

T D M
TRAVAUX ET DOCUMENTS
MICROFICHÉS

N° 111

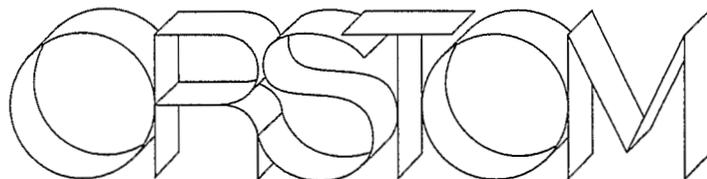
F5

**FONCTIONNEMENT HYDROCHIMIQUE
D'UN ÉCOSYSTÈME FORESTIER
DE L'AFRIQUE CENTRALE :
LA NGOKO À MOLOUNDOU
(SUD-EST DU CAMEROUN)**

Luc
SIGHA-NKAMDJOU

ORSTOM
Éditions

TDM 111



Editions de l'ORSTOM

L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Collection :

Travaux et Documents Microédités

PARIS 1994

ISBN : 2-7099-1183-3

© ORSTOM

F 5

«La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2
« et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions
« strictement réservées à l'usage privé du copiste et non des-
« tinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les
« analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et
« d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale,
« ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses
« ayants droit ou ayants cause, est illicite» (alinéa 1^{er} de l'article 40).

« Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé
« que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par
« les articles 425 et suivants du Code pénal.»

**FONCTIONNEMENT HYDROCHIMIQUE D'UN ECOSYSTEME FORESTIER
DE L'AFRIQUE CENTRALE :
La Ngoko à Moloundou (Sud-est du Cameroun)**

Luc SIGHA-NKAMDJOU

**UNIVERSITÉ DE PARIS-SUD
CENTRE D'ORSAY**

THÈSE

présentée

par **SIGHA-NKAMDJOU**

Pour obtenir

le GRADE de DOCTEUR EN SCIENCES

DE L'UNIVERSITÉ PARIS XI ORSAY

SPECIALITE : SCIENCES DE LA TERRE

OPTION : HYDROLOGIE ET GEOCHIMIE ISOTOPIQUE

CARACTÉRISATION ET FONCTIONNEMENT HYDROCHIMIQUE D'UN BASSIN VERSANT EN MILIEU FORESTIER ÉQUATORIAL HUMIDE :

L'EXEMPLE DE LA NGOKO A MOLOUNDOU (SUD-EST DU CAMEROUN)

Soutenue le 7 juillet 1993 devant la Commission d'examen :

MM.	Jean-Charles FONTES,	Président
	Paul CARRÉ,	Rapporteur
	Emmanuel NAAH,	Rapporteur
	Jean-Claude OLIVRY,	Rapporteur
	Jean-Luc MICHELOT,	Examineur
	Patrick SEYLER,	Examineur

**Orstom
Laboratoire d'Hydrologie - Montpellier
UR "Géodynamique de l'Hydrosphère Continentale"**

**MINREST
Institut de Recherches
Géologiques et Minières
(Cameroun)**

Etude réalisée dans le cadre de l'opération GBF du programme PEGI (Orstom-INSU)

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	3
RESUME	7
ABSTRACT.....	8
INTRODUCTION GENERALE.....	9
PREMIERE PARTIE : CADRE NATUREL DE L'ETUDE : LA BANDE MERIDIONALE DU PLATEAU SUD-CAMEROUNAIS	15
1.1. PRESENTATION ET CARACTERISATION DES BASSINS VERSANTS	17
1.2. LA CARACTERISATION DU MILIEU NATUREL DE LA BANDE MERIDIONALE DU PLATEAU SUD-CAMEROUNAIS.....	24
1.3. UN CLIMAT EQUATORIAL A QUATRE SAISONS	58
DEUXIEME PARTIE : LES REGIMES HYDROPLUVIOMETRIQUES DES BASSINS-VERSANTS .	71
CHAPITRE 2 : LES REGIMES PLUVIOMETRIQUES.....	75
2.1. LA BANDE MERIDIONALE DU PLATEAU SUD-CAMEROUNAIS.....	75
2.2. LE BASSIN VERSANT DE LA NGOKO.....	89
CHAPITRE 3 : LES REGIMES HYDROLOGIQUES.....	99
3.1. LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES REGIMES HYDROLOGIQUES	
3.2. LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DU NYONG SUPERIEUR ET DU NTEM	124
3.3. LES CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DES CYCLES ETUDIES SUR LE BASSIN AVAL DE LA NGOKO	142
TROISIEME PARTIE : OBSERVATIONS ET FONCTIONNEMENT CHIMIQUES DES HYDROSYSTEMES	153
CHAPITRE 4 : ENSEIGNEMENTS TIRES DES TRAVAUX ANTERIEURS.....	157
4.1 LES REGIMES DE TRANSPORTS SOLIDES SUR LE MBAM, LA SANAGA ET LE NTEM	147
4.2 LES TRANSPORTS DISSOUS SUR LES BASSINS DU NYONG, DU MBAM ET DE LA SANAGA.....	169
CHAPITRE 5 : LES METHODES D'ECHANTILLONNAGE ET LES TECHNIQUES D'ANALYSES DES EAUX.....	171
5.1. LE PROTOCOLE D'ECHANTILLONNAGE.....	171
5.2. LES TECHNIQUES D'ANALYSES.....	179
5.3. PRESENTATION ET CRITIQUE DES RESULTATS D'ANALYSES CHIMIQUES	183
CHAPITRE 6 : OBSERVATIONS DES TRANSFERTS DE MATIERES ET FONCTIONNEMENT HYDROCHIMIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA NGOKO.....	189
6.1. OBSERVATIONS ET TRANSFERTS DE MATIERES EN SUSPENSION	190
6.2. LES MATIERES EN SOLUTION	231
6.3. LE CARBONE ORGANIQUE.....	288

CHAPITRE 7 : OBSERVATIONS ET TRANSFERTS DE MATIERES SUR LES BASSINS VOISINS DE LA NGOKO.....	303
7.1. LES MATIERES EN SUSPENSION.....	303
7.2. LES MATIERES EN SOLUTION.....	305
CHAPITRE 8 : OBSERVATIONS DES ISOTOPES STABLES DE L'EAU ET FONCTIONNEMENT HYDROCLIMATIQUE	317
8.1. LES RESULTATS	317
8.2. DISCUSSIONS	321
CHAPITRE 9 : PLACE DES RESULTATS HYDROCHIMIQUES DE LA NGOKO.....	327
9.1. DU POINT DE VUE DES TRANSPORTS PARTICULAIRES	327
9.2. DU POINT DE VUE DES TRANSPORTS DISSOUS	331
CONCLUSION	334
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	337
BIBLIOGRAPHIE.....	345
LISTE DES FIGURES.....	357
LISTE DES TABLEAUX.....	367
ANNEXE : PHOTOS : MILIEU NATUREL ET TRAVAUX DE TERRAIN	379

A mes parents, mes enfants et leur mère

1. The following are the names of the members of the committee:

AVANT-PROPOS

Je ne saurais présenter les résultats de cette étude sans avoir auparavant remercié l'ensemble des personnes des instituts et des laboratoires en France, au Congo, en Centrafrique et au Cameroun qui ont contribué à sa réalisation.

Mes remerciements s'adressent d'abord aux personnalités scientifiques qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail :

- Monsieur le Professeur J. ch. FONTES, Responsable du Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique de l'Université de Paris Sud, pour m'avoir accueilli dans son Laboratoire et accepté de présider la commission d'examen ;
- Monsieur J.C. OLIVRY, Directeur de Recherches à l'ORSTOM et Responsable de l'UR "Géodynamique de l'Hydrosphère Continentale" au sein de laquelle ce travail a été réalisé ; je lui renouvelle ma gratitude non seulement pour avoir dirigé cette thèse, mais aussi pour m'avoir encadré depuis le DEA ;
- Monsieur J.L. MICHELOT, Chargé de Recherches au CNRS, qui a accepté avec gentillesse de participer à cette commission d'examen ;
- Monsieur P. CARRE, Maître de Recherches à l'ORSTOM, qui n'a cessé de m'apporter son aide et ses conseils depuis 1980 et tout au long de la rédaction de ce mémoire ;
- Monsieur E. NAAH, Maître de Recherches et Chef du Centre de Recherches Hydrologiques qui n'a ménagé aucun effort pour également m'encadrer depuis 1980 ;
- Monsieur P. SEYLER, Ingénieur de Recherches à l'ORSTOM, pour m'avoir amicalement accepté et pour s'être investi dans la réalisation de ce travail à tous les niveaux.

Dans le cadre administratif, je tiens d'abord à rendre hommage au regretté Directeur de l'IRGM, monsieur SOBA DJALLO. Je renouvelle ma gratitude à son successeur, Mr G.E. EKODECK dont je connais le dévouement et l'attachement à la recherche scientifique, pour m'avoir encadré depuis l'Université de Yaoundé. Son Adjoint, Mr J.P. MABOUKA trouvera également ici toute ma reconnaissance pour la direction de cet Institut.

Je témoigne de ma gratitude à Mr J. BONVALLOT, Représentant de l'ORSTOM à Yaoundé et à son prédécesseur, Mr P. MATHIEU ainsi qu'à Mr B. VOLKOFF, Directeur de Recherches à l'ORSTOM qui ont mobilisé les moyens matériels et financiers et facilité les formalités administratives pour la réalisation de cette étude.

Mes remerciements vont également à Mr. B. POUYAUD, Directeur du Département des Eaux Continentales, Mr. H. POUPON, Chef de service des relations extérieures et Mme M. MALOCHET.

Cette étude a été menée avec la participation de nombreux Instituts et Laboratoires au sein desquels j'ai été gentiment accueilli.

Au laboratoire d'hydrologie du centre ORSTOM de Montpellier, je remercie l'ensemble du personnel et particulièrement :

- M. MORELL, responsable du laboratoire et B. THEBE, responsable de la formation ;
- J.P. DEBUICHE, M. SUAVIN et MALIKA DJELLOULI du service de cartographie pour leur disponibilité et pour avoir monté certains graphiques de cette thèse ;
- E. RABBIA et A. GIODA pour la documentation qu'ils ont mise à ma disposition ;
- P. RAOUS, N. ROUCHE, H. LUBES, Cl. DIEULIN du service informatique ;
- Les Secrétaires, J. OSUGHRUE, B. JEANNY, M. OI et F. DELCOUSTAL, I. GHISALBERTI et P. GARCIA. Je réserve une mention spéciale à M. TAPIAU pour son intervention efficace à certaines de mes difficultés et à N. MUTHER pour sa sympathie ;
- Y. L'HOTE, J. MALEY et les amis du centre : G. MAHE, J.C. KLEIN, R. TAIBI, D. TAPTSOBA, B. BACYE, M. DJONDO pour leur contribution remarquable dans l'aboutissement de cette thèse ;
- F. BENMEHDI, pour son dévouement et pour son expérience qui ont permis le montage de ce mémoire ;
- P. DURAND, J.L. GONZALES-BARRIOS et J.TEXEIRA qui ont successivement partagé le bureau avec moi ;

Au Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique , je tiens à remercier la Secrétaire Agnès et la Technicienne Annick qui nous a aidé pour les analyses isotopiques. Celles-ci sont essentiellement l'oeuvre de R. NJITCHOUA dont l'investissement personnel dans l'aboutissement de cette thèse est louable. Je renouvelle mes amitiés au personnel et aux autres stagiaires de ce laboratoire.

Dans le cadre de l'opération GBF de PEGI, je tiens à remercier :

- F. SONDAG et M. DELAUNE du Centre ORSTOM de Bondy qui ont effectué respectivement les analyses chimiques et minéralogiques ;
- H. ETCHEBER, de l'Université de Bordeaux I, qui a analysé le carbone organique et J.M. JOUANNEAU pour la minéralogie ;
- A. LARAQUE, Responsable de la partie congolaise de GBF et toute l'équipe au sein de laquelle j'ai travaillé à l'ORSTOM-Brazzaville en 1986/87, notamment J.P. BRICQUET et J. KONG, B. MAZIEZOULA, N. MOUKOLO et SAMBA ;
- C. CENSIER et D. ORANGE, du Centre ORSTOM Bangui, collaborateurs de la partie centrafricaine de GBF, sans oublier J.P. THIEBAUX.

J'exprime mon cordial souvenir à l'équipe "rue Goethe" du Centre de Géochimie de la surface (CNRS) de Strasbourg pour leur accueil et en particulier à J.L. PROBST.

Je renouvelle mes amitiés à mes camarades et professeurs de DEA de l'USTL (Montpellier) ainsi qu'à ceux de l'EPFL (Suisse) et particulièrement à Mr R. GLOOR pour les documents qu'il m'a fait parvenir.

Je témoigne de ma reconnaissance à Madame DJONGANG, Chef du Centre National des Sols de l'IRA et au personnel du laboratoire pour leur accueil.

Je m'en voudrai de ne pas remercier les observateurs des stations hydrométriques et météorologiques ainsi que la Direction de la Météorologie Nationale du Cameroun pour la collecte des échantillons et des données de base de cette thèse. Je ne saurai oublier les Autorités Administratives de la Boumba et Ngoko et en particulier de Moloundou, la Direction et le personnel de la SOTREF ainsi que les habitants de nombreux villages de notre zone d'étude pour leur bonne humeur et pour leur hospitalité.

Force est de reconnaître que je dois cette thèse à l'ensemble du personnel de l'IRGM et du Centre de Recherches Hydrologiques dont la liste ne saurait être exhaustive . Je tiens à remercier :

- J.P. BOUM, Chef de Centre Adjoint, pour son aide au traitement des données à l'ordinateur ;

- B. BEDIANG, P. NIA et J. NLOZOA pour leur contribution à certaines analyses effectuées à Yaoundé ;

- D. SIGHOMNOU, pour son assistance et sa relecture, J.C. NTONGA et G. Z. TANYILEKE ;

- G. AYISSI, dont le dévouement aussi bien sur le terrain qu'au bureau a été déterminant pour ce travail et NKOA FOE qui a réalisé l'essentiel des dessins ;

- J. NWALAL, A. AYANGMA, R. ABEGA, D. ESSOGO et les Secrétaires Mmes C. ARABO et S. NGAH BELINGA qui ont assuré la frappe des notes et des rapports de terrain.

Je termine en remerciant toutes celles et tous ceux qui m'ont apporté leur affection et leur amitié aux moments difficiles, lors des travaux de terrain et durant la rédaction de ce mémoire, notamment J.P. SOH, M. TALLIE, J.M. MBE, J.M. FOTSING, J.B. NKWETCHE, M. NGUEMNO, B. TALLA, F. DAMESSE, A. KENGNE, le "Club des Amis" (la liste est loin d'être exhaustive).

Enfin, je dédie cette thèse à toute ma famille, à mes parents (s.l.), à mes tuteurs (paix à l'âme de MAMBOU Ambroise), à Nina, Lucas, E. Charron, A. Lislotte et P. SIGHA. Je ne saurai les remercier pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. Néanmoins, ils savent la part qui leur revient dans ce travail. Aussi, que Bénilde, Larissa et Eulalie trouvent en cette thèse la consolation pour mes multiples voyages.

RESUME

Une étude des régimes hydrologique et hydrochimique est menée sur l'ensemble du bassin versant de la Ngoko (70 000 km²) depuis 1989. Elle tente de comprendre le comportement hydrogéochimique de ce grand écosystème forestier intertropical encore intact et sa réponse à d'éventuelles perturbations humaines et/ou naturelles.

L'analyse des régimes des précipitations a permis de déceler un déficit pluviométrique anormal dans l'axe Yokadouma-Moloundou, lié sans doute à la "barrière orographique" constituée par la succession de collines en aval de Biwala. Le bilan hydrologique a fait ressortir, pour une pluie moyenne annuelle sur le bassin de 1 470 mm, un déficit d'écoulement de 75 %, essentiellement par évapotranspiration. Les observations isotopiques ont montré une faible évaporation et une bonne homogénéisation des eaux.

Le suivi spatio-temporel des transferts de matières en suspension depuis l'amont vers l'aval a indiqué une intensification de l'érosion sur le bassin du Dja et une diminution sur celui de la Boumba ; la tendance a été à l'augmentation de l'érosion mécanique au cours des 3 cycles étudiés, en raison d'une rupture de l'équilibre du milieu due à une exploitation forestière en nette progression (30 % d'augmentation de volume d'abattage). La kaolinite constitue le principal minéral des suspensions. Le chimisme des précipitations a montré de faibles teneurs en éléments marins ; mais en terme de flux, les apports atmosphériques sont relativement importants (8 t.km⁻².an⁻¹) en raison de la forte pluviométrie. Le faciès géochimique des eaux fluviales est bicarbonaté calcoc-magnésien. Elles appartiennent au domaine de stabilité de la kaolinite. A la différence du transport particulaire, le transport dissous a peu varié. Le carbone organique, évalué à 4 t.km⁻².an⁻¹, est exporté principalement sous sa forme dissoute (3,3 t.km⁻².an⁻¹) qui représente 80 % du carbone total.

En définitive, l'analyse hydrochimique permet de conclure à une prédominance de l'altération (17,5 t.km⁻².an⁻¹) sur l'érosion mécanique (11,5 t.km⁻².an⁻¹). L'épaisseur moyenne de sol décapée, estimée à 8,8 µm par an, soit 8,8 mm en 1 000 ans, permet de situer la Ngoko parmi les bassins qui résistent le mieux à l'érosion mécanique à l'échelle planétaire. Ce comportement du bassin de la Ngoko est lié à son couvert forestier dense.

MOTS CLES

Régimes hydro-pluviométriques - Fonctionnement hydrochimique - Erosion mécanique-
Altération chimique - Ecosystème forestier équatorial - Bassin fluvial de la Ngoko.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION AND HYDROCHEMICAL BEHAVIOUR OF A MOIST-FOREST EQUATORIAL DRAINAGE BASIN :

Exemple of the Ngoko river at Moloundou (Southeastern Cameroon)

Since 1989, an hydrological and hydrochemical study has been conducted on the regimes of the Ngoko drainage basin ($70\,000\text{ km}^2$) in attempt to understand the hydrochemical behaviour of this undamaged large intertropical forest ecosystem and its reply to possible human and/or natural perturbations.

The downstream portion of Boumba at Biwala is characterized by an unexpected deficit of the precipitations. For a $1\,470\text{ mm}$ precipitation amount over the study period, a depth of runoff of 360 mm and evapotranspiration value reaching $1\,110\text{ mm}$ are observed (75 % of runoff deficit). The study of the stable water isotopes shows no evaporation and a good water homogenization.

With regard to the matter regimes, we observe an increase of the suspended load with a constant solute transport. This increase is due to the increasing of deforestation. Mean specific atmospheric inputs over the Ngoko river basin are evaluated at $8\text{ t.km}^{-2}\text{.yr}^{-1}$. The geochemical water type is a calcium and magnesium bicarbonate one. The dissolved organic carbon ($3.3\text{ t.km}^{-2}\text{.yr}^{-1}$) represents 80 % of the total organic carbon).

The results of the hydrochemical analysis show a mechanical erosion rate of $11,5\text{ t.km}^{-2}\text{.yr}^{-1}$ and a chemical weathering of $17,5\text{ t.km}^{-2}\text{.yr}^{-1}$. According to the mean erosion rate, ($8,8\ \mu\text{m}/\text{year}$ or $8,8\text{ mm}/1\,000\text{ years}$), the Ngoko river appears to be one of the basins among others in the world, which resistance to mechanical erosion is the greatest, thanks to its thick forest cover.

KEY WORDS

Hydrological and rainfall regimes - Hydrochemical behaviour - Mechanical erosion - Chemical alteration - Equatorial forest ecosystem - Ngoko river basin.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'eau, en bouclant son cycle à l'océan, y apporte des substances d'origine atmosphérique et continentale. Les matériaux en provenance des versants résultent de l'érosion des sols et de l'altération chimique des roches sous-jacentes, deux processus de dégradation du milieu naturel dont l'eau est le principal agent. Ces phénomènes ont des actions successives. En effet, si le rôle de l'altération est de décomposer les roches, celui de l'érosion est d'évacuer les produits de cette altération de la surface des continents.

L'évaluation de ces processus, rendue difficile par les phénomènes de dépôts et de stockages, peut se faire par diverses approches. Parmi les approches régionales, celles qui prennent en compte le transfert des matériaux par les cours d'eau qui drainent les bassins versants figurent en bonne place. De nombreux travaux sont réalisés dans ce domaine à l'échelle planétaire. En régions tropicales, mis à part des travaux épars sur les bassins du Congo (EISMA et al, 1978 ; MOLINIER, 1979 ; DERONDE et al, 1980 ; NKOUNKOU et PROBST, 1986 ; KINGA-MOUZEO, 1986 ; MOGUEDET, 1988 ; OLIVRY et al, 1988 ; NKOUNKOU, 1989 ; MOUKOLO et al, 1991 ; PROBST et al, 1992), du lac Tchad (CARRE, 1972 ; ROCHE, 1973 ; GAC, 1980), du Sénégal (GAC et al, 1986 et 1987 ; ORANGE, 1990) et sur de petits bassins de Côte d'Ivoire (MATHIEU, 1972 ; LENOIR, 1972 ; LELONG et ROOSE, 1986), la plupart des travaux se sont localisés sur le bassin amazonien (GIBBS, 1967, 1970 et 1972 ; STALLARD and EDMOND, 1981 et 1983 ; NKOUNKOU, 1989 ; PROBST, 1990 ; LARAQUE, 1990 ; ROCHE, 1982 ; ROCHE et al, 1986 ; GUYOT, 1992). Par ailleurs, d'autres travaux, dans le milieu intertropical humide, ont montré à l'échelle globale que ces fleuves constituent environ 60 % de l'écoulement continental (UNESCO, 1983). Ils exportent vers les océans 74 % de la silice (MEYBECK, 1984) et 63 % de la matière organique (STEIN, 1981). Ces régions sont couvertes par d'immenses forêts denses qui se trouvent, depuis quelques années, au centre des débats sur l'environnement et le développement (conférence de Rio de juin 1992 au Brésil).

A l'heure où la communauté scientifique se mobilise autour de grands projets sur l'amélioration des connaissances des écosystèmes tropicaux et la protection de l'environnement, aucune étude hydrochimique systématique n'a été réalisée sur les bassins fluviaux en milieu forestier équatorial de l'Afrique Centrale en général, et sur le Cameroun en particulier. Pourtant, sur les 475 000 km² de superficie que constitue le pays, le tiers est couvert d'une forêt dense humide. Celle-ci perd, du fait des activités et des besoins de l'homme - mise en cultures des sols, bois de construction et de chauffage, bois d'exportation - environ 1 % de son étendue par an (FAO, 1988).

En ce qui concerne le Cameroun, les quelques travaux réalisés en Hydrochimie dans le sud forestier se sont limités aux transports de matières en suspension mesurés à l'occasion des projets d'aménagement tels que les barrages hydro-électriques sur les bassins de la Sanaga (NOUVELOT, 1969 et 1972 ; OLIVRY, 1976, 1977 et 1978) et du Ntem (BOUM et al, 1983). Une seule étude s'est intéressée à la qualité des eaux fluviales du Nyong, de la Sanaga et de son principal affluent, le Mbam (OLIVRY et NAAH, 1978). En outre, depuis l'explosion du lac Nyos en 1986 au Nord-ouest, on note des investigations sur la physicochimie des eaux, mais essentiellement orientées vers les lacs de cratère de la région volcanique du Cameroun (KLING, 1987).

Dans le souci de poursuivre la reconnaissance sur ce thème, l'Institut de Recherches Géologiques et Minières (IRGM) du Cameroun et son Centre de Recherches Hydrologiques (CRH) d'une part, et l'Institut Français de Recherches Scientifiques pour le Développement en Coopération (ORSTOM) et son Unité de Recherches "Géodynamique de l'Hydrosphère Continentale" d'autre part, ont initié, en 1987, un projet de recherche sur l'hydrochimie du bassin forestier humide de la Ngoko à Moloundou. Ce projet intéresse exclusivement le volet bassin sous forêt dense primaire - restée jusque-là intacte -, de l'opération Grands Bassins Fluviaux (GBF) du Programme Interdisciplinaire de Recherche Péri-Atlantique (PIRAT), désormais Programme d'Etude de l'Environnement de la Géosphère Intertropicale (PEGI) de l'ORSTOM-INSU sur le bassin du Congo. Il n'a effectivement démarré qu'en 1989 sur la Ngoko, pour sa partie hydrochimique.

Parmi les multiples objectifs de cette étude, les principaux consistent :

- sur le plan de la recherche fondamentale, en la compréhension de la "respiration" de cet écosystème forestier encore à l'état naturel et situé aux confins du pays, à l'abri de toute contamination d'origine externe, des influences océaniques et anthropiques majeures ;
- sur le plan de la recherche appliquée, dans la mise en évidence d'éventuels changements par rupture de l'équilibre du milieu due - soit aux phénomènes naturels tels que des crises continues des régimes climatique et hydrologique, l'évolution des paysages -, soit aux interventions humaines telles que la déforestation, les incendies, la destruction des sols ;
- sur le plan du développement, en la mise à la disposition des utilisateurs des résultats valables pour la réalisation d'éventuels projets d'aménagement.

Les interprétations reposeront sur l'observation quantitative et qualitative des matières minérales et organiques (en suspension et en solution) véhiculées par les cours d'eau drainant l'écosystème. Afin de contrôler l'ensemble des matériaux issus de la dégradation des versants, la problématique PIRAT nous a incité à faire les mesures le plus en aval possible, d'où le choix de Moloundou - arrondissement de l'extrême sud-est du Cameroun, à "l'autre bout du monde" (SUCHEL, 1987) -, comme porte de sortie des matériaux évacués par le fleuve Ngoko et apportés par ses deux tributaires, le Dja et la Boumba.

Cette première tentative de compréhension de la biogéodynamique de l'écosystème en forêt primitive passe par le suivi et la connaissance des régimes hydroclimatique et hydrochimique. Ceci implique, en plus des mesures classiques évoquées ci-dessus, une prise en compte sur l'ensemble du bassin des apports météoriques en éléments susceptibles d'influencer les bilans géochimiques. Cela suppose également une bonne connaissance de l'influence des facteurs ou des combinaisons des facteurs conditionnels - couverture végétale, topographie, substratum géologique et pédologie - des dits régimes.

