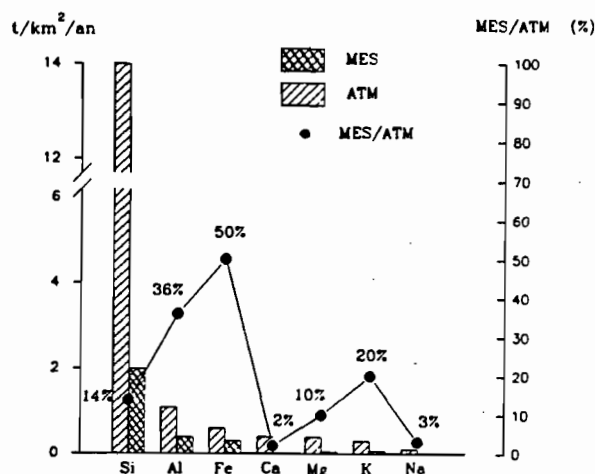


Fig. 69 : Importance relative des apports atmosphériques particuliers sur le Fouta Djalou et des flux de matières en suspension exportés par les fleuves et rivières qui drainent ce massif.

Le fer est un élément difficilement assimilable par les êtres vivants, contrairement au calcium. On peut donc supposer qu'une grande partie des poussières atmosphériques est reprise par le vent (plus de 50%, correspondant aux 50% manquants du fer) et qu'une autre partie est assimilée par la végétation, et la faune, ou dissous par les eaux, préférentiellement selon les éléments chimiques. Leur impact sur le bilan d'érosion mécanique à l'échelle du paysage semble donc négligeable.

En fait, l'impact le plus important des apports atmosphériques détritiques est le fait des eaux de pluie, dont ils modifient fortement la composition chimique (chapitre VI).

2. Bilan des apports atmosphériques dissous et des flux dissous exportés

Le bilan massique des apports atmosphériques dissous et des flux dissous exportés, effectué à partir de la composition chimique des eaux de pluie en milieu guinéen (chapitre VI) et de la composition chimique moyenne des eaux sortant du Fouta Djalou, permet d'appréhender le bilan "entrée-sortie" sur l'ensemble du Fouta Djalou. Ce bilan est équilibré pour le chlore, ce qui confirme l'origine essentiellement atmosphérique de cet élément. Pour les autres éléments, il est positif à l'exception du bilan du calcium qui est fortement excédentaire (tableau 72).

Tableau 72 : Bilan massique des apports atmosphériques dissous et des flux dissous exportés hors du Fouta Djallon (en 10³ t/an)

Eléments chimiques	ENTREES E	SORTIES S	BILAN $\delta = E - S$	δ_s (t/km ² /an)	$\ \delta/S\ $ (%)
Cl	24,4	24,3	0	0	0
HCO ₃	391,1	417,2	-26,1	-0,44	6
Ca	154,8	53,0	+101,8	+1,73	-
Mg	8,1	37,0	-28,9	-0,49	78
K	16,3	19,9	-3,6	-0,06	18
Na	24,4	35,3	-10,9	-0,20	31
SiO ₂	57,0	185,4	-128,4	-2,18	69

δ_s : bilan spécifique

Un bilan "entrée-sortie" négatif (<0) correspond à un apport provenant de l'altération chimique de la roche. Ainsi, il apparaît que le calcium est le seul élément stocké (seul bilan positif) à l'échelle du paysage. On peut supposer ici qu'une partie du calcium précipite sous forme de calcite dans le sol, hypothèse déjà envisagée par TARDY (1969) puis LELONG & ROOSE (1986) dans le Nord de la Côte d'Ivoire en milieu guinéen dans des conditions bioclimatiques comparables. La silice constitue 75% des flux dissous exportés provenant de l'altération. Cependant, le magnésium est l'élément ayant le taux d'apport par l'altération le plus important : 78% du magnésium exporté hors du paysage viendrait de l'altération (tableau 72). Enfin, l'altération chimique actuelle sur l'ensemble du Fouta Djallon apporte surtout aux eaux de surface de la silice et du magnésium.

Bien que les eaux de la Gambie et de la Falémé semblent influencées par la dissolution de bancs carbonatés à l'intérieur d'une matrice générale gréseuse, l'altération chimique qui affecte le Fouta Djallon, est assimilée en première approximation à une hydrolyse simple des minéraux qui composent les roches cristallines. Cette hypothèse permet de ne considérer que la somme des cations et de la silice pour le bilan du soutirage chimique (GAC, 1980 ; MEYBECK, 1984). Pour la période 1979-1986, l'altération chimique sur l'ensemble du Fouta Djallon est de 2,9 t/km²/an, ce qui est du même ordre de grandeur que les valeurs mesurées directement sur des toposéquences en milieu guinéen par LELONG & ROOSE (1986). Par contre, elle est largement inférieure au résultat donné par GAC & PINTA (1973) sur l'Ouham (7,5 t/km²/an) du fait, à notre avis, de la non prise en compte des apports atmosphériques, les auteurs n'ayant retranché que les ions bicarbonates au flux total exporté par la rivière.

3. Erosion des sols et vitesse d'approfondissement des profils

Sur l'ensemble du Fouta Djallon, le principal produit de l'altération est la kaolinite. L'importance relative des deux mécanismes concurrentiels d'érosions des sols et d'approfondissement des profils peut être appréciée par le calcul du bilan d'altération de la kaolinite selon la méthode décrite par GAC & PINTA (1973).

L'érosion mécanique spécifique a été fixée à 8 t/km²/an. En admettant une densité moyenne de 2,0 pour les sols, les processus actuels d'érosion sur l'ensemble du Fouta Djallon se traduiraient par une ablation mécanique des sols de 4 mm/1000 ans en moyenne. On sait par ailleurs que 36% des MES sont formés de kaolinite (chapitre VII), ce qui représente une exportation hors du paysage de 170000 t de kaolinite (soit 2,9 t/km²/an). Il s'agit maintenant de déterminer dans quelle mesure l'altération chimique est susceptible de compenser chaque année la perte en kaolinite résultant de l'ablation mécanique.

A partir de la composition chimique moyenne des roches du Fouta Djallon (chapitre II) et en prenant une densité moyenne de 2,65, on établit que 1 m³ de roche contient 1500 kg de quartz, 530 kg de silice combinée et 240 kg d'Al₂O₃. Il faut évacuer 250 kg de silice pour que tout l'alumine soit associée à la silice restante pour former de la kaolinite, dont le poids est alors de 600 kg.

Le taux moyen de dissolution du quartz généralement admis est de 15% (LELONG, 1967 ; TARDY, 1969 ; GAC & PINTA, 1973 ; GAC, 1980 ; PROBST, 1983 ; NKOUNKOU & PROBST, 1987). Dans le Fouta Djalou, la silice totale évacuée par m³ de roche s'élève alors à 475 kg, dont 225 kg proviennent de la dissolution du quartz. Le soutirage chimique en silice qui correspond à la kaolinisation de la roche représente donc 53% du tonnage annuel de silice en solution, soit 68000 t (= 128400 t * 53%) (tableau 72). Il lui correspond une progression de l'altération d'une épaisseur de $4,6 \cdot 10^{-6}$ m/an et la formation de 2,8 t/km²/an de kaolinite. Le bilan de la kaolinite s'équilibre donc, puisque l'érosion mécanique enlève 2,9 t/km²/an de kaolinite. Cependant, la tendance apparaît légèrement favorable à l'approfondissement des sols (fig.70).

Il s'agit là de résultats obtenus à partir de valeurs moyennes. Il est bien évident que localement les sols sont susceptibles de s'approfondir ou de se tronquer. En effet, ces chiffres ne sont que des indicateurs de tendance. Le déséquilibre enregistré ici ne semble pas significatif à l'échelle du paysage et nous rejoindrons les conclusions de LELONG & ROOSE (1986) faites sur le Nord de la Côte d'Ivoire dans un climax comparable. Dans les conditions actuelles, le Fouta Djalou est en *équilibre géochimique*.

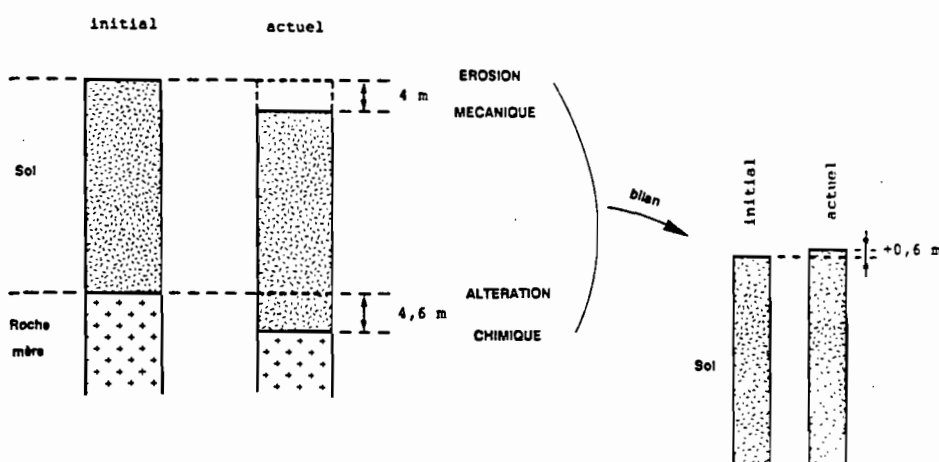


Fig. 70 : Bilan actuel de l'altération chimique et de l'érosion mécanique sur l'ensemble du Fouta Djalou (tous les millions d'années).

III - CONTRIBUTIONS RESPECTIVES DES DIFFERENTES FORMATIONS LITHOLOGIQUES A LA DYNAMIQUE ACTUELLE DU FOUTA DJALON

La composition chimique des eaux du Fouta Djalou résulte en fait du mélange d'eaux drainant cinq formations lithologiques principales (chapitre II). Les apports en solution de chaque formation lithologique peuvent être calculés à partir des compositions chimiques moyennes des eaux drainant chaque type de roche et des débits spécifiques des régions correspondantes (NKOUNKOU & PROBST, 1987 ; ETCHANCHU, 1988).

Sur l'ensemble du Fouta Djalou, il existe une relation linéaire hautement significative entre la lame d'eau écoulée et la lame d'eau précipitée (fig.71). Ainsi, les débits spécifiques moyens pour chaque formation lithologique sont déterminés en admettant que les débits suivent la même répartition que les précipitations (SUTCLIFFE & PIPER, 1986) : 56% des eaux de surface sortant annuellement du Fouta Djalou drainent les formations gréseuses, 18% les dolérites, 17% les granites, 7% les grès quartzitiques à bancs carbonatés et seulement 2% les schistes (tableau 73) (fig.72).

Tableau 73 : Contributions respectives des différentes formations lithologiques à l'écoulement de surface du Fouta Djalon

Formations lithologiques	S km ²	% S	% V	Q m ³ /s	Q _a (l/s/km ²)
Granites	14000	24	17	115	8,2
Grès	20100	34	56	394	19,6
Schistes	2300	4	2	11	5,0
Grès quartz.	8200	14	7	52	6,3
Dolérites	14400	24	18	127	8,8

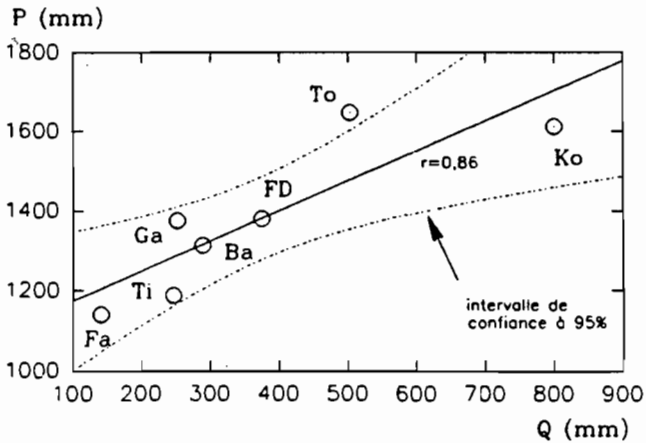


Fig. 71 : Relation entre la lame d'eau écoulee (Q en mm) et la lame d'eau précipitée (P en mm) sur l'ensemble du Fouta Djalon.

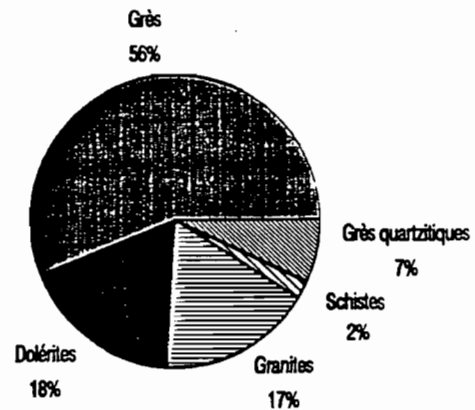


Fig. 72 : Apports des différentes formations lithologiques à l'écoulement de surface du Fouta Djalon.

La composition chimique moyenne des eaux drainant chaque type de roche est plus délicate à déterminer. Il s'agit de trouver des prélèvements sur des bassins homogènes situés suffisamment à l'amont pour ne pas être influencés par des dissolutions provenant d'autres formations lithologiques : 45 analyses ont été sélectionnées. La composition chimique pour chaque formation lithologique a été calculée par le procédé utilisé pour établir les moyennes par bassin versant.

Bien sûr, ces moyennes doivent être corrigées des apports atmosphériques. En effet, il est apparu dans le paragraphe précédent que la composition chimique des apports atmosphériques dissous était d'une importance capitale pour pouvoir estimer l'altération à partir de ces eaux de surface extrêmement diluées. Or les différents prélèvements choisis n'ont pas été influencés de la même façon par les apports atmosphériques dissous du fait de leur provenances diverses. Certains sont issus du centre du Fouta Djalon en milieu guinéen, d'autres du Nord du massif en milieu soudanien. Ainsi, une composition moyenne des eaux de pluie est calculée à partir de la composition chimique des pluies de ces deux zones climatiques (chapitre VI) afin que tout le chlore contenu dans les eaux de surface soit entièrement attribué aux apports atmosphériques. Cette correction est applicable à tous les ensembles lithologiques à l'exception des schistes où un résidu de chlore subsiste dans les eaux issues de cet ensemble (tableau 74), ce résidu représente 0,08% des flux dissous provenant uniquement de l'altération, ce qui est négligeable. D'autre part, seuls les granites et les grès montrent un bilan négatif pour le calcium.

Tableau 74 : Compositions chimiques moyennes (mg/l) des eaux d'altération drainant les principaux types de roches du Fouta Djallon (après corrections des apports atmosphériques)

Lithologie	n	Cl	HCO ₃	Ca	Mg	K	Na	SiO ₂
Granites	15	0	6,7	0	0,8	0,2	1,3	7,1
Grès	13	0	1,9	0	0,5	0,1	0,2	5,4
Schistes	1	0,5	13,7	1,3	0,7	0,8	4,8	7,3
Grès quartz.	3	0	22,6	3,6	1,8	0,3	1,0	19,8
Dolérites	13	0	13,9	0,9	1,8	0,4	0,9	10,2

n : nombre d'échantillons.

Le calcul du bilan de l'altération par ensemble lithologique donne un bilan légèrement supérieur à celui déterminé globalement sur l'ensemble du Fouta Djallon (tableau 75). La part respective de chaque élément dans le bilan de l'altération est sensiblement la même à l'exception du magnésium et du calcium. Le magnésium ne représente plus que 9% du flux dissous provenant de l'altération (au lieu de 17%) et, au contraire, le calcium représente 5% de ce flux alors qu'il est stocké à l'échelle du paysage.

Tableau 75 : Comparaison des deux méthodes de calcul des flux dissous provenant de l'altération

Méthodes	Ca	Mg	K	Na	SiO ₂	Σ(dissous)	E _c t/km ² /an
Lithologie en 10 ³ t en %	9,7 5	19,5 9	4,4 2	13,0 6	168,2 78	215 28	3,6
Globale en 10 ³ t en %	<0 -	28,9 17	3,6 2	10,9 6	128,4 75	171 22	2,9

Finalement, 20% à 30% des flux dissous exportés hors du Fouta Djallon proviennent de l'altération de son substratum rocheux et de sa couverture pédologique. Les grès représentent 36% de ce flux, ensuite viennent par ordre décroissant les dolérites, les grès quartzitiques, les granites et, enfin, loin derrière du fait de leur faible superficie, les schistes (tableau 76) (fig.73).

Tableau 76 : Altération des principaux types de roches du Fouta Djallon exprimée en % de l'altération totale

Formations lithologiques	Ca	Mg	K	Na	SiO ₂	Σ(dissous)	E _c t/km ² /an
Granites	0	16	18	35	15	16	2,4
Grès	0	32	25	19	40	36	3,8
Schistes	5	1	6	5	2	2	1,9
Grès quartz.	60	15	11	13	19	20	5,3
Dolérites	35	36	40	28	24	26	4,0

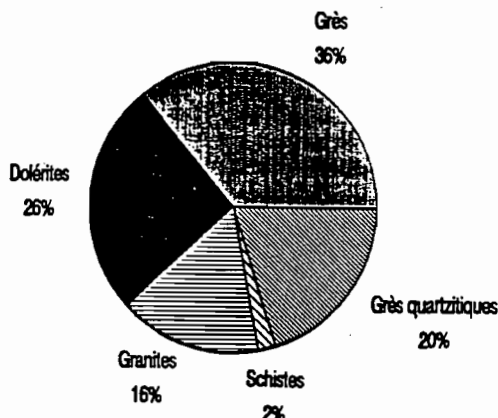


Fig. 73 : Origine de la charge dissoute totale due à l'altération chimique dans les eaux drainant le Fouta Djallon.

L'importance relative de l'ablation des sols et de l'approfondissement des profils est appréciée par classe lithologique en utilisant la méthode de calcul précédemment décrite. Les grès, les grès quartzitiques et, dans une moindre mesure, les dolérites sont les formations lithologiques du Fouta Djalon formant actuellement des sols, les granites semblent en semi-équilibre géochimique avec cependant une légère tendance vers l'ablation des sols alors que les schistes sont complètement dénudés (tableau 77) (fig.74).

Tableau 77 : Importance relative de l'ablation et de l'approfondissement des sols par classe lithologique sur l'ensemble du Fouta Djalon

Formations lithologiques	SiO ₂ dissoute exportée tonnes/an	Approfond. µm/an (1)	Kaolinite formée t/km ² /an	Ablation µm/an (2)	BILAN µm/an (1)-(2)
Granites	25 700	3,0	3,2	4	-1
Grès	66 600	12,8	2,4	4	+9
Schistes	2 600	1,1	1,1	4	-3
Grès quartz.	32 200	11,2	0,1	4	+7
Dolérites	41 100	5,7	5,7	4	+2

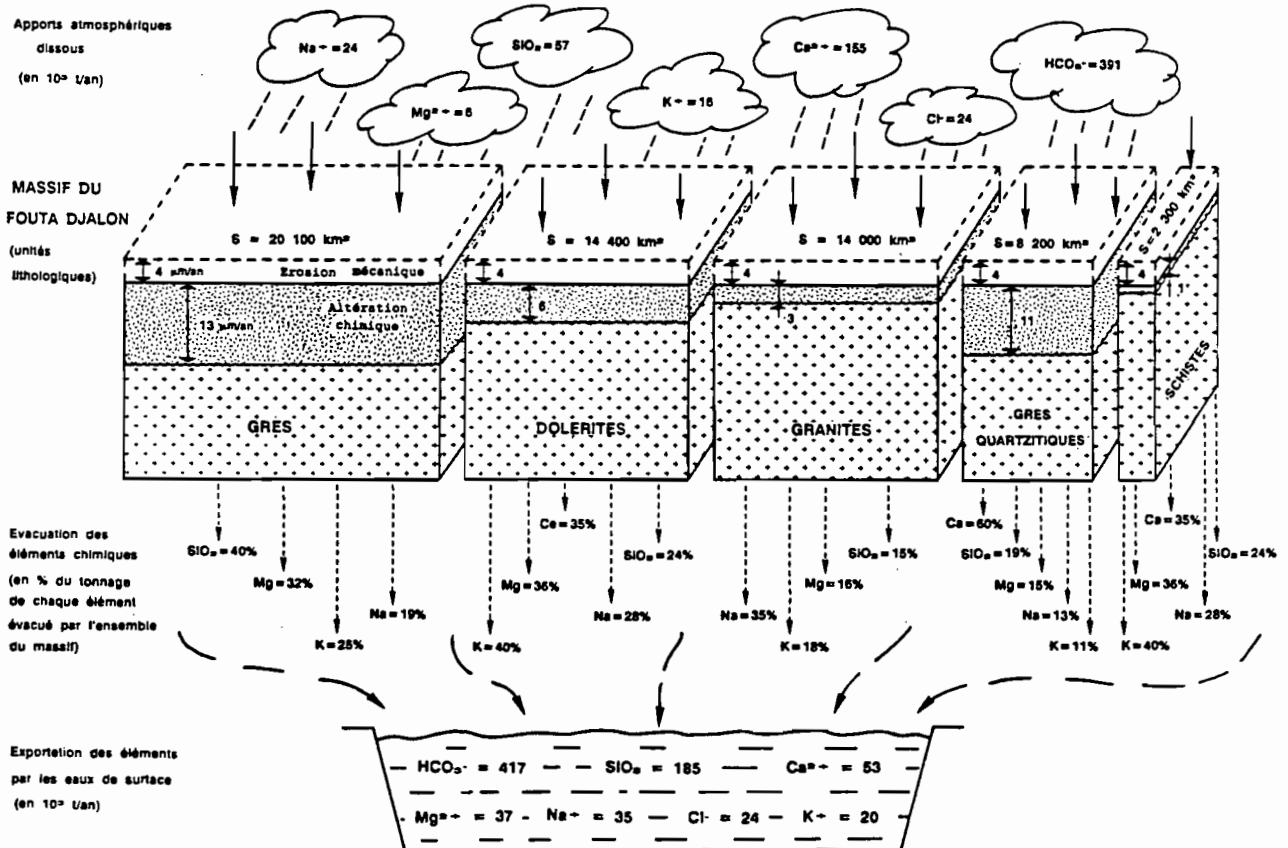


Fig. 74 : Bilan géochimique du Fouta Djalon.

IV - CONCLUSIONS

Les eaux du Fouta Djalou, faiblement minéralisées (35 mg/l), sont bicarbonatées calcomagésiennes et siliceuses. Les bicarbonates assurent à eux seuls l'équilibre anions-cations et la silice constitue 33% de la charge dissoute. La dynamique globale actuelle d'altération est de type monosiallitique. Cependant, des tendances régionales apparaissent en fonction de la lithologie et des situations topographiques. La caractéristique essentielle des flux de matières est la faible importance du transport particulaire (21 mg/l). Toutes formes d'exportation confondues, le flux relatif pondéral des éléments majeurs est le suivant : $Si > C_{\text{inorg.}} > Ca > Mg > Na > Cl > Al > K > Fe$. Les cations basiques sont presque entièrement évacués en solution, la silice se partage équitablement entre les deux formes de transport, et l'aluminium et le fer accompagnent exclusivement la phase en suspension. La fraction dissoute représente 62% des exportations, la fraction minérale particulaire 36% et le carbone organique particulaire 2%.

L'influence des apports atmosphériques particuliers sur la qualité chimique des eaux de pluie fait que les apports atmosphériques dissous sont loin d'être négligeables dans le calcul du bilan de l'altération de ces paysages, où l'érosion mécanique et l'altération chimique sont très faibles. L'apport majeur de poussières atmosphériques, souvent négligé dans les bilans géochimiques, apporte ici un éclairage nouveau sur la dynamique d'altération de ces régions tropicales.

Ainsi, après correction des apports atmosphériques, l'altération chimique et l'érosion mécanique sont estimés respectivement à 3 t/km²/an et 8 t/km²/an. Sur les 772000 t/an exportées en solution par les eaux de surface du Fouta Djalou, de 20% à 30% seulement proviennent de l'altération du substratum rocheux et de sa couverture pédologique. Ces chiffres soulignent la faiblesse de l'altération chimique sévissant actuellement dans ces paysages guinéens souvent cuirassés. Du fait de leur drainage beaucoup plus élevé, les grès tendres de la partie ouest du Fouta Djalou contribuent le plus à l'exportation des éléments dissous, leur profil d'altération s'enfonce de 13 mm/1000 ans.