A l'origine du projet, on se proposait de faire de ce bassin enclavé de la Ngoko un bassin de référence : après un suivi régulier (mesure et échantillonnage mensuels) de ses caractéristiques hydrologiques et hydrochimiques, il pouvait à court ou à moyen terme, compte-tenu de son caractère encore naturel, servir d'observatoire de la "respiration" écologique des écosystèmes forestiers équatoriaux. Mais, pour des raisons de conjoncture, la périodicité des mesures indiquée ci-dessus a plutôt évolué avec la disponibilité sporadique des moyens matériels et financiers. Cependant, en dépit de ces difficultés, on a pu effectuer, de 1989 à 1991, vingt-deux mesures à la station principale de la Ngoko, Moloundou. D'autre part, à partir de novembre 1989, nous avons décidé d'intégrer dans ce travail :

- L'étude des stations de Somalomo et de Bi sur le Dja et de Biwala sur la Boumba en amont de Moloundou ;
- l'étude des stations des bassins fluviaux voisins, en l'occurrence le Nyong et le Ntem qui présentent de nombreuses analogies avec celui de la Ngoko du point de vue des facteurs qui conditionnent les régimes hydrologiques ; elles ont l'avantage d'avoir déjà été l'objet des études mentionnées plus haut et de renforcer les possibilités d'analyses des résultats par comparaison.

Nous avons également inclus dans notre approche, l'étude du bassin de la Kadey, qui est un bassin de transition entre la forêt et la savane.

Ainsi, nous pourrons sur le plan local, comparer les résultats obtenus sur ces bassins avec ceux de la Ngoko. Dans le contexte général du projet PEGI en Afrique Centrale, nous replacerons les résultats par rapport à ceux des bassins fluviaux de l'Oubangui à Bangui et du Congo à Brazzaville.

Notre étude se subdivise en trois parties.

La première partie porte sur l'état des connaissances du milieu naturel tel que décrit par les Géographes, les Géologues, les Pédologues, les Botanistes et les Climatologues en vue de dégager les facteurs influant sur les régimes hydro-pluviométriques et hydrochimiques des bassins versants.

La deuxième partie est consacrée à l'étude des régimes hydro-pluviométriques. Il s'agit en fait, de réactualiser l'analyse des données effectuée par OLIVRY (1986) sur la période allant de la date de mise en service des stations à 1978. Nous avons complété par les observations récentes (1979 à 1992), ce qui permet de mieux apprécier la représentativité de la période 1989-1992 au cours de laquelle nous avons effectué nos observations hydrochimiques.

La dernière partie, axée sur l'hydrochimie, s'organise en six chapitres. Elle commence par un aperçu sur les travaux antérieurs suivi de la description des méthodes de mesures et des techniques d'analyses. Ensuite, nous abordons les transports de matières minérales et organiques et leurs bilans, ce qui permet d'appréhender le fonctionnement hydrochimique de l'écosystème. Après une analyse des observations des isotopes stables de l'eau, nous concluons notre étude en situant le bassin de la Ngoko d'un point de vue hydrochimique aux échelles régionales rencontrées et à l'échelle planétaire.

*"Tout homme a droit à un environnement de qualité et
il a le devoir de le protéger pour les générations futures"*

KERMARREC (1980)

PREMIERE PARTIE

**CADRE NATUREL DE L'ETUDE :
LA BANDE MERIDIONALE DU PLATEAU SUD-CAMEROUNAIS**

CHAPITRE 1

CADRE NATUREL DE L'ETUDE : LA BANDE MERIDIONALE DU PLATEAU SUD-CAMEROUNAIS

INTRODUCTION

Dans cette partie du travail, nous nous proposons de décrire les caractéristiques physiques et climatiques du milieu étudié. On aurait pu limiter cette caractérisation uniquement au bassin de la Ngoko, bassin principal de l'étude. Mais il serait plus intéressant de le caractériser en le replaçant dans le contexte local de la bande méridionale du plateau sud-camerounais. Il s'agit de la zone comprise entre les latitudes 01°30' et 05° Nord. Toutefois, on mettra en évidence les caractéristiques spécifiques du bassin de la Ngoko. Par contre, celles de la Kadey ne seront abordées que sur les principaux traits soulignant sa spécificité.

Après avoir situé les bassins, on s'attachera à décrire simultanément le relief et le réseau hydrographique à partir des cartes topographiques de manière à faire ressortir les aspects pouvant influencer les régimes hydrologiques et de transport de matières. En raison de l'influence de la lithologie sur les éléments dissous, on déterminera les superficies occupées par les différents types de roches sur les sous-bassins et sur le bassin de la Ngoko. Compte tenu du fait que les autres facteurs (sols, végétation et climat) sont dans l'ensemble assez homogènes sur les bassins étudiés, on les décrira sur l'ensemble de la bande méridionale tout en relevant les variantes propres à chaque bassin.

1.1. PRESENTATION ET CARACTERISATION DES BASSINS VERSANTS

1.1.1 PRESENTATION DES BASSINS

1.1.1.1 Situation géographique

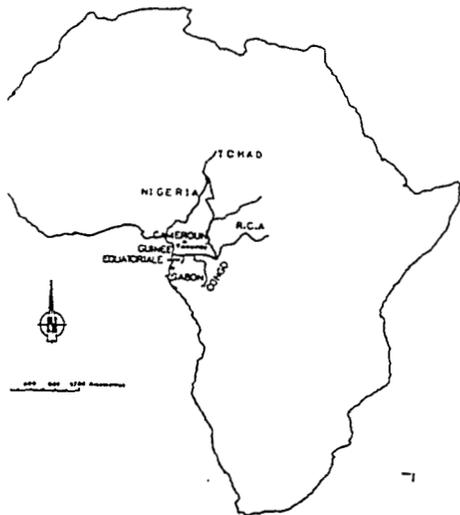
Avec une superficie totale de 475 000 km² et une population de 12 millions d'habitants, le Cameroun s'étend entre les latitudes 01°30' N et 13°05' N et les longitudes 08°30' E et 16°10' E. Son territoire occupe une bande côtière de 400 km sur la façade atlantique de l'Afrique Centrale.

L'étude porte essentiellement sur la Ngoko, un des tributaires camerounais du fleuve Congo. Elle draine un bassin versant situé à l'est de la bande méridionale du plateau sud-camerounais. Délimitée par les latitudes 01°30' et 05° N et les longitudes 10°20' et 15°50' E, cette zone constitue le domaine camerounais de forêt équatoriale dense humide ou "moist forest", avec ses marges en Guinée Equatoriale, au Gabon, en République du Congo et en République Centrafricaine (RCA). Sa partie occidentale est drainée par deux fleuves côtiers, le Nyong et le Ntem (figure 1-1). Les coordonnées géographiques des bassins et les principaux centres administratifs sont rassemblés dans le tableau 1-1. Comme nous l'avons déjà mentionné dans l'introduction générale, les bassins du Nyong en amont de Mbalmayo et du Ntem sont intégrés dans cette étude hydrochimique du bassin de la Ngoko pour permettre de replacer les résultats dans le contexte local du domaine forestier sud-camerounais. Dans les lignes qui suivent, nous allons situer les différents bassins versants.

Tableau 1-1 : Coordonnées géographiques des bassins versants et centres administratifs

COORDONNEES GEOGRAPGHQUES DES BASSINS VERSANTS ET CENTRES ADMINISTRATIFS						
B.V.	LATITUDE NORD			LONGITUDE EST		CENTRES ADMINISTRATIFS
	limite sud	limite nord	limite ouest	limite est		
	DG MN SEC	DG MN SEC	DG MN SEC	DG MN SEC		
Boumba	02 00	05 00	13 00	15 30	Yokadouma Lomié	
Dja	01 30	04 00	11 00	15 10	Sangmélima Mbengbis Djoum	
Ngoko	01 30	05 00	11 00	15 30	Moloundou	
Nyong Sup	02 48	04 32	03 31	13 30	Abong-Mang Ayos Akonolinga Mbalmayo Yaoundé	
Ntem	01 00	03 00	02 24	12 00	Ebolowa Ambam	
Légende :						
B.V. : Bassin Versant ; Nyong Sup. : Nyong Supérieur ;						
DG : Degré ; MN : Minute ; SEC : Seconde						

Avec la Kadey au Cameroun et la Mambéré en RCA, la Ngoko forme la Sangha qui est l'un des principaux affluents de la rive droite du fleuve Congo. Par ses deux affluents le Dja et la Boumba, elle draine, à sa sortie de Moloundou dont les coordonnées géographiques sont 02°02'42" de latitude N et 15°12'34" de longitude E, un bassin versant de 67 075 km² de superficie, soit environ 2 % de la superficie du bassin du Congo qui est de 3 700 000 km² (figure 1-2). De forme ovoïde, le bassin versant de la



SITUATION DE LA REPUBLIQUE DU CAMEROUN, DANS L'AFRIQUE

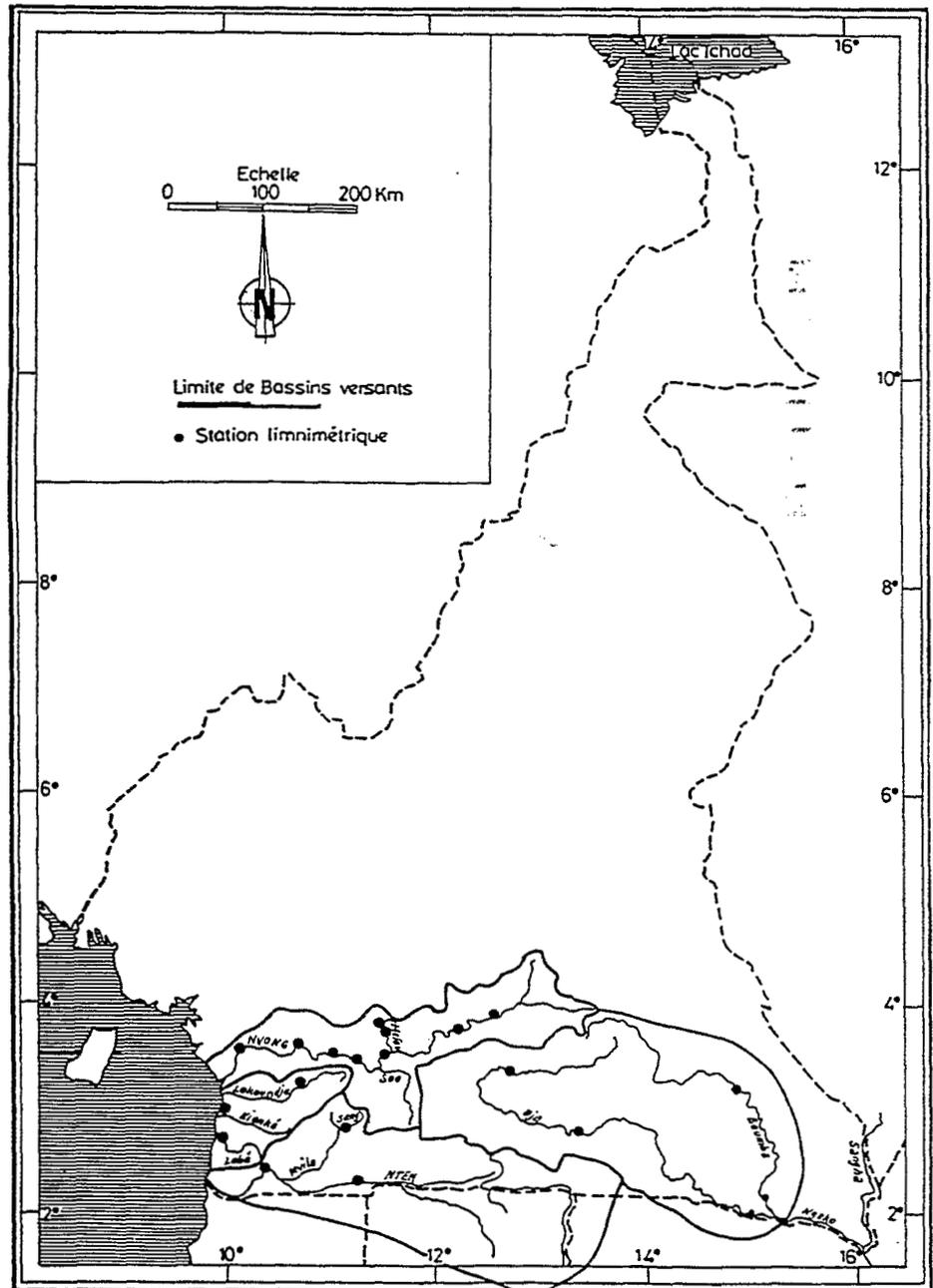


Figure 1-1 : Situation des bassins versants de la Ngoko, du Nyong et du Ntem

Ngoko est limité au nord par le bassin de la Kadey, à l'ouest par celui du Nyong, au sud-ouest par la partie gabonaise du bassin du Ntem, au sud par la Likouala Mossaka en territoire congolais et à l'est par le bassin de la Sangha supérieure, en territoire centrafricain.

Le bassin versant du Dja, à son exutoire de Moloundou-SOTREF situé à 3 km en amont de Moloundou-ville, couvre une superficie de 39 715 km², soit 59,2 % de la superficie du bassin de la Ngoko. D'amont en aval, le Dja est contrôlé à partir des trois stations de Somalomo, Bie et Moloundou-SOTREF (figure 1-2).

La Boumba draine à son exutoire de Moloundou-Bac situé à 2,5 km en amont de la ville de Moloundou, une superficie de 27 260 km², soit 40,6 % de la superficie du bassin de la Ngoko. D'amont en aval, la Boumba est observée à deux stations, à savoir Biwala et Moloundou-Bac (figure 1-2).

La Kadey est contrôlée par deux stations hydrométriques, Batouri et Pana. A Batouri (latitude 4° 14' N et longitude 14°19' E), la superficie est de 8 970 km² et à Pana (latitude 4° 12' N et longitude 14° 41' E), elle est de 20 370 Km².

Le Nyong draine vers l'océan Atlantique la partie septentrionale du domaine d'étude. D'une superficie de 27 800 km² à l'embouchure, il est le deuxième fleuve en importance après la Sanaga coulant en totalité sur le territoire camerounais. Il est limité au nord par le bassin de la Sanaga, à l'ouest par l'océan Atlantique, au sud par les bassins de la Lokoundjé et du Ntem, à l'est par ceux du Dja, de la Boumba et de la Kadey. On se limite ici à la partie supérieure du bassin, contrôlée à partir des stations hydrométriques d'Akonolinga, où la superficie est de 8 350 km², et de Mbalmayo, où la superficie est de 13 555 km² (figure 1-3).

Le bassin versant du Ntem, d'une superficie de 31 000 km² à son embouchure de Campo, est partagé entre le Cameroun, le Gabon et la Guinée Equatoriale, ayant respectivement 61, 32 et 7 % de la superficie du bassin. Il est limité au nord par les bassins du Nyong, de la Lokoundjé, de la Lobé et de la Kienké, à l'ouest par l'océan Atlantique, au sud-ouest par ceux du Rio Benito et de la Mbia du côté de la Guinée Equatoriale, au sud par celui de l'Ayina, du côté gabonais et à l'est par le bassin du Dja. Les stations hydrométriques exploitées sont d'amont en aval Ngoazik et Nyabessan (figure 1-4). Les superficies des bassins versants contrôlés par ces stations sont respectivement de 18 100 km² et de 26 350 km².

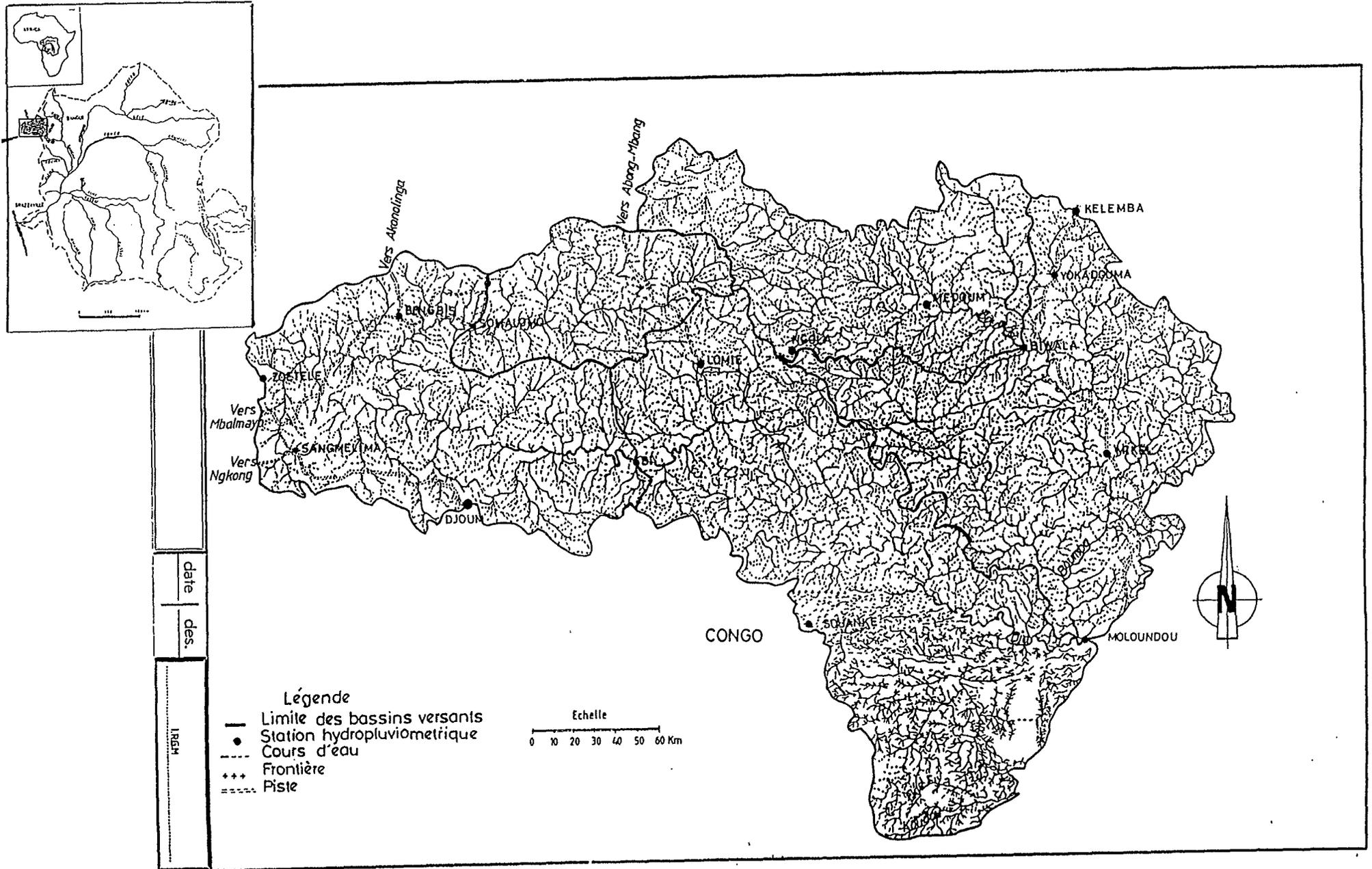


Figure 1-2 : Bassin versant de la Ngoko à Moloundou : Hydrographie

1.1.1.2. La population, les centres urbains et l'économie

Si nous employons fréquemment dans ce mémoire le terme écosystème encore à l'abri de l'influence anthropique ou naturel en ce qui concerne particulièrement le bassin de la Ngoko, nous devrions toutefois signaler qu'il ne s'agit pas pour autant d'un "désert humain". L'utilisation de ces termes est due au fait qu'en plus des réserves forestières telles que la boucle du Dja dans la région de Messaména et de l'éloignement du bassin des sources de pollution, la densité de la population y est très faible. Ces caractéristiques donnent une stabilité écologique au milieu qui mérite d'être connue avant une éventuelle interruption à moyen ou à long terme. Nous y reviendrons dans le chapitre relatif au couvert végétal.

En ce qui concerne la population, nous avons estimé, à partir du recensement de 1987, à environ 200 000 le nombre d'habitants dans le bassin de la Ngoko, soit une densité de la population de l'ordre de 3 hab/km², valeur très faible par rapport aux 64 hab/km² du bassin du Nyong Supérieur par exemple. Les populations, regroupées le long des pistes, de rares axes routiers et des rives des cours d'eau, sont constituées de groupes ethniques tels que les Maka dans la zone de Lomié, les Bong-Bong, les Konabembé et les Yanghéré dans la zone de Yokadouma, les Bagandou et les Bakwéré dans la zone de Moloundou, les Boulou dans la zone de Sangmélina et de Djoum. Les Pygmées ou Baka qui sont des nomades se retrouvent partout dans le bassin. Ces populations sont pour la plupart des chasseurs et des pêcheurs, sauf celles de la région de Yokadouma et de Sangmélina qui sont en plus des planteurs de café et de cacao pour les premières et de cacao pour les secondes, de même que de cultures vivrières. Les plantations ainsi mises en cultures constituent des zones de dégradation du bassin versant.

Les principales richesses restent cependant :

- Les ressources minières et surtout les métaux précieux à l'instar de l'or et du diamant dont l'exploitation, bien qu'artisanale, perturbe les sols ;
- la forêt qui recèle d'énormes potentialités caractérisées par des essences dont l'exploitation par de nombreuses sociétés forestières est déjà signe visible de perturbation de l'écosystème.

Les centres administratifs - Moloundou, Yokadouma, Lomié, Djoum, Sangmélina, Bengbis -, bien que de faible extension, sont également des témoins d'anthropisation du milieu. Les habitats et les routes de ces villes constituent des surfaces imperméables pouvant modifier les régimes des écoulements et accentuer l'érosion, mais de façon très locale.

Le bassin versant du Ntem est plus densément peuplé que celui de la Ngoko. La population y est évaluée à environ 159 745 habitants, soit une densité de 6 hab/km². Ce bassin est surtout peuplé des Boulou, des Fang et des Ntoumou. Les principales richesses sont le fer de Campo et la forêt dont le déboisement est accentué par les plantations de cacao et de cultures vivrières, la coupe de bois. Les principales villes sont Ebolowa, Ambam, Ma'an, Nvangane, Oveng.

Le bassin du Nyong Supérieur compte environ 1 179 200 habitants, dont 703 588 dans l'un de ses sous-bassins, le Mfoundi. La densité, qui est de 64 hab/km², est surtout liée à la présence de la capitale, Yaoundé, dont la population est évaluée à 649 252 habitants. Cette densité élevée de la population entraîne une intense activité humaine sur le milieu, notamment avec des plantations de caféiers, de cacaoyers et de cultures vivrières, auxquelles il faut ajouter l'extension des villes comme Mbalmayo, Akonolinga, Abong-Mbang. L'incidence de cette forte densité de la population sur le milieu se traduit par des aménagements divers. Ceux-ci entraînent une déforestation intense sous toutes les formes et une augmentation des surfaces piétinées plus imperméables, donc du coefficient de ruissellement ayant souvent pour conséquence des inondations. De même, l'industrialisation sans cesse croissante de la ville de Yaoundé peut être à l'origine d'une éventuelle pollution des eaux du Nyong en aval du confluent avec le Mfoundi.

En règle générale, on peut retenir que la densité élevée de la population dans le bassin versant du Nyong Supérieur et dans une moindre mesure dans celui du Ntem et à l'ouest de celui de la Ngoko (région de Sangmélina) a pour corollaire des aménagements multiples. L'homme qui doit se loger et se nourrir, dégrade le milieu par des défrichements, des brûlis, la coupe de bois pour le chauffage et la déforestation industrielle pour l'exportation. Toutes ces activités humaines peuvent entraîner une rupture de l'équilibre de l'écosystème, en modifiant les caractéristiques des régimes hydro-pluviométriques (déficits pluviométriques et d'écoulement) et hydrochimiques par intensification de l'érosion des sols et réduction de l'altération des roches.

1.2. LA CARACTERISATION DU MILIEU NATUREL DE LA BANDE MERIDIONALE DU PLATEAU SUD-CAMEROUNAIS

Au chapitre précédent, on a montré que le bassin versant de la Ngoko était situé dans la même zone géographique que le Nyong et le Ntem. Dans ce qui suit, nous allons caractériser l'ensemble de la zone ainsi délimitée tout en faisant ressortir certaines différences notables entre ces bassins versants.

1.2.1. LE RELIEF ET LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Le plateau sud-camerounais, dont la bande méridionale fait l'objet de cette étude, est constitué de deux unités morphologiques.

La première unité consiste en une succession de collines dont l'altitude varie entre 650 et 900 m. D'ouest en est, elle s'étend de Yaoundé-Ebolowa à Yokadouma-Berbérati en RCA. Sa monotonie est par endroit rompue par des massifs comme ceux de Yaoundé et de la chaîne de Ngovayang. La deuxième est située au sud-est et s'abaisse doucement pour aboutir à une pénéplaine d'altitude moyenne de 500 à 800 m, qui se termine dans la cuvette congolaise à environ 350 m d'altitude.

A l'ouest de ce plateau, s'étendent les plaines côtières qui vont de l'estuaire du Wouri à Campo sur le Ntem. Comme déjà signalé plus haut, il est drainé à l'ouest par les rivières tributaires de l'Atlantique et à l'est par les tributaires du fleuve Congo. Nous avons reporté dans le tableau 1-2 les principales caractéristiques morphométriques des bassins versants et dans le tableau 1-3 celles des cours d'eau qui les drainent.

Le système Dja-Ngoko

La caractérisation du bassin versant de la Ngoko à son exutoire de Moloundou se résume à celle de ses principaux formateurs qui confluent à 1 500 m en amont de cette ville. Il s'agit des bassins versants du Dja à Moloundou- SOTREF et de celui de la Boumba à Moloundou-Bac. Les profils en long de ces deux cours d'eau sont représentés sur la figure 1-5. En ce qui concerne les caractéristiques morphométriques des bassins, le coefficient de Gravelius ou indice de compacité (K_c) varie entre 1,32 pour le Dja à Somalomo et 1,87 pour le Dja à Moloundou-SOTREF. Le rectangle équivalent du bassin du Dja à la SOTREF, d'un périmètre de 1 330 km, a 599 km de long sur 66 km de large. Celui de la Boumba au Bac a un périmètre de 1 050 km, soit une longueur de 466 km sur une largeur de 59 km. Le rectangle équivalent de l'ensemble du bassin de la Ngoko a un périmètre de 1 554 km, soit 678 km de long et 99 km de large. Ces valeurs traduisent l'allongement du bassin de la Ngoko et de ses sous-bassins. Les valeurs d'indice de pente global et d'indice de pente de Roche sont faibles, traduisant un relief modéré. Il s'agit d'une pénéplaine d'altitude variant entre 300 et 900 m (figure 1-6). Bien que monotone, celle-ci présente des ondulations à l'ouest et à l'est. La courbe hypsométrique (figure 1-7), réalisée à partir du tableau 1-4, permet d'individualiser les principales unités morphologiques.