Globalement, le Fouta Djalou est en régime stationnaire, ou encore en *équilibre géochimique* : l'approfondissement des profils d'altération est légèrement supérieur à l'ablation des sols, respectivement 4,6 mm/1000 ans et 4 mm/1000 ans. Enfin, le calcium semble stocké dans le paysage, apparemment au niveau des grès et granites.

CHAPITRE IX

INFLUENCE DES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES SUR LA DYNAMIQUE ACTUELLE DU FOUTA DJALON, ESQUISSE D'UN MODELE PREVISIONNEL.

Ce dernier chapitre appréhende la dynamique actuelle du Fouta Djalon par l'étude des fluctuations hydroclimatiques. Dans un premier temps, l'objectif est de déterminer les relations existant entre le débit du fleuve Sénégal à Bakel, la température de ses eaux, la température de l'air et la pluie, à différents pas de temps : journalier, mensuel, saisonnier et annuel. Dans un second temps, ces résultats sont reliés à l'exportation en bicarbonates hors du bassin versant, et donc à sa consommation en CO₂, il est alors établi un modèle prévisionnel de la dynamique actuelle du Fouta Djalon en cas de changement climatique prolongé.

Cette démarche est dans la droite ligne des études initiées par GARRELS & MACKENZIE (1971), qui ont débouché notamment sur le modèle BLAG (BERNER & *al.*, 1983), et dont les travaux de géochimie globale de TARDY (1986) puis PROBST (1990) rendent compte. A l'échelle globale, PROBST & TARDY (1987, 1989) ont montré que le débit des fleuves peut servir d'indicateur hydroclimatique, que celui-ci est lié à la température de l'air, elle-même en relation directe avec la concentration de CO₂ dans l'atmosphère (modèle BLAG). Ainsi il apparaît bien que la Terre est un système fermé où tout interfère. Tout ce travail a été fait à l'échelle planétaire. Nous proposons ici une nouvelle approche, que l'on peut intituler *Hydroclimatologie et Géochimie Globale des Continents* (HGGC), cherchant à souligner par zone climatique les comportements géochimiques et leur relations avec les indicateurs hydroclimatiques. Ainsi, dans le cadre de cette étude africaine et en continuité avec les chapitres précédents, le domaine sahélo-soudano-guinéen est testé.

I - LES QUATRE MODES CLIMATIQUES AU SENS DE TARDY (1986)

Les climats qui règnent à la surface de la Terre sont très contrastés et changent énormément d'un site à l'autre. La latitude, l'altitude, la distance à la mer en sont les facteurs déterminants. Un climat est défini à partir de ses caractéristiques moyennes, observées sur de nombreuses années. Mais, ces caractéristiques fluctuent d'une année à l'autre, en combinant des composantes cycliques et des composantes accidentelles. Aux cycles climatiques se surimposent les crises climatiques. On imagine volontiers pouvoir définir un climat moyen à l'échelle du globe terrestre. On imagine également que ce climat puisse fluctuer sous l'effet de pulsations qui concernent la Terre entière. Il est cependant certain que chacune des régions, chacun des bassins du globe réagit pour son propre compte avec plus ou moins d'inertie, provoquant des déphasages plus ou moins importants les uns par rapport aux autres (KRISHNAMURTI & *al.*,

1986 ; KAYSER & *al.*, 1990). De cette façon, chaque bassin module à sa guise composantes cycliques et composantes accidentelles, si bien que la réponse paraît souvent individuelle, chaotique et inexplicable.

Cependant, l'analyse des paléoclimats récents et anciens, comme celle des climats actuels, fait apparaître quatre modes climatiques majeurs, qui, aujourd'hui, s'interpénètrent dans l'espace et, qui, hier, se sont succédés dans le temps. Ces modes sont définis à partir de la température et de l'humidité de l'air, ce dernier paramètre difficilement quantifiable est appréhendé à partir du facteur pluie ou du facteur débit. Il s'agit des modes humides-chauds et secs-froids, qui sont les plus fréquents, et humides-froids et secs-chauds, qui sont exceptionnels (PROBST & TARDY, 1989). L'alternance de ces quatre modes climatiques est le résultat du jeu de position de six séries de courants convectifs d'air qui, des pôles à l'équateur, en passant par les tropiques, animent l'atmosphère au-dessus des continents et des océans. Selon les cas, au gré du déplacement des anticyclones ou des dépressions, un climat tempéré humide et frais peut évoluer vers un mode sec et froid, si l'influence polaire domine, ou sec et chaud si l'influence tropicale l'emporte. Bien évidemment, et pour des raisons symétriques, un climat humide et chaud peut devenir plus frais, en restant humide, ou plus frais en devenant plus sec.

L'examen des fluctuations climatiques des temps passés montre que, à long terme, quand le climat d'une région du globe ou le climat de la Terre entière évoluait de l'un de ces quatre pôles vers un autre, la transition ne se produisait pas de manière uniforme mais dévoilait de nombreuses récurrences. Ainsi, par exemple, lorsque le climat global change du mode sec-froid vers le mode humide-chaud, la transition montre des allés et venues qui peuvent être, selon les régions et selon les époques, tantôt humides-froids, tantôt secs-chauds. Ces allés et venues sont dominés par un certain nombre de facteurs géodynamiques : position relative des océans et des continents, niveau moyen des mers, surface des continents, distribution des altitudes, taux de subduction et d'expansion océanique. Et de ces facteurs géodynamiques dépendent les flux d'altération, d'érosion, de transport et de sédimentation ainsi que la composition de l'océan et de l'atmosphère. Les pulsations climatiques et les fluctuations du cycle de l'eau apparaissent donc comme dépendantes des caprices de la tectonique globale. Lier ces fluctuations géodynamiques appréciées par l'intermédiaire des paramètres hydroclimatiques aux pulsations qui affectent l'altération, l'érosion et le transport des éléments dissous et particuliers est une démarche globale qui aboutit à un schéma de dynamique à l'échelle du paysage, des continents puis de la Terre entière.

II - DESCRIPTION CLIMATIQUE DES 8 ANNEES ETUDIEES

Dans ces régions tropicales où la pluviosité est le facteur principal qui règle l'écoulement de surface, il est justifié de parler d'année humide lorsque celle-ci à un débit annuel élevé et d'année sèche dans le cas contraire. Pour les raisons données dans le chapitre III, l'année civile est utilisée comme référence.

Les quatre paramètres hydroclimatiques n'ont pas la même signification physique. Le débit est une mesure qui intègre toute la surface du bassin versant, alors qu'au contraire les paramètres de températures et pluie sont des données ponctuelles qui expriment l'état climatique à l'exutoire. Ceci est d'autant plus vrai pour le facteur pluie qui est particulièrement irrégulier dans ces régions, la température étant une donnée plus homogène (chapitre III). Ces raisons expliquent que la caractérisation climatique de chacune des années étudiées ait été recherchée à travers l'évolution des paramètres débit et température.

A - LES DONNEES UTILISEES

Toutes les données concernent le fleuve Sénégal à Bakel de 1979 à 1986. Les données hydroclimatiques utilisées sont le débit du fleuve (Q en m^3/s), la température de l'eau (T_e en $^{\circ}C$), la température de l'air (T_a en $^{\circ}C$) et la pluviométrie (P en mm).

1. Les débits

Les valeurs de débit moyen journalier, Q , utilisées sont celles données par le service hydrologique de l'ORSTOM à Dakar.

2. Les températures de l'air et de l'eau

Les températures sont mesurées au thermomètre à mercure le matin à 8 h et le soir à 18 h. La température moyenne journalière est la moyenne de ces deux lectures.

3. Les pluies

La pluie est relevée le matin à 8 h et le soir à 18 h. On appelle $P_n(j)$ la lecture du matin du jour j pour pluie nocturne, et $P_d(j)$ la lecture du soir du jour j pour pluie diurne. La pluie journalière P_j est obtenue en sommant les deux pluies :

$$P_j = P_d(j) + P_n(j+1).$$

B - DESCRIPTION HYDROCLIMATIQUE ANNEE PAR ANNEE (fig.75)

Rappelons que les huit années étudiées (de 1979 à 1986) appartiennent à la période de sécheresse ayant débutée en 1970 et dont la phase paroxysmale a eu lieu en 1983 et 1984. A l'échelle du siècle, toutes ces années sont donc sèches. Aussi, les qualificatifs humides/secs et chauds/froids utilisés sont données par rapport à la moyenne interannuelle des huit années étudiées.

L'année la plus humide est 1981 ($Q=426 m^3/s$) et la plus sèche est 1984 ($218 m^3/s$) ; l'année la plus chaude est 1983 ($31,4^{\circ}C$) et la plus froide est 1982 ($29,1^{\circ}C$) (tableau 78). La figure 76 représente les écarts annuels à la moyenne du débit et de la température de l'air. Les années 1983 et 1984 sont des années sèches-chaudes alors que les années 1980 et 1981 sont humides-froides. Les années 1979 et 1982 sont sèches-froides alors que les années 1985 et 1986 sont humides-chaudes.

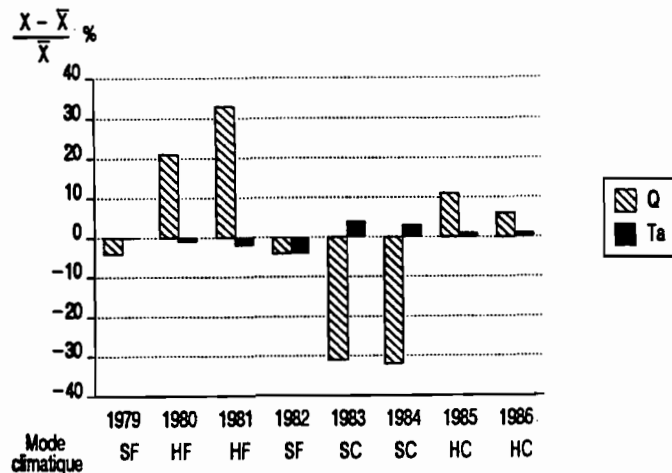


Fig. 76 : Ecarts annuels à la moyenne (δ en %) du débit et de la température de l'air.

Tableau 78 : Moyennes annuelles des paramètres hydroclimatiques (Q , P , T_E , T_A) du bassin du Sénégal à Bakel (moyenne sur l'année civile)

X_i	1979		1980		1981		1982		1983		1984		1985		1986		Moyenne X_m
	X_i	$\delta\%$	X_i	$\delta\%$	X_i	$\delta\%$	X_i	$\delta\%$	X_i	$\delta\%$	X_i	$\delta\%$	X_i	$\delta\%$	X_i	$\delta\%$	
Q (m^3/s)	309	-4	389	+21	426	+33	307	-4	221	-31	218	-32	356	+11	341	+6	321
P (mm)	409	-9	411	-8	533	+19	574	+28	402	-10	251	-44	533	+19	469	+5	448
T_A ($^{\circ}C$)	30.2	-0	30.0	-1	29.8	-2	29.1	-4	31.4	+4	31.1	+3	30.7	+1	30.5	+1	30.3
T_E ($^{\circ}C$)	28.7	+6	28.3	+4	27.1	-0	26.4	-3	26.9	-1	27.8	+2	26.1	-4	26.7	-2	27.2

$\delta\%$: écart à la moyenne en %

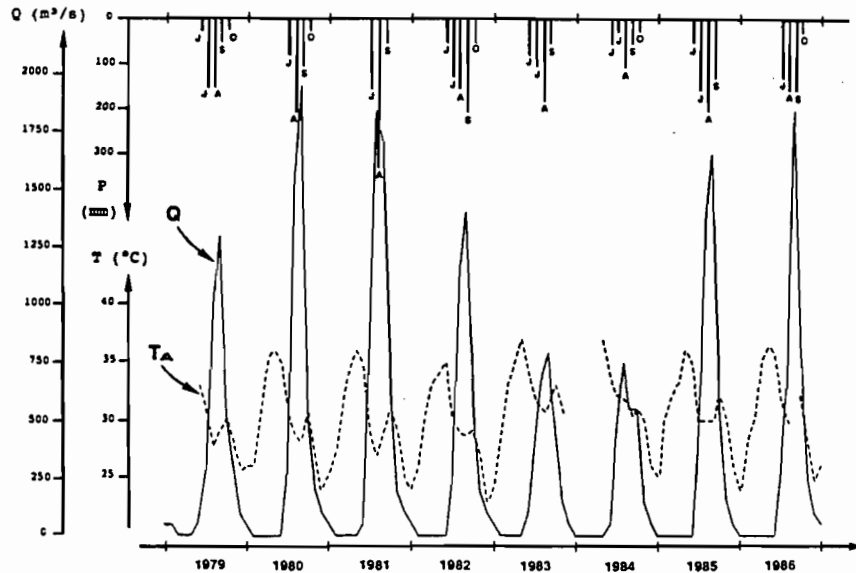


Fig. 75 : Evolution de trois paramètres hydroclimatiques (P , Q , T_A) du bassin versant du Sénégal de 1979 à 1986.

1. Année 1979 : année moyenne (plutôt sèche-froide)

L'écoulement est inférieur à $100 m^3/s$ de janvier à juin. L'hydrogramme annuel montre deux points de crue. La première a lieu début août après un écoulement quasi-nul en avril-mai et très faible en juin-juillet. La seconde est centrée sur la première quinzaine de septembre, la pointe de crue étant atteinte le 2/9/79 avec $1792 m^3/s$. La montée des eaux est rapide et par à-coups alors que la descente est plus lente et régulière. La température de l'eau est stable autour de $30^{\circ}C$ de juin à octobre puis décroît en même temps que la température de l'air : le minimum est atteint en décembre. La courbe d'évolution de la température de l'air est bimodale : le maximum maximum a lieu en fin de saison sèche (mai-juin-juillet) et le maximum minimum en fin de saison des pluies (septembre-octobre). Le minimum minimum a lieu en décembre.

2. Année 1980 : année humide-froide

L'écoulement est inférieur à $100 m^3/s$ de janvier à juin et en décembre ; l'étiage dure trois mois, de mars à mai. L'hydrogramme annuel montre trois points de crue successives, la dernière étant la plus importante : $3141 m^3/s$ le 10/9/80. La température de l'eau et la température de l'air ont des évolutions analogues à l'année précédente. L'écart en fin de saison sèche entre ces deux paramètres est plus important.

3. Année 1981 : année humide-froide

L'écoulement est inférieur à 100 m³/s de janvier à juin et en décembre ; l'étiage dure trois mois, de mars à mai. L'hydrogramme annuel montre trois pointes de crue mal individualisées, la première étant la plus importante : 2578 m³/s le 10/8/81. Cette année-là, la température de l'eau mime l'évolution de la température de l'air avec des amplitudes moins fortes.

4. Année 1982 : année sèche-froide

L'écoulement est inférieur à 100 m³/s de janvier à juin et en décembre ; l'étiage dure quatre mois, de mars à juin. L'hydrogramme annuel montre une seule pointe de crue (2183 m³/s) atteinte le 31/8/82. L'évolution de la température de l'eau est à nouveau monomodale avec une période stable d'avril à octobre à 30°C. La température de l'air est moins élevée et le caractère bimodal de sa courbe d'évolution annuelle est moins marqué.

5. Année 1983 : année sèche-chaude

L'écoulement est inférieur à 100 m³/s de janvier à mai et en décembre ; l'étiage dure trois mois, de mars à mai. Une première crue est enregistrées exceptionnellement en juin : elle est due à un événement pluvieux important localisé près de Bakel (64,4 mm le 16/6/83). Après cette montée atypique des eaux, le fleuve retrouve son niveau d'étiage fin juin. La crue proprement dite commence début juillet, l'hydrogramme a une forme aplatie. Le mois de juillet est normal mais les pointes de crue d'août et de septembre sont écrêtées. Le maximum de crue (1153 m³/s) est atteint le 22/8/83. La température de l'eau atteint son palier plus tardivement que l'année précédente. Les températures de l'air sont élevées.

6. Année 1984 : année sèche-chaude

L'écoulement est inférieur à 100 m³/s de janvier à juin et en décembre ; suite au déficit hydrique de l'année précédente, l'étiage dure cinq mois, de février à juin. A l'exception de la crue tardive enregistrée en octobre et sensiblement égale à la pointe de crue annuelle atteinte le 24/8/84 à 882 m³/s, il n'y a pas de pics qui s'individualisent. Cet hydrogramme est encore plus plat que celui de l'année précédente. Les températures n'ont été mesurées qu'à partir de mai. La température de l'eau avait déjà atteint son palier de 30°C et la température de l'air semble encore avoir une évolution bimodale.

7. Année 1985 : année moyenne (plutôt humide-chaude)

Suite à la faiblesse de la crue des deux années précédentes, la période d'étiage s'étale de janvier à juin et malgré une pointe de crue relativement importante le niveau d'étiage est déjà atteint fin décembre. Le corps de l'hydrogramme est unimodal. La montée des eaux est une suite d'impulsions croissantes jusqu'au 10/9/85 à 2370 m³/s. La température de l'eau n'atteint son palier que vers juin-juillet. Le caractère bimodal de la courbe annuelle d'évolution de la température de l'air est bien marqué.

8. Année 1986 : année moyenne (plutôt humide-chaude)

Comme l'année précédente, la période d'étiage est très longue (de janvier à juin). La période des hautes eaux est réduite dans le temps. En effet, après une première impulsion en juillet, le débit se stabilise autour de 500 m³/s jusqu'à la mi-août. La montée des eaux est alors très rapide. La pointe de crue est atteinte le 8/9/86 à 2732 m³/s. La décrue est plus lente, elle est momentanément interrompue fin septembre par une crue secondaire. La température de l'eau a un comportement classique : palier à 30°C dès avril jusqu'à fin octobre. La température de l'air est pratiquement toujours supérieure à la température de l'eau.

III - ANALYSE DES RELATIONS DEBIT-TEMPERATURE

Dans ce paragraphe, on cherche à mettre en évidence, à partir des huit années étudiées en continu sur le bassin versant du Sénégal, le meilleur découpage de l'année hydroclimatique qui permette de caractériser une année suivant les quatre principaux modes climatiques de TARDY (1986).

A - ANALYSE DES MOYENNES ANNUELLES

1. Généralités

Les deux années aux débits moyens annuels les plus faibles (1983 et 1984) correspondent aux deux années à la pluviosité la plus basse (fig.77). L'évolution interannuelle de la température de l'air et de la température de l'eau est plus stable. L'année 1982 présente un minimum pour ces deux paramètres, c'est aussi l'année la plus pluvieuse. L'année 1983 est la plus chaude vis-à-vis de T_A alors que c'est 1984 vis-à-vis de T_E .

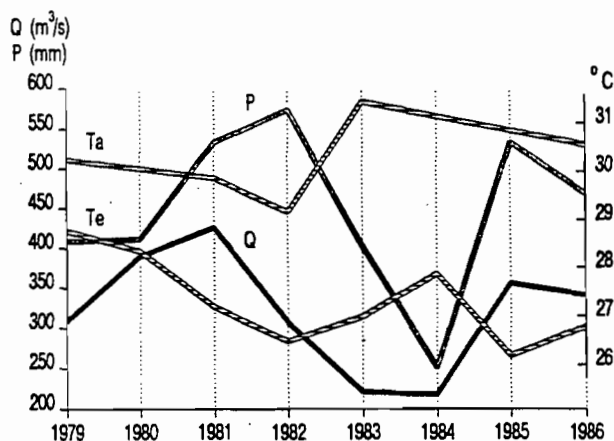


Fig. 77 : Evolution interannuelle des paramètres hydroclimatiques du bassin versant du Sénégal de 1979 à 1986.

L'étude des corrélations effectuées sur les moyennes annuelles (tableau 79) confirme que l'évolution du facteur pluie suit celle du débit (PALUTIKOF & al., 1981), le coefficient de corrélation est de +0,63, significatif à 10%. Par contre, cette évolution du facteur pluie est inverse à celles de la température de l'air ($r=-0,64$; $p=9\%$) et de la température de l'eau ($r=-0,62$; $p=10\%$). Ces deux facteurs ne sont pas du tout corrélés entre eux. Enfin, le débit est également bien corrélé à la température de l'air mais ils évoluent en sens contraire ($r=-0,60$; $p=12\%$).

Tableau 79 : Coefficients de corrélation de Pearson sur les moyennes annuelles des facteurs hydroclimatiques

n = 8	Q	T _E	T _A
P	0,63	-0,62	-0,64
T _A	-0,60	(-0,01)	
T _E	(-0,04)		

() : seuil de signification supérieur à 10%

2. Relation débit-température

La distribution des huit années étudiées en fonction des quatre modes climatiques peut être représentée en portant les moyennes annuelles dans un graphe débit-température partagé en quatre par les moyennes interannuelles respectives de ces deux paramètres (fig.78). Les années

1983 et 1984 définissent effectivement un pôle sec-chaud, et les années 1980 et 1981 un pôle humide-froid. Par contre, les années 1979, 1985 et 1986 sont proches des droites moyennes, on peut parler alors d'années moyennes ; avec l'année 1982 qui est froide moyennement sèche, ces quatre années correspondent à la tendance normale définie par TARDY (1986) à l'échelle globale. Dans ce qui suit, elles sont regroupées dans un seul ensemble, à l'intérieur duquel la tendance d'évolution entre T_A et Q est inverse de la tendance notée sur la population entière : le coefficient de corrélation linéaire y est positif ($r=0,81$; $p=19\%$).

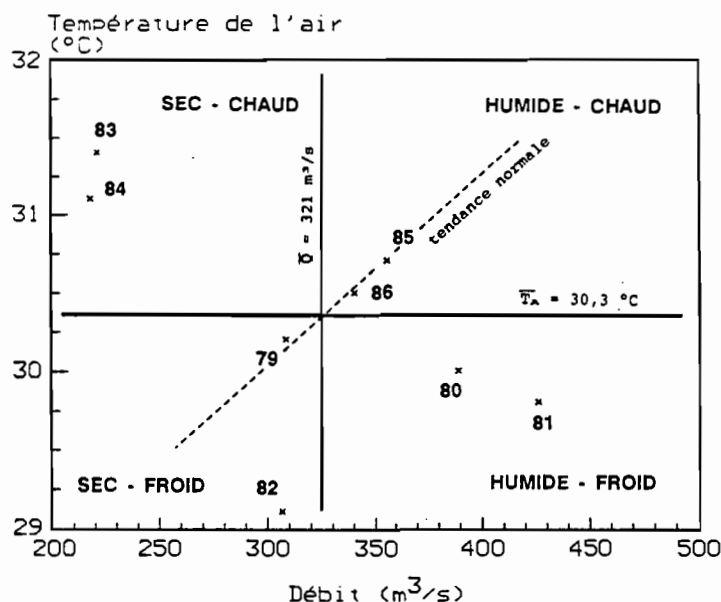


Fig. 78 : Répartition des années étudiées selon les quatre modes climatiques au sens de TARDY.

B - ANALYSES A D'AUTRES ECHELLES DE TEMPS

On recherche à l'échelle journalière, mensuelle puis saisonnière les caractéristiques des comportements hydroclimatiques des trois groupes individualisés précédemment.

1. Analyse des données journalières

L'analyse est effectuée sur les données journalières de janvier 1979 à décembre 1986, soit 2922 jours d'observation possibles. Les variables Q_j , $T_A(j)$, $T_E(j)$ et P_j ont respectivement 0, 341, 365 et 151 observations manquantes.

a) Corrélation journalière interannuelle

A l'échelle journalière, les facteurs les mieux corrélés (tableau 80) sont T_E et T_A ($r=0,65$; $p=0,01\%$). Dans une moindre mesure, Q et T_E puis Q et P sont également corrélés positivement. Enfin, Q et T_A sont faiblement corrélés négativement. Cette étude met en évidence la disparité d'évolution à l'échelle journalière des différents paramètres hydroclimatiques entre eux (à l'exception des températures).

Tableau 80 : Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs journalières des facteurs hydroclimatiques

2500 < n < 3000 p=0,01%	Q	T_E	T_A
P	0,26	0,13	-0,04
T_A	-0,15	0,65	
T_E	0,34		

b) *Corrélations journalières par année*

L'établissement des tables de corrélation des observations journalières par année (tableau 81) montre une homogénéité de comportement des quatre paramètres hydroclimatiques étudiés d'une année sur l'autre. Le facteur pluie est toujours mieux corrélé avec le débit, à l'exception de 1979, et le débit est toujours mieux corrélé avec T_E , à l'exception de 1981. Les facteurs de température sont toujours bien corrélés entre eux. Enfin, le couple (Q , T_A) a le comportement le plus désordonné d'une année sur l'autre. Cette variabilité montre que ces deux paramètres pourront le mieux caractériser le comportement hydroclimatique d'une année donnée.