Tableau 1-2 : Caractéristiques morphométriques des bassins versants

BASSIN VERSANT	EXUTOIRE	SUPERF.	PER.	Ip	Ig	Kc	R.E.	R.E.	Hmax.	Hmin.	Hmoy.
		km ²	km		m/km		L(km)	l(km)	(m)	(m)	(m)
DJA	SOMALOMO	5473	350		1.43	1.32	126	43	760	603	
DJA	BIE	19516	750		1.35	1.5	323	60	800	533	
DJA	MOLOUNDOU-SOTREF	39715	1330	0.0224	0.33	1.87	599	66	800	348	692
BOUMBA	BIWALA	10310	500		1.9	1.38	216	48	726	500	
BOUMBA	MOLOUNDOU-BAC	27260	1050	0.0263	0.51	1.78	466	59	800	359	649
NGOKO	MOLOUNDOU	67075	1554	0.0222	0.34	1.68	678	99	800	348	675
NYONG	AKONOLINGA	8350	380	0.0314	0.68	1.16	118	71	884	644	682
NYONG	MBALMAYO	13555	570	0.0255	0.41	1.37	224	61	1225	634	682
NTEM	NGOAZIK	18100	550		0.48	1.14	161	112	1200		
NTEM	NYABESSAN	26350	670			1.16	210	125	1200		
Legende :											
	Ip : indice de pente de ROCHE			Ig : indice global de pente							
	Kc : coefficient de GRAVELIUS ou indice de compacité										
	R.E. : rectangle équivalent			H : altitude							
	PER : perimetre			max : maximale							
	L : longueur			min : minimale							
	l : largeur			moy : moyenne							

Tableau 1-3 : Caractéristiques principales du réseau hydrographique

COURS D'EAU	STATION	Lat.N.	Long.N.	L	H	H	h	Imoy	Dd
		DG MN SEC	DG MN SEC	km	m	m	m	m/k	m/km
					Sc	Exut			
Dja	Somalomo	03 22 42	12 43 47	190	760	617	143	0.75	
Dja	Bie	02 48 06	13 21 21	460	760	533	227	0.49	
Dja	Moloundou-SOTREF	02 02 30	15 08 43	854	760	360	400	0.53	0.42
Boumba	Biwala	03 12 58	14 55 24	310	780	500	280	0.9	
Boumba	Moloundou-Bac	02 03 16	15 10 32	530	780	359	421	0.79	0.38
Ngoko	Moloundou	02 02 42	15 12 42	857	760	354	406	0.47	0.4
Nyong	Akonolinga	03 47	12 15	186	690	644	46	0.25	
Nyong	Mbalmayo	03 31	11 30	360	690	634	56	0.16	
Ntem	Ngoazik	02 18	11 18	210	1100	535	565	2.69	
Ntem	Nyabessan	02 24	10 24	360	1100	384	716	1.99	
Legende :									
H: altitude; h: dénivelée; L: longueur; Imoy: pente moyenne; Dd: densité de drainage.									
Sc : source; Exut. : Exutoire									

Tableau 1-4 : Répartition hypsométrique des bassins versants de la Ngoko, du Dja et de la Boumba à Moloundou

a)-Ngoko à Moloundou				
Tranche d'altitude(m)	superficie partielle(km2)	% partiel de la superf. totale	superficie cumulée(km2)	% cumulé à la superf. totale
800-900	2.5	0	2.5	0
700-800	137.5	0.2	140.5	0.2
600-700	31327	46.7	31468	46.9
500-600	24450	36.5	55917	83.4
354-500	11157	16.6	67075	100
b)-Dja à Moloundou-SOTREF				
800-900	2.5	0	2.5	0
700-800	100	0.3	102.5	0.3
600-700	25330	63.8	25432	64
500-600	9832.5	24.8	35265	88.8
360-500	4450	11.2	39715	100
c)-Boumba à Moloundou-Bac				
700-800	37.5	0.14	37.5	0.14
600-700	5997.5	22	6035	22.1
500-600	14617	53.6	20652	75.8
400-500	6050	22.2	26702	98
359-500	558	2.05	27260	100

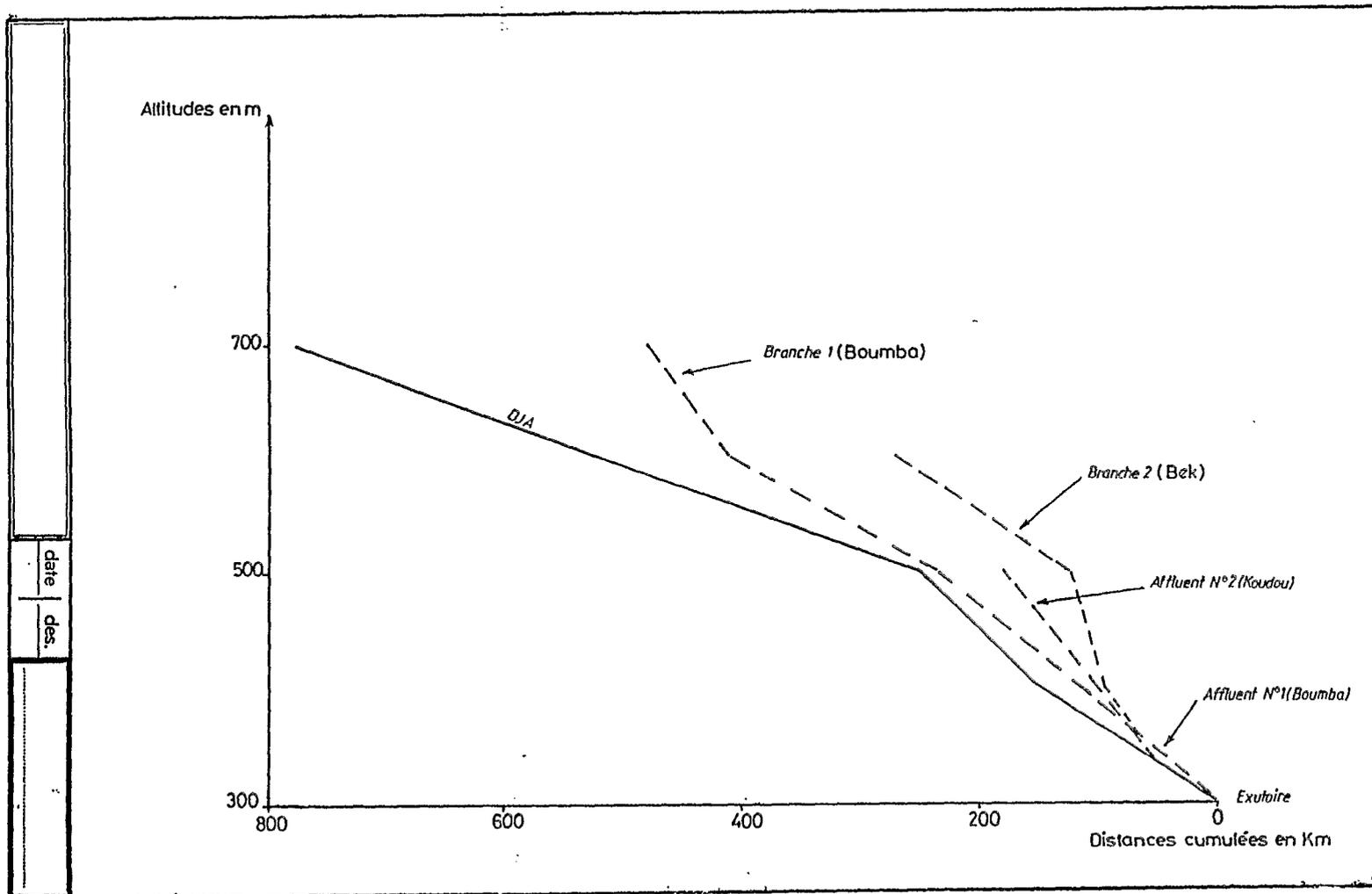


Figure 1-5 : Profil en long de la Ngoko à Moloundou et de ses principaux affluents

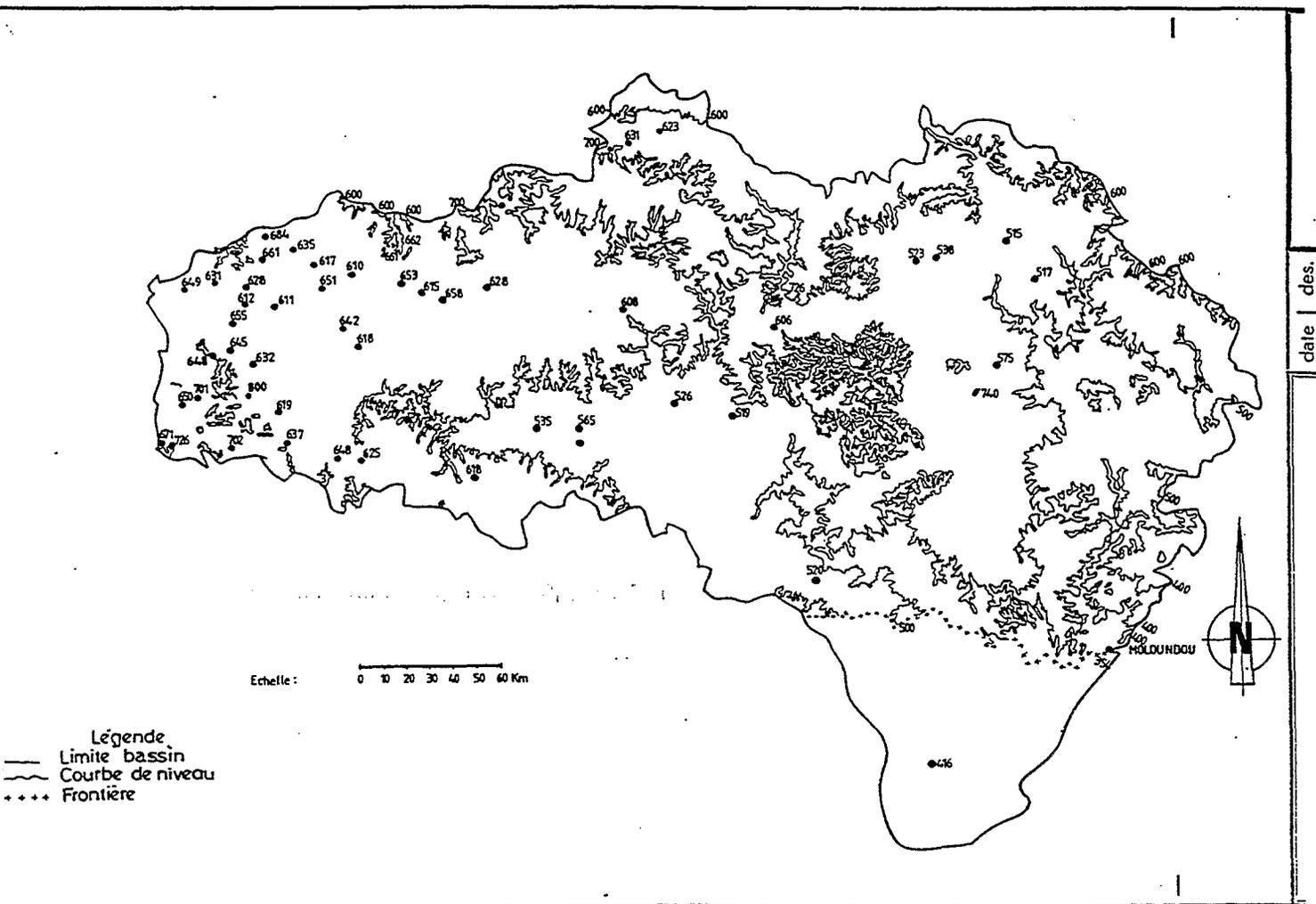


Figure 1-6 : Bassin versant de la Ngoko à Moloundou - Relief

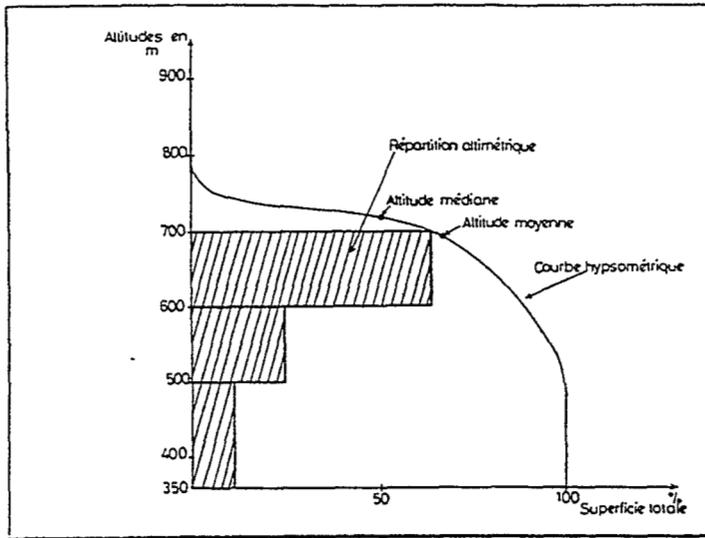
Les parties hautes du bassin, d'altitude comprise entre 700 et 900 m, couvrent une superficie de 140 km^2 , soit 0,2 % de la superficie totale du bassin versant. La Ngoko prend naissance dans cette tranche d'altitude, à la cote 760 m au sud d'Abong-Mbang et au Nord de Lomié, sous le nom de Dja. Elle coule en direction de l'ouest. La Boumba, affluent en rive gauche de la Ngoko, prend sa source également aux environs de Lomié - au nord-ouest de celle du Dja -, mais coule dans une direction opposée à celle du Dja, vers l'est.

Ces parties hautes du bassin vont influencer très peu les écoulements et les processus d'érosion en raison de la faible superficie qu'elles occupent.

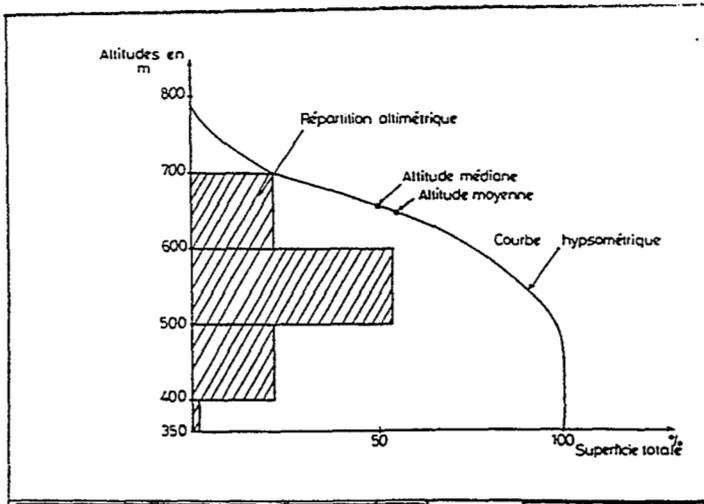
Le Dja, dans son parcours vers l'ouest, reste parallèle au Nyong. A Somalomo où il se trouve à l'altitude 617 m, sa longueur est de 190 km et sa pente moyenne de 0,75 m/km. En aval de son confluent avec la Lobo situé à 70 km de Somalomo, il fait une rotation de 180° et coule dès lors en direction opposée à la première, vers l'est. Deux thèses s'opposent au sujet de l'interprétation de ce coude que fait le Dja au cours de son trajet : l'une soutient que le Dja a été capturé par le Nyong et l'autre le contraire. Cette discussion ne faisant pas l'objet de nos propos, nous ne saurions nous y attarder davantage, sinon pour signaler au passage que la zone ainsi circonscrite par le Dja lors de ce changement de direction est appelée boucle du Dja. Les altitudes moyennes des bassins du Dja (692 m), de la Boumba (649 m) et de la Ngoko (675 m) sont comprises ces tranches d'altitudes de 600 à 700 m. Celles-ci s'étendent sur près de 64 % de la superficie du bassin du Dja, soit $25\,330 \text{ km}^2$. Par contre, elles sont faiblement représentées dans celui de la Boumba où elles occupent 22 % de la superficie, soit $6\,000 \text{ km}^2$.

Globalement, près de la moitié de la superficie du bassin de la Ngoko (46,7 %, soit $31\,327 \text{ km}^2$) est constituée par des reliefs d'altitudes moyennes. Cette partie doit avoir une influence considérable sur les régimes hydrologiques et ceux des transports de matériaux, notamment en favorisant les précipitations et en limitant l'évaporation.

Après un parcours de 460 km, le Dja, dont la pente moyenne est de 0,49 m/km, coule à 533 m d'altitude à Bi. La Boumba, - dans cette classe d'altitudes comprises entre 500 et 600 m -, coule à la cote 500 m à Biwala où sa longueur est de 310 km et sa pente moyenne de $0,90 \text{ m/km}^2$. Cet ensemble représente 25 % de la superficie du bassin du Dja, soit $9\,833 \text{ km}^2$ et plus de la moitié (53,6 %) de celle du bassin de la Boumba, soit $14\,617 \text{ km}^2$.



a - Dja à Moloundou - Sotref



b - Boumba à Moloundou - Bac

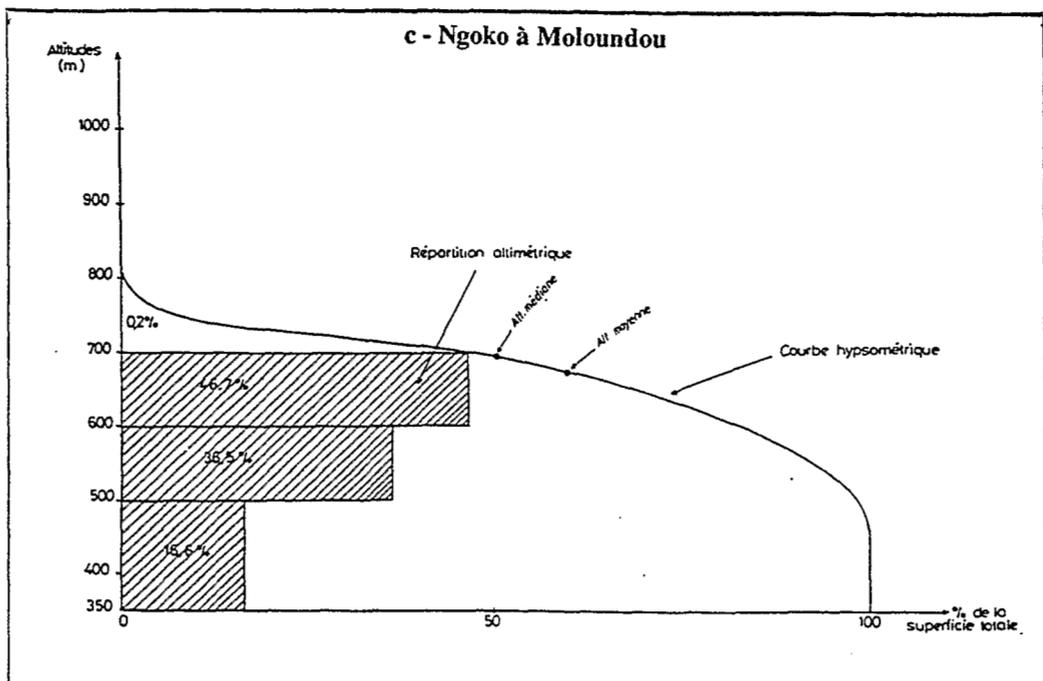


Figure 1-7 : Répartition altimétrique et courbe hypsométrique du bassin versant de la Ngoko à Moloundou

Ainsi donc, sur 36,5 % de la superficie du bassin versant de la Ngoko, soit 24 450 km², s'étend la classe d'altitudes de 500 à 600 m. On les retrouve au centre et à l'est du bassin, en particulier dans les sous-bassins de la Boumba que sont la Bidjar, la Bangué et la Lokomo en rive gauche. On peut donc s'attendre, en l'absence des hautes et moyennes altitudes dans ces sous-bassins, à une infiltration intense, donc à une altération plus prononcée.

Avec la tranche d'altitudes de 350 à 500 m, on entre dans la cuvette congolaise où on retrouve 17 % de la superficie du bassin de la Ngoko, soit 11 157 km². Sur le Dja en aval de Bi, la cote 384 m correspond au sommet des chutes de Nki dont la hauteur est de 29 m. Elles sont suivies 30 km plus loin par celles de Cholet qui marquent l'amont de la section navigable de ce fleuve à partir de Ouessou. A Moloundou-SOTREF, le Dja qui a déjà parcouru 800 km coule à 360 m d'altitude. Sa pente moyenne est de 0,53 m/km et sa densité de drainage de 0,42 km/km². La Boumba, après avoir reçu la Bek en rive droite, coule à 359 m d'altitude à Moloundou-Bac et a une longueur de 530 km. Sa pente moyenne est de 0,79 m/km et sa densité de drainage de 0,38 km/km². A 1 500 m en amont de Moloundou-Ville, le Dja reçoit la Boumba et prend alors le nom de la Ngoko qu'il garde jusqu'à son confluent avec la Sangha en amont de Ouessou. Sa densité de drainage est de 0,40 km/km².

Cette tranche d'altitudes comprises entre 350 et 500 m, bien que entrecoupée par des chutes sur le Dja, correspond aux vallées du bassin de la Ngoko dans lesquelles d'éventuels déficits pluviométriques peuvent être enregistrés. Ce sont généralement de vastes zones de marécages inondables, dont les influences sur les écoulements et les transferts de matières sont multiples (écrêtement des crues, évaporation intense, piégeage des matériaux issus des versants).

Dans l'ensemble, le bassin de la Ngoko est tourné vers la cuvette congolaise grâce à ses deux affluents, le Dja et la Boumba. L'aplanissement du relief, - interrompu par quelques sommets - et son inégale répartition entre les deux principaux sous-bassins, le Dja et la Boumba peuvent influencer les régimes pluviométriques, hydrologiques et de transport de matières. Sur les parties hautes, on peut s'attendre à une pluviométrie excédentaire et à une érosion plus prononcée tandis que les vastes vallées peuvent être les sièges des inondations, de l'évaporation et du piégeage des substances en provenance des versants.

Le Nyong supérieur

Le fleuve Nyong, dont le profil en long est représenté sur la figure 1-8, prend également sa source dans la région de Lomié comme le Dja et la Boumba, à 690 m d'altitude à l'est d'Abong-Mbang. A l'opposé de ces deux cours d'eau, le Nyong coule suivant une direction WSW. Il draine la partie septentrionale de la zone étudiée, d'altitude comprise entre 600 et 800 m. La courbe hypsométrique, réalisée à partir du tableau 1-5, est représentée sur la figure 1-9. Les caractéristiques morphométriques (cf tableau 1-2), sont voisines de celles du bassin versant de la Ngoko. L'indice global de pente varie de 0,68 à Akonolinga à 0,41 à Mbalmayo tandis que l'indice de pente de Roche varie de 0,0314 à Akonolinga à 0,0225 à Mbalmayo. Ces valeurs traduisent un relief à faible pente. L'indice de compacité est de 1,26 à Akonolinga et de 1,37 à Mbalmayo. Ils indiquent une forme allongée du bassin versant.

La tranche d'altitudes supérieures à 720 m, à l'intérieur de laquelle on trouve quelques reliefs isolés culminant par endroit à 1 200 m (Mont Zomo), correspond aux parties les plus hautes du bassin. Sur le bassin du Nyong à Akonolinga, elle représente 6 % de la superficie, soit 418 km². Sur celui du Nyong à Mbalmayo, elle représente 8 % de la superficie, soit 949 km². Après avoir reçu en rive gauche le Long Mafok, fleuve drainant la région de Messamena, le Nyong coule à 644 m d'altitude à Akonolinga. Sa longueur est de 186 km et sa pente moyenne de 0,25 m/km. En aval de cette station, elle reçoit en rive droite la Mfoumou et coule à 634 m d'altitude à Mbalmayo.

On doit noter que les pentes faibles des versants et du cours du Nyong vont induire des écoulements lents en général, et en particulier des inondations dans les plaines pendant les hautes eaux. Dans la région d'Abong-Mbang, la faible pente et la végétation aquatique ont entraîné la disparition du cours du Nyong si bien qu'en hautes eaux les inondations s'étendent sur des centaines de mètres de largeur. Comme nous l'avons souligné dans le cas du bassin de la Ngoko, ces vastes zones marécageuses sont les sièges d'une évaporation intense et de dépôts des matériaux issus des versants.