Tableau 81 : *Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs journalières des facteurs hydroclimatiques par année*

$p=0,01\%$ pour $r=0,20$ et $p=10\%$ pour $r=0,08$; () : seuil de signification supérieur à 10%

Année 1979 (S-F)				Année 1980 (H-F)			
n=214	Q	T_E	T_A	n=366	Q	T_E	T_A
P	(0,09)	0,15	(-0,01)	P	0,31	0,14	(-0,04)
T_A	-0,18	0,59		T_A	-0,16	0,57	
T_E	0,43			T_E	0,33		
Année 1981 (H-F)				Année 1982 (S-F)			
n=365	Q	T_E	T_A	n=365	Q	T_E	T_A
P	0,33	(0,05)	-0,10	P	0,29	0,17	(-0,01)
T_A	-0,23	0,77		T_A	(-0,08)	0,74	
T_E	(0,05)			T_E	0,35		
Année 1983 (S-C)				Année 1984 (S-C)			
n=333	Q	T_E	T_A	n=245	Q	T_E	T_A
P	0,20	0,11	(-0,02)	P	0,19	0,12	(0,03)
T_A	(-0,09)	0,66		T_A	(-0,08)	0,80	
T_E	0,57			T_E	0,36		
Année 1985 (H-C)				Année 1986 (H-C)			
n=365	Q	T_E	T_A	n=335	Q	T_E	T_A
P	0,30	0,21	(-0,05)	P	0,26	0,15	(-0,01)
T_A	-0,14	0,62		T_A	(-0,00)	0,85	
T_E	0,51			T_E	0,36		

Tableau 82 : *Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs journalières des facteurs hydroclimatiques par mode climatique*

() : seuil de signification supérieur à 10%

Année humide-froide 1980, 1981				1979, 82, 85, 86				Année sèche-chaude 1983, 1984			
n=731	Q	T_E	T_A	n=1272	Q	T_E	T_A	n=561	Q	T_E	T_A
P	0,32	0,08	-0,07	P	0,25	0,17	(-0,03)	P	0,19	0,11	(-0,0)
T_A	-0,19	0,66		T_A	-0,10	0,66		T_A	-0,09	0,69	
T_E	0,18			T_E	0,42			T_E	0,50		

$p=0,01\%$ pour $r=0,10$

$p=0,01\%$ pour $r=0,10$

$p=0,01\%$ pour $r=0,15$

L'étude des corrélations par mode climatique confirme ces remarques. En effet, à l'intérieur de l'homogénéité du comportement journalier, on différencie deux pôles : un pôle humide-froid où les débits sont bien corrélés positivement avec le facteur pluie et négativement avec la température de l'air, et un pôle sec-chaud où le débit est alors bien corrélé avec la température de l'eau (tableau 82). Enfin, quel que soit le cas, la température de l'air est toujours corrélée négativement avec le débit : lorsque le débit journalier augmente, la température de l'air journalière diminue.

c) Corrélations journalières par saison

L'évolution saisonnière des différents paramètres hydroclimatiques (chapitre III) et la séparation classique de l'année hydroclimatique en deux saisons, humide et sèche, a amené à rechercher s'il existe des comportements différents selon ces saisons hydrologiques. La séparation de l'année en deux saisons est basée sur le calcul du CMD (coefficient mensuel de débit) défini comme étant le rapport entre le débit moyen mensuel et le débit moyen annuel. En saison humide, ce rapport est supérieur à 1.

Toutes années confondues, on observe une différence de comportement des paramètres hydroclimatiques en fonction de la saison hydrologique considérée (tableau 83). Les températures sont mieux corrélées entre elles en saison sèche. Les débits sont mieux corrélés aux températures de l'air en saison humide et les corrélations restent toujours négatives. Mais, ces comportements sont identiques pour les études annuelles et les études par classe d'années H-F, moyennes, S-C. L'étude journalière par saison ne permet donc pas de caractériser les différents modes climatiques.

Tableau 83 : Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs journalières des facteurs hydroclimatiques par saison hydrologique

saison sèche				saison humide			
n=1697	Q	T _E	T _A	n=860	Q	T _E	T _A
P	0,13	0,09	0,03	P	0,14	-0,06	-0,16
T _A	-0,22	0,78		T _A	-0,46	0,31	
T _E	0,13			T _E	-0,28		

p=0,01% pour r=0,10 p=0,01% pour r=0,10

2. Analyse des données mensuelles

L'analyse des corrélations à l'échelle mensuelle (tableau 84) donnent les mêmes informations que l'analyse effectuée à l'échelle journalière (tableau 80). Les corrélations sont bien sûr nettement meilleures mais moins significatives du fait du plus petit nombre d'observations.

Tableau 84 : Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs mensuelles des facteurs hydroclimatiques

() : seuil de signification supérieur à 10%

n = 96	Q	T _E	T _A
P	0,74	0,35	(-0,04)
T _A	(-0,15)	0,72	
T _E	0,32		

p=0,01% pour r=0,40

saison sèche				saison humide			
n=67	Q	T _E	T _A	n=29	Q	T _E	T _A
P	0,45	0,33	(0,18)	P	0,48	-0,33	-0,58
T _A	-0,29	0,84		T _A	-0,70	0,36	
T _E	(0,06)			T _E	-0,44		

p=0,01% pour r=0,45 p=0,01% pour r=0,65

La séparation entre saison sèche et saison humide montre une différence de comportement du couple Q-T_E ; d'évolution opposée en saison humide, ces deux paramètres sont indépendants en saison sèche. Pour les autres paramètres, les tendances restent les mêmes entre les deux saisons. Enfin, les regroupements en années H-F, moyennes et S-C montrent que les différents paramètres hydroclimatiques évoluent similairement dans les trois groupes à l'exception du couple (Q, T_A) dont la tendance devient légèrement positive lors des années S-C (tableau 85).

Tableau 85 : Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs mensuelles des facteurs hydroclimatiques par mode climatique
() : seuil de signification supérieur à 10%

Année humide-froide 1980, 1981				1979, 82, 85, 86				Année sèche-chaude 1983, 1984			
n=24	Q	T _E	T _A	n=48	Q	T _E	T _A	n=24	Q	T _E	T _A
P	0,75	(0,18)	(-0,17)	P	0,75	0,43	(-0,0)	P	0,64	0,45	(0,17)
T _A	(-0,23)	0,69		T _A	(-0,12)	0,74		T _A	(0,06)	0,78	
T _E	(0,21)			T _E	0,35			T _E	0,51		

p=0,01% pour r=0,70 p=0,01% pour r=0,60 p=0,01% pour r=0,70

3. Analyse des données saisonnières

A l'échelle de la saison, T_E et T_A sont mal corrélées. Par contre, Q et T_A sont bien corrélés surtout en séparant la saison sèche de la saison humide ; leur évolution est toujours opposée (tableau 86).

Tableau 86 : Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs saisonnières des facteurs hydroclimatiques
() : seuil de signification supérieur à 10%

n = 16			
	Q	T _E	T _A
P	0,89	0,67	(-0,41)
T _A	(-0,41)	(-0,11)	
T _E	0,76		

p=0,01% pour r=0,80

saison sèche				saison humide			
n=8	Q	T _E	T _A	n=8	Q	T _E	T _A
P	(0,55)	(-0,15)	(-0,50)	P	(0,48)	(-0,51)	(-0,59)
T _A	(-0,58)	(-0,20)		T _A	-0,76	(0,25)	
T _E	(0,50)			T _E	(-0,35)		

p=10% pour r=0,60 et p=0,01% pour r=0,85

Le regroupement par années H-F, moyennes et S-C à l'échelle saisonnière montre un changement de comportement de la température de l'air par rapport au débit (tableau 87). En années H-F, Q et T_A sont fortement corrélés négativement alors qu'en année S-C, ils sont fortement corrélés positivement. En années moyennes, la corrélation bien qu'étant nettement moins importante, reste négative. Enfin, notons que les années 1983 et 1984 (années du mode S-C) sont les seules années où la température de l'air de la saison humide est supérieure à la température de l'air de la saison sèche (fig.79), ce qui explique la corrélation positive entre Q et T_A pour ce mode climatique uniquement.

Tableau 87 : Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs saisonnières des facteurs hydroclimatiques par mode climatique
() : seuil de signification supérieur à 10%

Année humide-froide
1980, 1981

n=4	Q	T_E	T_A
P	(0,86)	(0,51)	-0,95
T_A	-0,95	(-0,62)	
T_E	(0,82)		

p=10% pour r=0,90

1979, 82, 85, 86

n=8	Q	T_E	T_A
P	0,93	0,80	(-0,40)
T_A	(-0,28)	(-0,32)	
T_E	0,82		

p=10% pour r=0,60

Année sèche-chaude
1983, 1984

n=4	Q	T_E	T_A
P	(0,89)	(0,87)	0,90
T_A	0,94	(0,78)	
T_E	0,93		

p=10% pour r=0,90

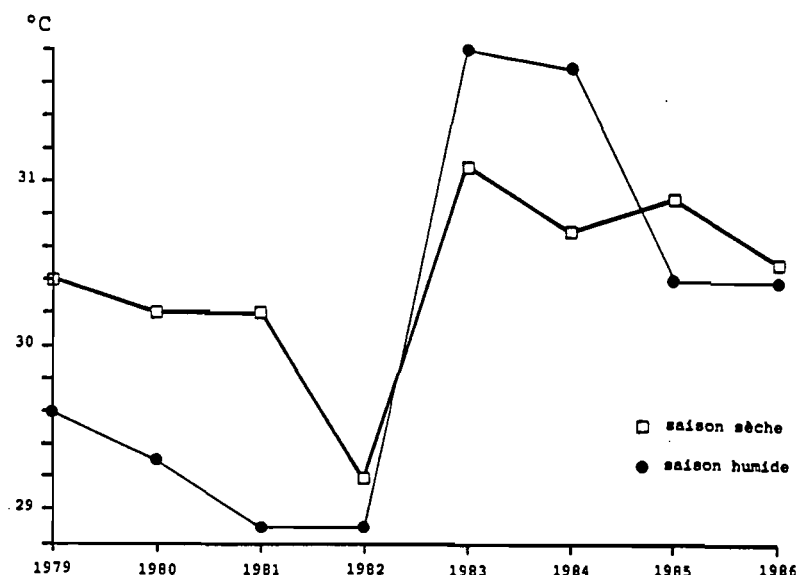


Fig. 79 : Evolution interannuelle de la température de l'air (T_A) de la saison sèche et de la saison humide.

L'étude des corrélations croisées entre saison sèche et saison humide (tableau 88) permet de déterminer les scénarios suivants. Une saison sèche chaude induit une saison humide chaude et, dans une moindre mesure, une saison humide à déficit hydrique important induit un déficit hydrique lors de la saison sèche suivante.

Tableau 88 : Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs saisonnières des facteurs hydroclimatiques de saison humide avec ceux de saison sèche

n = 8		saison humide			
		Q	T _E	T _A	P
saison sèche	Q	(0,58)	(0,19)	-0,63	(-0,05)
	T _E	(0,13)	(0,36)	(-0,29)	(-0,41)
	T _A	(-0,48)	(0,35)	0,79	(-0,25)
	P	(0,19)	(0,04)	(-0,11)	(-0,31)

p=0,01% pour r=0,85 et p=10% pour r=0,60
() : seuil de signification supérieur à 10%

4. Conclusion

A l'échelle journalière, les deux paramètres climatiques Q et T_A sont toujours corrélés négativement quel que soit le mode climatique considéré. Par contre, à l'échelle mensuelle et, surtout, à l'échelle saisonnière, ces deux paramètres ont un comportement relatif différent selon le mode climatique considéré : en années H-F, ils évoluent en opposition alors qu'en années S-C ils évoluent dans le même sens. Ceci montre que l'année hydroclimatique ne doit plus être décrite simplement en terme de débit (ou pluie) mais en terme de débit et température. La prise en considération de ces deux paramètres conduit à diviser l'année hydroclimatique en trois périodes hydroclimatiques (et non plus en deux saisons hydrologiques).

C - DECOUPAGE DE L'ANNEE HYDROCLIMATIQUE EN TROIS PERIODES

Le tracé sur un même graphe de l'évolution annuelle du débit et de la température de l'air met en évidence trois périodes de l'année pendant lesquelles les comportements relatifs de ces deux paramètres sont différents (fig.80). Durant la première période (P₁), de janvier à mai, la température de l'air augmente alors que le débit diminue, c'est la fin de la saison sèche. Ensuite, ces deux facteurs hydroclimatiques ont encore une évolution contraire ; en début de crue, la température de l'air diminue alors que le débit augmente puis, après la pointe de crue, les tendances s'inversent. Cette deuxième période (P₂) couvre toute la saison des pluies de juin à octobre. Enfin, la troisième période (P₃) marque le début de la saison sèche de novembre à décembre : la température de l'air et le débit diminuent ensemble. C'est la seule période de l'année où ces deux paramètres sont corrélés positivement (tableau 89). Ainsi la normalité ou non (au sens de Tardy) de l'année à l'échelle journalière dépendra de l'importance relative de la période P₃ par rapport aux périodes P₁ et P₂. Dans ces régions tropicales à deux saisons annuelles contrastées, la normalité de l'année à l'échelle journalière est impossible puisque la période P₃ est largement moins étendue que les deux autres.

Tableau 89 : Coefficients de corrélation de Pearson (r) sur les valeurs journalières (n observations) des facteurs hydroclimatiques (Q et T_A) selon les trois périodes hydroclimatiques de l'année (p=seuil de signification en %)

(Q, T _A)	P ₁	P ₂	P ₃
r	-0,69	-0,61	0,63
n	951	1086	576
p	0,01	0,01	0,01

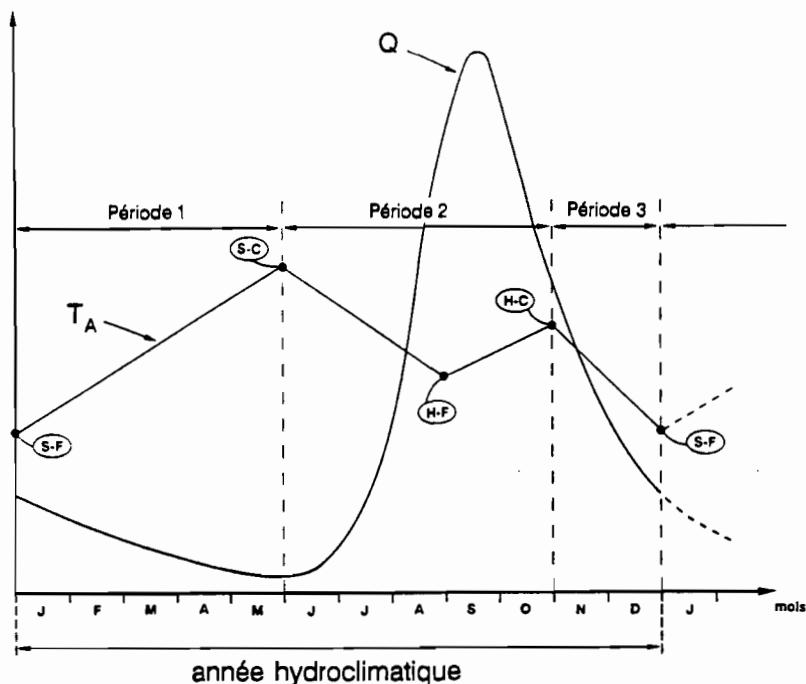


Fig. 80 : Schéma de découpage de l'année hydroclimatique en trois périodes.

IV - UN INDICATEUR GEOCHIMIQUE DE L'ALTERATION : LE FLUX DE BICARBONATES, LA CONSOMMATION DE CO₂ ATMOSPHERIQUE

Les bicarbonates présents dans les eaux sont des marqueurs de l'intensité de l'altération (GARRELS & MACKENZIE, 1971). Ainsi, pouvoir déterminer la quantité de bicarbonates évacuer par le paysage selon les modalités climatiques, c'est appréhender la relation qui existe entre l'évolution climatique de la zone tropicale africaine et l'intensité de l'altération qui y règne. L'aboutissement logique est l'élaboration d'un modèle prévisionnel de dynamique régionale actuelle en cas de changements climatiques prolongés.

Dans le chapitre VII, il a été montré qu'à l'échelle journalière la concentration des eaux en bicarbonates (HCO₃ en mg/l) s'exprime en fonction du débit (Q en m³/s) de la manière suivante :

$$\text{HCO}_3 = 54,1 \cdot Q^{-0,125} \quad (r = -0,83).$$

A la suite de l'étude des différents paramètres hydroclimatiques, nous recherchons maintenant l'influence de la température sur la concentration en bicarbonates dans les eaux du fleuve Sénégal en fonction des modes climatiques.

A - RECHERCHE DES DIFFERENTS COMPORTEMENTS GEOCHIMIQUES

Toutes années confondues et quel que soit le mode climatique, c'est avec le débit et la température de l'air que la concentration journalière en bicarbonates est le mieux corrélée (tableau 90). L'évolution des teneurs en bicarbonates en fonction de ces deux paramètres suit un schéma classique : les concentrations sont diluées par le débit du fleuve, mais elles augmentent quand la température de l'air augmente. Cependant, selon le mode climatique, les influences respectives de ces deux paramètres hydroclimatiques changent. La température de l'air semble avoir autant d'influence que le débit uniquement lors des années H-F (tableau 91). Pour ce mode climatique, à débit égal, les concentrations en bicarbonates sont plus élevées lorsque la température est plus chaude. Sur la figure 81, on distingue effectivement deux courbes sensiblement parallèles matérialisant l'évolution des concentrations en bicarbonates dans les deux classes de températures testées. Le calcul du flux de bicarbonates exportés hors du paysage

peut alors être tenté à partir d'une relation liant leur concentration dans les eaux à Q et T_A. Par contre, pour les autres modes climatiques, l'influence de la température de l'air n'est pas suffisante pour permettre l'utilisation d'une telle relation. On gardera alors la relation de dilution classique des bicarbonates par le débit du fleuve. Ainsi, dans ces paysages tropicaux, les variations de températures ne sont pas suffisamment importantes pour pouvoir être prises en compte dans un modèle global de *respiration géochimique* de la zone sahélo-soudano-guinéenne.

Tableau 90 : Coefficients de corrélation de Pearson entre les valeurs journalières des concentrations en bicarbonates et les paramètres hydroclimatiques

n = 226	Q	T _A	T _E	P
HCO ₃	-0,59	0,49	0,11	-0,16
p	0,01	0,01	10	2

p : seuil de signification en %

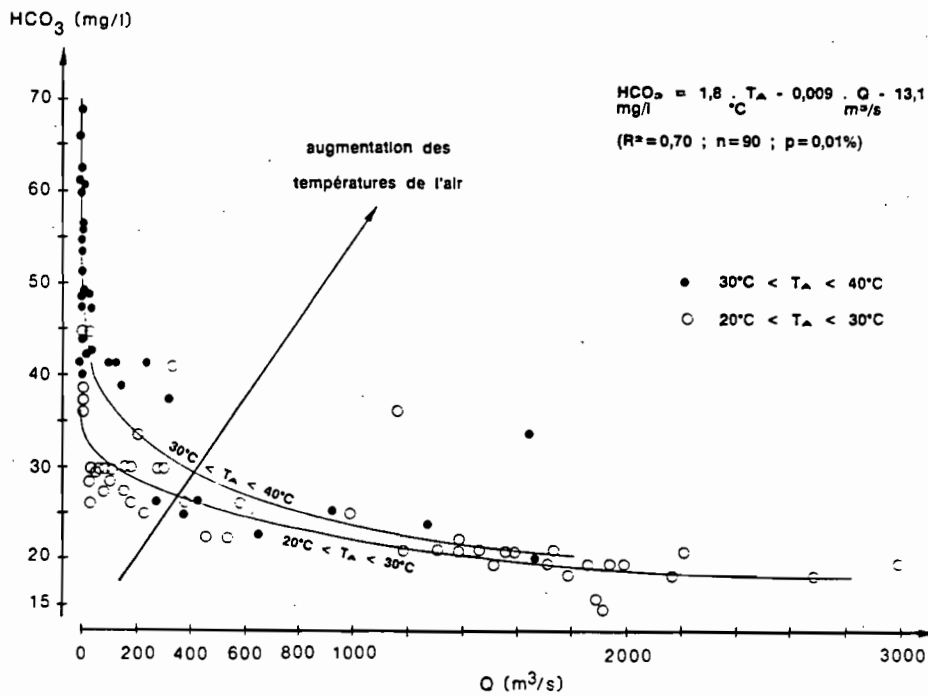


Fig. 81 : Evolution des concentrations en bicarbonates des eaux du fleuve Sénégal à Bakel en fonction du débit et par classe de température, lors des années H-F.

Tableau 91 : Coefficients de corrélation de Pearson entre les valeurs journalières des concentrations en bicarbonates et les paramètres hydroclimatiques selon les modes climatiques et seuils de signification (p en %)

Modes	n		Q	T _A
H-F	90	HCO ₃	-0,69	0,68
		p	0,01	0,01
N	89	HCO ₃	-0,60	0,53
		p	0,01	0,01
S-C	47	HCO ₃	-0,73	0,41
		p	0,01	0,4

L'étude des corrélations en fonction des trois périodes hydroclimatiques montre que, quel que soit le mode climatique, le débit est toujours le facteur déterminant. La température de l'air influence la deuxième période uniquement lors des années H-F. Pour les autres modes climatiques, la température de l'air influence surtout la première période qui ne participe que très peu aux exportations (fin de saison sèche).

B - EXPORTATIONS DE BICARBONATES SELON LES MODES CLIMATIQUES

Pour les années du mode H-F, l'équation exprimant HCO_3 (en mg/l) en fonction de Q (en m^3/s) et T_A (en $^\circ\text{C}$) est testée :

$$\text{mode H-F : } \text{HCO}_3 = 1,8.T_A - 0,009.Q - 13,1 \quad (R^2=0,70 ; n=90 ; p=0,01\%).$$

Les résultats obtenus par cette méthode (290000 t en 1980 et 310000 t en 1981) sont du même ordre de grandeur que ceux trouvés directement par l'équation de dilution déterminée au chapitre VII (tableau 92). Ainsi quel que soit le mode climatique considéré, les flux de bicarbonates exportés par le Sénégal au bief de Bakel peuvent toujours être exprimés directement en fonction du débit du fleuve. Or sur le bassin versant du Sénégal (les grès quartzitiques à bancs carbonatés de la Falémé ne représentant que 1% de la superficie totale), ce flux de bicarbonates donne directement la consommation en gaz carbonique due à l'altération. La *respiration géochimique* du paysage est donc en relation directe avec l'importance de l'écoulement de surface (fig.82).

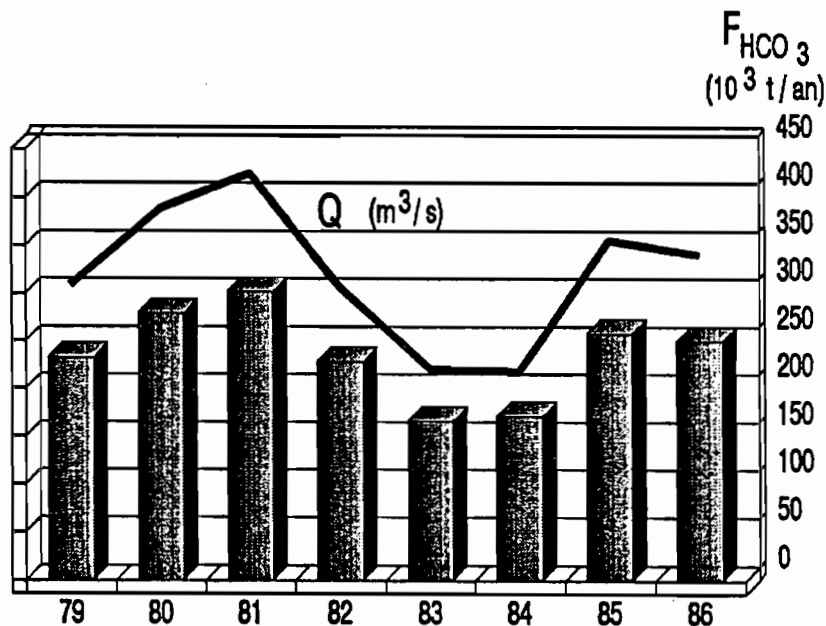


Fig. 82 : Respiration géochimique du bassin versant du Sénégal de 1979 à 1986 (flux de bicarbonates exportés en 10^3 t/an).

Dans le contexte général actuel de sécheresse, les exportations de bicarbonates sont de l'ordre de 300000 t/an en mode H-F alors que, en mode S-C, les exportations sont seulement de 170000 t/an, soit presque la moitié. Par rapport à une année moyenne dont l'exportation peut être estimée à 240000 t/an, le mode H-F représente un excédent de 25% alors que le mode S-C accuse un déficit de 30%. Si les quantités totales annuelles sont les plus fortes en année humide, les concentrations sont en revanche les plus fortes en année sèche (tableau 92). Ainsi, dans un paysage de savane de la zone sahélo-soudano-guinéenne, l'intensité de l'altération

chimique, rapportée au volume d'eau, est relativement plus forte en période sèche, mais le bilan de l'altération est finalement plus important en période humide (GAC, 1980).

Tableau 92 : Moyennes annuelles des flux de bicarbonates, de leur concentration dans les eaux du fleuve Sénégal à Bakel et des flux de CO₂ consommés par altération

	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
Q (m ³ /s)	309	389	426	307	221	218	356	341
F _{HCO₃} (10 ³ t)	233	279	302	228	166	171	258	250
HCO ₃ (mg/l)	24,3	22,8	22,6	23,7	24,1	25,2	23,0	23,1
F _{CO₂}								
10 ⁹ moles	3,8	4,6	5,0	3,7	2,7	2,8	4,2	4,1
10 ⁶ mol/km ²	0,018	0,021	0,023	0,017	0,012	0,013	0,019	0,019

Enfin, la consommation en CO₂ atmosphérique due à l'altération régnant sur l'ensemble du bassin versant du Sénégal s'exprime par une fonction de transfert simple dépendant uniquement du débit :

$$F_{CO_2} = 0,028 \cdot Q^{0,66}$$

10⁹.mol/an m³/s

La consommation spécifique actuelle sur l'ensemble du bassin versant est de l'ordre de 18.10³ mol/km²/an.

V - CONCLUSION : MODELE PREVISIONNEL D'EVOLUTION DU FOUTA DJALON

Cette tentative de lier les fluctuations des paramètres hydroclimatiques sur une décennie aux pulsations qui affectent la dynamique du paysage a montré que, dans ces régions tropicales à deux saisons annuelles contrastées, le facteur gouvernant la *respiration géochimique* est le débit. En effet, les variations de la température ne sont pas suffisamment prononcées pour avoir une importance significative sur le comportement géochimique de l'altération sévissant dans ces régions. Par conséquent, le débit, c'est-à-dire la quantité d'eau disponible, reste le facteur déterminant de l'érosion et de l'altération. On aboutit donc au schéma suivant de dynamique géochimique à l'échelle du Fouta Djallon : plus le débit est important (et donc plus il pleut), plus l'altération chimique (c'est-à-dire la formation de sols) sera importante.

Les études géomorphologiques (ALBERGEL, 1986 ; MIETTON, 1988) ont montré que l'érosion mécanique n'était pas affectée outre mesure par le déficit hydrique de ces dernières années. Ainsi, la question est maintenant de savoir quel est le débit critique pour lequel altération chimique et érosion mécanique s'équilibrent. Il a été montré dans le chapitre VIII que le Fouta Djallon était actuellement en régime stationnaire. Le débit critique pour lequel ce massif ne s'érode ni s'altère (en bilan global bien sûr) est de 700 m³/s, ce qui équivaut à une lame d'eau écoulée de 380 mm/an. Ce débit critique correspond au débit moyen actuel des eaux de surface drainant le Fouta Djallon.

Par conséquent, un modèle prévisionnel de dynamique actuelle du Fouta Djallon en cas de changement climatique prolongé peut être proposé. Pour un écoulement supérieur à 380 mm/an, le bilan global d'altération sur l'ensemble du Fouta Djallon sera positif : le paysage formera des sols. Par contre, en deçà de cette valeur, la formation de sols ne sera plus suffisante pour équilibrer l'ablation des sols en surface : *l'érosion mécanique l'emportera sur l'altération chimique.*

CONCLUSION GENERALE

Pour conclure cette étude consacrée au massif du Fouta Djalou et à sa région, je rappellerai les résultats importants qui ont été obtenus, et qui contribuent à une meilleure connaissance de la dynamique actuelle des paysages de la zone sahélo-soudano-guinéenne.

1) Situation particulière du Fouta Djalou en Afrique de l'Ouest

Le Fouta Djalou, partie nord de la dorsale guinéenne, est le seul relief important de l'Afrique de l'Ouest. Cette situation particulière en fait le *château d'eau* de cette région. Malgré sa faible altitude, c'est un massif montagneux imposant. Il couvre une superficie de 59 000 km², son substratum géologique est entièrement constitué de roches cristallines. Il présente une opposition nette entre sa partie ouest, gréseuse, franchement découpée et sa partie est, granitique et doléritique, organisée en une succession de plateaux latéritiques plus ou moins cuirassés. Dans ces régions tropicales, soumises à des climats contrastés chauds et humides pendant de longues périodes, l'altération des roches a donné naissance à un matériau très monotone sur le plan minéralogique, constitué essentiellement de quartz résiduel, de kaolinite et de goethite. Secondairement, on y trouve divers oxydes et hydroxydes, quelques minéraux lourds plus ou moins altérés et des traces d'illites ou de micas hydratés.

2) La sécheresse actuelle

Si la sécheresse actuelle a eu un impact sur la quantité de matières exportées, elle n'affecte en rien l'agressivité du climat, qui est un des climats les plus agressifs au monde. En effet, l'accentuation de l'aridité depuis une quinzaine d'années oppose, de plus en plus, une longue saison sèche à une courte saison pluvieuse et chaude, accompagnée de précipitations orageuses et donc dévastatrices. Cette période de sécheresse qui affecte la région depuis 1970, a eu pour conséquence une descente vers le Sud, de 200 km environ, de l'ensemble des isohyètes. Pour la période 1979-1986, la pluviosité moyenne varie de 100 mm/an au Nord du bassin versant du Sénégal, en zone sahélienne, à 1900 mm/an au SW du Fouta Djalou et au Sud du bassin versant du Niger. Le bilan hydrique est partout déficitaire, à l'exception du domaine guinéen qui couvre la quasi-totalité du Fouta Djalou. Cependant, c'est dans ce massif que le déficit pluviométrique est le plus marqué. Notons enfin que la variabilité interannuelle s'accroît quand la pluviosité diminue. D'autre part, dans ce domaine continental, l'air surchauffé très instable peut s'élever en tourbillons emportant sables et poussières provoquant des vents de sable de plus en plus fréquents. Les poussières atmosphériques constituent désormais un événement climatique saisonnier majeur, au même titre que la saison des pluies.

Pour l'ensemble du Fouta Djalou, la lame d'eau moyenne précipitée est de 1380 mm/an, l'évapotranspiration réelle de 1000 mm/an et l'écoulement moyen annuel de 380 mm, soit un débit moyen de 700 m³/s, ce qui correspond à un déficit d'écoulement de 75%. L'opposition, visible dans le paysage, entre les contreforts occidentaux et orientaux existe aussi au niveau des conditions climatiques. Les deux bassins côtiers, beaucoup plus humides, apportent près de 60% de l'écoulement total du Fouta Djalou.

3) Impact des apports atmosphériques particuliers

Le Sahara est la plus grande source de poussières atmosphériques du Globe. Au niveau de Dakar, leurs dépôts sont de l'ordre de 200 g/m²/an, mais ils ne sont plus que de 40 g/m²/an en milieu guinéen. Leur impact sur les bilans de l'érosion et de l'altération est difficile à apprécier car il n'existe pas de méthode directe pour mesurer la quantité de poussières remobilisées. Ce taux de remobilisation a été estimé par trois méthodes différentes qui convergent toutes vers le même résultat : 40% à 50% des poussières déposées sont remobilisées. L'autre partie des poussières déposées est assimilée par la végétation et la faune. Ainsi, leur contribution au bilan de l'érosion mécanique semble négligeable, même si on retrouve leur trace dans la qualité chimique des MES exportées. Par contre, leur impact est important dans le bilan de l'altération chimique car elles modifient largement la composition chimique des eaux de pluie. En effet, 25% des apports annuels de poussières se font en saison humide, donnant aux pluies africaines un chimisme caractéristique. En domaine continental sahélo-soudano-guinéen, elles sont bicarbonatées-calciques et non acides ; par rapport à la moyenne mondiale, elles sont fortement minéralisées (de 10 mg/l à 22 mg/l), avec une moyenne annuelle de 13 mg/l. Ces chiffres soulignent l'intérêt que doit susciter l'étude des aérosols désertiques pour mieux comprendre la dynamique actuelle des paysages dans ces zones africaines. Le capteur pyramidal, appareil testé ici, semble le mieux adapté aux conditions de terrains difficiles telles que les zones arides, malgré son côté rudimentaire qui est aussi l'un de ses atouts.

4) Charge dissoute et charge particulaire des eaux fluviales en domaine sahélo-soudano-guinéen

Les eaux de surface du domaine sahélo-soudano-guinéen ont une charge totale dissoute faible variant de 20 à 100 mg/l. Les teneurs en HCO₃⁻, Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺ sont diluées par le débit quelle que soit la saison, les charges en matières en suspension augmentent en fonction du débit et dépendent de l'état de surface du bassin versant, les teneurs en silice sont réglées par des processus biogéochimiques. Les concentrations en potassium sont relativement stables et dépendent à la fois du débit et de la charge en suspension. Les teneurs en chlorures et sulfates montrent une grande variabilité caractéristique d'un apport essentiellement atmosphérique. Finalement, toutes les espèces chimiques dissoutes se comportent en première approximation comme si la contribution des eaux de ruissellement aux apports dissous était négligeable. Quel que soit le domaine climatique considéré, les concentrations en éléments dissous sont toujours maximales en fin de saison sèche, et les flux dissous présentent toujours un maximum en milieu de saison humide. Enfin, l'amplitude de variation des concentrations est toujours faible. Au contraire, les matières en suspension (MES) sont caractérisées par une grande variabilité journalière de leur concentration, malgré un rythme saisonnier immuable. Elles sont constituées de quartz, kaolinite et illite-smectite ; la fraction argileuse, qui prédomine en toutes saisons, est mieux représentée lors des premiers écoulements où le minéral dominant est alors la kaolinite. L'association illite-smectite est principalement exportée en période de *basses-eaux*, alors que le quartz est exporté préférentiellement lorsque le débit est le plus fort. Le cortège d'éléments chimiques qui accompagnent les fractions argileuses est le suivant : P, Mg, Mn, Cu, Cr, Co, Zn, Y et La-Ce-Nb, alors que celui de la fraction sableuse est Na, Zr, Sr, Ba et Y-Lu. Les teneurs en carbone organique particulaire (COP) diminuent en fonction des concentrations en MES comme sur la plupart des fleuves du Monde, et la matière organique représente entre 5% et 10% de la masse totale des suspensions. La chimie des MES, malgré un enrichissement relatif en alcalins et alcalino-terreux, reflète la composition chimique de sols appauvris par un lessivage intense. Cet enrichissement est attribué à l'influence des poussières atmosphériques et à l'accumulation d'argiles de type smectite-vermiculite dans les zones de vallées, surtout en domaines nord-soudanien et sahélien.

5) Le ruissellement superficiel et sa charge en suspension

La principale contribution au transport en suspension par les rivières est due à l'érosion des versants par le ruissellement superficiel. Le découpage de l'hydrogramme de crue

du fleuve Sénégal à Bakel par analyse spectrale a permis d'estimer l'intensité du ruissellement superficiel moyen à 11 mm/an, soit 23% de l'écoulement total. La répartition annuelle de cet écoulement superficiel est inégale, à l'image de celle des pluies. A partir de la composition chimique des eaux fluviales, on a pu établir que la contribution de l'écoulement de nappe varie de 57%, en septembre, à 97% de l'écoulement total, en janvier ; de février à juin, cette contribution atteint 100%.

La charge en suspension annuelle du ruissellement superficiel a été calculée à 1,3 g/l pour le Sénégal amont ; après correction de l'érosion des berges, cette charge est estimée à 1 g/l. Elle est diluée dans le fleuve par les eaux provenant de l'écoulement de nappe et de l'écoulement hypodermique. Pendant ce temps, la charge en suspension est augmentée par la reprise des laissés-de-cruce dans le lit du fleuve lors des premiers flots et par l'érosion des berges. La reprise des laissés-de-cruce provoque dans les eaux fluviales un maximum de concentration qui précède la pointe de crue. L'évolution annuelle des MES peut donc se décomposer en trois phases : une phase d'*érosion précoce* durant un à deux mois selon les années, une phase d'*érosion et de transport* se terminant toujours au quatrième mois après le début de la crue quelle que soit la durée de la phase précédente, et une phase d'*alluvionnement* durant les huit mois restants de l'année. Cette importance du laps de temps écoulé entre l'amorce de la crue et ces différentes phases nous a conduit à déterminer l'évolution de la somme des flux solides exportés en fonction de la somme des flux liquides écoulés. On met ainsi en évidence un changement de capacité de réponse du bassin versant à l'érosion entre la phase d'*érosion précoce* dont les expulsions solides consistent surtout en du matériel repris, et la phase d'*érosion et de transport* qui concerne l'érosion effective du bassin. Lors de la première phase, la concentration en suspension est dépendante du cycle hydrologique considéré et de l'intensité de la crue précédente ; au contraire, dans la seconde phase la charge solide moyenne des eaux fluviales est une constante intrinsèque du bassin versant, de l'ordre de 160 mg/l pour le Sénégal amont.

6) Bilan de l'érosion en zone sahélo-soudano-guinéenne

L'érosion mécanique qui affecte les bassins amont de la Gambie et du Tinkisso, est de 7 t/km²/an. C'est une des plus faibles du continent africain et donc du monde. Ceci est à mettre en relation avec la nature cristalline du substratum rocheux et la couverture pédologique ferrallitique de toute cette zone amont que constitue le massif latéritique du Fouta Djallon. Pour les bassins amont du Niger, de la Falémé et du Sénégal, l'érosion mécanique varie de 10 t/km²/an à 18 t/km²/an. Elle est plus importante à cause de la traversée dans leur cours moyen du plateau Mandingue, zone de sols ferrugineux très sensibles à l'érosion en ravines et rigoles. L'altération chimique spécifique, c'est-à-dire le transport dissous diminué des bicarbonates et chlorures, est de l'ordre de 1 t/km²/an en domaine sahélien, elle atteint 5 t/km²/an en domaine guinéen. C'est également une des plus faibles au monde. Fortement influencée par l'hydrologie, elle est donc essentiellement dépendante du domaine climatique.

7) Dynamique du Fouta Djallon

Sur l'ensemble du Fouta Djallon, la dynamique générale actuelle d'altération est de type monosiallitique. Cependant, des tendances locales apparaissent en fonction de la lithologie et des situations topographiques. La caractéristique essentielle des flux de matières est la faible importance de la charge particulaire (21 mg/l) par rapport à la charge dissoute (35 mg/l). La fraction dissoute représente 62% des exportations, la fraction minérale particulaire 36% et le carbone organique particulaire 2%. Après correction des apports atmosphériques, les taux d'altération chimique et d'érosion mécanique sont estimés, respectivement, à 3 t/km²/an et 8 t/km²/an. Sur les 772000 t/an exportées en solution par les eaux de surface du Fouta Djallon, 20% à 30% seulement proviennent de l'altération des roches et des sols, le reste provenant des apports atmosphériques. Ces chiffres soulignent la faiblesse de l'altération chimique sévissant actuellement dans ces paysages guinéens souvent cuirassés. Globalement, le Fouta Djallon est

actuellement en "équilibre géochimique" : l'approfondissement des profils d'altération (4,6 mm/1000 ans) est à peine supérieur à l'ablation des sols (4 mm/1000 ans), sachant que localement ce bilan peut être très différent.

Enfin, l'étude de l'influence des fluctuations des paramètres hydroclimatiques sur la dynamique du paysage a montré que, dans ces régions tropicales à deux saisons annuelles contrastées, la "respiration géochimique" d'un bassin versant peut se lire dans ses variations hydrologiques. En effet, les variations de la température ne sont pas suffisamment importantes dans cette zone climatique pour avoir une influence déterminante sur l'évolution de l'altération chimique. Par conséquent, en cas de changement climatique prolongé, l'évolution de la dynamique actuelle du Fouta Djallon, peut être schématisée de la façon suivante : pour une lame d'eau écoulee inférieure à 380 mm/an, la formation de sols par altération chimique du substratum rocheux ne sera pas suffisante pour compenser les pertes par érosion mécanique des sols en surface : l'érosion mécanique l'emportera sur l'altération chimique.

8) *Hydroclimatologie et Géochimie Globale des Continents (HGGC) : perspectives*

Ce travail montre qu'il est indispensable d'associer l'étude de la géochimie des eaux de surface à l'étude des paramètres hydroclimatiques. Cette approche, déjà pratiquée à l'échelle globale, est effectuée ici à l'échelle du paysage afin de déterminer par zone climatique et/ou par grand bassin versant, les relations débit-température et teneurs en bicarbonates. Dans la zone climatique sahélo-soudano-guinéenne, le débit est le seul indicateur hydroclimatique significatif vis-à-vis de l'altération chimique. Ainsi, le flux de CO₂ atmosphérique consommé par altération chimique en zone sahélo-soudano-guinéenne est une fonction directe de l'intensité de l'écoulement de surface. Cette approche d'*Hydroclimatologie et Géochimie Globale des Continents (HGGC)* a montré également que seules les années appartenant au mode climatique "Humide-Froid" permettent de distinguer l'influence de la température sur l'intensité des teneurs en bicarbonates en fonction des débits. Ainsi, à débit égal, plus la température est élevée, plus la teneur en bicarbonates, et donc le flux de CO₂ atmosphérique consommé par l'altération, est importante.

Enfin, à l'heure où le problème de l'évolution des teneurs en CO₂ dans l'atmosphère est d'actualité, on oublie souvent que l'altération chimique peut jouer un rôle important dans l'évolution de ces teneurs en intervenant, peut-être, comme tampon (régulateur ou non ?) entre les différents réservoirs naturels, que sont la lithosphère, la biosphère et l'atmosphère. L'HGHC est une approche nécessaire pour préciser et quantifier la consommation de CO₂ par zone climatique. En zone sahélo-soudano-guinéenne, cette consommation moyenne actuelle a été chiffrée à 18.10³ mol/km²/an de CO₂ atmosphérique.

Qu'en était-il dans le passé ?

Qu'en est-il dans les autres régions du Globe ?

Autant de questions que l'HGHC peut permettre d'élucider. Aussi, beaucoup de travail reste à faire...

"Cette science qui devait tout m'apprendre finit dans l'hypothèse..." !

(CAMUS, *Le Mythe de Sisyphe*)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AIEA (1982) - Interprétation des résultats d'analyses isotopiques et chimiques des campagnes d'échantillonnage de 1980. *C.T., rapport n°1934.*
- ALBERGEL J. (1986) - Evolution de la pluviométrie en Afrique soudano-sahélienne, exemple du Burkina-Faso. *Rapp. ORSTOM, Ouagadougou, 19 p. multigr.*
- ALBERGEL J., CASENAVE A., VALENTIN C. (1985) - Modélisation du ruissellement en zone soudano-sahélienne ; simulation de pluies et cartographies des états de surfaces. *Journées hydrologiques de Montpellier, Coll. et Sémin. ORSTOM, p.75-84.*
- ANGINO E.E., MAGNUSON L.M., WAUGH T.C. (1974) - Mineralogy of suspended sediment and concentration of Fe, Mn, Ni, Zn, Cu and Pb in water and Fe, Mn and Pb in suspended load of selected Kansas streams. *Water Res. Res., 10, p.1187-1191.*
- ARCHAMBAULT J. (1960) - Eaux souterraines de l'Afrique occidentale. *Ed. BERGER-LEVRAULT, Nancy, 139 p.*
- ARLERY R., GRISSOLET H., GUILMET B. (1973) - Climatologie ; méthodes et pratiques. *Paris, Bruxelles, Montréal, 2^{ème} édition, 434 p.*
- ASTON S.R. (1983) - Natural water and atmospheric chemistry of silicon. *In : Silicon Geochemistry and Biogeochemistry, S.R. ASTON Ed., Academic Press, London, p.77-100.*
- AUDIBERT M. (1970) - Delta du fleuve Sénégal : étude hydrogéologique. *Rapport O.E.R.S., PNUD-FAO, St Louis (Sénégal), 1-2, 68 p.*
- AYME J.M., DROUHIN J.P., LARROUHL J. (1962) - Rapport de synthèse sur le bassin du Sénégal. *Rapport géologique C.O.P.E.T.A.O., 14, 46 p.*
- BALLAND P. (1983) - Méthodologie de quantification des flux de nutriments en rivières. *Proc. of Hamburg Symp., LAHS publ., 141, p.333-345.*
- BALLAND P. (1984) - Utilisation des relations concentration-débit pour le calcul des flux de matières en rivières. *Physio Géol., 9, p.5-13.*
- BALLO A. (1984) - Les modalités de l'écoulement fluvial en domaine tropical humide africain, l'exemple des bassins du Niger supérieur et du Bani. *Thèse 3^{ème} cycle, Géographie, univ. Nancy II, 172 p.*
- BAMBA S.B. (1987) - Le bilan de l'eau et de la matière dans le haut bassin guinéen du fleuve Gambie. *Thèse 3^{ème} cycle, Géologie, univ. Dakar, 147 p.*
- BARRETO P.S. (1974) - Note pédologique. *In : Le bassin du Sénégal, monographie hydrologique ; ROCHETTE, Monographies Hydrologiques, ORSTOM, Paris, 1, p.25-33.*
- BARTOLI F., SOUCHIER B. (1978) - Cycle et rôle du silicium d'origine végétale dans les écosystèmes forestiers tempérés. *Ann. Sci. Forest., 35, 3, p.187-202.*
- BASSOT J.P. (1966) - Etude géologique du Sénégal Oriental et de ses confins guinéo-maliens. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Clermont-Ferrand ; Mém. BRGM, Paris, 40, 322 p.*
- BASSOT J.P. (1969) - Aperçu sur les formations précambriennes et paléozoïques du Sénégal Oriental. *Bull. Soc. Géol. Fr., série 7, 11, p.160-169.*
- BEAUVAIS A., MAZALTARIM D. (1988) - Etude des cuirasses latéritiques dans la région de Dembia-Zémio en Centrafrique, pétrographie, minéralogie et géochimie. *Bull. Sci. Géol., Strasbourg, 41, p.47-69.*
- BENSE C. (1964) - Les formations sédimentaires de la Mauritanie méridionale et du Mali Nord-occidental (Afrique de l'Ouest). *Mém. BRGM, Paris, 26, 270 p.*
- BERGAMETTI G. (1987) - Apport de matière par voie atmosphérique à la Méditerranée occidentale : aspects géochimiques et météorologiques. *Thèse Sciences, univ. Paris VII, 296 p.*
- BERNER R.A., LASAGA A., GARRELS R.M. (1983) - The carbon-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years. *Am. J. Sci., 283, p.641-683.*
- BERTRAND J. (1976) - Visibilité et brume sèche en Afrique. *La Météorologie, 6, p.201-211.*

- BERTRAND J. (1977) - Action des poussières sub-sahariennes sur le pouvoir glaçogène de l'air en Afrique de l'Ouest. *Thèse Sciences, univ. Clermont-Ferrand*, 197 p.
- BESSELES B. (1977) - Géologie de l'Afrique, le craton ouest africain. *Mém. BRGM, Paris*, 88, 402 p.
- BETZER P.R., CARDER K.L., DUCE R.A., MERRILL J.T., TINDALE N.W., UEMATSU M., COSTELLO D.K., YOUNG R.W., FEELY R.A., BRELAND J.A., BERNSTEIN R.E., GRECO A.M. R. (1988) - Long-range transport of giant mineral aerosol particles. *Nature*, 336, p.568-571.
- BISCALDI R. (1968) - Problèmes hydrogéologiques des régions d'affleurement de roches éruptives et métamorphiques sous climat tropical. *Bull. BRGM, série 2, section III, 2*, p.7-22.
- BLANCHOT A. (1958) - *Bulletin du Service de Géologie et de Prospection Minière, Dakar*, 27, 280 p.
- BLOT A. (1970) - Les nappes phréatiques au Sénégal oriental, données géochimiques sur les eaux. *Rapp. ORSTOM, Dakar*, 34 p. multigr.
- BLOT A. (1980) - L'altération climatique des massifs de granite du Sénégal. *Trav. Doc. ORSTOM, Paris*, 114, 434 p.
- BOCQUIER G. (1973) - Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad, interprétation biogéodynamique. *Mém. ORSTOM, Paris*, 62, 350 p.
- BONSANG B., LAMBERT G., BAUDET J. (1989) - Light hydrocarbons emissions from african savannah burning. *Symp. of Williamsburg, NASA-Greenbelt, Washington (MD)*.
- BOUILLET M.N. (1893) - Dictionnaire d'histoire et de géographie. Ed. HACHETTE, Paris ; UER Géographie, Strasbourg.
- BOULANGE B., MILLOT G. (1988) - La distribution des bauxites sur le craton ouest-africain. *Bull. Sci. Géol., Strasbourg*, 41, p.113-123.
- BOULET R. (1974) - Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta, équilibres dynamiques et bioclimats. *Mém. ORSTOM, Paris*, 85, 272 p.
- BOURRIE G. (1978) - Acquisition de la composition chimique des eaux en climat tempéré, application aux granites des Vosges et de la Margeride. *Thèse Doc. Ing., univ. Strasbourg ; Mém. Sci. Géol., Strasbourg*, 52, 174 p.
- BRADLEY S.B. (1982) - Sediment quality related to discharge in a mineralized region of Wales. *Proc. of Exeter Symp., LAHS publ.*, 137, p.341-350.
- BRUNET-MORET Y. (1968) - Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale. *Rapp. de synthèse, ORSTOM/CIEH, Paris*, multigr.
- BRUNET-MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.P., MOLINIER M. (1986) - Monographie hydrologique du fleuve Niger. Tome I - Niger supérieur. *Monographies hydrologiques, ORSTOM, Paris*, 8, 396 p.
- BUAT-MENARD P., DUCE R.A. (1986) - Precipitation scavenging of aerosol particles over remote marine regions. *Nature*, 321, p.508-510.
- CARRE P. (1972) - Quelques aspects du régime des apports fluviaux des matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., Paris*, IX, p.19-46.
- CECCHI P. (1989) - *Communication orale, ORSTOM, Dakar*.
- CHANUT G. (1986) - Méthodes d'analyse des eaux et des sols. *Note technique Lab. Chimie, ORSTOM, Dakar*, 45 p.
- CHARREAU C., NICOU R. (1971) - L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche Ouest-africaine et ses incidences agronomiques. *CNRA Bambey, IRAT, Sénégal, Bull. Agron.*, n°23, p.8-45.
- CHARREAU C., SEGUY L. (1969) - Mesure de l'érosion et du ruissellement à Séfa en 1968. *Agronomie Tropicale, XXIV, 11*, p.1055-1097.
- CHAUVEL A. (1967) - Notice explicative de la carte pédologique du Sénégal au 1/200000. Feuilles de Kédougou et de Kéniéba-Kossanto. *Rapport ORSTOM, Dakar*, 155 p. multigr.
- CHESTER R., JOHNSON L.R. (1971) - Atmospheric dusts collected off the west african coast. *Nature*, 229, p.105-107.
- CHETELAT E. de (1933) - Recherches géologiques et morphologiques dans le Nord-Ouest de la Guinée française. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, VI, p.91-122.
- CHETELAT E. de (1938) - Le modelé latéritique de l'Ouest de la Guinée française. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Paris ; Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, XI, 120 p.