Le bassin du Ntem

Le fleuve Ntem, dont le profil en long est représenté sur la figure 1-10, prend sa source à 1 100 m d'altitude au Gabon et coule dans la direction WNE. L'absence d'informations dans les parties gabonaise et guinéenne correspondant respectivement à 32 et 7 % de la superficie totale du bassin a rendu impossible le calcul des caractéristiques morphométriques. Les quelques informations disponibles indiquent de

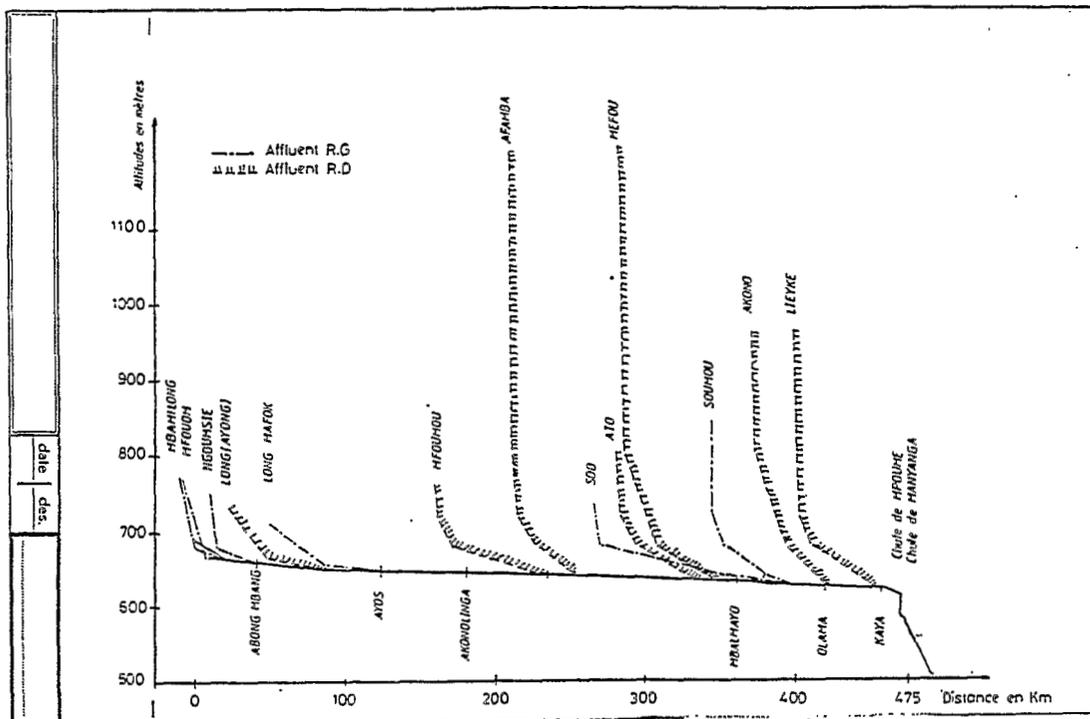


Figure 1-8 : Profil en long du Nyong - Cours supérieur (d'après OLIVRY, 1979)

Tableau 1-5 : Hypsométrie des bassins versants du Nyong supérieur

a)- AKONOLINGA				
Tranche d'altitude (m)	Superficie partielle (km ²)	% partiel de la superf. totale	Suprficie cumulée (km ²)	% cumulé à la superf. totale
> 760	83.5	1	83.5	1
720-760	417.5	5	501	6
680-720	3674	44	4175	50
640-680	4175	50	8350	100
b)- MBALMAYO				
> 760	135.6	1	135.6	1
720-760	948.8	7	1084.4	8
680-720	6099.7	45	7184.2	53
640-680	6370.9	47	13555	100

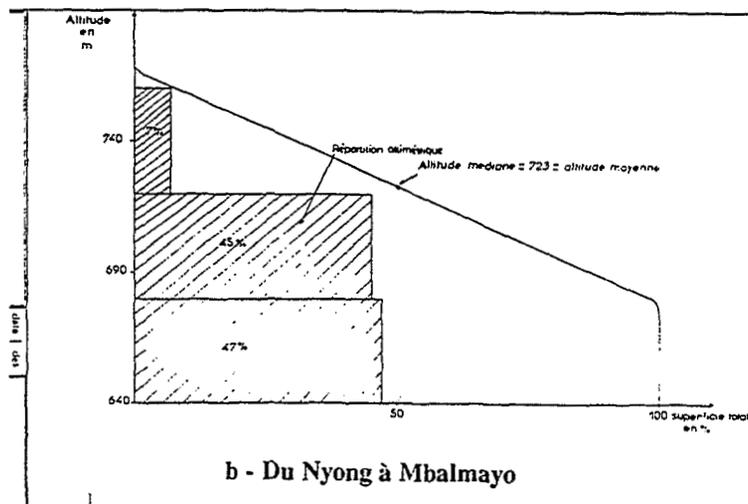
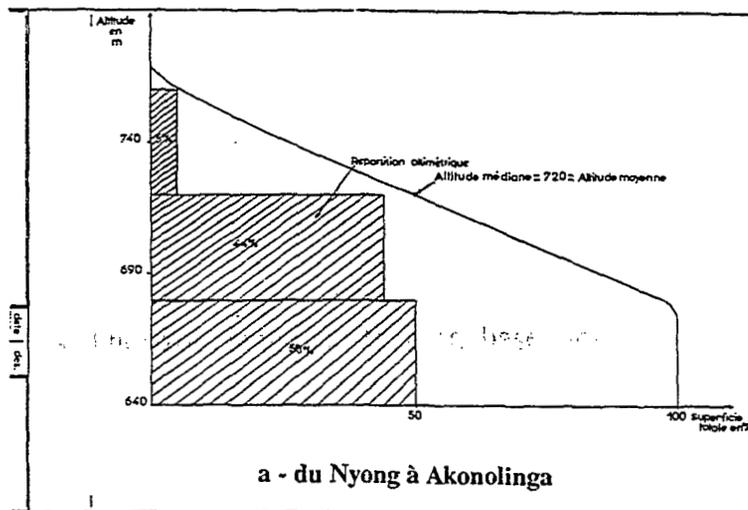


Figure 1-9 : Courbe hypsométrique et altimétrique

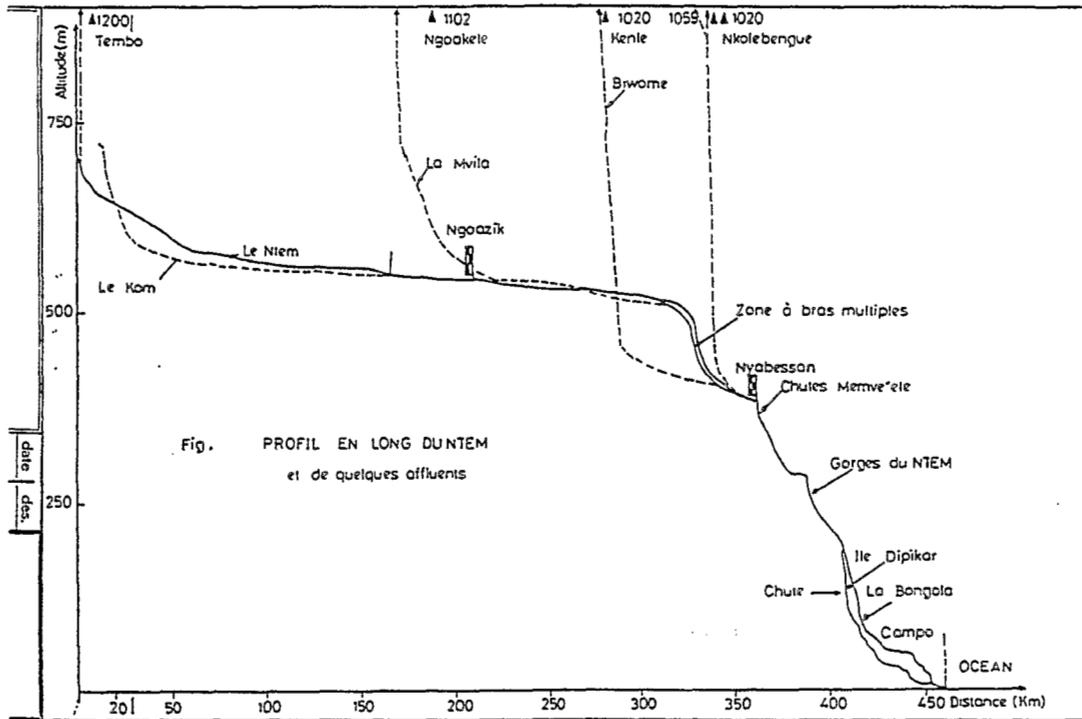


Figure 1-10 : Profil du Ntem (d'après OLIVRY, 1979)

faibles indices de compacité (1,14 à Ngoazik et 1,16 à Nyabessan), donc une forme compacte du bassin aux deux stations. On signale également que le bassin est limité au sud par des reliefs atteignant 1 200 m d'altitude (Mont Tembo au Gabon) et au nord par des pointes de plus de 1 000 m qui s'alignent d'Ebolowa à Akom II (OLIVRY, 1986). On pense que ces parties hautes du bassin peuvent favoriser la pluviosité et l'érosion hydrique.

A sa sortie du Gabon, le Ntem s'infléchit vers l'ouest et constitue la frontière entre le Cameroun et le Gabon sur 30 km. A Ngoazik où il a déjà parcouru 210 km, il coule à 535 m d'altitude. La pente moyenne est de 2,68 m/km. En aval de cette station, il reçoit en rive droite la Mboro et la Mvila et en rive gauche le Rio Gouro en provenance de la Guinée Equatoriale. En atteignant Nyabessan, le Ntem passe de 518 m d'altitude dans la région de Ma'an à 384 m ; sa longueur est de 360 km et sa pente de 1,99 m/km. En aval de Nyabessan, il reçoit en rive droite la Ndjo'o et la Biwoumé avant d'être entrecoupé par les chutes de Menve'elé. Après avoir franchi ces chutes, le Ntem se divise en deux bras - Ntem et Bongola -, qui créent l'île de Dipikar. C'est à 40 km, dans l'estuaire de Rio Campo, que ces deux bras se réunissent avant de se jeter dans l'océan 8 km plus loin.

Il se dégage de ce qui précède que la région de Ma'an se détache des autres zones du bassin du Ntem. En effet, elle constitue une vaste zone marécageuse semblable à celle du Nyong et des basses altitudes de la Ngoko. Elle peut donc freiner les écoulements, piéger les matériaux issus des hauts reliefs du Gabon et favoriser l'évaporation.

Dans l'ensemble, les bassins versants constituant la bande méridionale du plateau sud-camerounais ont une forme allongée, exception faite du bassin du Ntem dont la forme est plutôt compacte. Ils forment une pénéplaine convexe, dissequée par de petites collines séparées par des vallées à fond plat où on observe de vastes zones de marécages inondables. La topographie plane des lits des cours d'eau est par endroit interrompue par des rapides ou des chutes comme celles de Cholet et de Nki sur le Dja et celles de Menve'elé sur le Ntem. Ces collines isolées peuvent favoriser localement la pluviosité. En revanche, elle est à tendance déficitaire dans les vallées qui les séparent. Parallèlement, l'écoulement et l'érosion vont être plus prononcés sur les collines que dans les vallées qui amortissent les crues, les étalent sur de grandes surfaces et favorisent l'évaporation. Ces plaines marécageuses inondables peuvent également piéger les substances en provenance des parties hautes des bassins, suite à la dégradation des sols et à l'altération du substratum géologique, objet du prochain sous-chapitre.

1.2.2. LA GEOLOGIE

Les roches-mères du bassin versant à travers lesquelles les eaux de pluie percolent influencent considérablement la composition chimique des eaux fluviales. Les connaissances sur la description fine des unités lithologiques du substratum rocheux de notre zone d'intérêt sont encore très limitées; En effet, en dehors des travaux de LASSERRE et al (1977), les seuls travaux récents sont ceux réalisés par le Programme des Nations Unies pour le Développement-PNUD (1987) dans le cadre du Projet Minier Sud-Est, qui ont abouti à la minute de la carte géologique de ce secteur englobant la presque totalité du bassin versant de la Ngoko. Dans le souci de mieux différencier les unités lithologiques de ce bassin qui est l'objet principal du présent travail, nous avons opté pour la présentation de la minute de la carte géologique dressée par le PNUD (figure 1-11) et de celle de LASSERRE limitée aux bassins versants du Nyong et du Ntem (figure 1-12). Dans leur globalité, ces deux cartes mettent en évidence un substratum géologique des bassins constitué essentiellement des formations du complexe de base datées du précambrien.

1.2.2.1. Les unités lithologiques de la zone étudiée

Les travaux du PNUD s'inspirent de ceux de LASSERRE qui avaient déjà permis de noter qu'on retrouve les principales séries géologiques - complexe calco-magnésien du Ntem, série de Mbalmayo-Mbengbis, série du Dja Inférieur et série du Dja Supérieur - dans les trois bassins versants. Les investigations du PNUD dans le sud-est du Cameroun ont abouti à une description plus détaillée de ces différentes séries dans le bassin de la Ngoko. Dans le tableau 1-6 sont décrites les différentes unités des deux zones structurales du Cameroun - le craton du Congo ou groupe du Ntem - et la zone mobile ou chaîne panafricaine, présentées de la plus ancienne vers la plus récente. Nous avons déterminé les proportions des différentes roches par bassin versant (tableau 1-7 et figures 1-13). Leur description constitue l'essentiel des lignes qui suivent.

Tableau 6-1 : Principales unités lithologiques des zones structurales selon le PNUD (1987)

PRINCIPALES UNITES LITHOLOGIQUES d'après le PNUD, 1987		
UNITE STRUCTURALE	DIVISION	PERIODE
Craton du Congo	Unité du Ntem	
ou	Unité de l'Ayina	Précambrien D
Groupe du Ntem	Unité de Mbalam	
	Gneiss et micaschistes (1ère couverture)	
Zone mobile	Série Mbalmayo-Mbengbis ou de Yokadouma	
ou	ou séries intermédiaires (2è couverture)	Précambrien B
Chaîne panafricaine	Série du Dja inférieur (3è couverture)	
	Complexe tillitique	
	Série du Dja supérieur	Précambrien A
	Formations horizontales	Crétacé

Le groupe du Ntem ou craton du Congo

Les formations du groupe du Ntem couvrent environ 4 % de la superficie du bassin de la Ngoko, soit 2 744 km² se rattachant aux bassins versants du Dja à Bi (8 % de la superficie) et du Dja à Moloundou-SOTREF (7 % de la superficie). Il est constitué de trois unités datées du Précambrien D. Ce sont les unités du Ntem, de l'Ayina et de Mbalam qui constituent la quasi-totalité du bassin du Ntem dont la série a hérité du nom.

* L'unité du Ntem est constituée de roches calco-magnésiennes de caractère charnockitique, marquées par la présence d'orthopyroxène (hypersthène) à l'extrémité du craton du Congo. Ce sont des gneiss et des leptynites affectés ultérieurement par un métamorphisme regressif au cours duquel certaines zones ont été recristallisées dans le faciès amphibolitique - notamment dans la région de Mintom - alors que d'autres sont restées intactes comme ceux de la région d'Akontangan (MAUZIROT et al, 1986). On note aussi la présence des faciès intrusifs de syénites, granites porphyroïdes à biotite, diorites, monzonites et gabbros.

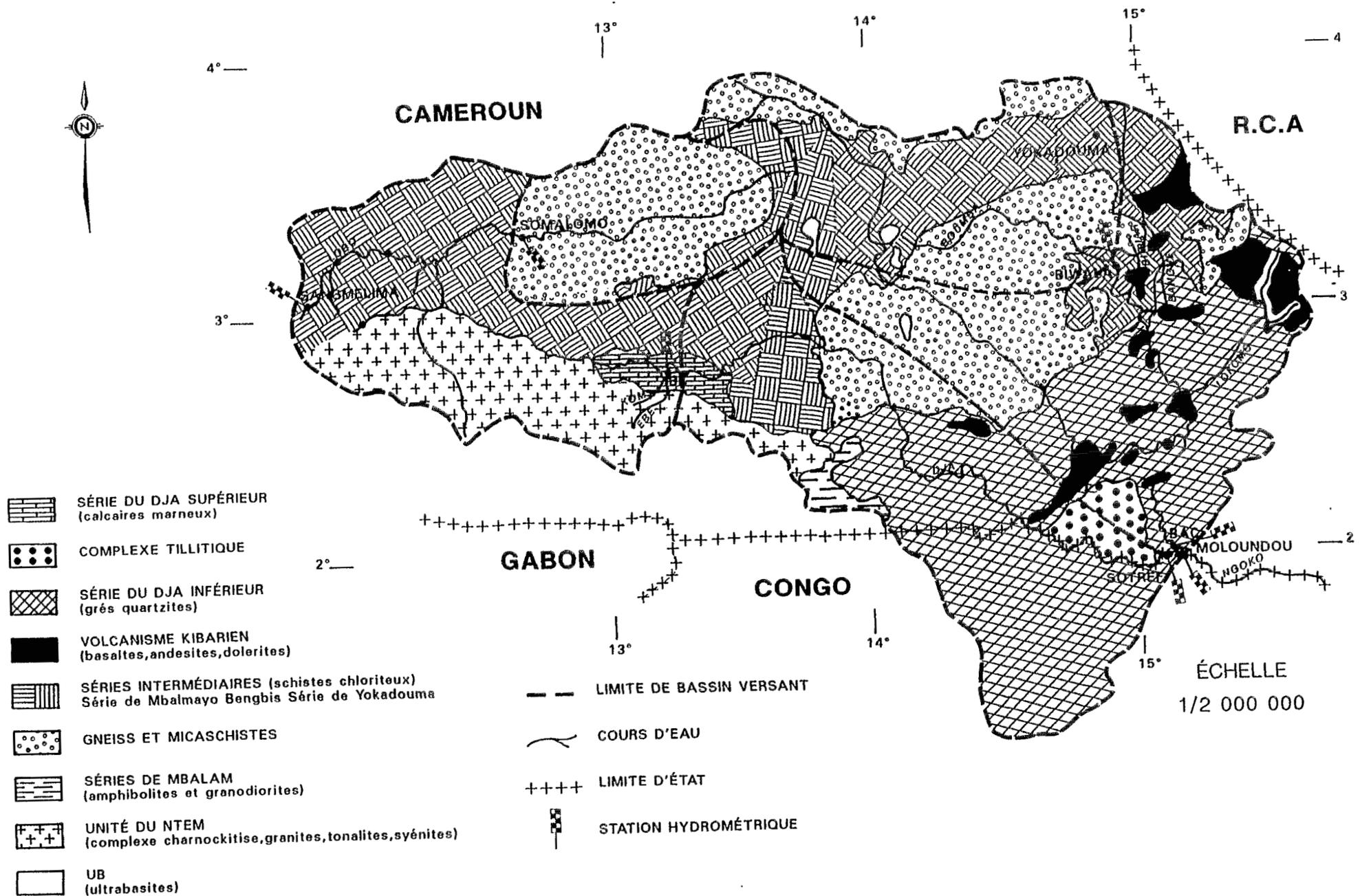


Figure 1-11 : Unités lithologiques par sous-bassin versant du système Dja-Ngoko, selon le PNUD (1987), modifié.

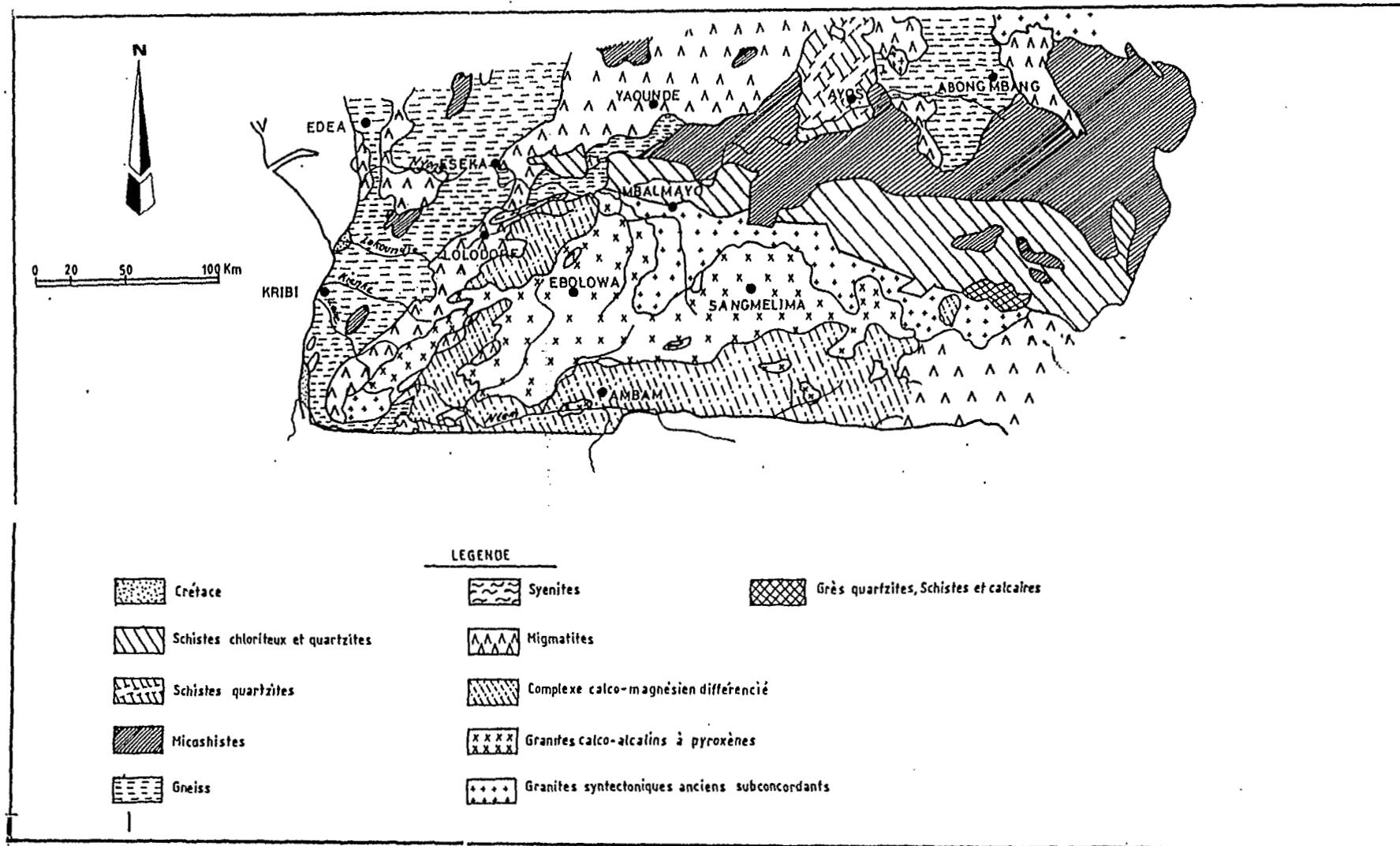
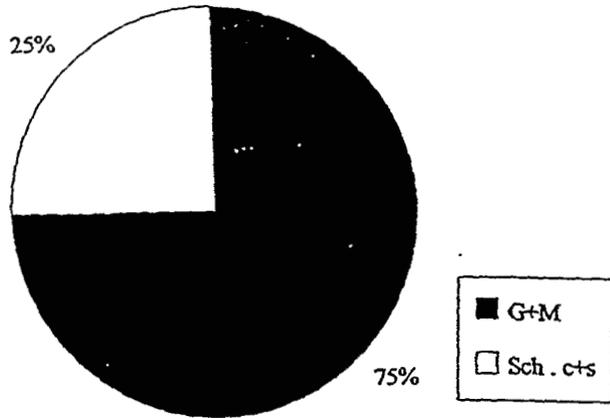


Figure 1-12 : Géologie des bassins du Nyong et du Ntem (d'après LASSERE et al., 1977)

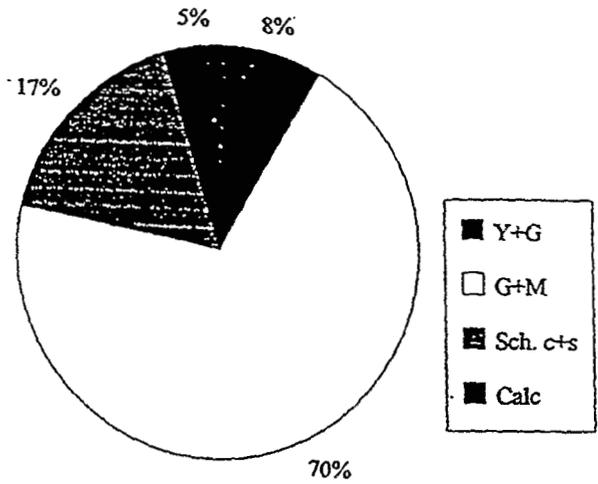
**Tableau 1-7 : Géologie du bassin versant de la Ngoko
Répartition des unités lithologiques par sous-bassin**

Bassin	Stations	Groupe du Ntem		Sér. paragneissique		Sér. Mbalmayo-Mbengbis		Série Dja inférieur		Compl andésito-doléritique		Sér. Dja supérieur		Compl tillitique		
		granites	gneiss	gneiss	micasc.	sch.chlor.et	sériciteux	pélites grès	quartzites	andésites	dolérites	basaltes	calcaires	marneux	tillites	
		s	%	s	%	s	%	s	%	s	%	s	%	s	%	
Dja	Somalomo			4100	75	1400	25									
Dja	Bi	1568	8	13660	70	3370	17					940	5			
Dja	Moloundou-SOTREF	2744	7	15915	40	7150	18	11368	28,50	392	1	1333	3,50	784	2	
Boumba	Biwala			6200	60	4110	40									
Boumba	Moloundou-Bac			9800	36	6530	23,5	8624	31,6	2352	8,6					
Ngoko	Moloundou	2744	4,1	25715	38,3	13580	20	19992	29,8	2744	4,1	1333	2	784	1	
Légende :																
s = superficie en km ² ; Sch. chlor. : Schistes chloriteux ; micasc. : micascistes																
Compl. : Complexe ; Sér. : Série																

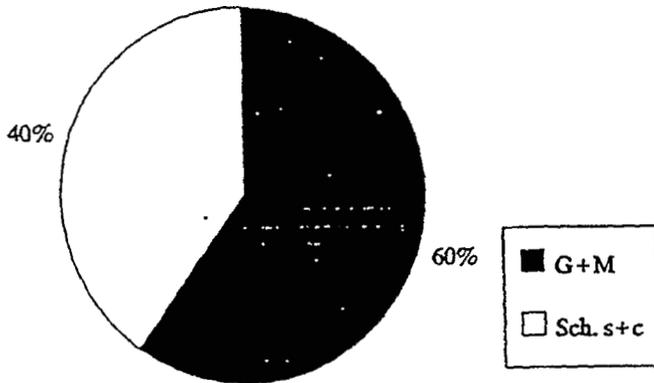
Dja à Somalomo



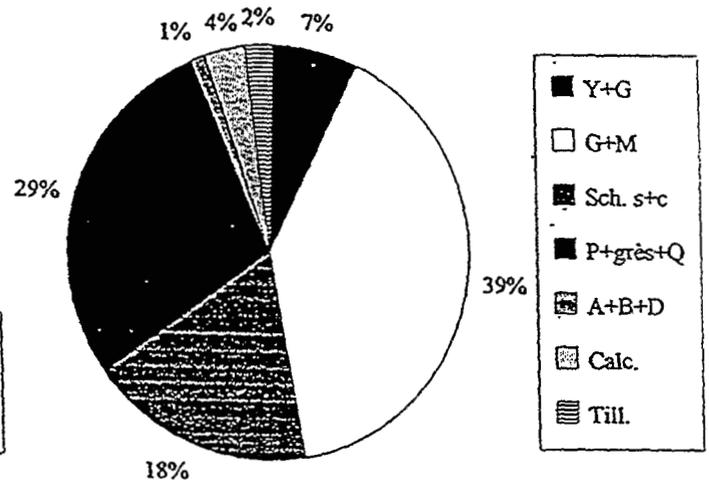
Dja à Bi



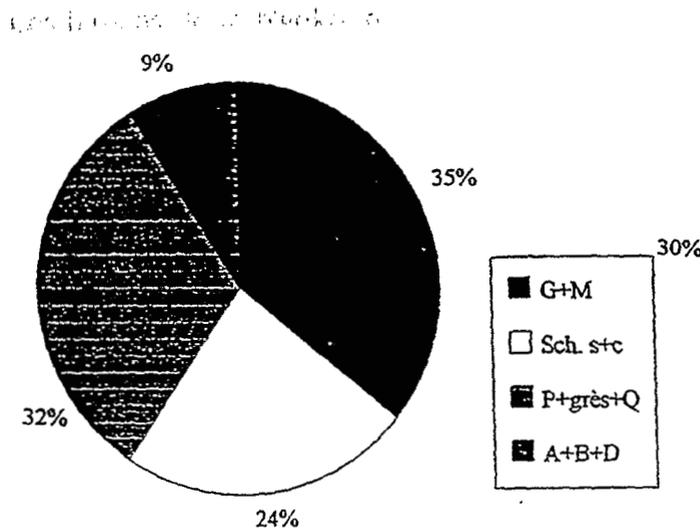
Boumba à Biwala



Dja à Moloundou-SOTREF



Boumba à Moloundou-Bac



Ngoko à Moloundou

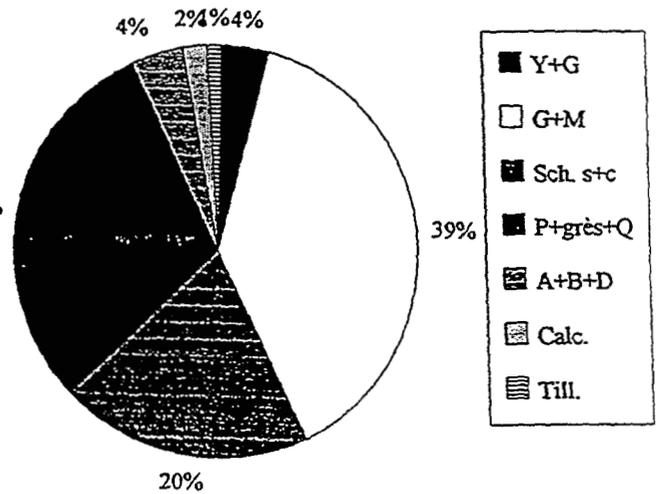


Figure 1-13 : Répartition des roches par bassin versant

Légende :

G + M : Gneiss et micaschistes

Y + G : Granite et gneiss

Sch.c. + s : Schistes sériciteux et chloriteux

Till. : Tillites

P + grès + Q : Pélites, grès et quartzites

A + B + D : Andésites, basaltes et dolérites

Calc. : Calcaires

* Le caractère lithologique de l'unité de l'Ayina est très peu différent de la précédente. Elle affleure au sud de Mintom. Elle comprend des roches cristallophylliennes - leptynites, les amphibolites et les gneiss -, et des roches intrusives notamment des syénites, granites et tonalites.