- CHURCH H.R.J. (1957) - A study of the environment and of man's use of it. In : *West Africa*, Ed. LONGMANS, London ; UER *Géographie*, Strasbourg, 547 p.
- COLLINET J. (1988) - Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest, évolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluie. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Strasbourg*, 513 p.
- COUDE-GAUSSSEN G. (1986) - Observations au MEB de poussières sahariennes prélevées aux Canaries. In : *Changements globaux en Afrique, Dakar symposium, INQUA*, p.83-86.
- COUDE-GAUSSSEN G. (1989) - Les poussières sahariennes et leur contribution aux sédimentations désertiques et péri-désertiques. *Thèse Lettres, Géographie, univ. Paris VI*, 715 p.
- COUDE-GAUSSSEN G., ROGNON P. (1983) - Les poussières sahariennes. *La Recherche*, n°147, p.1050-1061.
- D'ALMEIDA G.A. (1986) - A model for Saharan dust transport. *J. Climate and Appl. Meteo.*, 25, 7, p.903-916.
- D'ALMEIDA G.A. (1989) - Desert aerosol : characteristics and effects on climate. In : *Paleoclimatology and Paleometeorology : Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport*, LEINEN M. & SARNTHEIN M. Ed., p.311-338.
- D'ALMEIDA G.A., SCHUTZ L. (1983) - Number, mass and volume distribution of mineral aerosol and soils of the Sahara. *J. Climate and Appl. Meteo.*, 22, p.233-243.
- DACOSTA H. (1985) - Essai d'extension des échantillons de débits moyens mensuels et annuels du fleuve Gambie. *Rapport ORSTOM, Dakar*, 72 p. multigr.
- DARMENDRAIL D. (1984) - Types hydrochimiques des eaux souterraines en milieu fissuré de socle. *Rapport DEA, BRGM, Orléans*, 84 SGN 378 EAU, 125 p.
- DARS R. (1961) - Les formations sédimentaires et les dolérites du Soudan occidental (Afrique de l'Ouest). *Thèse Sciences, Géologie, univ. Paris ; Mém. BRGM, Paris*, 12, 329 p.
- DAVEAU S. (1971) - Les Monts Loma dans la dorsale guinéenne. In : *Le massif des Monts Loma (Sierra Leone), fascicule I, Mém. IFAN, Dakar*, 86, p.11-53.
- DAWDY D.R., FETH J.H. (1967) - Application of factor analysis in study of chemistry of groundwater quality, Mojave river valley, California. *Water Res. Res.*, 3, p.505-510.
- DEEPAK A., GERBER H.E. (1983) - Report of the experts meeting on aerosols and their climatic effects. *World Climate Research Programme, Virginia, 28-30 March 1983, NASA Langley Research Center, Washington*, 106 p.
- DEGALLIER R. (1965) - Réflexions et questions sur l'alimentation des nappes souterraines. *Chron. Hydrolog., Fr.*, 5, p.7-31.
- DEGENS E. (1982) - Transport of carbon and minerals in major world rivers. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Hamburg, SCOPE/UNEP*, 52, p.91-332.
- DELMAS R., SERVANT J. (1987) - Echanges biosphères-atmosphères d'azote et de soufre en zone intertropicale : transferts entre les écosystèmes forêt et savane en Afrique de l'Ouest. *Atmos. Res.*, 21, p.53-74.
- DESCROIX L. (1986) - Projet pour la première partie de la monographie hydrologique du bassin du fleuve Gambie. Composantes géographiques et climatiques. *Rapport ORSTOM, Dakar*, 54 p. multigr.
- DEYNOUX M. (1980) - Les formations glaciaires du Précambrien terminal et de la fin de l'Ordovicien en Afrique de l'Ouest, deux exemples de glaciations d'inlandsis sur une plateforme stable. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Marseille ; Trav. Lab. Sci. Terre St Jérôme, Marseille*, 17, 554 p.
- DEYNOUX M. (1983) - Glaciations du Précambrien terminal et de la fin de l'Ordovicien dans le bassin de Taoudéni (Afrique de l'Ouest). In : *Symp. Till Mauretania 83, West African palaeoglaciations, characterization and evolution of glacial phenomena through space and time, Nouakchott, Mauretania, 4-15 janv. 83, M. DEYNOUX Ed., univ. Poitiers, Labo. Petrol. et ERA/CNRS 220*, p.43-86.
- DEYNOUX M., TROMPETTE R. (1976) - Late Precambrian mixtites : glacial and/or non-glacial? A discussion dealing especially with the mixtites of West Africa. *Am. J. Sci.*, 276, p.1302-1315.
- DEYNOUX M., SOUGY J., TROMPETTE R. (1985) - Lower Paleozoic rocks of west Africa and western part of central Africa. In : *Lower Paleozoic of Northwestern and West Central Africa, WILEY Ed., New York*, p.337-495.

- DEYNOUX M., KOCUREK G., PROUST J.N. (1989a) - Late proterozoic periglacial aeolian deposits on the West African Platform, Taoudeni Basin, western Mali. *Sedimentology*, 36, p.531-549.
- DEYNOUX M., MARCHAND J., PROUST J.N. (1989b) - Notice explicative et synthèse stratigraphique et sédimentologique des cartes géologiques au 1/200 000 de Kossanto, Kayes, Kankossa (Mali occidental). *Rapp. CGS/CNRS, univ. Strasbourg*, 71 p.
- DILLON W.P., SOUGY J.M.A. (1974) - Geology of West Africa and Canary and Cape Verde islands. In : *The ocean basins and margins, New York*, 2, p.315-390.
- DIOUF M.B. (1989) - Sédimentologie, minéralogie et géochimie des grès carbonatés quaternaires du littoral sénégal-mauritanien. *Thèse Sciences, Océanologie, univ. Perpignan*, 237 p.
- DOMERGUE J.L. (1980) - Contribution à l'étude des aérosols atmosphériques d'origine naturelle en Afrique de l'Ouest. *Thèse Sciences, Physique, univ. Toulouse*, 165 p.
- DOUGLAS I. (1968) - The effects of precipitation chemistry and catchment area lithology on the quality of river water in selected catchments in Eastern Australia. *Earth Sci. J.*, 2, p.126-144.
- DOYNE H.C., HARTLEY K.T., WATSON W.A. (1938) - Soil types and manurial experiments in Nigeria. *Third West African Agricultural Conference*.
- DUBREUIL P. (1974) - Initiation à l'analyse hydrologique. *Ed. MASSON, Paris*, 216 p.
- DUPRAZ C. (1984) - Echantillonnages adaptés et méthodes de calcul automatique pour l'évaluation de la charge soluble dans les petits bassins versants. *Physio Géo*, 9, p.99-116.
- EDMOND J.M., BOYLE E.A., GRANT B., STALLARD R.F. (1981) - The chemical mass balance in the Amazon plume. I. The nutrients. *Deep Sea Research*, 28 A, 11, p.1339-1374.
- ELOUARD P. (1962) - Etude géologique et hydrogéologique des formations sédimentaires du Guebla mauritanien et de la vallée du Sénégal. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Paris ; Mém. BRGM, Paris*, 7, 247 p.
- EMMETT W.W. (1981) - Measurement of bed load in rivers. In : *Erosion and Sediment Transport Measurement, Proceedings of the Florence Symposium, LAHS*, 133, p.3-15.
- ERHART H. (1973) - Itinéraires géochimiques et cycle géologique du silicium. *Ed. DOIN S.A., Paris VI*, 217 p.
- ETCHANCHU D. (1988) - Géochimie des eaux du bassin de la Garonne, transferts de matières dissoutes et particulières vers l'océan Atlantique. *Thèse Sciences, Géochimie, univ. Toulouse*, 178 p.
- FAURE H., GAC J.Y. (1981) - Will the sahelian drought end in 1985 ? *Nature*, 291, p.475-478.
- FELLER C., MERCKY P. (1976) - Carte pédologique de reconnaissance de la zone Matam-Bakel-Kidira (au 1/200000). *ORSTOM, Dakar*.
- FENN R.W., CLOUGH S.A., GALLERY W.O., GOOD R.E., KNEIZYS F.X., MILL J.D., ROTHMAN L.S., SHETTLE E.P., VOLZ F.E. (1984) - Optical and infrared properties of the atmosphere. In : *Handbook of Geophysics and Space Environments, AFCRL, VALLEY S.L. Ed.*, p.18/1-18/80.
- FERGUSON R.I. (1987) - Accuracy and precision of methods for estimating river loads. *Earth surface processes and landforms*, 12, p.95-104.
- FRECAUT R. (1974) - Les variabilités de l'écoulement fluvial en milieu tropical humide. *Annales de Géog.*, 83, 457, p.241-259.
- FRECAUT R., PAGNEY P. (1982) - Dynamique des climats et de l'écoulement fluvial. *Ed. MASSON, Paris*, 240 p.
- FRITZ B. (1975) - Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions, application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Strasbourg ; Mém. Sci. Géol.*, 41, 152 p.
- GAC J.Y. (1980) - Géochimie du bassin du lac Tchad. Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Strasbourg ; Trav. et Doc. ORSTOM, Paris*, 123, 251 p.
- GAC J.Y. (1985) - Le phénomène des brumes sèches au Sénégal en 1984-1985. *Bull. Veille Climatique Satellitaire, ORSTOM, Paris*, 7, p.31-35.

- GAC J.Y. (1986) - Etude préliminaire de la physicochimie de la nappe phréatique de Koundara (Guinée). *Rapport ORSTOM, Dakar, 8 p. multigr.*
- GAC J.Y. (1987) - Effet thermique des brumes sèches. *Bull. Veille Climatique Satellitaire, ORSTOM, Paris, 16, p.46-48.*
- GAC J.Y., PINTA M. (1973) - Bilan de l'érosion et de l'altération en climat tropical humide, estimation de la vitesse d'approfondissement des profils : étude du bassin versant de l'Ouham (R.C.A.). *Cah. ORSTOM, sér. Géol., Paris, V, p.83-96.*
- GAC J.Y., TARDY Y. (1980) - Géochimie d'un paysage tropical : le bassin du lac Tchad. In : *Géochimie des interactions entre les eaux, les minéraux et les roches, Ed. S.A.R.L. Elements, Strasbourg, p.199-239.*
- GAC J.Y., TRAVI Y. (1984) - Etude quantitative et qualitative des poussières atmosphériques en provenance du Sahara, entre Dakar et Nouakchott. In : *10^{ème} Réunion Annuelle des Sciences de la Terre, Bordeaux, Soc. Géol. Fr. Ed., Paris, p.237.*
- GAC J.Y., CARN M., DIALLO M.I., ORANGE D., TANRE D. (1986) - Corrélation entre brumes sèches et visibilité horizontale au sol à partir de mesures quotidiennes au Sénégal pendant 3 années. *C.R. Acad. Sc., Paris, 303, série II, p.1025-1027.*
- GAC J.Y., KANE A. (1986a) - Le fleuve Sénégal : I. Bilan hydrologique et flux continentaux de matières particulaires à l'embouchure. *Bull. Sci. Géol., Strasbourg, 39, p.99-130.*
- GAC J.Y., KANE A. (1986b) - Le fleuve Sénégal : II. Flux continentaux de matières dissoutes à l'embouchure. *Bull. Sci. Géol., Strasbourg, 39, p.151-172.*
- GAC J.Y., FAURE H. (1987) - Le "vrai" retour à l'Humide au Sahel est-il pour demain ? *C.R. Acad. Sci., Paris, 305, série II, p.777-781.*
- GAC J.Y., BOUCHEZ J.M., ORANGE D. et al. (1987a) - Géochimie des eaux du Fouta Djalon, flux dissous et particulaires en Haute Gambie (Kédougou et Gouloumbou), contribution à la monographie de la Gambie. *Rapport ORSTOM, Dakar, 102 p.*
- GAC J.Y., ORANGE D., DIALLO M.I. (1987b) - La visibilité au sol à Dakar (Sénégal), recueil de 25 années d'observations (1962-1986). *Rap. ORSTOM, Dakar, 3 tomes, 382 p.*
- GAC J.Y., ORANGE D. (1990) - Cadre naturel du haut bassin versant du fleuve Sénégal. *Rapport ORSTOM, Dakar, projet CEE/EQUESEN n° TS-2-0-198-F-EDB, 150 p.*
- GARRELS R.M., MACKENZIE F.T. (1971) - Evolution of sedimentary rocks. *W.W. NORTON & Company, USA, 397 p.*
- GEORGE B. (1968) - Rôle de l'analyse du modelé latéritique dans la prospection des nappes d'eau des terrains d'altération en Afrique occidentale. *Bull. BRGM, série 2, section III, 2, p.53-65.*
- GIBBS R.J. (1970) - Mechanisms controlling world water chemistry. *Science, 170, p.1088-1090.*
- GIRARD J.P. (1985) - Diagenèse hydrothermale tardive des sédiments grés-argileux du Protérozoïque supérieur du bassin de Taoudéni (Afrique de l'Ouest). *Thèse 3^{ème} cycle, univ. Poitiers, 255 p.*
- GIRARD J.P., DEYNOUX M., NAHON D. (1989) - Diagenesis of the upper proterozoic siliciclastic sediments of the Taoudeni basin (West Africa) and relation to diabase emplacement. *J. Sed. Petr., 59, 2, p.233-248.*
- GOLOUBINOW R. (1936) - Géologie et ressources en or du N-E de la Guinée française. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Nancy, Imp. THOMAS, 140 p.*
- GOLOUBINOW R. (1950) - Notice explicative sur la feuille Bougoni-Ouest de la carte géologique de reconnaissance au 1/500000. *Gouvernement de l'A.O.F., Dakar, 23 p.*
- GOLTERMAN H.L. (1978) - Sediments as a source of phosphate for algal growth. In : *Interactions between sediments and fresh water, H.L. GOLTERMAN Ed., W. Junk BU Publishers, La Hague, p.286-293.*
- GOMA S.C. (1988) - Transports dissous et particulaires par le fleuve Congo et l'un de ses principaux affluents, l'Oubangui, premier résultats de la campagne 1986-1987. *DEA Géologie, univ. Strasbourg, 27 p.*
- GOODMAN G.T., INSKIP M.J., SMITH S., PARRY G.D.R., BURTON M.A.S. (1979) - The use of moss-bags in aerosol monitoring. In : *Saharan dust : mobilization, transport, deposition, SCOPE Rep. n°14, Ed. MORALES, p.211-232.*
- GORHAM E. (1955) - On the acidity and salinity of rain. *Geochim. Cosmochim. Acta, 7, p.231-239.*

- GSELL A. (1957) - Rapport de prospection, campagne 1956-1957 (Région de Tougué). *Archives Soc. Péchiney, Paris*, 35 p multigr.
- GUPTA R.K. (1987) - Aménagement intégré du massif du Fouta Djallon (projet régional). *Projet FAO n° DP/RAF/81/060, Rome, Rapport de mission n°7*, 130 p.
- HALL J.K., BAKER D.E. (1971) - Phosphorous fixation by montmorillonite and vermiculite clays as influenced by pH and soluble aluminium. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 35, p.876-881.
- HAUBERT M. (1975) - Bilan hydrochimique d'un bassin versant de moyenne montagne : la Drame de Bellevaux (Brevon, Haute-Savoie). *Thèse 3^{ème} cycle, Géologie, univ. Paris VI*, 331 p.
- HICKS B.B. (1976) - Some micrometeorological aspects of pollutant desposition rates near the surface. In : *International conference on Atmospheric-surface exchange of particulate and gaseous pollutants, ERDA Symp. Ser., Richland, Washington (USA)*, 38, p.434-439.
- HITCHON B., BILLINGS G.K., KLOVAN J.E. (1971) - Geochemistry and origin of formation waters in the Western Canada sedimentary basin, III - Factors controlling chemical composition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 35, p.567-598.
- HOLEMAN J.N. (1968) - The sediment field of major rivers of the world. *Water Res. Res.*, 4, p.737-747.
- JACCON G. (1989) - *Laboratoire d'Hydrologie, ORSTOM, Montpellier.*
- JACKSON R.E. (1974) - Time series analysis of groundwater hydrographs from surficial deposits of the Canadian shield. *Can. J. Earth Sc.*, 11, p.177-188.
- JAENICKE R. (1979) - Monitoring and critical review of the estimated source strength of mineral dust from the Sahara. In : *Saharan dust : mobilization, transport, deposition, SCOPE Rep. n°14, Ed. MORALES*, p.233-242.
- JANKOWIAK I., TANRE D. (1989) - Climatology of saharan dusts events observed from Meteosat imagery over ocean : method and preliminary results. *J. Climate, (in press)*, 23 p.
- JEANROY E. (1983) - Diagnostic des formes du fer dans les pédogénèses tempérées, évaluation par les réactifs chimiques d'extraction et apports de la spectrométrie Mössbauer. *Thèse Sciences, univ. Nancy I*, 168 p.
- 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. Strasbourg*, 320 p.
- KANE A. (1985) - Le bassin du Sénégal à l'embouchure, flux continentaux dissous et particulaires, invasion marine dans la vallée du fleuve. *Thèse 3^{ème} cycle, Géographie, univ. Nancy II*, 7, 205 p.
- KATTAN Z. (1984) - Hydrologie de surface et érosion mécanique sur les bassins amont du Chari-Logone et du Sénégal. *DEA Géologie, univ. Strasbourg*, 53 p.
- KATTAN Z. (1989) - Géochimie et hydrologie des eaux fluviales des bassins de la Moselle et de la Mossig, transports dissous et particulaires, cycles biogéochimiques des éléments. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Strasbourg*, 220 p.
- KATTAN Z., GAC J.Y., PROBST J.L. (1987) - Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin, estimation of the surface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion. *J. Hydrology*, 92, p.59-76.
- KAYSER N., PROBST J.L., CADET D., TARDY Y. (1990) - Propagation des ondes de sécheresse et d'humidité à travers le monde. *C.R. Acad. Sc., Paris*, 310, p.757-763.
- KONTA J. (1985) - Mineralogy and chemical maturity of suspended matter in major rivers sampled under the SCOPE/UNEP Project. In : *Transport of carbon and minerals in major world rivers, part 3, E.T. DEGENS, S. KEMPE et R. HERRERA Ed., Mitt. Geol. Paläont. Inst., Hamburg, SCOPE/UNEP*, 58, p.569-592.
- KREMPP G. (1988) - Techniques de prélèvement des eaux naturelles et des gaz associés, méthodes d'analyse des eaux et des roches. *Note technique, Géologie, univ. Strasbourg*, 19, 79 p.
- KRISHNAMURTI T.N., SHAO-HANG CHU, IGLESIAS W. (1986) - On the sea-level pressure of the southern oscillation. *Arch. Meteo. Geoph. Biocl., serie A* 34, p.385-425.
- LACAUX J.P., SERVANT J., BAUDET J.G.R. (1987) - Acid rain in the tropical forests of the Ivory Coast. *Atm. Env.*, 21, 12, p.2643-2647.