* L'unité de Mbalam diffère des deux précédentes par son métamorphisme moins intense, par l'abondance des amphibolites et des itabirites. C'est une série volcano-sédimentaire qui s'étale le long du bassin géosynclinal de la série du Dja inférieur. Les roches à caractère intrusif sont les granodiorites et les serpentinites. Les itabirites qui forment la plupart des roches ferrifères sont marquées par une alternance d'oxydes de fer (hématite) et de quartz.

D'une manière générale, le groupe du Ntem est formé du complexe charnockitique et des formations cristallophylliennes. Ils s'étendent sur la totalité du bassin du Ntem et à l'ouest du bassin de la Ngoko, dans la région de Mintom. On pense que les teneurs en éléments dissous seront faibles dans les zones ci-dessus suite à la faible vulnérabilité des roches-mères à l'altération chimique.

La zone mobile ou chaîne panafricaine

La limite entre le craton du Congo et la chaîne panafricaine n'étant pas nette, ces deux ensembles ne sont surtout différenciés que par l'âge. Le premier est du Précambrien D alors que la seconde est du Précambrien C. La chaîne panafricaine comprend également le complexe tillitique et la série du Dja supérieur qui sont du Précambrien A, de même que les formations horizontales datant du Crétacé. Le substratum géologique se répartit en plusieurs séries dont les détails sont donnés ci-dessous.

* La série paragneissique micaschisteuse, comme l'indique son nom, est constituée essentiellement de gneiss et de micaschistes. Elle s'étend sur 25 715 km², soit 38 % de la superficie du bassin de la Ngoko répartie sur 40 % de la superficie du bassin du Dja-SOTREF et 36 % de la superficie de la Boumba-Bac. En amont de Bi et Somalomo sur le Dja, elle occupe respectivement 70 % et 75 % des superficies de chacun des bassins. Le sous-bassin du Dja à Djaposten (772 km²) est constitué en totalité des gneiss et des micaschistes. Sur le bassin de la Boumba à Biwala, ces formations couvrent 60 % de la superficie.

* Les formations géologiques des séries intermédiaires font partie de celles de

Mbalmayo-Mbengbis ou de Yokadouma. Il s'agit essentiellement des dépôts pélitiques transformés en schistes, micaschistes et quartzites s'étendant sur 13 580 km², soit 20 % de la superficie du bassin de la Ngoko. On les retrouve sur la bande SW-NE dans la région de Lomié où le Dja et la Boumba prennent leur source, à des proportions respectives de 25 % en amont de Somalomo et de 40 % en amont de Biwala. Le bassin du Dja à Bi est constitué à 17 % de la série de Mbalmayo-Mbengbis, celui du Dja-SOTREF à 18 % et celui de Moloundou-Bac de 23,5 %. Les sous-bassins de l'Afamba à Sangmélina (191 km²), de la Lobo à Kombé (730 km²) et à Assok (2 482 km²) sont constitués en grande partie des schistes et micaschistes. Sur le bassin du Nyong, les schistes sériciteux affleurent en amont d'Akonolinga et les schistes chloriteux dans la région de Mbalmayo.

* La série du Dja inférieur comprend : un niveau inférieur constitué de grès conglomératique et arkosique et un niveau supérieur constitué de pélites qui renferment des niveaux gréseux et quartzites, de rares dolomies et des jaspes. Elle s'étend sur près de 20 000 km², soit 30 % de la superficie du bassin de la Ngoko. La répartition sur les sous-bassins donne 28,5 % de la superficie du Dja à la SOTREF, soit 11 370 km² et 31,6 % de celle de la Boumba au Bac, soit 8 625 km². Les intrusions de dolérites et de laves, en forme de filons et recouvrant les formations antérieures complètent cette vaste entité. Les andésites et les dolérites affleurent principalement dans les sous-bassins de la Bidjar à Bandekok (161 km²), de la Lokomo à Lokomo (2 600 km²) et partiellement dans celui de la Bangué à Bangué (3 265 km²). Globalement, le complexe andésito-doléritique couvre 400 km² sur le bassin du Dja et 2 350 km² sur celui de la Boumba, soit au total de 2 750 km² sur la Ngoko (4 % de sa superficie). Cette série étant constituée de grès et de roches volcaniques qui sont généralement des roches tendres, on pense que les eaux qui les drainent vont avoir de fortes teneurs en éléments dissous.

* Le complexe tillitique est constitué des conglomérats gris-verdâtres. L'absence de granoclassement, la forme variée des éléments anguleux et arrondis et la présence des galets à faces planes sont expliquées par leur origine glaciaire. Les tillites reposent en discordance sur la série du Dja inférieur. Ils affleurent à Moloundou et à Béla-Lipongo. Ils occupent une superficie d'environ 800 km², soit 1 % du bassin versant de la Ngoko, représentée uniquement sur le Dja à la SOTREF. On pense que leur faible extension ne peut pas influencer de façon significative la composition chimique des eaux.

* La série du Dja supérieur est caractérisée par une abondance des formations carbonatées et schisteuses. Les calcaires marneux se trouvent à une dizaine de mètres de profondeur en petites bandes, dans deux sous-bassin du Dja, l'Ebé à

Zoébéfam (166 km²) et le Kon à Mintom (47 km²), situé entre Mintom et Bi. Au total, les calcaires occupent 940 km², soit 5 % de la superficie du Dja à Bi. Sur l'ensemble du bassin de la Ngoko, ils s'étendent sur 1 333 km², soit 2 % de la superficie exclusivement dans le bassin du Dja à la SOTREF. Ce sont des roches très vulnérables à l'altération chimique. Mais leur faible extension dans le bassin peut réduire considérablement leur influence sur la qualité chimique des eaux du Dja.

* Les formations tabulaires détritiques démantelées affleurent à l'est de la route Yokadouma-Moloundou et dans la rivière Libon Mbolo. La redistribution des débris ou leur reprise dans les réseaux hydrographiques peut donner des renseignements sur la distribution des diamants dans le sud-est Cameroun.

En ce qui concerne le bassin de la Kadey, le substratum rocheux est constitué du complexe de base. Il regroupe des formations déjà décrites sur la Ngoko, notamment les gneiss, les micaschistes, les migmatites et les granites syntectoniques. Compte tenu de la dureté de ces roches, les eaux de la Kadey seront peu minéralisées.

1.2.2.2 Minéralogie, aperçu structural et gîtologie des formations géologiques du bassin de la Ngoko

L'analyse minéralogique des fonds de battée, des alluvions fines, des sols et des roches par le PNUD permet de distinguer les minéraux par unité lithologique ainsi qu'il suit :

- Groupe du Ntem : grenat, tourmaline, disthène et monazite ;
- Gneiss et micaschistes : disthène, épidote, grenat et monazite ;
- Séries intermédiaires ou de Mbalmayo-Mbengbis ou de Yokadouma : disthène, staurotide, amphibole ;
- Séries du Dja inférieur : mélange des stocks minéraux des deux précédentes unités avec de fortes concentrations en ilménite, leucoxène et oxydes de fer ;
- Complexe basique : Ilménite, épidote, amphibole et pyrite ;
- Complexe tillitique : mélange de divers minéraux lourds.

La position en écailles (charriage) des formations intermédiaires permet d'admettre que l'avancée vers le nord-est du môle cratonisé du complexe calco-magnésien du Ntem a été marquée par la subduction de la plaque du craton du Congo sous la plaque de l'Adamaoua ; auquel cas les roches basiques et ultrabasiqes affleurant entre le craton et les formations intermédiaires proviendraient de grande profondeur. C'est au niveau des failles qui s'allongent au contact du groupe Ntem-couverture qu'on trouve une forte minéralisation. Quatre groupes métallogéniques ont été déterminés :

- Les minéralisations liées au processus de la métasomatose potassique suivie d'une phase hydrothermale (U, Au) ;
- les minéralisations dues aux venues basiques et ultrabasiques : Ni, Co, Cr, Au ;
- les concentrations résiduelles dues aux processus d'altération superficielles des roches ultrabasiques (Co, Ni) et des quartzites ferrugineux ;
- les minéralisations d'origine détritique telles que des placers : or, diamant, rutile, monazite.

D'une manière générale, les travaux du PNUD dans le sud-est du Cameroun permettent de différencier les roches du socle du bassin versant de la Ngoko. En effet, à l'intérieur des grands ensembles décrits par LASSERRE, ces travaux font ressortir la présence des grès, des quartzites, du complexe andésito-doléritique, des formations carbonatées et des tillites. Dans leur globalité, ces roches sont vulnérables à l'altération chimique. Il est donc possible que les eaux du Dja et de la Boumba qui les drainent soient plus chargées en substances dissoutes que celles du Nyong et du Ntem. Mais leur faible extension géographique dans la bassin par rapport à celle des micaschistes, des gneiss et du complexe calco-alcalin peut réduire leur influence sur la composition chimique des eaux de la Ngoko. En tout état de cause, nonobstant les détails ainsi apportés, on doit noter que les types de sols, objet du sous-chapitre ci-dessous, résultent de l'altération des principales unités lithologiques qui dominant dans les différents bassins versants.

1.2.3. LES SOLS

Les sols conditionnent, par leur nature et leur degré de perméabilité, les écoulements. Ils constituent entre autre la source des substances particulières que les écoulements véhiculent. Devant ce double intérêt, on aurait souhaité présenter dans cette étude des informations assez détaillées sur leurs organisations et leurs propriétés dans les bassins étudiés. Or, il s'avère que les investigations des Pédologues dans la forêt dense camerounaise ont permis d'améliorer les connaissances sur la minéralogie et la structure des sols mais beaucoup moins pour une représentation de l'organisation des versants. Dans les lignes qui suivent, nous tentons de faire une synthèse à partir des travaux de SEGALIN et al (1957) et (1959) ; SEGALIN (1967) ; MARTIN (1967) ; HUMBEL (1976) ; MARTIN et VOLKOFF (1990) et à partir de l'Encyclopédie du Cameroun (1981) d'où a été extraite la carte de la figure 1-14. Les sols des bassins étudiés appartiennent aux groupes des sols ferrallitiques

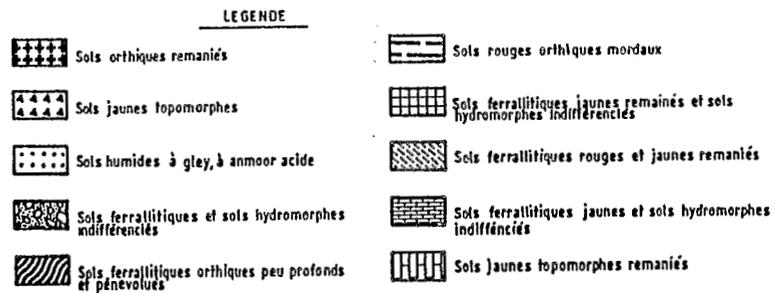
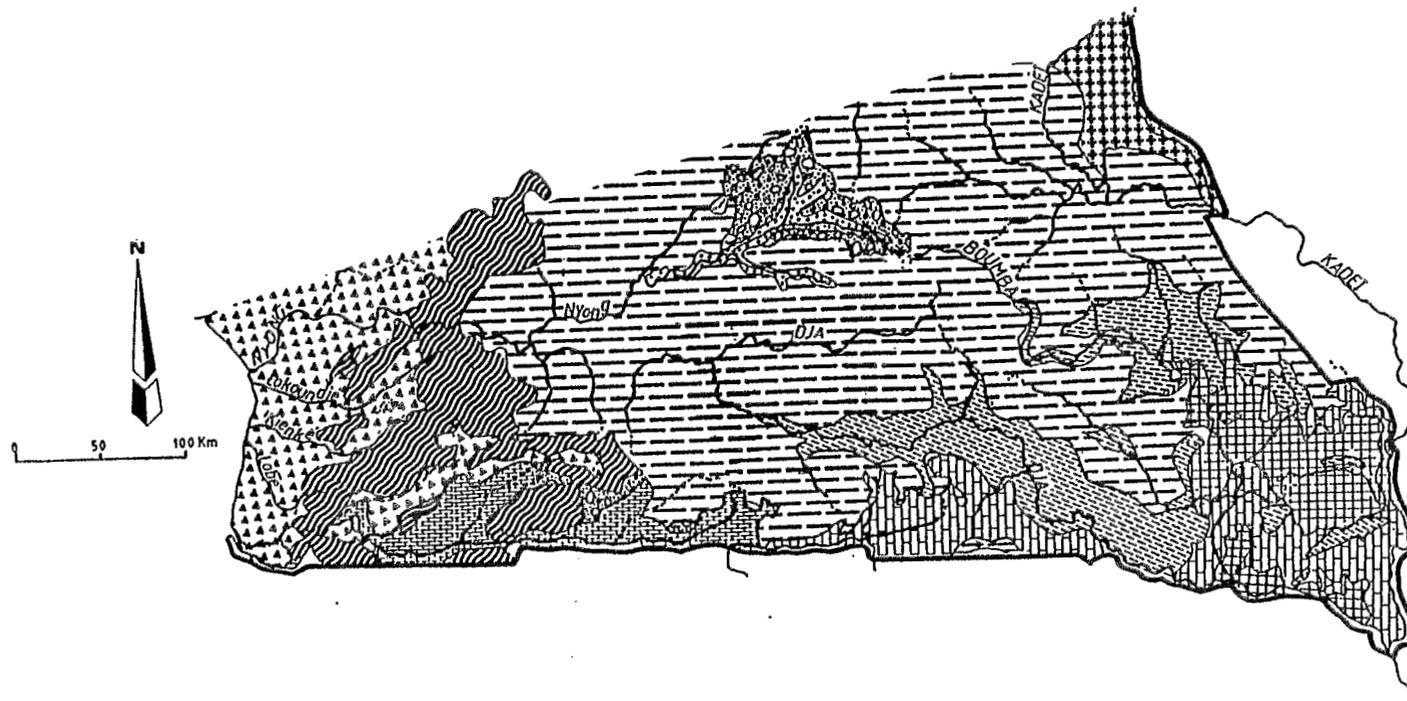


Figure 1-14 : Les sols du plateau du centre-sud camerounais (selon l'encyclopédie du Cameroun, 1981)

Tableau 1-8 : Types et caractéristiques des sols des bassins versants

Type	Perméabilité	pH	Granulométrie %	M.O. %	r = C/N	C.E. méq/100g	B.E. méq:100g	D.S. %	Observations B.V.
Ferral. jaunes	bonne	4.8<pH<5.7	40<argiles<60 5<limon<10	1.9<M.O.<2.3	8<r<11	6<C.E.<9	1<B.E.<4.5 Ca et Mg	20<D.S.<30	Ntem Nyong
Ferral. rouges	bonne	4.8<pH<6	40<argiles<70	1.5<M.O.<3.25	8<r<10	8<C.E.<11	1<B.E.<5 Ca	faible	Nyong Ngoko
Hydromorphes	mauvaise				20			moyen	Dja-Ngoko
Légende :									
M.O. : Matière Organique ; r : rapport Carbone-Azote ;									
C.E. : Capacité d'échange ; B.E. : Bases Echangeables ; D.S. : Degré de Saturation									
Ferral. : Sols Ferrallitiques ; B.V. : Bassins Versants sur lesquels sont observés les sols indiqués									

typiques et des sols hydromorphes. Les caractéristiques physiques et chimiques de ces sols sont données dans le tableau 1-8.

1.2.3.1. Les sols ferrallitiques typiques

D'après MARTIN et VOLKOFF (1990), ce sont des sols constitués essentiellement des nappes de nodules ferrugineux associés à des cuirasses en blocs de taille variable ensevelis sous une épaisse couverture meuble. On retiendra qu'ils se subdivisent en deux sous-groupes : les sols ferrallitiques jaunes et les sols ferrallitiques rouges.

Les sols ferrallitiques jaunes résultent de l'altération des roches sédimentaires, des roches plutoniques anciennes notamment des granites à pyroxènes et des roches métamorphiques (gneiss et migmatites). Leur extension géographique dans notre domaine d'étude est encore difficile à préciser. On sait cependant, compte tenu de la nature des roches dont ils dérivent, qu'ils sont largement représentés dans les bassins du Nyong et du Ntem. Leurs profils sont décrits dans les lignes ci-dessous. De haut en bas ils présentent les horizons suivants :

- Un horizon humifère brun, de 5 à 10 cm d'épaisseur ;
- un horizon argileux jaune, de quelques décimètres à plusieurs mètres d'épaisseur ;
- une zone d'altération de la roche-mère présentant des bandes blanches et rouilles ;
- la roche-mère.

A certains endroits, l'horizon jaune porte à sa base des concrétions ferrugineuses, passant parfois à des cuirasses de faible étendue. De même, dans la zone d'altération de la roche-mère, les filons de quartz sont visibles. Les caractéristiques physiques et chimiques de ces sols montrent une réaction acide, avec des pH compris entre 4,8 et 5,2. Les teneurs en argiles sont élevées (40 à 60 %), de même que celles des sables (40 à 50 %) avec une prédominance de la fraction fine sur les sables grossiers. Le limon est inférieur à 15 %. Les graviers, - constitués par des grains de quartz et de concrétions ferrugineuses -, existent en proportion variable. Les concrétions de cuirasses contiennent entre 30 et 45 % de Fe_2O_3 , avec moins de 20 % de Al_2O_3 . Les teneurs en matière organique totale sont comprises entre 1,8 et 3 %. L'azote varie de 1,3 à 1,5 %. Les teneurs en humus sont insignifiantes. Les teneurs en bases échangeables sont faibles (2,5 méq/100 g), calcium (2 méq/100 g), potassium (0,5 méq/100 g).

Les sols ferrallitiques rouges résultent de l'altération des basaltes anciens ou de celle des roches métamorphiques et plutoniques anciennes. Seul ce dernier sous-groupe nous

intéresse puisqu'on le trouve dans les bassins étudiés. Ces sols se rattachent à des zones moins humides que les précédentes, avec une pluviométrie comprise entre 1300 et 2000 mm. La roche-mère est plus riche en éléments ferro-magnésiens. Il s'agit surtout des dolérites, des amphiboles et des pyroxénites. Nous ne nous attardons plus sur leurs profils et leur morphologie puisqu'ils sont assez proches de ceux des sols jaunes, à la couleur près. Les horizons riches en concrétions sont souvent importants et s'observent à des profondeurs variables. Les cuirasses y sont plus fréquentes, surtout dans les talwegs. Les propriétés physiques et chimiques sont également voisines de celles des sols jaunes : le pH, un peu moins acide, est compris entre 5 et 6 ; les teneurs en matière organique varient entre 1,8 et 3% ; les teneurs en bases échangeables, comprises entre 1 à 3 méq/100g, sont faibles, mais les réserves minérales sont un peu plus élevées notamment de 10 à 15 méq/100 g pour le calcium, de 0.5 à 5 méq/100 g pour le magnésium et de 0.4 à 1.5 méq/100 g pour le potassium. Le phosphore total varie de 0.5 à 2 pour mille.

Il convient de signaler que le long de la route Yokadouma-Moloundou, et particulièrement dans la région de Lokomo-Mickel, on observe des sols gravillonnaires ferrugineux et des mamelons de grosses termitières. D'après SEGALIN et al (1959), leur présence en forêt fait penser à l'existence par le passé d'un climat qui a favorisé le développement de la savane comme on le verra plus loin.

1.2.3.2. Les sols hydromorphes

Ils résultent essentiellement de l'action d'une nappe phréatique sur une roche-mère quelconque, pendant toute ou une partie de l'année. Le processus fondamental est la formation d'un gley ou d'un pseudo-gley auquel peuvent être associés, assez indépendamment des conditions climatiques, l'accumulation de la matière organique, le concrétionnement et le cuirassement. Dans le Sud-Cameroun, sévit essentiellement l'accumulation de la matière organique qui est à l'origine des sols dits humiques. On distingue les sols de marais et sols marécageux. On les rencontre dans les bas-fonds de notre domaine d'étude. Les sols de marais sont caractérisés par une accumulation de la matière organique peu décomposée, riche en débris végétaux encore reconnaissables ; au-dessous se reconnaît un horizon gris ou tacheté. Le niveau de la nappe phréatique est le plus souvent élevé pendant toute l'année. Le sol ne sèche jamais et la transformation des produits végétaux est fortement ralentie.

A l'inverse, les sols marécageux présentent en surface des accumulations très nettes de matière organique transformée, sans aucun débris végétal. L'horizon humifère varie de

3 à 60 cm. Il se caractérise par de faibles teneurs en argiles, des teneurs en matière organique élevées atteignant 20 % et des teneurs en azote total variant entre 5 et 10 % de même que de fortes teneurs de bases échangeables.

Dans l'ensemble, ce sont des sols moyennement saturés. Ils s'engorgent d'eau presque toute l'année et constituent des zones d'inondations à l'exemple de la partie sud-est du bassin de la Ngoko.

Les sols du bassin de la Kadey évoluent du type ferrallitique rouge au nord de Yokadouma (région de Nola-Ndélé), aux sols ferrallitiques cuirassés vers Bétaré-Oya en passant par Batouri.

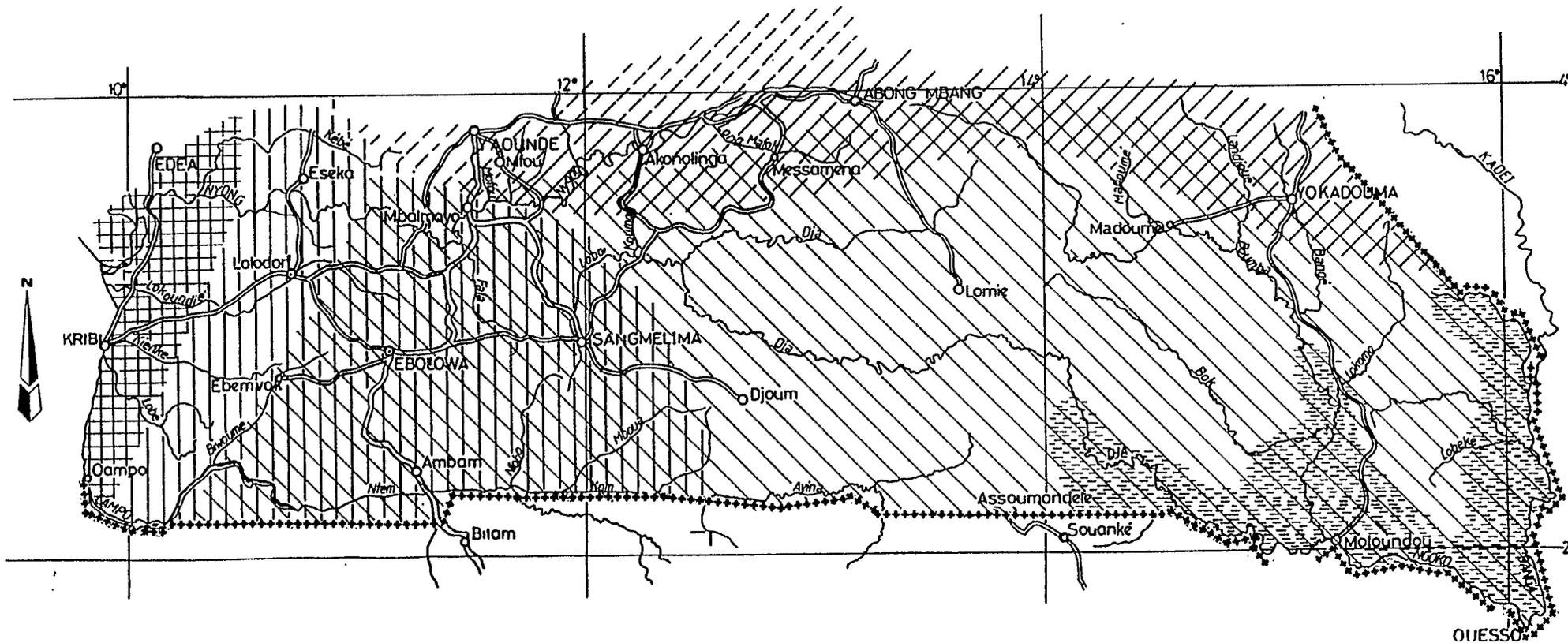
Il se dégage de cette synthèse que les bassins versants étudiés sont recouverts en grande partie de sols rouges et jaunes ou de l'association des deux types. Ils présentent de grandes analogies non seulement dans leurs propriétés physiques, mais également dans leur répartition dans les profils et ne diffèrent finalement que par la couleur de l'horizon principal. Ce sont tous des sols acides peu saturés, à faible minéralisation à travers lesquels va s'infiltrer la presque totalité des eaux de pluies ; en revanche, le ruissellement et l'érosion hydrique vont se manifester très faiblement. L'acidité des eaux qui s'infiltrent augmente au contact des sols acides et elles deviennent d'autant plus agressives sur les roches-mères qui s'altèrent considérablement. Les sols qui en dérivent supportent une forêt dense humide ou moist-forest, objet du prochain sous-chapitre.

1.2.4. LA VEGETATION : UNE FORET DENSE HUMIDE OU FORET DENSE SEMPERVIRENTE

Les bassins étudiés se rattachent au domaine de la forêt dense congolaise toujours verte (figure 1-15). Celle-ci présente trois étages :

- Un étage dominant d'arbres élevés aux vastes frondaisons, aux fûts verticaux souvent munis à la base de contreforts ;
- un étage moyen d'arbres aux feuillages denses ;
- un étage inférieur constituant le sous-bois formé d'arbustes, de rares plantes herbacées et de lianes aux aspects multiples.