- LACAUX J.P., DELMAS R. (1989) - Influence of biomass burning emissions on precipitation chemistry in the equatorial forests of Africa. *Symp. of Williamsburg, USA.*
- LACROIX A. (1914) - Les latérites de la Guinée. *C.R. Acad. Sc., Paris, 158, p.835-838.*
- LAMAGAT J.P., ALBERGEL J., BOUCHEZ J.M., DESCROIX L. (1989) - Monographie hydrologique du fleuve Gambie. *Rapport ORSTOM-OMVG, Dakar, 247 p.*
- LEGRAND M. (1990) - Etude des aérosols sahariens au-dessus de l'Afrique à l'aide du canal à 10 microns de Météosat : visualisation, interprétation et modélisation. *Thèse Sciences, Physique, univ. Lille, 200 p.*
- LELONG F. (1966) - Régime des nappes phréatiques contenues dans les formations d'altération tropicale, conséquence pour la pédogénèse. *Sci. Terre, Fr., 11, 2, p.201-244.*
- LELONG F. (1969) - Nature et genèse des produits d'altération de roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane française). *Thèse Sciences, Géologie, univ. Nancy ; Mém. Sci. Terre, 14, 188 p.*
- LELONG F., LEMOINE J. (1968) - Les nappes phréatiques des arènes et des altérations argileuses ; leur importance en zone intertropicale ; les difficultés de leur exploitation. *Bull. BRGM, série 2, section III, 2, p.41-52.*
- LELONG F., ROOSE E. (1986) - Cycles biogéochimiques comparés de quelques éléments chimiques (Ca, Mg, K, Na, Si, Cl, S) dans divers écosystèmes à végétation naturelle d'Afrique occidentale. *Bull. Sci. Géol., Strasbourg, 39, p.173-193.*
- LENEUF N. (1959) - L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Paris, Lang Grandemange Ed., 210 p.*
- LENOIR F. (1972) - Exportation chimique d'un bassin intertropical (le Bandama, Côte d'Ivoire). *Thèse Sciences, Géologie, univ. Nice, ORSTOM, 402 p.*
- LENOIR F. (1978) - Relations entre la dynamique et la composition chimique d'une nappe d'arène en Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, sér. Géol., Paris, X, p.209-236.*
- LEPRUN J.C. (1979) - Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche : genèse, transformations, dégradation. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Strasbourg ; Mém. Sci. Géol., Strasbourg, 58, 224 p.*
- LERIQUE J. (1975) - Les transports solides en suspension dans la Gambie à Kédougou et à Gouloumbou. Résultats de la campagne de 1974. *Rapport ORSTOM, Dakar, 11 p. multigr.*
- LEROUX M. (1980) - Le climat de l'Afrique tropicale. *Thèse Lettres, Géographie, univ. Dakar, 1427 p.*
- LE ROUX E., FERHI A., DORIOZ J.M., BLANC P. (1987) - Contribution à l'étude des échanges de phosphore entre l'eau et les sédiments dans un système fluvio-lacustre. *Rev. Franç. Sci. Eau, 6, p.97-106.*
- LEVEQUE A. (1979) - Pédogénèse sur le socle granito-gneissique du Togo, différenciation des sols et remaniements superficiels. *Trav. Doc. ORSTOM, Paris, 108, 224 p.*
- LEWIS W.M. (1981) - Precipitation chemistry and nutrient loading by precipitation in a tropical watershed. *Water Res. Res., 17, p.169-181.*
- LO H.M. (1984) - Le bassin de la Gambie en amont de Gouloumbou. *Thèse 3^{ème} cycle, Géographie, univ. Nancy II, 6, 394 p.*
- LOYE-PILOT M.D., MARTIN J.M., MORELLI J. (1986) - Influence of saharan dust on the rain acidity and atmospheric input to the mediterranean. *Nature, 321, p.427-428.*
- MACHENS E. (1973) - Contribution à l'étude des formations du socle cristallin et de la couverture sédimentaire de l'Ouest de la République du Niger. *Mém. BRGM, Paris, 82, 143 p.*
- MACKENZIE R.T., GARRELS R.M. (1966) - Chemical mass balance between rivers and oceans. *Am. J. Sci., 264, p.507-525.*
- MAIGNIEN R. (1954) - Cuirassement des sols de plaine-Ballay (Guinée française). *Actes et C.R. du V^e Congrès Int. Sci. Sol, Léopoldville, 25, p.19-22.*
- MAIGNIEN R. (1958) - Le cuirassement des sols en Guinée, Afrique occidentale. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Strasbourg ; Mém. Serv. Carte Géol. Als.-Lorr., Strasbourg, 16, 239 p.*
- MAINGUET M. (1972) - Le modelé des grès, problèmes généraux (tome I). *Etudes de photo-interprétation, Institut Géographique National, Paris, 587 p.*

- MALEY J. (1981) - Etudes palynologiques dans le bassin du Tchad et paléoclimatologie de l'Afrique nord-tropicale de 30 000 ans à l'époque actuelle. *Trav. Doc. ORSTOM, Paris*, 586 p.
- MALEY J. (1982) - Dust, clouds, rain types and climatic variations in tropical North Africa. *Quat. Res.*, 18, p.1-16.
- MANGIN A. (1981) - Apports des analyses corrélatrices et spectrale croisées dans la connaissance des systèmes hydrologiques. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 293, série II, p.1011-1014.
- MANGIN J.P., LECOLLE J., MATHIEU P., MONNET C., PINTA M., SIRCOULON J. (1966) - Géochimie des eaux naturelles ; le transport en solution par un fleuve de Côte d'Ivoire. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 262, p.2204-2206.
- MARCHAND J., BASSOT J.P., SIMON B. (1987) - Notice explicative de la carte photogéologique au 1/200000 de Kossanto (Mali). *Rapp. Direction Nationale Géol. Mines, Bamako (Mali)*, 28 p.
- MARTIN J.M., MEYBECK M. (1979) - Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Marine Chemistry*, 7, p.173-206.
- MARTINS O. (1982) - Geochemistry of the Niger river. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Hamburg SCOPE/UNEP*, 52, p.337-418.
- MARTINS O., PROBST J.L. (1990) - Biogeochemistry of major african rivers. Carbon and mineral transport. In : *SCOPE/UNEP Books*, J. WILEY Ed., (in press), 29 p.
- MATHIEU P. (1976) - Influence des apports atmosphériques et du pluviollessivage forestier sur la qualité des eaux de deux bassins versants en Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, sér. Géol., Paris*, VIII, p.11-32.
- MATHIEU P., MONNET C. (1971) - Physico-chimie des eaux de pluie en savane et sous forêt en milieu tropical. *Cah. ORSTOM, sér. Géol., Paris*, III, p.93-114.
- MAZALTARIM D. (1989) - Géochimie des cuirasses ferrugineuses et bauxitiques de l'Afrique occidentale et centrale. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Strasbourg*, 262 p.
- McTAINSH G.H. (1980) - Harmattan dust deposition in northern Nigeria. *Nature*, 286, p.587-588.
- McTAINSH G.H. (1984) - The nature and origin of the aeolian mantles of central north Nigeria. *Geoderma*, 33, p.13-37.
- McTAINSH G.H., WALKER P.H. (1982) - Nature and distribution of harmattan dust. *Z. Geomorph. N.F.*, 26, 4, p.417-435.
- MEYBECK M. (1982) - Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers. *Amer. J. Science*, 282, p.401-450.
- MEYBECK M. (1983) - Atmospheric inputs and river transport of dissolved substances. In : "Dissolved Loads of Rivers and Surface Water Quantity/Quality Relationships" (proceedings of the Hamburg Symposium), LAHS publ., 141, p.173-191.
- MEYBECK M. (1984) - Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Paris VI*, 558 p.
- MICHEL P. (1973) - Les bassins du Sénégal et de la Gambie : étude géomorphologique. *Thèse Lettres, Géographie, univ. Strasbourg ; Mém. ORSTOM, Paris*, 63, 3 tomes, 753 p.
- MIDDLETON N.J. (1985) - Effect of drought on dust production in the Sahel. *Nature*, 316, p.431-434.
- MIKLISHANSKIY A.Z., SEROVA V.V., TAMBIYEV S.B. (1986) - Geochemical features of Indian-ocean eolian suspensates. *Geochim. Int.*, 23, 5, p.125-132.
- MILLIMAN J., QUINCHUN X., ZUOSHENG Y. (1984) - Transfer of particulate organic carbon and nitrogen from the Yangtze river to the ocean. *Amer. J. Science*, 284, p.824-834.
- MILLOT G. (1964) - Géologie des argiles. *Ed. MASSON et Cie, Paris*, 499 p.
- MILLOT G., BOCQUIER G., PAQUET H. (1976) - Géochimie et paysages tropicaux. *La Recherche*, 7, 65, p.236-244.
- MONNET C. (1972) - Contribution à l'étude de la dynamique et de la nature des suspensions d'un fleuve intertropical, le Bandama (Côte d'Ivoire). Evolution des éléments chimiques des eaux de son estuaire. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Nice*, 427 p.
- MONTEILLET J. (1988) - Environnements sédimentaires et paléocéologie du delta du Sénégal au Quaternaire. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Perpignan ; Trav. Lab. Rec. Sédimentologie Marine, Perpignan*, 267 p.

- MORALES C. (1979) - Saharan dust : mobilization, transport, deposition. *SCOPE Rep. n°14, Ed. MORALES, 320 p.*
- MOSSER C. (1980) - Etude géochimique de quelques éléments traces dans les argiles des altérations et des sédiments. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Strasbourg ; Mém. Sci. Géol., Strasbourg, 63, 230 p.*
- MOSSER C. (1987) - Les éléments traces des fractions argileuses et en particulier dans les altérations et des sédiments, leur utilisation en géologie. *Yerbilimleri, Bull. of Earth Sci. Appl. and Research Centre of Hacettepe University, Turquie, 14, p.179-189.*
- MOSSER C., GALL J.C., TARDY Y. (1971) - Géochimie des illites du grès à Voltzia du Budsandstein supérieur des Vosges du Nord, France. *Chem. Geology, 9, p.157-177.*
- MOSSER C., WEBER F., GAC J.Y. (1974) - Eléments traces dans des kaolinites d'altération formées sur granite et schiste amphiboliteux en République centrafricaine. *Chem. Geology, 14, p.95-115.*
- MOSSER C., LEPRUN J.C., BLOT A. (1985) - Les éléments traces des fractions <2 μ m à kaolinite et smectite formées par altération de roches silicatées acides en Afrique de l'Ouest (Sénégal et Haute-Volta). *Chem. Geology, 48, p.165-181.*
- NGUYEN B.C., BONSANG B., MIHALOPOULOS N., BELVISO S. (1989) - Carbonyl sulfide emissions from african savannah burning. *Symp. of Williamsburg, USA.*
- NICHOLSON K.W. (1988) - A review of particle resuspension. *Atm. Environment, 22, 12, p.2639-2651.*
- NKOUNKOU R.R., PROBST J.L. (1987) - Hydrology and geochemistry of the Congo river system. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Hamburg SCOPE/UNEP, 64, p.483-508.*
- OBERMULLER A., 1941 - Description pétrographique et étude géologique de la région forestière de la Guinée française. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Alger ; Bull. Serv. Mines, Dakar, 5, 207 p.*
- OLIVRY J.C. (1983) - Evaluation des données hydrologiques et météorologiques disponibles sur le bassin du fleuve Gambie. *Rapport ORSTOM, Dakar, 91 p. multigr.*
- OLIVRY J.C. (1983a) - Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégal et aux îles du Cap Vert, examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., Paris, XX, p.47-69.*
- ORANGE D. (1986) - Bilan de l'altération chimique et de l'érosion mécanique sur le haut-bassin du fleuve Sénégal. *Rapp. ORSTOM, Dakar ; DEA Géologie, univ. Orléans, 111 p.*
- ORANGE D., CARN M., CHAUVIN M., DIALLO M.I., GAC J.Y. (1986) - Contribution à l'étude du phénomène des brumes sèches au Sahel. *Rapport ORSTOM, Dakar, 36 p. multigr.*
- ORANGE D., GAC J.Y. (1987) - Vers une prévision des flux annuels exportés par le fleuve Sénégal à Bakel. *Rapport ORSTOM, Dakar, 22 p.*
- ORANGE D., GAC J.Y. (1990a) - Qualité chimique des apports atmosphériques en Afrique de l'Ouest (bassins supérieurs du Sénégal et de la Gambie). *Géodynamique, ORSTOM, Paris, V, 1, 20 p.*
- ORANGE D., GAC J.Y. (1990b) - Reconnaissance géochimique des eaux du Fouta Djallon (Guinée), flux dissous et particuliers en haute Gambie. *Géodynamique, ORSTOM, Paris, V, 1, 19 p.*
- ORANGE D., GAC J.Y., PROBST J.L., TANRE D. (1990) - Mesure du dépôt au sol des aérosols désertiques, une méthode simple de prélèvement : le capteur pyramidal. *C.R. Acad. Sc., Paris, 311, série II, p.167-172.*
- PAGNEY P. (1976) - Les climats de la Terre. *Ed. MASSON, Paris, 150 p.*
- PALUTIKOF J.P., LOUGH J.M., FARMER G. (1981) - Senegal river runoff. *Nature, 293, p.414.*
- PAQUET H. (1970) - Evolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens tropicaux à saisons contrastées. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Strasbourg ; Mém. Sci. Géol., Strasbourg, 30, 212 p.*
- PAQUET H., COUDE-GAUSSSEN G., ROGNON P. (1984) - Etude minéralogique de poussières sahariennes le long d'un itinéraire entre 19° et 35° de latitude nord. *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys., Paris, 25, p.257-265.*
- PELISSIER P. (1949) - Le Fouta Djallon. *In : Notes et C.R., Les Cahiers d'Outre-Mer, rev. géog. de Bordeaux et de l'Atlantique, tome II, ref. ORSTOM, 5, p.63-73.*

- PELISSIER P., ROUGERIE G. (1953) - Problèmes morphologiques dans le bassin de Siguiri (Haut-Niger). *Bull. IFAN, Dakar, XV, 1, p.1-47.*
- PEDRO G. (1964) - Contribution à l'étude expérimentale de l'altération chimique des roches cristallines. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Paris, 344 p.*
- PEDRO G. (1966) - Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles (cycle aluminosilicique). *C.R. Acad. Sci., Paris, 262, p.1828-1831.*
- PEDRO G. (1968) - Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. *Rev. Géog. Phys. Géol. Dyn., Paris, X, p.457-470.*
- PEDRO G. (1979) - Altération des roches cristallines en milieu superficiel. *Bull. Ass. Fr. pour l'étude des sols, séminaire INRA/Versailles du 7-8/78, 2-3, 301 p.*
- PEREZ P., SARR P.S. (1990) - Rapport d'activité, bassin versant de Keur Dianko (Sénégal). *Programme Gestion des Ressources Naturelles, Economie de l'eau - DRS année 1989, CIRAD (IRAT/ISRA/ORSTOM), Dakar, 42 p.*
- PETRECHUK O.P., SELEZNEVA E.S. (1970) - Chemical composition of precipitation in regions of the Soviet Union. *J. Geophys. Res., 75, 18, p.3629-3634.*
- PIEST R.F., BRADFORD J.M., SPOMER R.G. (1975) - Mechanisms of erosion and sediment movement from gullies. In : *Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources, U.S. Dep. of Agriculture, Agr. Res. Serv. Publ., ARS-S-40, p.162-176.*
- PINTA M., OLLAT C. (1961) - Recherches physico-chimiques des éléments traces dans les sols tropicaux, I- Etude de quelques sols du Dahomey. *Geochim. Cosmochim. Acta, 25, p.14-23.*
- PION J.C. (1989) - *Communication orale, CGS/CNRS, Géologie, univ. Strasbourg.*
- PIPER J.D. (1976) - Paleomagnetic evidence for a Proterozoic super-continent. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A., GBR, 280, p.469-490.*
- POUQUET J. (1955) - Aspects morphologiques du Fouta Djallon, régions de Kindia et de Labé (Guinée française, AOF), caractères alarmants des phénomènes d'érosion des sols déclenchés par les activités humaines. *Rev. Géog. Alp., Grenoble, XLIV, 2, p.231-245.*
- PROBST J.L. (1983) - Hydrologie du bassin de la Garonne, modèle de mélanges, bilans de l'érosion, exportation des phosphates et des nitrates. *Thèse 3^{ème} cycle, univ. Toulouse II, 148 p.*
- PROBST J.L. (1985) - Nitrogen and phosphorus exportation in the Garonne basin (France). *J. Hydrol., 76, p.281-305.*
- PROBST J.L. (1986) - Dissolved and suspended matter transported by the Girou river (France) : mechanical and chemical erosion rates in a calcareous molasse basin. *Hydrol. Sci. J., 31, 1, p.61-79.*
- PROBST J.L. (1990) - Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale. Mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Strasbourg, 190 p.*
- PROBST J.L., BAZERBACHI A. (1986) - Transports en solution et en suspension par la Garonne supérieure. *Bull. Sci. Géol., 39, 1, p.79-98.*
- PROBST J.L., SIGHA N. (1989) - Estimation de l'écoulement superficiel et de sa charge en suspension sur quelques grands bassins fluviaux du monde. *C.R. Acad. Sc., Paris, 309, série II, p.357-363.*
- PROBST J.L., TARDY Y. (1987) - Long range streamflow and world continental runoff fluctuations since the beginning of this century. *J. Hydrology, 94, p.289-311.*
- PROBST J.L., TARDY Y. (1989) - Global runoff fluctuations during the last 80 years in relation to world temperature change. *American J. Sci., 289, p.267-285.*
- PROSPERO J.M. (1979) - Mineral and sea-salt aerosol concentration in the various ocean regions. *J. Geophys. Res., 84, p.725-731.*
- PROSPERO J.M. (1985) - Records of past continental climates in deep-sea sediments. *Nature, 315, p.279-280.*
- PROSPERO J.M., GLACCUM R.A., NEES R.T. (1981) - Atmospheric transport of soil dust from Africa to south America. *Nature, 289, p.570-572.*
- PROUST J.N. (1990) - Expression sédimentologique et modélisation des fluctuations glaciaires, exemple des dépôts du Protérozoïque terminal au Mali occidental. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Strasbourg, 200 p.*

- PYE K. (1989) - Aeolian dust and dust deposits. *Academic Press, London, 334 p.*
- QUANTIN P. (1989) - *Communication orale, ORSTOM, Bondy.*
- QUANTIN P., BOULEAU A. (1983) - Détermination des constituants minéraux amorphes et crypto-cristallins d'andosols par l'analyse cinétique de leur dissolution par HCl et NaOH. *Sc. du Sol, Bull. AFES, 3-4, p.217-234.*
- REEDER S.W., HITCHON B., LEVINSON A.A. (1972) - Hydrogeochemistry of the surface water of the Mackenzie river drainage basin, Canada, I - Factors controlling inorganic composition. *Geochim. Cosmochim. Acta, 36, p.825-865.*
- REJO R.A. (1985) - Simulation des débits journaliers, recherche d'une méthode utilisant l'analyse de Fourier, application à l'Ipoka (Madagascar). *Thèse Sciences, univ. Rennes I, 165 p.*
- RHAN K.A., BORYS R.D., SHAW G.E., SCHUTZ L., JAENICKE R. (1979) - Long-range impact of desert aerosol on atmosphere chemistry : two examples. *In : Saharan dust : mobilisation, transport, deposition, SCOPE Rep. n°14, Ed. MORALES, p.243-266.*
- ROBINSON A.R. (1977) - Relationship between erosion and sediment delivery. *Proc. Paris Symp., LAHS publ., 122, p.159-167.*
- ROBEQUAIN C. (1937) - A travers le Fouta Djallon. *Rev. Géog. Alp., Grenoble, p.545-580.*
- ROCCI G. (1965) - Essai d'interprétation de mesures géochronologiques ; la structure de l'Ouest africain. *Sci. Terre, 10, 3-4, p.461-479.*
- ROCHETTE C. (1974) - Le bassin du Sénégal, monographie hydrologique. *Monographies Hydrologiques, ORSTOM, Paris, 1, 325 p.*
- RODIER J. (1964) - Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'Ouest du Congo. *Mém. ORSTOM, Paris, 6, 137 p.*
- ROOSE E. (1977) - Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest ; vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. *Trav. Doc. ORSTOM, Paris, 78, 108 p.*
- ROOSE E. (1980) - Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Orléans, 587 p.*
- ROOSE E., SARRAILH J.M. (1989) - Erodibilité de quelques sols tropicaux, vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cah. ORSTOM, Pédologie, Paris, XXV, 1-2, p.7-30.*
- ROQUIN C., DANDJINOU T., FREYSSINET P., PION J.C. (1989) - The correlation between geochemical data and SPOT satellite imagery of lateritic terrain in southern Mali. *J. Geochemical Exploration, 32, p.149-168.*
- ROQUIN C., FREYSSINET P., ZEEGERS H., TARDY Y. (1990) - Element distribution patterns in laterites of southern Mali : consequence for geochemical prospecting and mineral exploration. *Applied Geochemistry, 5, p.303-315.*
- 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 Taoudéni au Mali occidental (Afrique de l'Ouest). *Sci. Geol., 37, p.91-106.*
- ROUGERIE G. (1960) - Le façonnement actuel des modelés en Côte d'Ivoire forestière. *Thèse Lettres, Géographie, univ. Paris ; Mém. IFAN, Sénégal, 58, 542 p.*
- RUELLE P., SENE M. (1987) - Bilan hydrique d'un micro-bassin versant (Sénégal). *Programme Gestion des Ressources Naturelles, CIRAD (IRAT/ISRA/ORSTOM), ISRA Kaolack, 20 p.*
- SABATON C. (1983) - Analyse statistique des relations liant les paramètres de qualité d'eau et le débit du Rhin en huit stations de 1959 à 1974. *Proc. Hamburg Symp., LAHS publ., 141, p.109-119.*
- SAMUEL J., ROUAULT R. (1983) - Les méthodes d'analyses des matériaux géologiques pratiquées au laboratoire d'analyses spectrochimiques. *Notes techniques de l'Institut de Géologie, univ. Strasbourg, 16, 46 p.*
- SAS Institute Inc. (1985) - User's Guide, version 5 edition. *Cary, NC, USA, 738 p.*
- SAUTTER G. (1944) - Le Fouta Djallon. *Bull. Soc. languedocienne Géog., XV, p.3-76.*
- SAVENKO V.S. (1976) - The chemical composition of precipitation over the oceans. *Geochem. Int., 13, 6, p.181-184.*
- SAVOIE D.L., PROSPERO J.M. (1976) - Saharan aerosol transport across the Atlantic ocean : characteristics of the input and the output. *Bull. Am. Meteorol. Soc., 57, p.145.*
- SCHOELLER H. (1962) - Les eaux souterraines. *Ed. MASSON, Paris.*

- SCHÜTZ L. (1979) - Saharan dust transport over the north Atlantic ocean, model calculations and measurements. In : *Saharan dust : mobilisation, transport, deposition, SCOPE Rep. n°14, Ed. MORALES, p.267-277.*
- SCHÜTZ L. (1980) - Long-range transport of desert dust with special emphasis on the Sahara. *Ann. N.Y. Acad. Sc., 338, p.515-532.*
- SEGALEN P. (1968) - Note sur une détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Paris, VI, p.105-126.*
- SHOLKOVITZ E.R. (1976) - Flocculation of dissolved organic matter during the mixing of river water and sea water. *Geochim. Cosmochim. Acta, 40, p.831-846.*
- SIMON B. (1979) - Essai de synthèse sur les formations sédimentaires de la partie occidentale du Mali. *Rapp. Lab. Geol. Dyn., univ. Marseille, 133 p.*
- SIMON B., DEYNOUX M., KEITA M., MARCHAND J., ROSSI P., TROMPETTE R. (1979) - Le Précambrien supérieur et la base du Paléozoïque de la partie SW du bassin de Taoudéni. *XX^{ème} Coll. Géol. Africaine, Montpellier, p.108-109.*
- SIRCOULON J. (1976) - Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale ; comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., Paris, XIII, p.75-174.*
- SIRCOULON J. (1985) - La sécheresse en Afrique de l'Ouest, comparaison des années 1982-1984 avec les années 1972-1973. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., Paris, XXIII, p.75-86.*
- SOW A. (1984) - Pluie et écoulement fluvial dans le bassin du fleuve Sénégal. *Thèse 3^{ème} cycle, Géographie, univ. Nancy II, 435 p.*
- STALLARD R.F., EDMOND J.M. (1981) - Geochemistry of the Amazon. 1. Precipitation chemistry and the marine contribution to the dissolved load at the time of peak discharge. *J. Geophys. Res., 86, C10, p.9844-9858.*
- STEEN B. (1979a) - A possible method for the sampling of Saharan dust. In : *Saharan dust : mobilization, transport, deposition, SCOPE Rep. n°14, Ed. MORALES, p.279-286.*
- STEEN B. (1979b) - Techniques for measuring dry deposition, summary of WMO expert meeting on dry deposition, april 18-22, 1977, Gothenburg. In : *Saharan dust : mobilization, transport, deposition, SCOPE Rep. n°14, Ed. MORALES, p.287-289.*
- SUTCLIFFE J.V., PIPER B.S. (1986) - Bilan hydrologique en Guinée et Togo-Bénin. *Hydrol. Continent., ORSTOM, Paris, I, 1, p.51-61.*
- TANRE D., DESCHAMPS P.Y., DEVAUX C., HERMAN M. (1988a) - Estimation of saharan aerosol optical thickness from blurring effects in Thematic Mapper Data. *J. Geophys. Res., 93, 12, p.15955-15964.*
- TANRE D., DEVAUX C., HERMAN M., SANTER R., GAC J.Y. (1988b) - Radiative properties of desert aerosols by optical ground based measurements at solar wavelenghts. *J. Geophys. Res., 93, 11, p.14223-14231.*
- TARDY Y. (1967) - Etude géochimique des eaux d'une nappe d'arène en pays cristallin (Korhogo, Côte d'Ivoire). *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr., Strasbourg, 20, 4, p.235-256.*
- TARDY Y. (1969) - Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Strasbourg ; Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr., Strasbourg, 31, 199 p.*
- TARDY Y. (1986) - Le cycle de l'eau ; climats, paléoclimats et géochimie globale. *Ed. MASSON, Paris, 338 p.*
- TARDY Y. (1987) - Une introduction à la géochimie globale. *Geochimica Brasiliensis, Brésil, I, 1, p.19-39.*
- TARDY Y., BOCQUIER G., PAQUET H., MILLOT G. (1973) - Formation of clay from granite and its distribution in relation to climate and topography. *Geoderma, Amsterdam, 10, p.271-284.*
- THORNTON I. (1965) - Nutrient content of rainwater in the Gambia. *Nature, 205, p.1025.*
- TOBIAS C., MEGIE C. (1981) - Les lithométéores au Tchad, premiers résultats concernant la nature, la composition et l'importance des aérosols transportés par voie atmosphérique dans la région de N'Djamena (Tchad). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Paris, XVIII, p.71-81.*
- TORCHINE N.S. (1976) - Carte géologique de la République de Guinée au 1/200000 ; feuille D28 XXXV et Sud de la feuille D28 XXIX (Youkounkoun). *Rapport multigr., Conakry, 165 p.*