Son influence sur l'écologie de l'écosystème naturel est considérable, en ce sens qu'elle intervient dans l'équilibre du climat, par conséquent sur la régularité des régimes hydrologique et d'exportations des matières des cours d'eau qui la drainent. Dans le bassin versant d'Amitioro en Côte d'Ivoire, MATHIEU (1976) note l'intervention du



LEGENDE

- | | | | | | |
|---|---|---|---|--|--|
|  | Forêt sempervirente atlantique de moyenne altitude (en cours de défrichement) |  | Forêt semi-décidue à Celtis et Sterculiacées (en cours de défrichement) |  | Forêt semi-décidue congolaise périodiquement inondée |
|  | Forêt sempervirente atlantique de moyenne altitude |  | Forêt semi-décidue à Celtis et Sterculiacées | | |
|  | Forêt sempervirente de basse altitude |  | Forêt semi-décidue congolaise | | |

ECHELLE 1/2000 000

Figure 1-15 : Forêt sud-camerounaise (selon l'atlas du Cameroun, 1959)

milieu biologique sur la migration des éléments que la forêt secondaire libère, puis consomme de façon sélective.

Dans la zone méridionale du plateau sud-camerounais, la délimitation des différents types de forêt est assez difficile. Néanmoins, LETOUZEY (1986) en distingue deux types principaux. Il s'agit de la forêt dense humide toujours verte ou forêt hémiombrophile congolaise et de la forêt atlantique de moyenne altitude. Dans ce qui suit, la forêt dense toujours verte, de par sa grande extension géographique - elle couvre la totalité du bassin du Dja - fera l'objet de plus d'attention.

La forêt dense toujours verte du bassin du Dja

Dans notre zone d'intérêt, elle est délimitée par les axes Moloundou-Yokadouma-Gari-Gombo, Yokadouma-Abong-Mbang, Abong-Mbang-Sangmélina, Sangmélina-Ebolowa et Ebolowa -Yaoundé. En plus du bassin versant du Dja dont elle porte le nom, elle s'étend sur le Haut Nyong. Elle est caractérisée par l'absence des espèces de la forêt semi-caducifoliée et des espèces de forêt atlantique, exception faite des *Gilbertiodendron dewerei* ou Ekoben. Les principales espèces sont le *Baillonella toxisperma* (Adjap) qui est un arbre gigantesque de 4 à 5 m de diamètre.

Dans le bassin inférieur du Dja et particulièrement en aval des chutes de Cholet, on observe les forêts inondables le long du fleuve qui coule lentement jusqu'à Ouesso, du fait de l'aplanissement accentué du relief. On les retrouve également dans les bourrelets sablonneux et les dépressions marécageuses.

En ce qui concerne le caractère écologique de cet écosystème du Dja, LETOUZEY (1986) note que la dégradation du milieu est limitée : villages peu peuplés et peu actifs, activité agricole très réduite, pistes rarement carrossables, passage et séjour des chasseurs, des pêcheurs et des animaux peu mobiles tels que les éléphants et exploitation forestière peu poussée. On peut donc noter que le rôle de l'homme vis-à-vis de la forêt verte du Dja reste globalement encore insignifiant, d'où son caractère de forêt primitive. Par conséquent, le bassin fluvial qui la supporte conserve à peu près intacts, à l'échelle des temps actuels, les comportements hydroclimatique et hydrochimique des forêts non perturbées, à savoir : forte évapotranspiration, interception des gouttes de pluie par le feuillage induisant par le fait même un ruissellement et une érosion faibles. En revanche, elle favorise l'infiltration et l'altération de la roche-mère. La nappe phréatique ainsi alimentée soutient les écoulements en période d'étiage, d'où le caractère plus régulier de leur régime hydrologique.

La forêt dense humide semi-caducifoliée de la Boumba

Elle couvre la totalité du bassin versant de la Boumba et s'étend jusqu'au bassin de la Kadey-Sangha. Elle constitue en fait la zone de transition entre la forêt toujours verte des bassins congolais et celle des bassins atlantiques. Son origine doit donc être récente, ce qui fait penser à des modifications climatiques, pédologiques voire même humaines si on se réfère aux plantations cacaoyères, caféières et vivrières de la région de Yokadouma. Mais les imbrications avec la forêt dense toujours verte du Dja dans la région Boumba-Kadey-Sangha plaident plutôt pour une origine paléogéomorphologique. En effet, compte-tenu de nombreuses espèces communes aux deux types de forêt, on pense que le rattachement du deuxième type au premier reste toujours possible. Un des arguments qui milite en faveur de cette thèse réside dans le fait que la perte du feuillage ne dure que quelques semaines durant la saison sèche.

Au sud-est de Yokadouma, dans le couloir longeant de part et d'autre le 15^e méridien jusqu'au nord du Congo et particulièrement dans le bassin de la Lokomo, affluent en rive gauche de la Boumba en aval de Biwala, la forêt semi-caducifoliée est désignée sous la dénomination de "forêt clairsemée" constituée d'arbres peu développés. Comme nous l'avions déjà mentionné au paragraphe 1.2.3 au sujet des termitières, il existe dans cette vallée de la Boumba des prairies marécageuses périodiquement inondées, comparables à celles des savanes péri-forestières (LETOUZEY, 1986). Ces observations rendent vraisemblables l'hypothèse déjà émise sur l'existence, à une époque non encore déterminée, d'un climat similaire à celui du domaine soudanien qui aurait favorisé de tels développements et dont les influences restent encore sensibles de nos jours comme nous le verrons dans le chapitre relatif aux précipitations.

Le sous-bassin de la Bek, compris entre les bassins du Dja et de la Boumba, de Ngoïla à Moloundou, est sous faciès broussailleux de forêt semi-caducifoliée. Cette zone des collines escarpées et de vallées argilo-sableuses, abandonnée aux troupeaux d'éléphants, n'est traversée que par les pygmées et par conséquent garde son état naturel.

En somme, la différence entre les forêts denses humides guinéo-congolaises semi-caducifoliée de la Boumba et celle toujours verte du Dja n'est pas notable au vu de nombreuses interférences qui existent entre les deux types de forêts. On doit cependant signaler, dans le bassin versant de la Boumba, le couloir de forêt clairsemée qui s'étend du sud-est de Yokadouma au nord du Congo le long duquel apparaissent des prairies semblables aux savanes péri-forestières. Il est probable que dans cette zone de végétation moins dense le ruissellement et l'érosion soient plus importants, au détriment

de la recharge de la nappe dont l'affaissement excessif en période d'étiage peut conduire à une irrégularité du régime hydrologique de la Boumba.

Les forêts denses humides toujours vertes et semi-caducifoliées du Nyong supérieur

Nous ne reviendrons pas ici sur les espèces décrites sur le bassin du Dja. Nous nous limiterons aux familles caractéristiques du Nyong, les prairies aquatiques à *Echinochloa pyramidalis* qui intéressent essentiellement les rives dégagées de son cours supérieur. Elles émettent des "îles flottantes" jusque vers Mbalmayo. Elles proviennent du déboisement de la forêt marécageuse du bassin. Exondées en basses eaux, elles sont brûlées par les chasseurs tandis qu'en hautes eaux elles sont inondées. La destruction par brûlis de ces prairies peut conduire à une augmentation des écoulements, donc à des crues exceptionnelles et à une modification de la minéralisation des eaux du Nyong.

En aval d'Akonolinga, particulièrement dans la région de Yaoundé, la forêt toujours verte disparaît graduellement au profit de la forêt semi-caducifoliée. La progression rapide de cette dernière est la conséquence de nombreuses interventions humaines, suite à l'urbanisation, à l'industrialisation et à la croissance démographique galopante et leurs corollaires (constructions, voies de communication, mises en cultures des sols et exploitations forestières). Pour LETOUZEY (1986), cette forêt possède un "faciès à dégradation prononcée". Les conséquences de cette anthropisation sont identiques à celles de la partie amont du bassin, avec en prime de grandes surfaces imperméables dans les villes qui augmentent les coefficients de ruissellement et favorisent des apports non négligeables de polluants.

La forêt atlantique du bassin du Ntem

Géographiquement, elle est définie comme étant l'aire comprise entre les axes Ebolowa-Nyabessan, Ebolowa-Djoum, le nord du Gabon et du Congo jusqu'à l'ouest du bassin du Dja (LETOUZEY, 1986). Dans le bassin du Ntem, la forêt originelle est extrêmement dégradée du fait d'une population dense, de vastes plantations de cultures vivrières et industrielles, des centres urbains, des voies de communication et de l'exploitation forestière. Comme dans le bassin du Nyong, l'intrusion de la forêt semi-caducifoliée y est également massive et prépondérante. Elle est caractérisée par la présence des caesalpiniaceae plus fréquentes et abondantes. Du sud-est d'Ebolowa jusqu'à Nyabessan et Ambam, la forêt occupe les sommets des collines qui dominent les plaines cultivées en vastes champs de cacaoyers, avec des imbrications de la forêt sémi-

caducifoliée à *Sterculiaceae* et à *Ulmaceae*. Dans la région d'Ebolowa, mention est faite de la forêt atlantique biafraise avec des *Saccoglottis gabonensis*, petits peuplements dus aux intempéries sur de fortes pentes exposées au sud-ouest. Les sols humides de la région de Ma'an, située entre Ambam et Nyabessan, supportent la forêt atlantique périodiquement inondée.

Dans sa globalité, la forêt atlantique du bassin du Ntem est très dégradée suite aux multiples interventions humaines, et massivement envahie par la forêt semi-caducifoliée. On note des similitudes avec celle du Nyong au sud de Yaoundé. Les conséquences d'une telle dégradation sur les comportements hydrologique et hydrochimique sont également identiques à celles énumérées dans le cas du Nyong, à la seule différence qu'ici, l'industrialisation étant quasiment inexistante, les substances exportées en solution proviennent exclusivement de l'altération des roches-mères des versants.

Avant de conclure, nous mentionnons, pour ce qui est du bassin de la Kadey, que la végétation passe de la forêt dense semi-décidue au nord de Yokadouma à la savane "post-forestière guinéenne". Elle est entrecoupée d'îlots forestiers et de forêts-galeries dans les régions de Pana et de Batouri.

En résumé, la description de la végétation par bassin versant a mis en évidence quelques différences relatives à la forêt dense humide de la bande méridionale du plateau sud-camerounais. Le principal bassin de cette étude, la Ngoko, supporte une forêt toujours verte, restée jusqu'alors quasiment intacte, d'où son caractère primitif et dense. On doit cependant noter que la végétation de son sous-bassin de la Boumba s'apparente par endroit à la forêt semi-caducifoliée. On pense que celle-ci résulterait plus d'une modification hydrologique liée à une variation climatique et/ou géomorphologique que d'une intervention humaine, qui aurait alors entraîné la "désintégration" de la forêt congolaise. On doit également noter la présence des prairies inondables dans les sous-bassins en rive gauche de la Boumba (Bidjar, Bangué, Bandekok) qui font penser à l'existence par le passé d'un microclimat, type soudanien, dont l'influence persisterait encore de nos jours. Hormis ces restrictions, la forêt du bassin de la Ngoko gardant encore son état naturel, son feuillage et sa litière jouent le rôle d'écran entre les apports atmosphériques et le sol.

En effet, ils interceptent les gouttes de pluie, ce qui réduit le ruissellement et l'érosion au profit de l'infiltration et de l'altération des roches-mères. Les nappes ainsi alimentées soutiennent les débits des cours d'eau pendant l'étiage et leur assurent une valeur

notable sans s'abaisser profondément. Les racines des arbres restent plongées dans les nappes entraînant une évapotranspiration élevée et constante toute l'année.

Par contre, les bassins versants du Nyong et du Ntem sont graduellement envahis par la forêt semi-caducifoliée. Celle-ci témoigne d'une intervention humaine très poussée sur ces bassins qui abritent une population dense. Les conséquences de cette anthropisation sur les comportements hydrologiques et hydrochimiques sont multiples : augmentation du ruissellement au détriment de l'infiltration avec abaissement des nappes phréatiques, accentuation de l'érosion des sols dénudés sans compensation de la production de matériaux par l'altération des roches-mères, diminution de l'oxygène et augmentation du CO₂ dans l'air.

On peut donc dire que sur l'ensemble de la bande méridionale du plateau sud-camerounais, la partie de la forêt dense humide toujours verte, et particulièrement le bassin versant de la Ngoko reste encore intacte. Il s'y développe une activité intense de la matière organique pendant le recyclage des éléments ou "turn-over" - nous y reviendrons dans la troisième partie - qui produit des acides très agressifs qui percolent et altèrent les roches. Par ailleurs, cette forêt primaire est la source d'une forte évapotranspiration, d'où l'existence d'une relation très étroite entre cette végétation forestière et le climat dont on parlera dans le prochain chapitre.

1.3. UN CLIMAT EQUATORIAL A QUATRE SAISONS

Les bassins de la Ngoko, du Nyong et du Ntem se rattachent à la zone climatique n° 3 qui correspond au domaine de la forêt dense sempervirente (MAHE, 1992). C'est le domaine du climat équatorial (figure 1-16). Il est assez caractéristique du fait de l'influence que joue la forêt dans la dynamique de l'atmosphère et des mouvements des masses d'air qui s'y produisent. Quant au bassin de la Kadey, il est soumis à deux types de climat. Une partie du bassin (région de Doumé) est sous l'influence équatoriale et le reste est soumis sous au climat tropical de transition.

Avant d'aborder l'étude des paramètres climatiques en général et celle des précipitations en particulier, nous allons dire quelques mots sur cette circulation des masses d'air.

1.3.1. LES MOUVEMENTS DES MASSES D'AIR EN MILIEU FORESTIER SUD-CAMEROUNAIS

La circulation des masses d'air dans notre zone d'intérêt s'inscrit dans le modèle proposé par DETWILLER en 1965 et repris par de nombreux auteurs. Cette circulation atmosphérique se fait d'une part, en altitude depuis l'équateur - domaine des basses pressions où l'air est chaud et humide - vers les pôles - domaine des hautes pressions où l'air est chaud et sec -, et d'autre part au sol, des pôles vers l'équateur, par l'intermédiaire des vents d'est. Au cours de leur extension vers les pôles, les masses d'air équatoriales perdent leur chaleur, deviennent denses et descendent vers les latitudes 30°. Elles se rechargent en humidité au cours de leur trajet au-dessus des océans, puis retournent vers l'équateur sous la dénomination de flux de mousson. On assiste alors à un remplacement en surface de l'air ascendant par de l'air plus froid et humide en provenance des moyennes et hautes latitudes. Au niveau de l'équateur, ces masses d'air sont déviées vers l'ouest par la force de Coriolis due à la rotation de la terre et prennent le nom d'alizés. Lorsque la force de Coriolis change de signe, le flux des alizés du sud-est est dévié vers le nord-est à l'équateur météorologique (EM) situé au nord de l'équateur géographique. Les courants jets, qui sont de forts vents d'ouest mis en évidence par PALMEN (1950) d'après DHONNEUR (1985) cité par MAHE (1992), soufflent entre les latitudes 30°N et 30°S et entre 5 000 et 12 000 m d'altitude. La limite inférieure correspond à la zone du Jet d'Est Africain (J.E.A.ou AEJ) et la limite supérieure au Jet d'Est Tropical (J.E.T.ou TEJ) dont la coupe schématique est représentée sur la figure 1-17.

Au niveau de l'équateur, sur le continent, ils se situent dans la Zone Inter-Tropicale de Convergence (ZITC) et portent le nom de cellules de WALKER. C'est l'élément central de la circulation atmosphérique. Il s'agit en d'autres termes de l'EM au niveau duquel se repère l'alignement des nuages convectifs à développement vertical ou cumulo-nimbus. La migration au sol de l'EM, du fait du mouvement zénithal du soleil, lui donne une structure en front de pente inclinée qui s'abaisse de l'équateur vers le nord : c'est le Front Inter-Tropical (FIT). Cette migration au sol diffère selon les latitudes et en fonction des facteurs locaux qui permettent ou non la migration des basses pressions intertropicales. Pour notre zone d'étude, la forêt sempervirente, en empêchant tout réchauffement excessif, rejette au-delà des régions qu'elle recouvre les dépressions thermiques dans lesquelles viennent se loger les discontinuités.

En d'autres termes, elle oppose, par son comportement même, un obstacle aux

advections d'air sec d'origine saharienne et participe ainsi à l'élaboration de la masse d'air dite équatoriale dont l'humidité permanente facilite les ascendances et les pluies en toute saison, quelle que soit la distance par rapport à la mer (LEROUX, 1983, cité par SUCHEL, 1987). A partir de la figure 1-18 illustrant la migration au sol de l'EM, ont été déduits les scénarios ci-dessous :

- En juillet-août, l'EM occupe sa position la plus septentrionale. La Confluence Inter-Océanique (CIO), constituée par la discontinuité des alizés et de la mousson, s'avance au niveau de l'Afrique Centrale. Les alizés du sud-est - masses d'air maritimes instables et humides dues aux remontées des upwellings -, en provenance de l'anticyclone de Sainte-Hélène, sont détournés en flux de mousson à la traversée de l'équateur. Les hautes pressions du Sahara, situées au-delà de l'EM bloquent la progression du flux de mousson vers les Tropiques. On assiste alors à des pluies abondantes et régulières dites pluies de mousson.

- En décembre-janvier, l'EM migre vers le sud et se bloque aux environs de la latitude 5°N. Les anticyclones (Açores et égypto-lybiens) génèrent les alizés du nord-est - masses d'air continentales sèches et stables ou harmattan -, qui se dirigent vers l'équateur. C'est le triomphe de la sécheresse marquée en certains points par l'absence de précipitations.

D'après SUCHEL (1987), le sud forestier camerounais est rarement atteint par le FIT et se trouve exempt d'une véritable saison sèche. Néanmoins, toutes les thèses convergent autour d'une répartition de l'année en quatre saisons :

- Deux saisons de pluies dont une grande de septembre à décembre et une petite de mars à juin ;
- Deux saisons sèches dont une grande de décembre à mars et une petite de juin à septembre.

Pour la suite, nous allons examiner les différents facteurs climatiques suivant les saisons et suivant des transects nord-sud et ouest-est.

1.3.2. LES ELEMENTS CLIMATIQUES DE LA BANDE MERIDIONALE DU PLATEAU SUD-CAMEROUNAIS

L'influence des paramètres climatiques sur l'hydrologie est capitale. Le déficit d'écoulement qui constitue avec la pluie les termes du bilan hydrologique peut être

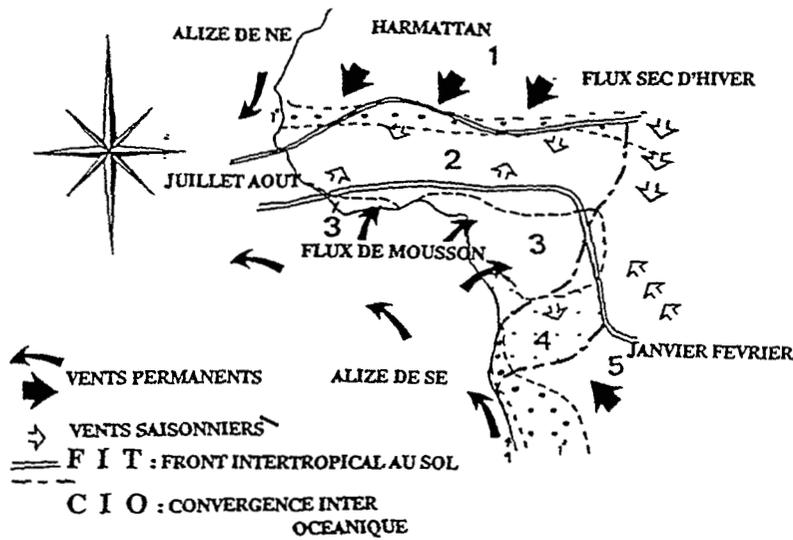


Figure 1-16 : Schéma des principaux flux de masses d'air en Afrique de l'ouest et centrale durant les deux situations extrêmes de l'année : janvier-février et juillet-août. Les grandes zonations végétales sont repérées par des numéros : 1 : déserts ; 1' : steppes et brousses à épineux ; 2, 4 et 5 : savanes herbacées à arborées ; 3 : forêt dense (d'après MAHE, 1992).

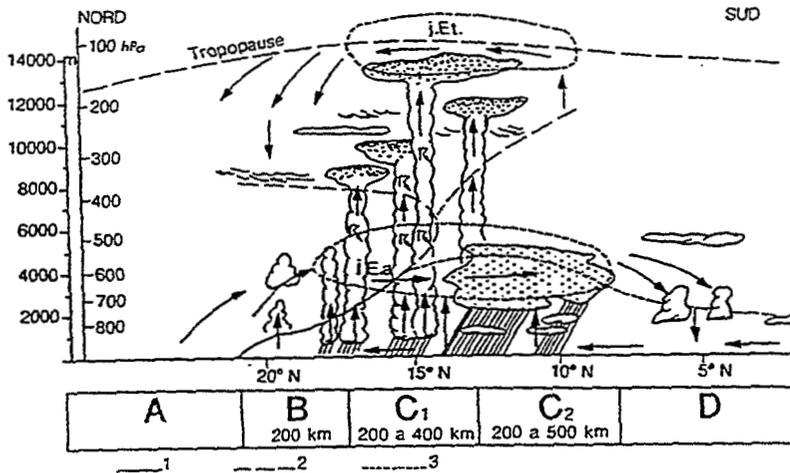


Figure 1-17 : Coupe schématique nord-sud en août de la troposphère au-dessus de l'Afrique vers le méridien origine. 1. Front Intertropical (FIT). 2. Limite inférieure de l'air équatorial d'altitude. 3. Limite supérieure de la mousson. J.E.a., Jet d'Est africain (A.E.J.). J.E.t., Jet d'Est tropical (T.E.J.). Les principales zones de temps : A, zone sans pluie. B, zones avec des orages isolés. C₁, zone où dominent les lignes de grains. C₂, zone où dominent les "pluies de mousson". D, zones avec des pluies réduites. Les flèches schématisent les flux et en particulier les mouvements de convection ou de subsidences de masses d'air (d'après Detwiler, 1965 ; Flohn, 1965 ; Leroux, 1970 ; Burpee, 1972 et Dhoneur, 1974 ; cités par Maley, 1981, et Olivry, 1986).

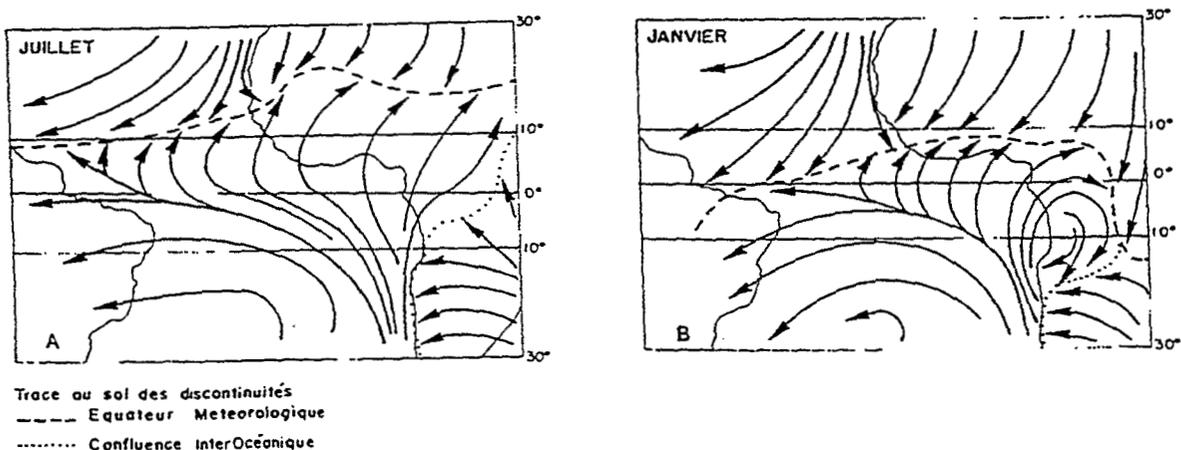


Figure 1-18 : Les vents en surface sur l'Afrique et l'Atlantique intertropical en janvier et juillet. Le trait tireté marque la trace au sol de l'équateur météorologique (EM), les pointillés celle de la confluence inter-océanique (CIO).

approché par l'évaporation et l'évapotranspiration. Celles-ci sont fonction de la température, de l'humidité relative de l'air, du vent et de l'insolation.

1.3.2.1 L'insolation

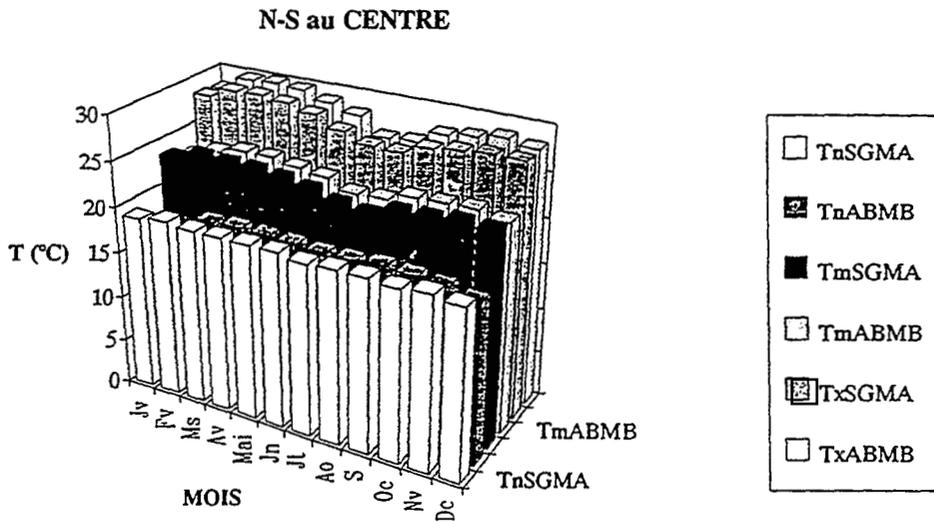
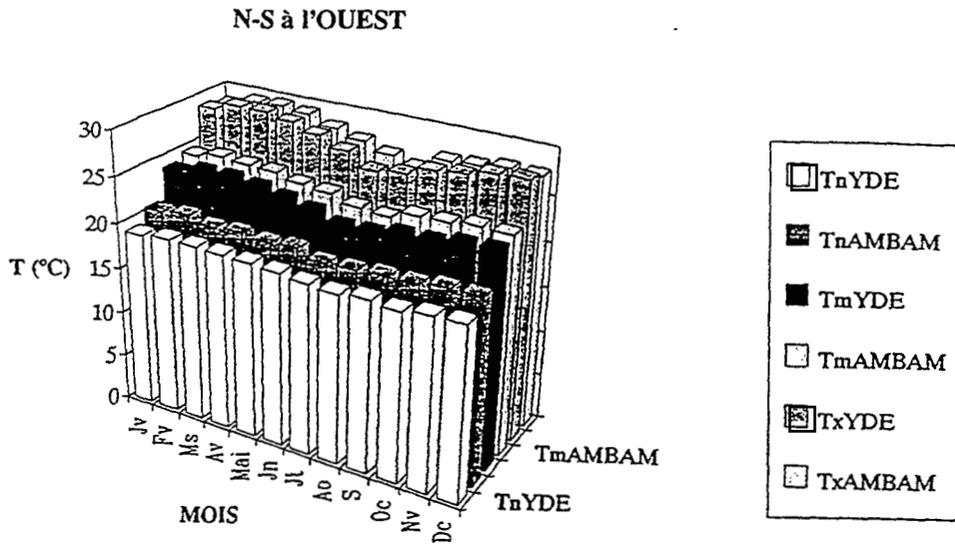
Le rayonnement solaire est la source d'énergie la plus importante à la surface du globe terrestre. Très peu de mesures sont effectuées aux stations météorologiques de notre zone d'intérêt. On peut noter à partir des observations à Yaoundé-Aéroport que janvier est le mois le plus ensoleillé avec 181 heures au total, et juillet-août les mois les moins ensoleillés avec 80 heures chacun. L'insolation moyenne annuelle est de 1640 heures (SUCHEL, 1987).