- TRAORE A.Z. (1985) - Géologie et hydrogéologie des plateaux mandingues (Mali), région de Koula-Nossombougou. *Thèse 3^{ème} cycle, Géologie, univ. Grenoble, 218 p.*
- TRAVI Y., GAC J.Y., SYLLA M. (1986) - Qualité chimique des eaux souterraines du Mali. *Bull. Liaison Com. Interafr. Etudes Hydraul., HVO, 66, p.13-26.*
- TRAVI Y., GAC J.Y., FONTES J.C., FRITZ B. (1987) - Reconnaissance chimique et isotopique des eaux de pluie au Sénégal. *Géodynamique, ORSTOM, Paris, 2, p.1-11.*
- TRICART J., 1956 - Dégradation du milieu naturel et problèmes d'aménagement au Fouta Djallon. *Rev. Géogr. alpine, Fr., 1, p.7-36.*
- TROMPETTE R. (1973) - Le Précambrien supérieur et le Paléozoïque inférieur de l'Adrar de Mauritanie (bordure occidentale du bassin de Taoudéni-Afrique de l'Ouest) : un exemple de sédimentation de craton, étude stratigraphique et sédimentologique. *Trav. Lab. Sci. Terre, Marseille, B7, 702 p.*
- TSOAR H., PYE K. (1987) - Dust transport and the question of desert loess formation. *Sedimentology, 34, p.139-153.*
- UEMATSU M., DUCE R.A., PROSPERO J.M., CHEN L., MERRILL J.T., McDONALD R.L. (1983) - Transport of mineral aerosol from Asia over the north Pacific ocean. *J. Geophys. Res., 88, p.5343-5352.*
- VAN ES F.W.J., BARRETO P.S. (1962) - Etude pédologique des hauts plateaux du Fouta-Djallon. *Mission CCTA/FAMA, Rapport Ministère Economie Rurale de Guinée, Conakry ; ORSTOM, Dakar, 89 p. multigr.*
- 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. Marseille, 552 p.*
- VILLENEUVE M. (1988) - Evolution géologique comparée du bassin de Taoudéni et de la chaîne des Mauritanides en Afrique de l'Ouest. *C.R. Acad. Sci., Paris, 307, série II, p.663-668.*
- 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 Proterozoic period. *Precambrian Research, 44, p.305-322.*
- VILLENEUVE M., DALLMEYER R.D. (1987) - Geodynamic evolution of the Mauritanide, Bassaride and Rokelide orogens (West Africa). *Precambrian Research, 37, p.19-28.*
- VOGT J. (1959) - Aspect de l'évolution morphologique récente de l'Ouest Africain. *Ann. Géogr., Fr., 367, p.193-206.*
- WACKERMANN J.M. (1975) - L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale semi-humide, étude minéralogique et géochimique des arènes du Sénégal oriental, conséquences pour la cartographie et la prospection. *Thèse Sciences, Géologie, univ. Strasbourg, 373 p.*
- WALLING D.E. (1977) - Limitations of the rating curve technique for estimating suspended sediment loads. *Proc. Paris Symp., LAHS publ., 122, p.34-48.*
- WALLING D.E., WEBB B.W. (1981) - The reliability of suspended sediment load data. *Proc. Florence Symp., LAHS publ., 133, p.177-194.*
- WHITE W.R. (1982) - Studies and reports in hydrology, sedimentation problems in river basin. *UNESCO publ., 35, 152 p.*
- WINDOM H.L. (1969) - Atmospheric dust records in permanent snowfields : implications to marine sedimentation. *Geol. Soc. Amer. Bull., 80, p.761-782.*
- WOLLAST R., MACKENZIE F.T. (1983) - The global cycle of silica. In : *Silicon geochemistry and biogeochemistry, S.R. ASTON Ed., Academic Press, London, p.39-76.*
- YAALON D.H., GANOR E. (1979) - East mediterranean trajectories of dust-carrying storms from the Sahara and Sināi. In : *Saharan dust : mobilization, transport, deposition, SCOPE Rep. n°14, Ed. MORALES, p.187-193.*
- YURTSEVER Y., GAT J.R. (1981) - Deuterium and oxygen 18 in precipitation. In : *Deuterium and oxygen 18 in the water cycle, Technical Reports Series, AIEA, Vienne, n°210.*
- 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.*

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Caractéristiques morphométriques du bassin versant amont du Sénégal à Bakel (d'après ROCHETTE, 1974).....	16
Tableau 2 :	Caractéristiques principales du réseau hydrographique du fleuve Sénégal en amont de Bakel (ROCHETTE, 1974).....	16
Tableau 3 :	Caractéristiques morphométriques du bassin versant amont de la Gambie (d'après DESCROIX, 1986).....	18
Tableau 4 :	Caractéristiques principales du réseau hydrographique du fleuve Niger en amont de Siguiri.....	19
Tableau 5 :	Caractéristiques principales du réseau hydrographique du fleuve Tominé en amont de Gaoual.....	21
Tableau 6 :	Caractéristiques principales du réseau hydrographique du fleuve Konkouré en amont de Konkouré.....	22
Tableau 7 :	Unités lithologiques de la zone d'étude.....	34
Tableau 8 :	Répartition des classes lithologiques par bassin.....	34
Tableau 9 :	Composition chimique des classes lithologiques (en % d'oxydes).....	37
Tableau 10 :	Composition chimique de la roche moyenne par bassin versant (en % d'oxydes).....	37
Tableau 11 :	Corrélations entre les pluies mensuelles, utilisées pour l'extension des données pluviométriques sur la période 1979-86.....	47
Tableau 12 :	Moyennes pluviométriques interannuelles (en mm/an).....	48
Tableau 13 :	Caractéristiques des stations pluviométriques choisies.....	51
Tableau 14 :	Pluviosité annuelle (P en mm) et écart à la moyenne (δP en %) à Bakel, Kédougou, Labé, Dabola, Siguiri, Kankan.....	52
Tableau 15 :	Péjorations pluviométriques (en %) de la période 1979-86 (P_3) par rapport aux périodes 1951-80 (P_1) et 1970-86 (P_2).....	56
Tableau 16 :	Moyennes pluviométriques mensuelles des stations références pour la période 1979-86.....	58
Tableau 17 :	Lame d'eau moyenne précipitée par bassin versant.....	61
Tableau 18 :	Répartition des pluies sur le Fouta Djallon par bassin versant.....	61
Tableau 19 :	Températures moyennes interannuelles (en °C) de diverses stations des bassins versants amont du Sénégal, du Niger, de la Gambie, du Konkouré et de la Tominé.....	63
Tableau 20 :	Caractéristiques de la température (en °C) sur les bassins supérieurs du Sénégal, de la Gambie et du Niger.....	63
Tableau 21 :	Evaporation Piche (Ep) et évapotranspiration potentielle (ETP) en mm.....	65
Tableau 22 :	Bilan hydrique par domaine climatique.....	66
Tableau 23 :	Débits moyens mensuels interannuels à Bakel (en m ³ /s).....	68
Tableau 24 :	Débits moyens mensuels et annuels à Bakel de 1903 à 1988 (en m ³ /s).....	69
Tableau 25 :	Modules spécifiques en différents sites du bassin amont du Sénégal sur la période 1903-64 (ROCHETTE, 1974).....	72
Tableau 26 :	Débits moyens annuels de 1979 à 1987 en différentes stations du bassin versant supérieur du Sénégal (en m ³ /s).....	73
Tableau 27 :	Débits moyens mensuels (en m ³ /s) mesurés à Tiguibéry (près de Siguiri) sur la période 1953-78 (BRUNET-MORET & al., 1986) et en 1987 (Direction hydrologique malienne).....	74

Tableau 28	: Débits moyens mensuels corrigés des principales stations du bassin versant supérieur du Niger sur la période 1950-80 (en m ³ /s).....	75
Tableau 29	: Débits moyens mensuels corrigés des principales stations du bassin versant supérieur du Niger en 1987 (en m ³ /s).....	75
Tableau 30	: Débits moyens annuels de la Gambie à Kédougou (en m ³ /s).....	76
Tableau 31	: Modules spécifiques en différents sites du bassin versant supérieur de la Gambie.....	78
Tableau 32	: Débits moyens mensuels aux exutoires du Fouta Djallon estimés sur la période 1979-87 (en m ³ /s).....	79
Tableau 33	: Bilans hydrologiques du Fouta Djallon sur la période 1979-87.....	80
Tableau 34	: Bilans hydrologiques du Sénégal et du Niger sur la période 1979-87.....	80
Tableau 35	: Calendrier des prélèvements d'eau effectués sur les stations permanentes pour l'étude des éléments en solution.....	85
Tableau 36	: Répartition des prélèvements sur les différentes stations permanentes pour l'étude des éléments en solution.....	85
Tableau 37	: Répartition des prélèvements d'eau ponctuels par année, par type de cours d'eau et par zone géographique.....	86
Tableau 38	: Liste des prélèvements ponctuels des eaux de surface du bassin de la Gambie.....	87
Tableau 39	: Liste des prélèvements ponctuels des eaux de surface du bassin du Sénégal.....	88
Tableau 40	: Liste des prélèvements ponctuels des eaux de surface des bassins côtiers guinéens et du bassin amont du Niger.....	89
Tableau 41	: Calendrier des prélèvements d'eau effectués sur les stations permanentes pour l'étude des matières en suspension.....	90
Tableau 42	: Méthodes d'analyses des eaux échantillonnées.....	92
Tableau 43	: Répartition des échantillons par tranche d'erreur sur la balance ionique.....	94
Tableau 44	: Méthodes de calcul des flux de matières.....	95
Tableau 45	: Composition chimique mensuelle des pluies (en µeq/l) à Bakel en 1983 et à Kédougou en 1987.....	98
Tableau 46	: Rapports mensuelles X ₁ /Cl des éléments chimiques majeurs X ₁ (exprimés en équivalent) des eaux de pluie collectées à Bakel et Kédougou.....	100
Tableau 47	: Composition chimique moyenne des pluies (en mg/l) en différentes stations continentales d'Afrique de l'Ouest.....	101
Tableau 48	: Dépôts moyens mensuels et annuels (en g/m ² /jour) de poussières atmosphériques à Dakar, Mbour, Ngnith, Kédougou et Pété.....	107
Tableau 49	: Géochimie des poussières atmosphériques collectées en Afrique occidentale (en % d'oxydes).....	111
Tableau 50	: Composition chimique moyenne des apports atmosphériques en domaines sahélien (sah), soudanien (soud) et guinéen (guin).....	112
Tableau 51	: Moyenne arithmétique des analyses chimiques effectuées sur les eaux du Sénégal à Bakel, de la Falémé à Kidira, de la Gambie à Kédougou, du Tinkisso à Dabola, du Milo à Kankan et du Niger à Siguiri.....	118
Tableau 52	: Granulométrie (en % de l'échantillon sec) des matières en suspension du Sénégal à Bakel durant les crues 81/82, 82/83, 83/84 et 85/86.....	122

Tableau 53 :	Granulométrie moyenne des matières en suspension du Sénégal à Bakel et comparaison avec d'autres fleuves ouest africains (en % de l'échantillon sec)	123
Tableau 54 :	Comparaison des compositions chimiques des MES de quelques cours d'eau africains et de la moyenne mondiale (oxydes en % et traces en ppm)	124
Tableau 55 :	Composition chimique des MES du fleuve Sénégal à Bakel (de 1980 à 1987) (oxydes en % et traces en ppm)	125
Tableau 56 :	Composition chimique en Terres Rares des MES du Sénégal à Bakel, de la Falémé à Kidira et du Milo à Kankan (de 1983 à 1987)	127
Tableau 57 :	Analyse minéralogique par diffractométrie RX des MES du fleuve Sénégal à Bakel (de 1980 à 1987), de la Falémé et du Milo	129
Tableau 58 :	Reconstitution minéralogique des MES du fleuve Sénégal à Bakel (de 1980 à 1987), de la Falémé, du Milo et de la Gambie à Kédougou	130
Tableau 59 :	Relations débit-concentration des variables de qualité des eaux du Sénégal à Bakel	133
Tableau 60 :	Flux dissous et particuliers (en 10 ³ t/an) du Sénégal à Bakel de 1979 à 1987	139
Tableau 61 :	Concentrations moyennes interannuelles des eaux du Sénégal à Bakel (en mg/l)	140
Tableau 62 :	Tonnages moyens annuels exportés par les eaux fluviales	142
Tableau 63 :	Concentrations moyennes annuelles des eaux fluviales (en mg/l)	142
Tableau 64 :	Erosion mécanique spécifique (E_m), altération chimique spécifique (E_c) (en t/km ² /an) du Sénégal à Bakel	145
Tableau 65 :	Flux annuels spécifiques de matières exportés, altération chimique spécifique (E_c) et érosion mécanique spécifique (E_m) (en t/km ² /an)	145
Tableau 66 :	Coefficient annuel de ruissellement superficiel (K_r) et charge en suspension annuelle du ruissellement superficiel (C_r)	151
Tableau 67 :	Estimation des variations saisonnières de la contribution minimale des eaux de nappe à l'écoulement total à partir de la charge dissoute des eaux de surface ($C_s=15$ mg/l) et des eaux de nappe ($C_n=60$ mg/l) (en année moyenne)	152
Tableau 68 :	Composition chimique moyenne des eaux de sources, de ruisseaux, de rivières et de fleuves du Fouta Djallon	156
Tableau 69 :	Composition chimique moyenne des eaux des bassins versants constitutifs du Fouta Djallon avant la saison des pluies (B) et après la saison des pluies (A)	157
Tableau 70 :	Composition chimique moyenne des eaux sortant du Fouta Djallon	158
Tableau 71 :	Flux dissous (T_D) et particuliers (T_B) dans les bassins versants qui drainent le Fouta Djallon et flux spécifiques correspondants (F_{TDs} et F_{MBs})	162
Tableau 72 :	Bilan massique des apports atmosphériques dissous et des flux dissous exportés hors du Fouta Djallon (en 10 ³ t/an)	165
Tableau 73 :	Contributions respectives des différentes formations lithologiques à l'écoulement de surface du Fouta Djallon	167
Tableau 74 :	Compositions chimiques moyennes (mg/l) des eaux d'altération drainant les principaux types de roches du Fouta Djallon (après corrections des apports atmosphériques)	168

Tableau 75 :	Comparaison des deux méthodes de calcul des flux dissous provenant de l'altération.....	168
Tableau 76 :	Altération des principaux types de roches du Fouta Djallon exprimée en % de l'altération totale.....	168
Tableau 77 :	Importance relative de l'ablation et de l'approfondissement des sols par classe lithologique sur l'ensemble du Fouta Djallon.....	169
Tableau 78 :	Moyennes annuelles des paramètres hydroclimatiques (Q, P, TE, TA) du bassin du Sénégal à Bakel (moyenne sur l'année civile).....	174
Tableau 79 :	Coefficients de corrélation de Pearson sur les moyennes annuelles des facteurs hydroclimatiques.....	176
Tableau 80 :	Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs journalières des facteurs hydroclimatiques.....	177
Tableau 81 :	Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs journalières des facteurs hydroclimatiques par année.....	178
Tableau 82 :	Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs journalières des facteurs hydroclimatiques par mode climatique.....	178
Tableau 83 :	Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs journalières des facteurs hydroclimatiques par saison hydrologique.....	179
Tableau 84 :	Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs mensuelles des facteurs hydroclimatiques.....	179
Tableau 85 :	Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs mensuelles des facteurs hydroclimatiques par mode climatique.....	180
Tableau 86 :	Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs saisonnières des facteurs hydroclimatiques.....	180
Tableau 87 :	Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs saisonnières des facteurs hydroclimatiques par mode climatique.....	181
Tableau 88 :	Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs saisonnières des facteurs hydroclimatiques de saison humide avec ceux de saison sèche.....	181
Tableau 89 :	Coefficients de corrélation de Pearson (r) sur les valeurs journalières (n observations) des facteurs hydroclimatiques (Q et T _A) selon les trois périodes hydroclimatiques de l'année (p-seuil de signification en %)	182
Tableau 90 :	Coefficients de corrélation de Pearson entre les valeurs journalières des concentrations en bicarbonates et les paramètres hydroclimatiques.....	184
Tableau 91 :	Coefficients de corrélation de Pearson entre les valeurs journalières des concentrations en bicarbonates et les paramètres hydroclimatiques selon les modes climatiques et seuils de signification (p en %)	184
Tableau 92 :	Moyennes annuelles des flux de bicarbonates, de leur concentration dans les eaux du fleuve Sénégal à Bakel et des flux de CO ₂ consommés par altération.....	186

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 :	Carte de situation de la zone étudiée et des stations permanentes de prélèvements d'eau.	3
Fig. 2 :	Situation géographique du Fouta Djallon en Afrique occidentale	7
Fig. 3 :	Carte hypsométrique du Fouta Djallon.	8
Fig. 4 :	Limites hydrographiques du Fouta Djallon.	9
Fig. 5 :	Carte de situation générale de la dorsale guinéenne.	10
Fig. 6 :	Paysages végétaux du Fouta Djallon (MICHEL, 1973).	12
Fig. 7 :	Zone étudiée et trajets parcourus.	13
Fig. 8 :	Le bassin versant amont du Sénégal (hypsométrie, cadre structural et réseau hydrographique principal).	15
Fig. 9 :	Le bassin versant amont de la Gambie (hypsométrie et réseau hydrographique principal).	18
Fig. 10 :	Le bassin versant amont du Niger (hypsométrie et réseau hydrographique principal).	20
Fig. 11 :	Carte géologique schématique de l'Ouest africain (ROSSI & al., 1984)	26
Fig. 12 :	Esquisse géologique du Fouta Djallon et des bassins versants supérieurs du Sénégal et du Niger.	28
Fig. 13 :	Esquisse lithologique du Fouta Djallon et des bassins versants supérieurs du Sénégal et du Niger.	35
Fig. 14 :	Croquis de situation des ensembles lithologiques du Fouta Djallon.	36
Fig. 15 :	Esquisse pédologique du Fouta Djallon, des bassins versants supérieurs du Sénégal et du Niger.	40
Fig. 16 :	Les déplacements du Front InterTropical pendant l'année.	45
Fig. 17 :	Isohyètes interannuelles du Fouta Djallon et des bassins supérieurs du Sénégal et du Niger pour la période 1951-80.	50
Fig. 18 :	Evolution interannuelle de la pluviométrie de 1951 à 1986.	53
Fig. 19 :	Caractéristiques de la pluviosité de quelques stations des bassins supérieurs du Sénégal, de la Gambie et du Niger depuis l'origine des observations.	54
Fig. 20 :	Isohyètes interannuelles du Fouta Djallon et des bassins supérieurs du Sénégal et du Niger pour la période 1979-86.	55
Fig. 21 :	Evolution mensuelle de la pluviosité de quelques stations des bassins supérieurs du Sénégal, de la Gambie et du Niger pour la période 1951-80 et la période 1979-86.	57
Fig. 22 :	Evolution mensuelle de la pluviosité au cours d'années excédentaires (----) et déficitaires (- - -) à Labé et Kédougou.	58
Fig. 23 :	Variabilité mensuelle spatiale de la pluviosité.	59
Fig. 24 :	Variation de l'insolation mensuelle sur les bassins supérieurs du Sénégal, de la Gambie et du Niger.	62
Fig. 25 :	Evolution mensuelle de la température.	64
Fig. 26 :	Hydrogrammes de crue types du fleuve Sénégal à Bakel.	68
Fig. 27 :	Hydrogrammes de crue de 1979 à 1987 du fleuve Sénégal à Bakel.	70
Fig. 28 :	Répartition des écoulements dans le bassin versant supérieur du Sénégal et modules annuels de 1979 à 1987.	72
Fig. 29 :	Hydrogramme de crue du Niger à Tiguibéry (Siguiri) en 1987.	74

Fig. 30 :	Hydrogrammes des crues 1986/87 et 1987/88 de la Gambie à Kédougou.	77
Fig. 31 :	Répartition des écoulements de surface dans le Fouta Djalon.	80
Fig. 32 :	Schématisation des interactions entre les réservoirs naturels intervenant dans le cycle des éléments chimiques à la surface des continents.	82
Fig. 33 :	Localisation des stations d'étude des apports atmosphériques.	84
Fig. 34 :	Schéma de localisation des prélèvements d'eau de surface dans le Fouta Djalon.	86
Fig. 35 :	Faciès géochimique des pluies en domaine continental sahélo-soudano-guinéen d'Afrique occidentale.	102
Fig. 36 :	Schéma de circulation des poussières atmosphériques en Afrique occidentale.	103
Fig. 37 :	Localisation des zones sources principales de poussières sahariennes.	103
Fig. 38 :	Schéma du capteur pyramidal.	104
Fig. 39 :	Evolutions journalières comparées du dépôt de poussières atmosphériques mesuré par le capteur pyramidal (en mg/m ²) et de la concentration en poussières par un dispositif aspirant classique (en µg/m ³) à Mbour en 1986.	105
Fig. 40 :	Evolutions journalières comparées des dépôts de poussières atmosphériques à Dakar et à Mbour enregistrés par le capteur pyramidal en saison des pluies et saison sèche.	106
Fig. 41 :	Comparaison des dépôts de poussières atmosphériques entre Ngnith et Dakar en 1988 (en mg/m ²).	109
Fig. 42 :	Distributions granulométriques de trois événements de poussières de 1984.	110
Fig. 43 :	Qualité chimique des apports atmosphériques dissous et particulaires en domaine continental sahélo-soudano-guinéen d'Afrique occidentale.	113
Fig. 44 :	Bilan chimique des apports atmosphériques dissous et particulaires sur le bassin versant amont du Sénégal (domaine sahélien) et sur le Fouta Djalon (domaine soudano-guinéen).	114
Fig. 45 :	Analyse en composantes principales des eaux du Sénégal à Bakel de 1979 à 1988 (n=229).	119
Fig. 46 :	Diagramme de Piper sur les eaux du Sénégal (S), de la Falémé (F), de la Gambie (G), du Tinkisso (T), du Milo (M) et du Niger (N).	121
Fig. 47 :	Evolution du COP en fonction des MES dans les bassins versants du Sénégal, du Niger et de la Gambie.	128
Fig. 48 :	Comparaison de l'évolution du COP en fonction des MES dans les bassins versants du Sénégal, du Niger et de la Gambie avec la moyenne mondiale.	128
Fig. 49 :	Reconstitution de la minéralogie des MES du Sénégal à Bakel, de la Falémé à Kidira, de la Gambie à Kédougou et du Milo à Kankan.	131
Fig. 50 :	Reconstitution de la minéralogie des alluvions du Sénégal à Bakel et de ses MES au cours de la crue.	131
Fig. 51 :	Variation annuelle des concentrations journalières des espèces dissoutes du fleuve Sénégal à Bakel au cours de l'année 1981.	132
Fig. 52 :	Relations débit-concentration des différentes espèces chimiques dissoutes des eaux du fleuve Sénégal à Bakel.	134
Fig. 53 :	Estimation des teneurs en potassium des eaux du fleuve Sénégal à Bakel en fonction du débit journalier.	135