Le rayonnement solaire intense au niveau de l'équateur va induire dans les plaines inondables des bassins une forte évaporation favorable à la concentration des eaux fluviales en éléments dissous.

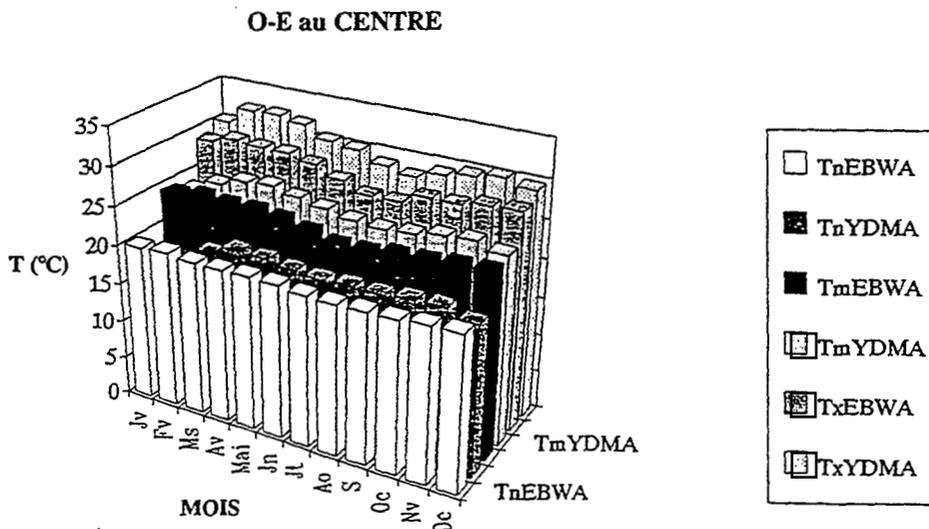
1.3.2.2. La température de l'air

La température dépend de la latitude et de l'altitude. Ses variations sont régies par celles des rayons solaires et le rafraîchissement résultant des pluies. Les variations saisonnières des températures maximales (T_x), minimales (T_n) et moyennes (T_m) représentées sur la figure 1-19 suivant les transects nord-sud dans l'axe Yaoundé-Ambam et ouest-est dans l'axe Ebolowa-Yokadouma respectivement. Globalement, les températures maximales varient entre 25 et 31°C contre 17 et 21°C pour les températures minimales. On enregistre le maximum des températures maximales à la fin de la grande saison sèche, avec 30 °C en février-mars et le minimum des températures minimales pendant la petite saison sèche, avec 19 °C en juillet-août. On relève également que la variation des températures moyennes mensuelles est parallèle à celle des températures maximales. En effet, en moyenne le maximum est de 25 °C en février-mars contre un minimum de 23 °C en juillet-août. La température moyenne annuelle est de 24 °C. Les écarts diurnes sont également imposés par les températures maximales en ce sens que les plus fortes valeurs sont déterminées en février-mars tandis que les faibles valeurs se situent en juillet-août.

Les variations latitudinales des températures moyennes montrent une légère augmentation de Yaoundé (23,5 °C) à Ambam (24,1 °C). Par contre, cette augmentation semble plus nette dans les variations méridiennes avec 24 °C à Ebolowa contre 24,7 °C à Yokadouma.



a - Zonalité latitudinale des températures dans les parties occidentale et centrale de la zone d'étude



b - Zonalité méridienne des températures dans la partie centrale de la zone d'étude

Figure 1-19 : Variations saisonnières des températures minimales et maximales

Légende : Tn : Température minimale ; Tm : Température moyenne ; Tx : Température maximale, YDE : Yaoundé ; SGMA : Sangmélina ; ABMB : Abong-Mbang ; EBNA : Ebolowa ; YOMA : Yokadouma

Sur l'ensemble des bassins, les températures relativement élevées et constantes toute l'année vont favoriser l'évaporation, l'activité biologique au sol, la vitesse d'altération des roches et surtout la libération de la silice.

1.3.2.3. Les vents

Le déplacement des vents au sol suit le mouvement des masses d'air en altitude. Ils proviennent soit de l'anticyclone de Sainte-Hélène, soit de l'anticyclone égypto-lybien. Dans la région étudiée, les vents dominants ont une direction principale sud-ouest comme celle de la mousson. A la limite nord de cette zone apparaissent faiblement des vents du nord-est correspondant à l'harmattan.

En janvier, l'AEJ se situe vers la latitude 5° N avec des vitesses de l'ordre de $8,5 \text{ m.s}^{-1}$. En juillet-août, il migre jusqu'à 15 à 17° N avec des vitesses de 12 m.s^{-1} . Le JET, initialement sur l'Afrique Centrale en décembre-janvier migre vers le nord de mars à juillet-août. En dessous de ces deux couches circule le flux de mousson. A Yaoundé, 52 % des vitesses de vent sont inférieures à 1 m.s^{-1} ; dans les autres stations de la région, cette proportion est supérieure à 85 %. Les vents sont donc calmes dans notre zone d'intérêt, leur vitesse étant limitée par la forêt.

On pense que même sur les sols dénudés des bassins versants du Nyong et du Ntem, l'érosion éolienne, si elle se produit, sera de très faible intensité.

1.3.2.4. L'humidité de l'air et la tension de vapeur d'eau

La forte humidité contenue dans la couche d'air au contact de l'océan est transportée par les alizés vers l'équateur où elle s'épaissit avec la diminution du poids de l'air sec. Les reliefs et les perturbations en provenance de l'est forcent l'ascendance de la basse couche humide. Les cumulo-nimbus se forment et sont à l'origine des pluies. Sur la figure 1-20 sont représentées les variations saisonnières moyennes de l'humidité maximale et minimale aux postes de Yaoundé et de Sangmélina, et, aux postes d'Ebolowa et d'Abong-Mbang. Sur l'ensemble des bassins, les valeurs maximales mensuelles de l'humidité varient peu. Elles se situent entre 92 et 99 %, donc proches de la saturation. Les valeurs minimales par contre, sont plus fluctuantes et significatives des variations climatiques ; elles sont maximales en juillet-août, ce qui correspond au minimum des températures liées à la petite saison sèche. En moyenne, les valeurs maximales de l'humidité sont partout supérieures à 95 % alors que les minimales se situent en deçà de 70 %.

La tension de vapeur (en hectopascals : hpa) calculée à partir des moyennes de température et de l'humidité relative aux stations de Yaoundé, Akonolinga, Abong-Mbang, Ebolowa et Sangmélina, est illustrée sur la figure 1-21. Globalement, elle varie entre 22 et 25 hpa. La tension maximale est obtenue en avril-mai et le minimum en juillet ; la moyenne annuelle étant d'environ 23,5 hpa.

La vapeur d'eau, fournie à l'atmosphère par l'évaporation des eaux continentales et l'évapotranspiration de la forêt, maintient en permanence l'air humide au-dessus de la bande méridionale sud-camerounaise et par voie de conséquence des pluies presque toute l'année.

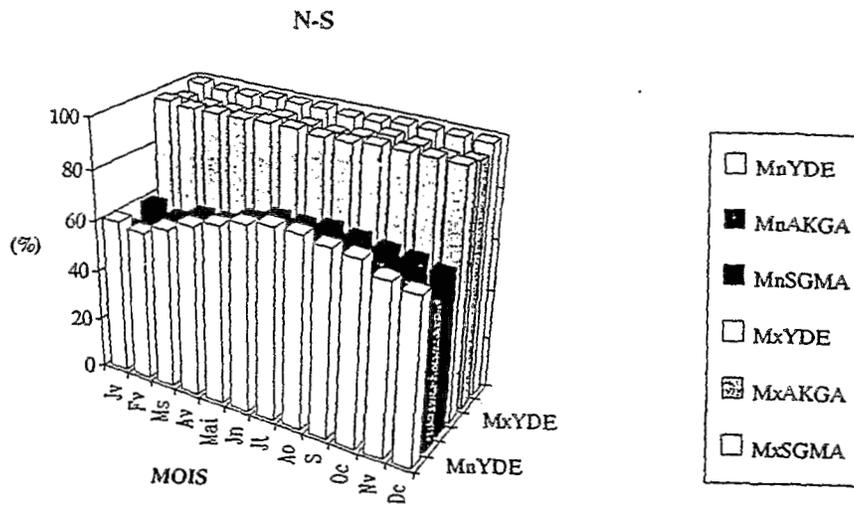
1.3.2.5. L'évaporation et l'évapotranspiration potentielle

Les variations saisonnières de l'évaporation sont représentées suivant l'axe nord-sud de Yaoundé à Ambam, et suivant l'axe ouest-est d'Ebolowa à Yokadouma sur la figure 1-22. Globalement, elles montrent que février et mars sont les mois de forte évaporation et que la hauteur d'eau évaporée reste partout inférieure à 100 mm. L'évaporation décroît ensuite jusqu'au mois de juin, puis varie peu jusqu'en décembre.

Le transect nord-sud met en évidence un regroupement des courbes de Yaoundé et d'Akonolinga d'une part, et celui des courbes d'Ebolowa et d'Ambam d'autre part. On note une diminution de l'évaporation du nord (Yaoundé - Akonolinga) vers le sud (Ebolowa - Ambam). Cette diminution traduit la faible influence des masses d'air sahariennes au fur et à mesure qu'on descend vers l'équateur.

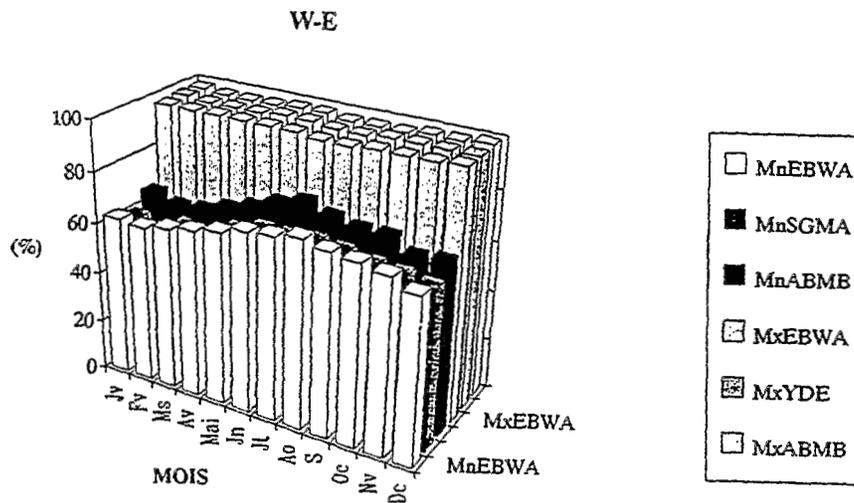
Le transect ouest-est montre que l'évaporation augmente d'Ebolowa-Sangmélina à l'ouest vers Yokadouma à l'est. Cette variation est due à l'influence des masses d'air océaniques dont la forte humidité réduit l'évaporation.

L'évaporation moyenne annuelle varie entre 580 mm à Sangmélina et 762 mm à Yaoundé. D'après SUCHEL (1987), les valeurs plafonnent à peu près partout à 750 mm dans le milieu forestier sud-camerounais. Selon cet auteur, dans cet air dont l'état hygrométrique n'est jamais très éloigné de la saturation, le pouvoir évaporant de l'atmosphère est forcément limité et les prélèvements obéissent en permanence à une sorte d'autorégulation, étroitement conditionnée par la biomasse forestière.



a - Zonalité latitudinale de l'humidité relative

Légende : Mn : Minimum ; Mx : Maximum ; YDE : Yaoundé ; AKGA : Akonolinga ; SGMA : Sangmélina



b - Zonalité méridienne de l'humidité relative

Légende : EBWA : Ebolowa ; ABMB : Abong-Mbang

Figure 1-20 : Variations saisonnières moyennes de l'humidité

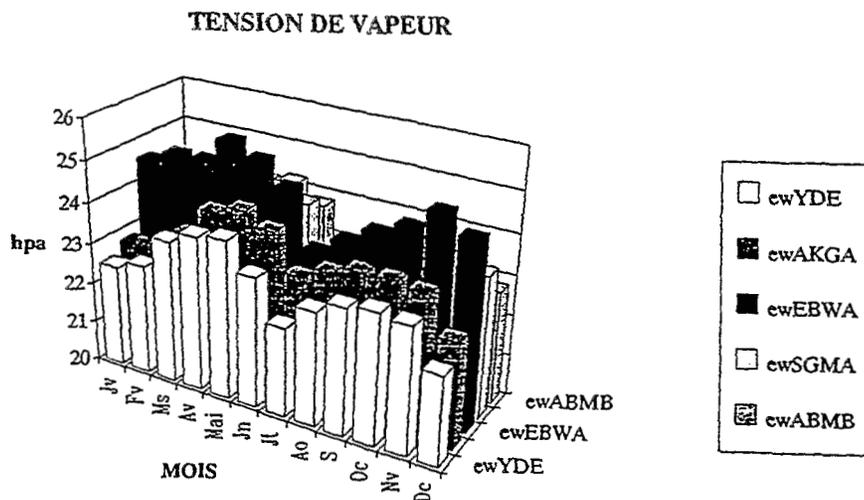


Figure 1-21 : Distribution de la tension de la vapeur d'eau

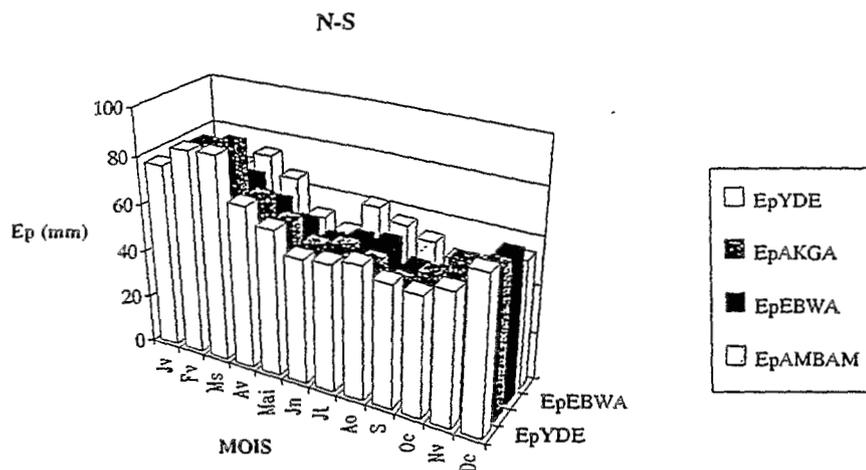
Légende : ew : Tension de la vapeur d'eau ; YDE, AKGA, EBWA, SGMA et ABMB (cf. fig. 1-20)

L'évapotranspiration potentielle de Yaoundé et de Bitam (station amont du Ntem au Gabon) calculée à l'aide de la formule de TURC d'après LEMOINE et al (1974) cités par OLIVRY (1986) est illustrée sur la figure 1-23. On relève que le maximum de l'ETP, observé en janvier et février, est de 117 mm à Yaoundé alors qu'il est de 105 mm avril à Bitam. A Yaoundé le minimum de 77 mm est mesuré en juillet tandis qu'à Bitam il est de 72 mm mais décalé en août. L'ETP annuelle est plus élevée à Yaoundé (1218 mm) qu'à Bitam (1087 mm).

L'évaporation et l'évapotranspiration sont des éléments importants du bilan hydrique et constituent l'essentiel du déficit d'écoulement dans notre zone d'intérêt. On pense que leurs hauteurs élevées en janvier-février vont induire des étiages plus prononcés en cette saison. L'ETP fournit de la vapeur d'eau contenant des éléments nutritifs recyclables comme le potassium et du gaz carbonique, principale source des bicarbonates des eaux fluviales de ces bassins au substratum géologique constitué presque entièrement des roches métamorphiques du socle précambrien. Cette vapeur d'eau est également à l'origine des précipitations enregistrées toute l'année dans cet écosystème forestier et qui font l'objet des lignes ci-après.

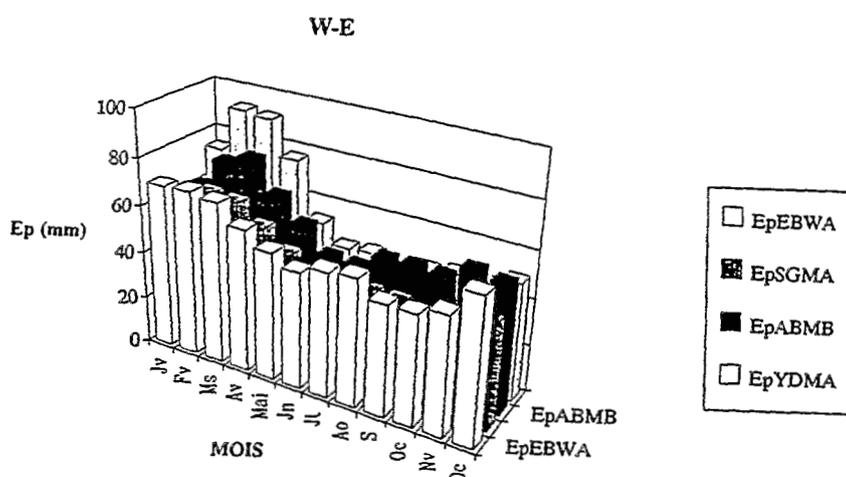
1.3.2.6. Les précipitations

La pluviométrie constitue le paramètre climatique et le terme de bilan hydrologique dont la mesure est la plus aisée et la plus répandue. C'est un facteur dont la variabilité dans l'espace et dans le temps - à l'échelle de l'averse, du jour, du mois, de la saison ou de l'année - est considérable. Dans le cadre de cette étude, nous avons, en plus des postes pluviométriques implantés par nos soins, collecté les données pluviométriques de la plupart des stations météorologiques et des postes agricoles situés dans notre zone d'intérêt. On sait généralement que, dans de grands bassins comme ceux de cette étude, les débits sont en relation directe avec les précipitations hormis les facteurs propres à chaque bassin versant. Dans leur chute, elles apportent - directement au sol des parties du bassin hors couvert végétal (pluie incidente), et indirectement au sol sous couvert végétal par le phénomène de pluviolessivage - les éléments d'origine atmosphérique et les nutriments. Elles sont également à l'origine de la dégradation des sols et de l'altération des roches sous-jacentes lorsqu'elles percolent. Elles constituent donc l'un des principaux paramètres pour l'établissement des bilans hydrochimiques Entrées-Sorties du bassin versant.



a - Zonalité latitudinale de l'évaporation

Légende : Ep : Evaporation Piche ; YDE, AKGA et EBWA (cf. fig. 1-20)



b - Zonalité méridienne de l'évaporation

Légende : YDMA : Yokadouma ; Ep, EBWA, SGMA, ABMB (cf. fig. 1-20)

Figure 1-22 : Variations saisonnières des évaporations

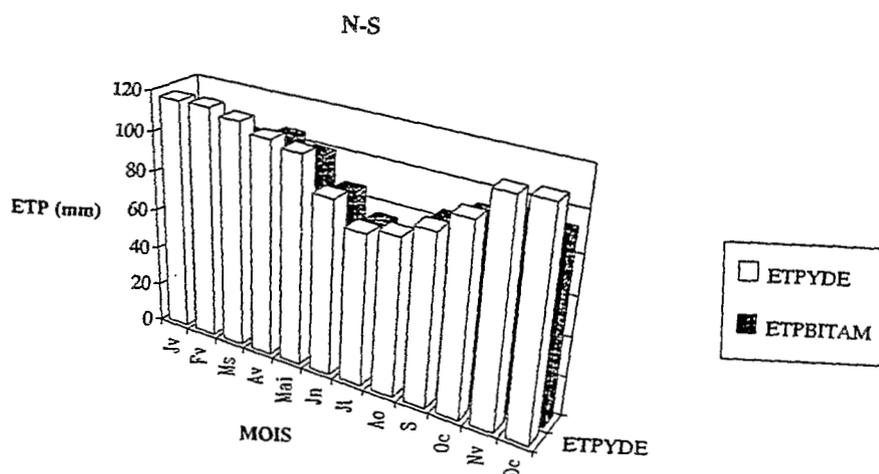


Figure 1-23 : Distribution de l'Evapotranspiration potentielle (ETP)

Compte-tenu du rôle fondamental ainsi joué par les précipitations dans les bilans hydrologique et géochimique, et au risque de nous répéter, nous renvoyons leur étude dans la deuxième partie du mémoire. En règle générale, on doit déjà noter que exception faite de quelques postes où la pluviométrie est déficitaire, elle varie entre 1 500 et 2 000 mm sur l'ensemble du domaine étudié, la moyenne se situant autour de 1 600 mm.

Conclusion

Les bassins versants étudiés se rattachent à la bande méridionale du plateau sud-camerounais. Ils présentent des caractéristiques morphométriques assez proches : aplanissement interrompu par des reliefs résiduels, réseau hydrographique dense comportant de vastes zones d'inondations et entrecoupé de chutes.

Les bassins reposent sur un socle granito-gneissique datant du précambrien et sur des roches cristallophylliennes. A l'ouest du bassin de la Ngoko, on note la présence de formations carbonatées et à l'est celles du complexe andésito-doléritique dont la vulnérabilité à l'altération chimique mérite d'être signalée.

Les sols ferrallitiques jaunes et rouges à caractéristiques physico-chimiques voisines, proviennent essentiellement de l'altération des roches sous-jacentes. Leur acidité et leur faible saturation favorisent l'altération des roches. La présence des termitières dans la vallée du bassin de la Boumba fait penser à l'interférence d'un domaine soudanien.

La forêt dense humide toujours verte du bassin de la Ngoko, très peu perturbée, protège le sol de l'action des gouttes de pluies, freine le ruissellement et l'érosion au bénéfice de l'infiltration. On note, toujours dans la vallée de la Boumba, la présence des lambeaux de prairies inondables qui s'ajoutent à celle des termitières pour renforcer la thèse de l'existence par le passé d'un climat soudanien. A l'opposé de la forêt dense primaire de la Ngoko, les ensembles denses semi-caducifoliées du Nyong et atlantiques du Ntem connaissent une dégradation poussée qui expose les sols à l'érosion hydrique faisant suite à une augmentation du ruissellement. Dans ces bassins, les nappes plus faiblement rechargées vont s'affaisser considérablement pendant l'étiage et peuvent affecter la régularité des régimes hydrologiques qui caractérise les cours d'eau forestiers équatoriaux.

L'influence des facteurs géographiques particuliers - la continentalité, la présence permanente de la mousson et des alizés, la proximité de l'équateur, la densité du couvert végétal - est déterminante sur les caractères climatiques fondamentaux et originaux de la bande méridionale du plateau sud-camerounais. Ces facteurs induisent une humidité relative élevée et permanente (85 %), une pluviométrie modérée (1600 mm) et une forte évapotranspiration (1250 mm). On en déduit que le bilan hydroclimatique annuel reste positif. Les écoulements sont permanents et véhiculent à tout moment les témoins des processus biogéodynamiques de cet écosystème forestier.

On note cependant une anthropisation relative à l'exploitation forestière, aux champs cultivés, à l'installation des hameaux le long des routes et des rives des cours d'eau. Sur les sols ainsi mis à nu, les fortes pluies ne trouveront aucune résistance à leur action érosive et entraîneront de matériaux dans les cours d'eau.

*"Eau, tu n'as ni goût, ni couleur, ni arôme,
on ne peut pas te définir, on te goûte sans te connaître.
Tu n'es pas nécessaire à la vie : tu es la vie."*

*A. de St EXUPERY
Terres des hommes, Gallimard*

DEUXIEME PARTIE

LES REGIMES HYDRO-PLUVIOMETRIQUES DES BASSINS VERSANTS

INTRODUCTION

L'analyse des observations de matières particulaires et dissoutes nécessite une bonne connaissance des régimes des précipitations et des écoulements qui président à leur production et à leur transfert. En effet, l'eau est considérée comme le principal agent de l'érosion mécanique et de l'altération chimique. D'autre part, les rivières et les fleuves évacuent les matériaux issus de ces deux phénomènes vers les océans.

Dans cette partie de notre travail, nous analyserons les données pluviométriques et hydrométriques non seulement de nos années d'étude, mais aussi les périodes allant de 1950 à 1991 pour les précipitations et de mise en service des stations à 1992 pour les débits. Le but visé par la réactualisation des données dont la série couvrant la période antérieure à 1978 a été étudiée par OLIVRY (1986), est l'appréciation de la représentativité de nos observations hydrochimiques par rapport à un cycle hydrologique moyen.

Nous avons subdivisé cette partie en deux chapitres. Le premier porte sur l'analyse des régimes pluviométriques et le second sur les régimes et les bilans hydrologiques.

CHAPITRE 2

LES REGIMES PLUVIOMETRIQUES

Dans ce chapitre, il sera essentiellement question de l'étude de la répartition temporelle et spatiale à partir des données antérieures et de celles collectées dans le cadre de ce travail. Nous ne reviendrons pas sur l'analyse statistique des hauteurs pluviométriques déjà réalisée à de nombreux postes de la région (OLIVRY, 1986 et SUCHEL, 1987), mais nous utiliserons les paramètres pour déterminer les régimes saisonniers et annuels dont les oscillations peuvent influencer plus ou moins les processus d'érosion et d'altération. Nous présenterons également les pluies mensuelles et annuelles nécessaires pour l'établissement des bilans hydrologique et hydrochimique des bassins versants.

L'analyse des régimes pluviométriques se fera, d'une part sur l'ensemble de la bande méridionale du plateau sud-camerounais, et d'autre part sur le bassin versant de la Ngoko.

2.1. LA BANDE MERIDIONALE DU PLATEAU SUD-CAMEROUNAIS

Dans l'analyse des régimes pluviométriques de notre zone d'étude, nous avons intégré les postes de Kribi à proximité de l'Atlantique, de Ouesso au sud-est de Moloundou et de Berbérati à l'est de Batouri. Les observations pluviométriques de ces stations permettent de mieux suivre la variabilité spatio-temporelle de la pluviosité.

Les régimes saisonniers et les pluies moyennes annuelles

Nous avons reporté dans le tableau 2-1 les précipitations moyennes mensuelles et interannuelles en année calendaire de l'origine des stations à 1991 ainsi que les informations relatives aux différents postes pluviométriques.