Fig. 54 :	Evolution journalière des MES du fleuve Sénégal à Bakel de 1979 à 1988.	137
Fig. 55 :	Estimation des MES du fleuve Sénégal à Bakel à partir du potassium et de la silice dissoute.	138
Fig. 56 :	Evolution des flux annuels de matières solides et dissoutes du fleuve Sénégal à Bakel de 1979 à 1987.	140
Fig. 57 :	Estimation des flux annuels de matières dissoutes exportées en fonction du débit annuel du fleuve Sénégal à Bakel.	140
Fig. 58 :	Variations mensuelles des tonnages dissous exportés et de la charge totale dissoute du Sénégal à Bakel, de la Falémé à Kidira, de la Gambie à Kédougou, du Tinkisso à Tinkisso, du Milo à Kankan et du Niger à Siguiri lors d'une année moyenne.	141
Fig. 59 :	Evolution de la concentration des éléments en solution en fonction de la minéralisation totale des six bassins versants étudiés.	143
Fig. 60 :	Evolution de la charge en suspension et des débits de la Gambie à Kédougou en 1974, 1986 et 1987.	144
Fig. 61 :	Variations journalières des concentrations en MES en fonction des débits du Sénégal au bief de Bakel.	146
Fig. 62 :	Evolution des tonnages en suspension cumulés en fonction des volumes d'eau écoulée cumulés.	147
Fig. 63 :	Périodogramme des fluctuations interannuelles des débits moyens mensuels du fleuve Sénégal.	149
Fig. 64 :	Découpage par analyse spectrale de Fourier des hydrogrammes de crue du fleuve Sénégal de 1979 à 1986 et coefficient annuel de ruissellement superficiel (K_r).....	150
Fig. 65 :	Contribution saisonnière des différents écoulements à l'exutoire du bassin amont du Sénégal en année moyenne (V_n écoulement de nappe, V_s écoulement de surface, C_n charge dissoute des eaux de nappe, C_s charge dissoute des eaux de surface).	152
Fig. 66 :	Position moyenne des eaux du Fouta Djallon dans les diagrammes de stabilité des minéraux silicatés.	159
Fig. 67 :	Répartition des exportations de matières dissoutes et particulaires hors du Fouta Djallon.	163
Fig. 68 :	Importance relative des exportations de matières dissoutes et particulaires hors du Fouta Djallon.	163
Fig. 69 :	Importance relative des apports atmosphériques particuliers sur le Fouta Djallon et des flux de matières en suspension exportés par les fleuves et rivières.	164
Fig. 70 :	Bilan actuel de l'altération chimique et de l'érosion mécanique sur l'ensemble du Fouta Djallon (tous les millions d'années).	166
Fig. 71 :	Relation entre la lame d'eau écoulée (Q en mm) et la lame d'eau précipitée (P en mm) sur l'ensemble du Fouta Djallon.	167
Fig. 72 :	Apports des différentes formations lithologiques à l'écoulement de surface du Fouta Djallon.	167
Fig. 73 :	Origine de la charge dissoute totale due à l'altération chimique dans les eaux drainant le Fouta Djallon.	168
Fig. 74 :	Bilan géochimique du Fouta Djallon.	169
Fig. 76 :	Ecart annuel à la moyenne (δ en %) du débit et de la température de l'air.	173
Fig. 75 :	Evolution de trois paramètres hydroclimatiques (P, Q, T_a) du bassin versant du Sénégal de 1979 à 1986.	174
Fig. 77 :	Evolution interannuelle des paramètres hydroclimatiques du bassin versant du Sénégal de 1979 à 1986.	176

- Fig. 78 : Répartition des années étudiées selon les quatre modes climatiques au sens de TARDY. 177
- Fig. 79 : Evolution interannuelle de la température de l'air (T_A) de la saison sèche et de la saison humide. 181
- Fig. 80 : Schéma de découpage de l'année hydroclimatique en trois périodes. 183
- Fig. 81 : Evolution des concentrations en bicarbonates des eaux du fleuve Sénégal à Bakel en fonction du débit et par classe de température, lors des années H-F. 184
- Fig. 82 : Respiration géochimique du bassin versant du Sénégal de 1979 à 1986 (flux de bicarbonates exportés en 10^3 t/an). 185

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS	i
SOMMAIRE	iii
ABSTRACT	v
INTRODUCTION	1

CHAPITRE I

LE MILIEU NATUREL

I - LE FOUTA DJALON	7
A - Situation géographique	7
B - Le relief	9
C - Géomorphologie : les grands aspects du relief	10
D - Une végétation tropicale dégradée	11
1. La forêt et la savane guinéenne.....	11
2. La savane soudanaise.....	12
II - LES PAYSAGES DE L'ETUDE HYDROCLIMATIQUE ET DYNAMIQUE	13
A - Les paysages guinéens	14
1. Le Fouta Djalon.....	14
2. Le bassin de Siguiri.....	14
B - Le plateau mandingue et le domaine sahélien	14
C - Présentation des bassins versants	15
1. Le bassin versant supérieur du fleuve Sénégal.....	15
a) D'un relief montagneux à un relief pénéplané.....	15
b) Un réseau hydrographique dense et des profils en long très accidentés.....	16
2. Le bassin versant supérieur du fleuve Gambie.....	17
a) Une petite surface de forme triangulaire et un haut relief.	17
b) Un réseau hydrographique dense	18
3. Le bassin versant supérieur du fleuve Niger.....	19
4. Les bassins versants côtiers guinéens (Tominé et Konkouré).....	21
III - LE FOUTA DJALON : EVOLUTION ACTUELLE DU BIOTOPE	22
A - Une population essentiellement rurale	22
B - L'utilisation du Biotope	23
C - Discussion : la dégradation du milieu	23
IV - CONCLUSION	23

CHAPITRE II

CADRE GEOLOGIQUE ET PEDOLOGIQUE DU DOMAINE LATERITIQUE

I - CADRE GEOLOGIQUE	25
A - Le craton ouest-africain	25

B - Histoire géologique de la région	25
C - Les grands ensembles géologiques	27
1. Les formations birrimiennes du socle.....	29
2. La couverture sédimentaire du Protérozoïque supérieur du bassin de Madina Kouta	29
3. La chaîne panafricaine des Bassarides.....	30
4. Les sillons molassiques panafricains du Protérozoïque terminal et Cambrien inférieur	30
5. Les formations sédimentaires du Cambrien supérieur au Dévonien..	31
6. Les venues doléritiques permo-triasiques.....	31
7. Le bassin méso-cénozoïque sénégal-mauritanien (Eocène et Continental terminal)	32
8. Les formations latéritiques et superficielles.....	32
II - COMPOSITION CHIMIQUE DU SUBSTRATUM ROCHEUX	32
A - Lithologie et degré d'altérabilité	33
1. Degré d'altérabilité des roches.....	33
2. Classification lithologique.....	33
3. Répartition géographique des classes lithologiques.....	34
B - Composition chimique moyenne des roches	36
1. Composition chimique des classes lithologiques.....	36
2. Composition chimique moyenne du substratum rocheux.....	37
III - HYDROGEOLOGIE	38
A - Hydrogéologie des roches éruptives et métamorphiques	38
B - La perméabilité des terrains	39
C - Les aquifères et leur qualité chimique	39
IV - LA NATURE DES SOLS ET LE DOMAINE DES LATERITES	40
A - Le cadre pédologique principal	41
1. Les sols ferralitiques.....	41
2. Les sols ferrugineux tropicaux.....	41
3. Les sols sub-arides.....	41
B - La lithologie, la topographie et la pédogénèse	41
1. Les sols du complexe d'altération smectitique sur roches basiques	41
2. Les sols hydromorphes dans les zones planes et les sols squelettiques sur cuirasse	41
C - Les horizons cuirassés : les latérites	42
V - CONCLUSION	42

CHAPITRE III

DONNEES CLIMATIQUES ET PARTICULARITE DES ANNEES 1979-1987

I - LE MOUVEMENT DES MASSES D'AIR EN AFRIQUE OCCIDENTALE	45
II - L'INFORMATION DISPONIBLE ET LES RESEAUX METEOROLOGIQUES	46
III - LA PLUVIOSITE ET SA VARIABILITE	47
A - Critique des données utilisées, le tracé des isohyètes	47
1. Critique des données et leur extension.....	47
2. Le tracé des cartes d'isohyètes.....	48
B - La dynamique des précipitations (période 1951-1980)	49
C - Une grande diversité de climats	49

D - La pluviosité annuelle	51
1. La pluviosité annuelle et son irrégularité temporelle.....	51
2. La pluviosité annuelle et son irrégularité spatiale.....	52
3. Les séquences humides et sèches.....	53
E - La période 1979-1986	54
1. La carte des isohyètes.....	54
2. La période 1979-86 dans la sécheresse des années "70".....	54
F - Les régimes pluviométriques saisonniers et leur variabilité	56
1. Une répartition saisonnière constante.....	56
2. La variabilité saisonnière interannuelle.....	58
3. La variabilité saisonnière spatiale.....	58
G - Les précipitations journalières	59
1. L'agressivité des pluies.....	59
2. La forme des averses.....	60
3. Le nombre de jours de précipitations dans l'année.....	60
H - La lame d'eau moyenne précipitée	60
 IV - LES CONDITIONS THERMIQUES ET D'EVAPOTRANSPIRATION	 61
A - Les vents et l'insolation moyenne	62
B - La température de l'air	62
C - L'évapotranspiration potentielle	64
1. L'humidité relative.....	64
2. L'évapotranspiration potentielle.....	65
 V - PREMIERES CONCLUSIONS : LES BILANS HYDRIQUES	 65
A - Une région à fort déficit hydrique	65
B - L'information climatique par bassin versant	66
1. Le bassin amont du Sénégal : une grande diversité climatique....	66
2. Le bassin versant amont de la Gambie.....	66
3. Le bassin versant amont du Niger.....	66
4. Le cas particulier du Fouta Djallon.....	66

CHAPITRE IV

SECHERESSE ACTUELLE ET BILANS HYDROLOGIQUES

I - LE SENEGAL : UN REGIME TROPICAL PUR	67
A - Les régimes du fleuve Sénégal	67
B - L'abondance fluviale à Bakel	68
1. Bilan moyen annuel des écoulements et variabilités interannuelle, mensuelle, journalière	68
2. Le caractère exceptionnel de la sécheresse actuelle.....	69
3. Les cycles hydrologiques de 1979 à 1987.....	71
C - Quelques informations sur les principaux tributaires	71
 II - LE NIGER : UN REGIME TROPICAL DE TRANSITION	 73
A - Le régime du fleuve Niger	73
B - L'abondance fluviale à Siguiri	73
1. Le bilan moyen annuel.....	73
2. Le cycle hydrologique de 1987.....	74
3. Et la sécheresse ?.....	74
C - Les principaux tributaires	75
 III - LES BASSINS CONSTITUTIFS DU FOUTA DJALON	 76
A - Un réseau hydrométrique embryonnaire	76
B - La Gambie à Kédougou	76

1. L'abondance annuelle et sa variabilité.....	76
2. Un régime de type tropical de transition.....	76
3. Particularités des deux cycles étudiés (86/87 et 87/88).....	77
a) Allure générale de la crue 1986/87 à Kédougou.....	77
b) Allure générale de la crue 1987/88 à Kédougou.....	77
4. Les modalités de l'écoulement à l'intérieur du bassin.....	78
C - La Falémé à Satadougou	78
D - Le Bafing à Dakka-Saïdou	78
E - Le Tinkisso à Tinkisso	79
F - Le Konkouré à Konkouré	79
G - La Tominé à Gaoual	79
IV - CONCLUSIONS : LES BILANS HYDROLOGIQUES	79

CHAPITRE V

PRESENTATION DES MESURES ET METHODES D'ETUDE

I - ACQUISITION DES DONNEES	83
A - Etude des apports atmosphériques	83
1. Les eaux de pluie.....	83
2. Les poussières atmosphériques.....	83
B - Etude des éléments dissous des eaux de surface	84
1. Les stations permanentes.....	84
2. Les stations itinérantes.....	85
3. La méthode de prélèvements.....	90
C - Etude des matières en suspension	90
II - METHODES D'ANALYSES	91
A - Les éléments en solution	91
B - Les matières en suspension	91
1. Les analyses chimiques.....	91
2. Les analyses minéralogiques.....	92
3. Dosage du carbone organique.....	93
4. Dosage de la matière amorphe.....	93
5. Les analyses granulométriques.....	93
III - RESULTATS D'ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX ET CRITIQUES	93
A - Problème de validité des analyses chimiques des eaux	93
B - Critiques des résultats bruts par bassin versant	94
1. Le Sénégal à Bakel.....	94
2. La Falémé à Kidira.....	94
3. La Gambie à Kédougou.....	94
4. Les eaux du bassin du Niger.....	95
5. Les prélèvements itinérants.....	95
IV - CALCUL DES FLUX DE MATIERES	95

CHAPITRE VI

L'IMPORTANCE DES APPORTS ATMOSPHERIQUES, PLUIES ET AEROSOLS DESERTIQUES

I - LES EAUX DE PLUIE OU LES DEPOTS HUMIDES	97
---	----

A - Présentation et critiques des résultats analytiques	97
B - Description du faciès chimique des pluies collectées	98
C - Evolution comparée des différentes espèces chimiques	99
D - Discussion	99
E - Comparaison aux données bibliographiques	101
II - LES POUSSIÈRES ATMOSPHERIQUES OU LES DEPOTS SECS	102
A - Brève description du phénomène	102
B - Méthode d'étude	104
1. Diversité des techniques d'échantillonnages.....	104
2. Description de l'appareil de mesure utilisé : le capteur pyramidal	104
3. Comparaison des résultats obtenus avec une méthode classique... ..	105
a) Présentation des mesures utilisées	105
b) Comparaison des variations journalières enregistrées par les deux types d'appareils.....	105
c) Comparaison des quantités de poussières déposées au sol	105
4. Homogénéité régionale des mesures effectuées par le capteur pyramidal	106
5. Conclusion.....	106
C - Bilan quantitatif	107
1. Présentation des mesures.....	107
2. Problème de la remobilisation.....	108
3. Estimation des flux de poussières déposées.....	108
a) Aperçu bibliographique : importance du phénomène	108
b) Recherche d'un gradient Nord-Sud	109
c) Calcul du flux de poussières déposées au sol	109
D - Bilan qualitatif	110
V - BILAN DES APPORTS ATMOSPHERIQUES	111
A - Influence des poussières atmosphériques sur la chimie des pluies ..	111
B - Qualité chimique des apports atmosphériques en Afrique de l'Ouest .	112
C - Bilan chimique quantitatif des apports atmosphériques	113
VI - CONCLUSIONS	114

CHAPITRE VII

TRANSPORTS DE MATIERES DISSOUTES ET PARTICULAIRES SUR LES BASSINS AMONT DU SENEGAL, DE LA GAMBIE ET DU NIGER

I - DESCRIPTION DE LA QUALITE CHIMIQUE DES FLUX DE MATIERES TRANSPORTEES PAR LES EAUX DE SURFACE EN DOMAINE SAHELO-SOUDANO-GUINEEN	117
A - Relations entre les différentes variables de qualité des eaux	117
1. Composition chimique moyenne des eaux prélevées.....	117
a) Les eaux du Sénégal à Bakel	117
b) Les eaux de la Falémé à Kidira	118
c) Les eaux de la Gambie à Kédougou	118
d) Les eaux du Tinkisso à Dabola, du Milo à Kankan et du Niger à Siguiri.....	119
2. Analyse factorielle en composantes principales.....	119
a) Les eaux du Sénégal à Bakel	119
b) Les eaux de la Falémé à Kidira	120
c) Les eaux de la Gambie à Kédougou	121
3. Etude des corrélations inter-éléments des eaux du Niger.....	121
4. Utilisation du diagramme de Piper.....	121

B - Qualité chimique et minéralogique des matières en suspension	122
1. Caractères granulométriques.....	122
2. Composition chimique des MES.....	123
a) Composition chimique moyenne des MES.....	123
b) Les MES du Sénégal à Bakel.....	125
c) Les relations inter-éléments.....	126
d) Les Terres Rares.....	126
3. Le carbone organique particulaire (COP).....	127
4. Minéralogie des MES.....	128
a) Les matières amorphes.....	128
b) L'information fournie par les diffractogrammes RX.....	129
c) Reconstitution de la minéralogie des MES à partir de leur composition chimique.....	129
II - LES FLUX DE MATIERES DANS LES BASSINS DU SENEGAL, DE LA FALEME, DE LA GAMBIE ET DU NIGER	132
A - Description des flux de matières du Sénégal à Bakel	132
1. Evolution des concentrations au cours de la crue et origine des éléments dissous	132
a) Variations des concentrations au cours de l'année.....	133
b) Les relations débit-concentration des éléments dissous....	133
c) Le cas particulier de la silice dissoute.....	135
2. Evolution des matières en suspension.....	136
a) Variabilité journalière et rythme saisonnier des MES.....	136
b) Recherche de corrélations.....	138
3. Calcul des flux de matières transportées par le Sénégal à Bakel	139
a) Calcul des concentrations moyennes mensuelles par une méthode stochastique.....	139
b) Calcul des concentrations moyennes mensuelles par une méthode déterministe.....	139
c) Conclusion.....	139
B - Les flux de matières en domaine sahélo-soudano-guinéen	139
1. Présentation des flux de matières exportées par le Sénégal à Bakel	139
2. Tonnages exportés et qualité chimique des eaux.....	142
3. Les flux de MES de la Gambie.....	143
C - Altération chimique et érosion mécanique en domaine sahélo-soudano-guinéen	144
1. Evolution de l'érosion mécanique et de l'altération chimique sur le bassin du Sénégal de 1979 à 1987	144
2. Altération chimique et érosion mécanique par domaine climatique : importance de l'érosion mécanique sur le plateau Mandingue	145
III - ROLE DES NAPPES ET IMPORTANCE DU RUISSELLEMENT	146
A - Acquisition de la charge solide en domaine sahélo-soudanien : cas du fleuve Sénégal	146
1. Pulsations journalières des concentrations en MES.....	146
2. Relations entre volumes d'eau écoulées et tonnages solides exportés	147
B - Application du modèle de mélange au Sénégal	148
1. Découpage de l'hydrogramme annuel par analyse spectrale de Fourier	149
2. La charge en suspension annuelle du ruissellement superficiel et l'érosion des berges	150
3. Contribution saisonnière des différents écoulements en année moyenne	151

IV - CONCLUSIONS	153
------------------	-----

CHAPITRE VIII

GEOCHIMIE DES EAUX DE SURFACE DU FOUTA DJALON, EROSION MECANIQUE ET ALTERATION CHIMIQUE EN DOMAINE SOUDANO-GUINEEN

I - RECONNAISSANCE GEOCHIMIQUE DES EAUX DE SURFACE DU FOUTA DJALON	155
A - La qualité chimique des eaux	155
1. Des sources aux fleuves.....	155
2. Composition chimique des eaux par bassin versant.....	156
3. La qualité chimique des eaux sortant du Fouta Djalon.....	157
4. Caractéristiques moyennes des eaux de surface du Fouta Djalon..	158
5. L'exportation des matières en suspension.....	159
B - Caractérisation des grands types d'altération	159
1. Les diagrammes d'équilibres et les modèles thermodynamiques....	159
2. Utilisation d'un rapport géochimique.....	160
C - Premières conclusions	161
II - BILANS D'ALTERATION CHIMIQUE ET D'EROSION MECANIQUE DANS LE FOUTA DJALON	161
A - Les flux de matières sortant du Fouta Djalon	161
1. Les flux de matières en solution.....	161
2. Les flux de matières en suspension.....	162
3. Importance relative des transports dissous et particulaires....	162
B - L'érosion actuelle dans le Fouta Djalon	163
1. L'impact des poussières atmosphériques.....	164
2. Bilan des apports atmosphériques dissous et des flux dissous exportés	164
3. Erosion des sols et vitesse d'approfondissement des profils....	165
III - CONTRIBUTIONS RESPECTIVES DES DIFFERENTES FORMATIONS LITHOLOGIQUES A LA DYNAMIQUE ACTUELLE DU FOUTA DJALON	166
IV - CONCLUSIONS	170

CHAPITRE IX

INFLUENCE DES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES SUR LA DYNAMIQUE ACTUELLE DU FOUTA DJALON, ESQUISSE D'UN MODELE PREVISIONNEL

I - LES QUATRE MODES CLIMATIQUES AU SENS DE TARDY (1986)	171
II - DESCRIPTION CLIMATIQUE DES 8 ANNEES ETUDIEES	172
A - Les données utilisées	173
1. Les débits.....	173
2. Les températures de l'air et de l'eau.....	173
3. Les pluies.....	173
B - Description hydroclimatique année par année	173
1. Année 1979 : année moyenne (plutôt sèche-froide).....	174
2. Année 1980 : année humide-froide.....	174
3. Année 1981 : année humide-froide.....	175
4. Année 1982 : année sèche-froide.....	175

5. Année 1983 : année sèche-chaude.....	175
6. Année 1984 : année sèche-chaude.....	175
7. Année 1985 : année moyenne (plutôt humide-chaude).....	175
8. Année 1986 : année moyenne (plutôt humide-chaude).....	175
III - ANALYSE DES RELATIONS DEBIT-TEMPERATURE	176
A - Analyse des moyennes annuelles	176
1. Généralités.....	176
2. Relation débit-température.....	176
B - Analyses à d'autres échelles de temps	177
1. Analyse des données journalières.....	177
a) Corrélation journalière interannuelle.....	177
b) Corrélations journalières par année.....	178
c) Corrélations journalières par saison.....	179
2. Analyse des données mensuelles.....	179
3. Analyse des données saisonnières.....	180
4. Conclusion.....	182
C - Découpage de l'année hydroclimatique en trois périodes	182
IV - UN INDICATEUR GEOCHIMIQUE DE L'ALTERATION : LE FLUX DE BICARBONATES, LA CONSOMMATION DE CO₂ ATMOSPHERIQUE	183
A - Recherche des différents comportements géochimiques	183
B - Exportations de bicarbonates selon les modes climatiques	185
V - CONCLUSION : MODELE PREVISIONNEL D'EVOLUTION DU FOUTA DJALON	186
CONCLUSION GENERALE	187
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	191
LISTE DES TABLEAUX	205
LISTE DES FIGURES	209
TABLE DES MATIERES	213

RESUME

La dynamique actuelle du Fouta Djallon est étudiée à partir de la géochimie des eaux qui drainent ce vieux paysage latéritique guinéen. Pour une lame d'eau moyenne précipitée de 1380 mm/an, l'écoulement moyen annuel est de 380 mm/an, soit un déficit d'écoulement de 75%. Les bilans de transports des matières dissoutes et particulaires sont calculés sur les bassins amont du Sénégal, de la Gambie et du Niger. On étudie sur ces bassins la composition chimique des eaux et des matières en suspension, la granulométrie et la minéralogie de ces dernières, et on détermine des modèles de qualité des eaux de surface, basés sur les relations débits-concentrations. On propose une nouvelle méthode pour expliquer l'acquisition de la charge solide des eaux fluviales en utilisant les sommes cumulées des flux liquides et solides exportés. Dans cette région continentale sahélo-soudano-guinéenne, on montre que la qualité chimique des eaux de pluies est fortement influencée par les poussières atmosphériques ; on met au point un nouvel appareil (le capteur pyramidal) pour mesurer les dépôts de poussières, et une méthode d'estimation du taux de remobilisation est proposée. Après correction de ces apports atmosphériques, les bilans de l'érosion mécanique et chimique qui affecte les différents bassins versants du Fouta Djallon, sont établis par type de roche et montrent que ces paysages cuirassés sont soumis à une altération chimique relativement faible. Enfin, on détermine l'influence des fluctuations hydroclimatiques sur la dynamique actuelle de ces paysages ouest africains et, notamment, sur l'intensité de l'altération chimique et la consommation de CO₂ atmosphérique.

ABSTRACT

HYDROCLIMATOLOGY OF THE FOUTA DJALON MASSIF AND PRESENT DYNAMICS OF AN OLD LATERITIC LANDSCAPE. - The present dynamics of the Fouta Djallon massif is investigated by a geochemical study of surface waters which drain this old lateritic Guinean landscape. The mean annual precipitation is 1380 mm and the annual average runoff is 380 mm/y, i.e. a runoff deficit of 75%. The dissolved and suspended loads are calculated for the upstream part of the Senegal, Gambia and Niger basins. The chemistry of surface waters and the granulometry, chemistry and mineralogy of suspended matters are studied ; models of surface water quality based on relationships between discharges and concentrations are determined. A new method, using cumulative sums of river discharges and river suspended material fluxes, is proposed to explain sediment load acquisition by river waters. In this Sahelo-Sudano-Guinean continental region, we show that rainfall chemistry is strongly influenced by Saharan dust ; we perfect a new instrument (the pyramidal collecting system) to measure the aeolian dust deposition, and a method is proposed to estimate the remobilization rate. After correction of these atmospheric inputs, the mechanical and chemical erosion rates in the Fouta Djallon river basins are estimated for each rock type, pointing out the low chemical weathering rate which affects at present this duricrusty Guinean landscape. Finally, we determine the influence of hydroclimatic fluctuations on the present dynamics of these West-African landscapes, and particularly, on the chemical weathering intensity and its atmospheric CO₂ consumption.

MOYS CLES : Hydroclimatologie - Géochimie des eaux - Transports dissous et particulaires - Erosion - Aérosols - CO₂ - Fouta Djallon - Fleuves Sénégal, Gambie, Niger.