Ce tableau a été élaboré à partir de la banque des données du logiciel PLUVIOM du Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM de l'origine des stations à 1980, complétées dans le logiciel TIDHYP de J.P. BOUM du Centre de Recherches Hydrologiques jusqu'en 1991. Les résultats des calculs du tableau 2-1 prennent en compte toutes les observations journalières. Les isohyètes des hauteurs de précipitations interannuelles et les histogrammes des moyennes mensuelles sont représentés sur la figure 2-1 .

Tableau 2-1 : Précipitations moyennes mensuelles et interannuelles (mm) de l'origine des stations à 1991

POSTE	LAT. NORD	LONG. EST	ALT DIST		PERIODE	Jv	Fv	Ms	Av	Mai	Jn	Jt	AO	S	Oc	Nv	Dc	P	N
	DG MN SEC	DG MN SEC	m	km															
OUESSO	01 37 00	16 03 00	351	700	1961-91	45,4	79	120,4	141,7	187,2	137,4	115	153	233,6	238,5	156,5	70,4	1678	31
MOLOUNDOU	02 02 42	15 12 42	354	600	1933-91	36,5	68,8	121	141	149,7	113	70,7	108,4	187,3	204,7	131,2	51,8	1381	48
SOUANKE	02 04 00	14 04 00	549	475	1961-91	44,1	72,9	153,1	168,9	200,4	98,3	79,5	117	235,7	243	156	51,1	1620	31
BIWALA	03 12 58	14 55 24	500	550	1979-91	18,9	40,2	106,1	125,5	210,8	149,3	104,4	194,4	239	233,6	106,6	26,2	1556	11
YOKADOUMA	03 31 00	15 06 00	640	600	1930-91	27,8	45,4	115,1	154,3	182	105,5	124,7	155,4	236,3	233,8	109,4	41,5	1606	52
KELEMBA				620	1974-91	21,5	33,1	133,7	153,5	250,6	167	155,3	235,6	276	259,3	125,9	24,5	1783	15
BATOURI-AERO	04 28 19	14 21 50	655	520	1942-91	23,2	41,5	108,8	135,3	178,9	169,6	122,7	167,2	219,8	262,8	102,1	29,9	1525	46
LOMIE	03 09 55	13 37 20	640	405	1907-91	34,7	51,8	125,4	166,4	194,5	162,5	94,2	135,5	239	267,9	128,7	40,8	1636	55
DJOUM-VILLE	02 40 32	12 40 13	684	310	1934-91	39,9	53,1	124,5	151,4	201,2	142,3	70,1	80,2	205,1	253,8	129,8	53,2	1475	36
SOMALOMO	03 22 42	12 43 47	617	320	1979-91	17,1	55	97,2	166,3	256,2	166,7	112,3	154,3	241,4	279,8	117,3	34,4	1636	5
BENGBIS	03 26 45	12 27 05		290	1943-91	24,6	49,8	145,1	215	254	166,3	114,1	154,1	289	373,5	149,7	32,3	1982	26
SANGMELIMA	02 56 00	11 56 00	713	230	1910-91	37,7	59,9	148,4	183,2	210,5	106,5	83,8	94,5	233,1	279,8	145,5	39,4	1676	58
YAOUNDE-AERO	03 50 24	11 31 37	760	210	1943-91	24,7	55	140,2	184,6	211,2	159,5	64,6	91,6	232,8	295,3	120,3	22,8	1604	48
MBALMAYO	03 31 00	11 30 00	641	196	1968-91	15,8	38,7	114,1	161	190,5	148,1	47,2	69,3	187,4	243,8	109,3	24,2	1339	20
AKONOLINGA	03 46 00	12 15 00	671	290	1908-91	18,7	36,1	122	156,2	202,1	140	76,4	106,8	237,5	274	117,1	26,5	1550	25
MESSAMENA	03 44 00	12 50 00	690	345	1943-91	20,1	55,9	126,2	172,5	223,6	144,8	102,3	135,2	254,1	284,6	104,1	43,5	1632	18
EBOWA	02 55 00	11 09 00	603	138	1900-91	39,6	78,4	175,3	205,9	222,8	156,3	54,6	75,3	210,1	296,7	177,9	53,5	1752	62
NYABESSAN	02 24 00	10 24 00	384	65	1952-91	40,7	74,1	168,8	209,9	208,3	93,2	18,1	51	157,1	326,2	191,2	59,7	1589	25
AMBAM	02 23 00	11 16 00	602	160	1912-91	37	72,5	159,9	185,1	194,8	127,6	44	55	191,7	286,1	174,5	62,5	1657	44
KRIBI	02 56 44	09 54 25	13	1	1900-91	85,1	118,8	205,2	263,7	350,8	278,1	123,1	244,6	523,1	505,6	201,2	92,4	2902	62

Legende :
 LAT. : Latitude ; LONG. : Longitude ; DG : Degré ; MN : Minute ; SEC : Seconde
 ALT. : Altitude ; DIST. : Distance par rapport à l'océan Atlantique
 P : Hauteur de pluie interannuelle ; N : Nombre d'annees d'observations

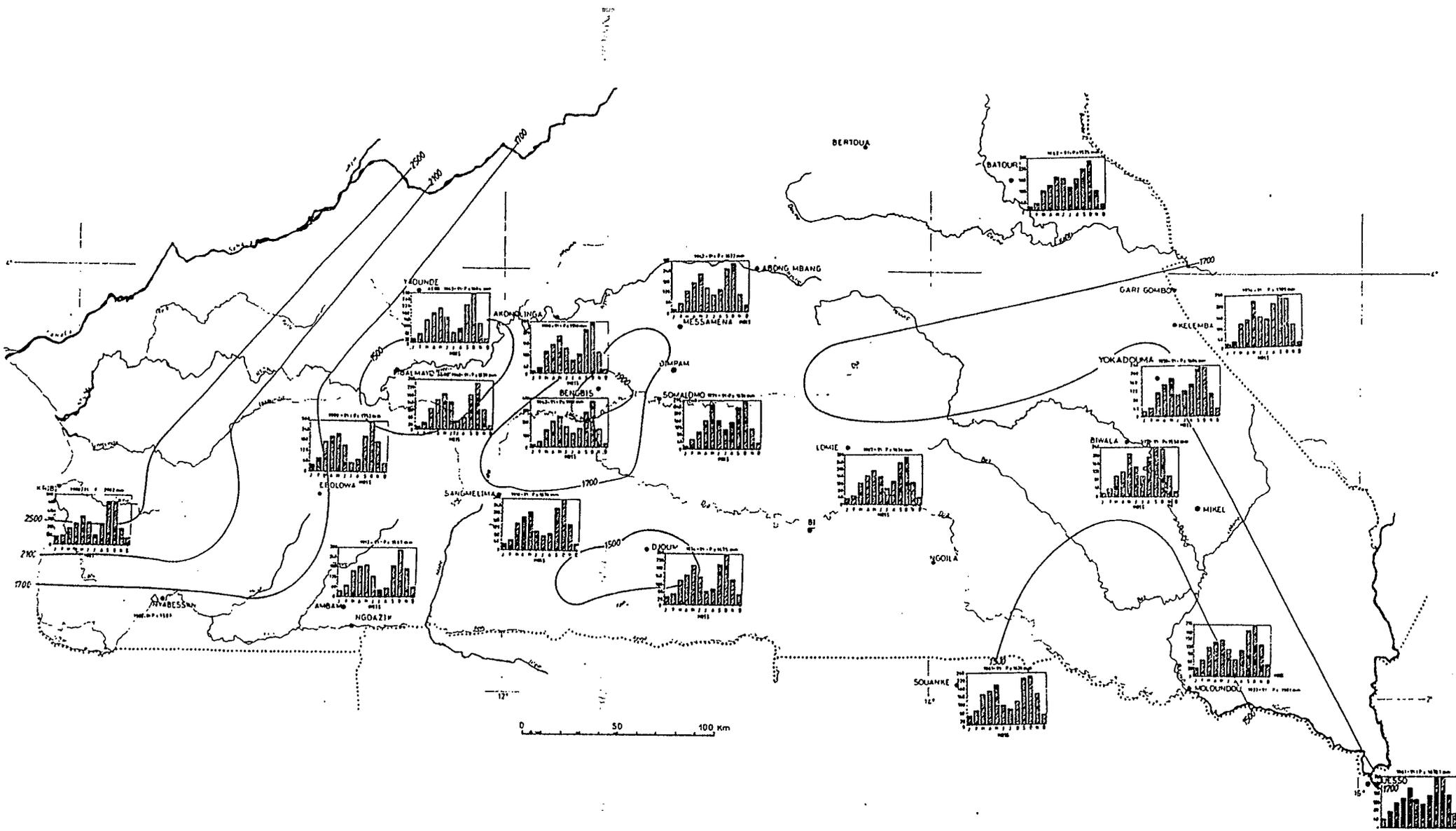


Figure 2-1 : Histogrammes et isohyètes des pluies interannuelles du plateau du centre-sud du Cameroun (de l'origine des observations à 1991)

L'examen des histogrammes montre qu'en moyenne, la pluie maximale mensuelle est mesurée en octobre dans la partie occidentale du plateau alors qu'à l'est on l'observe à plusieurs stations en septembre et/ou en octobre. Les précipitations de ces deux mois constituent à elles seules 30 % des totaux annuels. Il ressort de ces observations que la grande saison pluvieuse s'étend essentiellement de septembre à octobre dans cette région forestière. Pendant la petite saison des pluies, la hauteur maximale est mesurée en mai sur toutes les stations du plateau du centre-sud. Elle s'étend sur quatre mois (mars-juin) au cours desquels tombent en moyenne 38 % de la pluie annuelle.

Au sens de Gaussen, janvier, dont la hauteur pluviométrique est inférieure à 48 mm, est le seul mois considéré comme sec à tous les postes, exception faite de Kribi qui figure dans ce travail uniquement comme station de référence côtière des bassins étudiés. Il est suivi par le mois de décembre qui ne l'est que partiellement. En effet, les postes où la hauteur pluviométrique est supérieure au double de la température sont nombreux ; ils sont soit proches de l'Atlantique (Nyabessan et Ebolowa), soit proches de l'équateur thermique (Ambam, Djoum, Souanké, Moloundou et Ouesso). Février est sec aux trois stations de la Boumba (Kelemba, Yokadouma et Biwala), à Batouri, à Akonolinga et à Mbalmayo.

On peut relever de ce qui précède que, dans la zone méridionale du plateau sud-camerounais, la répartition mensuelle des précipitations détermine les saisons, et que les mois sans pluie sont rares. Hormis Moloundou, les modules pluviométriques interannuels varient dans l'ensemble entre 1500 mm et 2000 mm.

Les variations spatio-temporelles des précipitations

Dans le tableau 2-2 sont reportées les hauteurs de pluies interannuelles pour des stations de longues durées provenant du tableau 2-1 ci-dessus (1) et celles homogénéisées de 1951 à 1989 (MAHE, 1992) (2) ; les données (2) ont été complétées par les observations disponibles à certaines stations en 1950, 1990 et 1991 (3). En valeur absolue, l'erreur entre les hauteurs de précipitations interannuelles (2) et (3) est comprise entre 0 à Akonolinga et 2,6 % à Ambam. Par contre, elle varie entre 0,18 % à Ouesso et 13,3 % à Elendzo, proche de Souanké. pour les hauteurs (1) et (2) d'une part, et entre 0,36 % à Ouesso et 12,3 % à Djoum-ville d'autre part. Les hauteurs de précipitations interannuelles calculées par l'une ou l'autre méthode sont acceptables sauf à Souanké ou Elendzo et Djoum-ville où l'erreur est de l'ordre de 13 %. La faible valeur observée à Djoum-ville serait attribuée aux nombreuses lacunes de 1963 à 1975 et de 1980 à 1987, reconstituées par ailleurs en (2). Par contre, les données d'Elendzo

Tableau 2-2 : Précipitations interannuelles comparées de quelques stations

	Erreur (%) entre:								
	1 N	2 N	3 N	(1)&(2)	(1)&(3)	(2)&(3)			
KRIBI	2902	62 2826	35 2837	42	2.69	2.24	-0.39		
NYABESSAN	1589	25 1591	35 1606	40	-0.13	-1.07	-0.94		
ABONG-MBANG		1582	37						
AKONOLINGA	1550	25 1532	37 1533	42	1.17	1.10	-0.07		
BATOURI-AERO	1525	43 1497	37 1471	40	1.87	3.54	1.74		
BERTOUA		1531	37						
DJOUM-VILLE	1475	36 1661	37 1656	41	-11.20	-12.27	0.30		
EBOWA	1752	62 1767	37 1758	41	-0.85	-0.34	0.51		
LOMIE	1636	55 1625	37 1621	41	0.68	0.92	0.25		
SANGMELIMA	1676	58 1649	37 1655	41	1.64	1.25	-0.36		
YAOUNDE-AERO	1604	47 1555	37 1547	42	3.15	3.55	0.51		
YOKADOUMA	1606	52 1598	37 1592	39	0.50	0.87	0.38		
BERBERATI		1456	38						
AMBAM	1657	44 1638	39 1596	40	1.16	3.68	2.56		
MOLOUNDOU	1381	48 1351	39 1354	42	2.22	1.96	-0.22		
SOUANKE(ELENDZO)	1620	32 1430	39 1430	41	13.29	11.73			
OUESSO	1678	32 1675	39 1672	41	0.18	0.36	0.18		
BITAM		1729	39						
Légende									
(1) : Pluies observées de l'origine des stations a 1991									
(2) : Pluies homogénéisées de 1951 a 1989 (MAHE, 1992)									
(3) : Données (2) complétées par (1)									
N : Nombres d'années									

Tableau 2-3 : Précipitations moyennes mobiles sur 5 ans et écarts à la moyenne (1951-1991)

	1951-1955	1956-1960	1961-1965	1966-1970	1971-1975	1976-1980	1981-1985	1986-1991
KRIBI	3071	2991	2829	2767	2767	2888	2665	2587
	8.25	5.42	-0.28	-2.49	-2.47	1.80	-6.07	-8.82
NYABESSAN	1638	1622	1678	1712	1516	1555	1428	1678
	2.01	1.02	4.48	6.62	-5.59	-3.15	-11.05	4.51
ABONG-MBANG	1585	1737	1720	1752	1803	1546	1569	1705
	0.21	9.82	8.74	10.77	13.96	-2.29	-0.83	7.71
AKONOLINGA	1511	1543	1487	1711	1696	1529	1613	1637
	-1.42	0.66	-3.00	11.61	10.64	-0.21	5.26	0.29
BATOURI-AERO	1746	1539	1433	1557	1596	1426	1503	1539
	18.73	4.64	-2.54	5.85	8.55	-3.02	2.18	5.15
BERTOUA	1756	1618	1647	1667	1661	1528	1459	1562
	14.69	5.67	7.60	8.93	8.48	-0.18	-4.67	2.07
DJOUM-VILLE	1716	1728	1589	1855	1621	1686	1743	1658
	3.62	4.34	-4.03	12.04	-2.09	1.83	5.24	-0.02
EBOLOWA	1716	1833	1909	1956	1857	1817	1707	1708
	-2.39	4.25	8.59	11.26	5.62	3.37	-2.88	-6.01
LOMIE	1765	1764	1651	1690	1604	1567	1637	1575
	8.93	8.86	1.90	4.27	-1.05	-3.27	1.03	1.19
SANGMELIMA	1714	1705	1690	1785	1692	1621	1704	1627
	3.59	3.00	2.14	7.88	2.25	-2.05	2.94	1.21
YAOUNDE-AERO	1692	1630	1653	1764	1640	1490	1734	1539
	9.35	2.37	6.35	14.03	6.02	-3.73	12.05	-3.91
YOKADOUMA	1716	1769	1661	1838	1468	1526	1592	1560
	7.79	11.14	4.34	15.49	-7.80	-4.13	-0.02	-5.17
BERBERATI	1614	1614	1437	1583	1456	1420	1437	1400
	10.82	10.84	-1.29	8.72	-0.03	-2.47	-1.32	-3.89
AMBAM	1895	1462	1572	1808	1493	1642	1561	1615
	18.80	-8.34	-1.47	13.34	-6.44	2.91	-2.15	1.24
MOLOUNDOU	1309	1395	1573	1240	1481	1237	1285	1300
	-3.29	3.04	16.23	-8.37	9.37	-8.60	-5.09	-3.94
SOUANKE(ELENDZO	1433	1452	1376	1323	1594	1353	1513	1456
	0.19	1.53	-3.77	-7.48	11.45	-5.39	5.82	1.77
OUESSO	1521	1721	1826	1758	1632	1735	1479	1665
	-9.01	2.94	9.20	5.14	-2.41	3.75	-11.54	-0.45
BITAM	2013	1760	1714	1844	1633	1605	1650	1677
	12.67	4.07	-1.98	7.15	-9.11	-5.78	-1.10	-6.67

se rapprochent de celles de Moloundou sans qu'on puisse dire si celles de Souanké sont mauvaises : la critique des données à ces postes par la méthode de double masse (nous y reviendrons plus loin) ne fait pas ressortir d'erreurs notables.

Il se dégage donc de cette étude comparée que l'erreur entre les différents résultats n'est significative qu'à Djoum et à Souanké où l'on note de nombreuses lacunes. Dans le tableau 2-3 sont reportées les hauteurs moyennes de pluie sur 5 ans et leurs écarts par rapport au module pluviométrique interannuel de 1950 à 1991 à quelques stations de la région. La suite de ce chapitre va consister en l'analyse des variations spatio-temporelles de la pluviosité à ces stations. Pour ce faire, nous avons représenté sur les figures 2-2 et 2-3 les fluctuations des précipitations annuelles et l'évolution de leurs écarts au module pluviométrique interannuel suivant les zonalités latitudinales et longitudinales respectivement.

Les variations spatiales des précipitations

L'étude des variations spatiales de la pluviosité va se faire suivant une zonalité latitudinale et une zonalité longitudinale. En règle générale, les pluies augmentent depuis les hautes latitudes vers l'équateur ; elles diminuent de l'océan vers l'intérieur des continents. L'analyse spatiale des précipitations va donc se faire suivant les axes géographiques Nord-sud et ouest-est.

a)- **Suivant le transect nord-sud**, on peut constater qu'exception faite de Kribi, la pluviosité varie de la manière suivante :

- Sur la partie occidentale du plateau, de Yaoundé à Bitam, la pluviosité augmente de Yaoundé (1 547 mm) Ebolowa (1 758 mm) d'où elle s'abaisse à 1 606 mm à Nyabessan et à 1 596 mm à Ambam ; Puis elle augmente à nouveau vers l'équateur à 1 729 mm à Bitam au Gabon ;

- sur la partie orientale du plateau, on observe une augmentation de la pluviosité de Batouri (1 471 mm) à Yokadouma (1 592 mm), suivie d'une diminution jusqu'à Moloundou (1 354 mm), puis d'une remontée à 1 672 mm à Ouessou (en République congolaise), proche de l'équateur.

a)- **Suivant le transect ouest-est**, on assiste normalement à une diminution de la pluviosité de l'océan (Kribi : 2 837 mm) vers l'intérieur du continent (Ebolowa : 1 758 mm). D'Ebolowa à Sangmélina ou à Djoum, la hauteur pluviométrique diminue

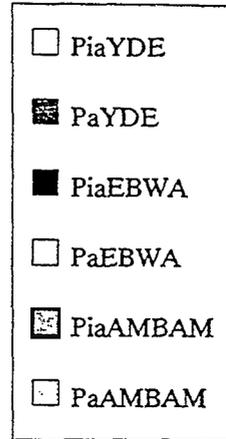
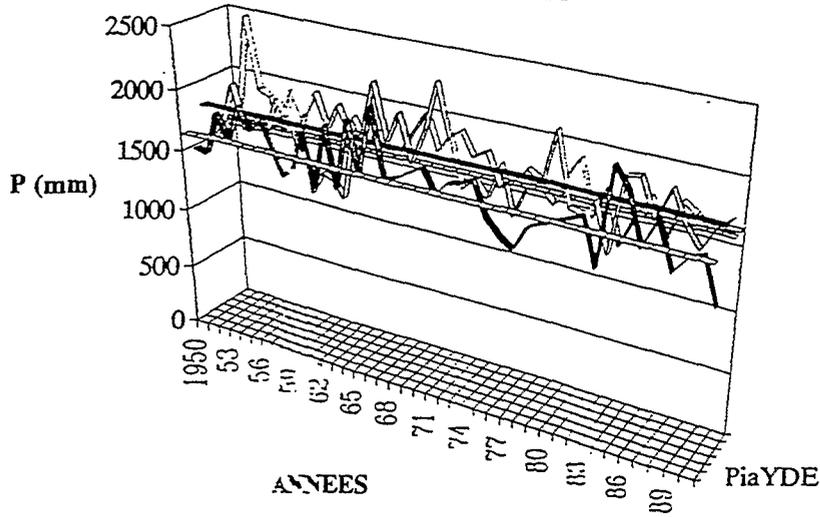
de 100 mm. Elle passe ensuite à 1 582 mm à Abong-Mbang, remonte légèrement à 1 621 mm à Lomié. Cette diminution se poursuit vers l'est où la hauteur est de 1 592 mm à Yokadouma. Plus à l'est, elle n'est plus que de 1 456 mm à Berbérati en République Centrafricaine. Dans la partie sud-est, ces variations méridiennes sont très fortes. En effet, après une relative stabilité observée entre Djoum (1 656 mm) et Lomié (1 621 mm), on passe à 1 430 mm à Elendzo en République congolaise (non loin de Souanké où la pluie interannuelle observée est de 1 620 mm), puis à 1 354 mm à Moloundou, - hauteur voisine à celle du climat tropical de transition - avant de retrouver la hauteur du climat équatorial à Ouesso (1 672 mm).

Dans la recherche d'une explication relative à cette forte disparité de la pluviosité, la relation entre la hauteur pluviométrique interannuelle et l'altitude s'est avérée mauvaise (figure 2-4). Il en est de même de celle existant entre la pluie moyenne annuelle et la distance de la station à l'océan Atlantique (figure 2-5). Il est possible qu'elle soit liée aux phénomènes locaux notamment au recyclage de la vapeur d'eau par la végétation (SUCHEL, 1987 et TSALEFAC, 1991).

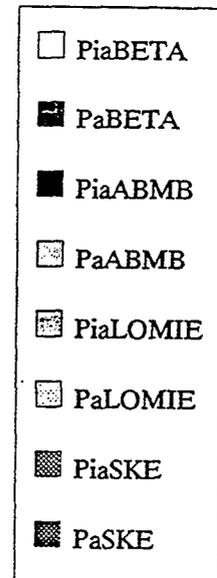
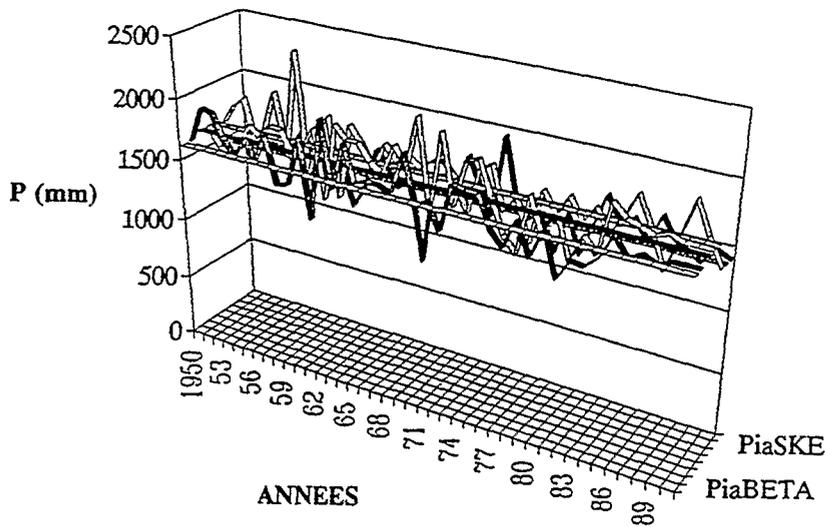
En définitive, on peut retenir que les variations méridiennes et latitudinales montrent une chute de la pluviosité vers Moloundou. Nous y reviendrons dans l'étude des régimes pluviométriques sur le bassin versant de la Ngoko.

Les variations temporelles des précipitations

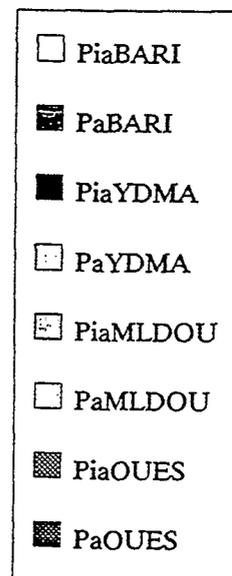
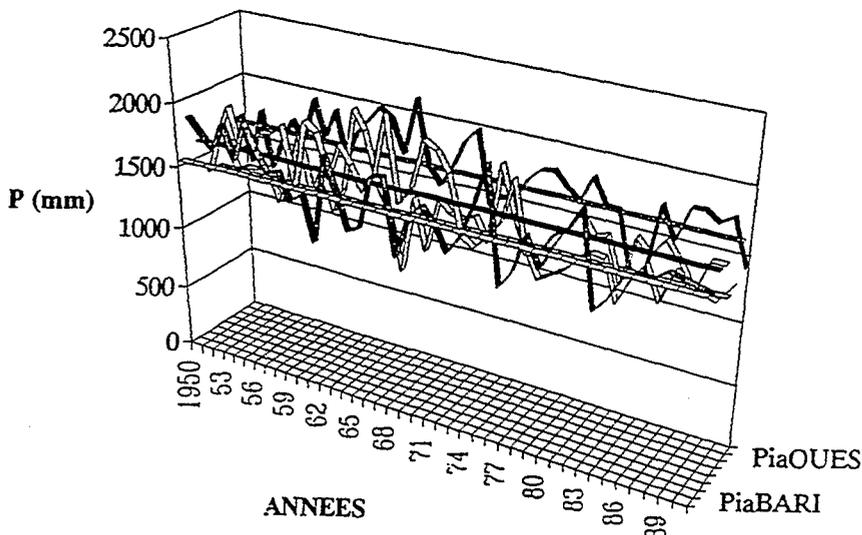
A l'échelle pluriannuelle, les figures 2-2 et 2-3 montrent que les précipitations varient en dents de scie, la partie supérieure à la moyenne indiquant les années ou les périodes excédentaires (humides), la partie inférieure indiquant les années ou les périodes déficitaires (sèches), au milieu desquelles se trouvent des années normales. Elles permettent également de relever que les séquences identiques n'apparaissent pas nécessairement au même moment à toutes les stations ; cette observation est valable aussi bien dans les distributions latitudinale que longitudinale décrites plus haut. Il pourrait s'agir là de l'influence de l'un ou de l'autre des éléments naturels des bassins ou de la conjugaison de leurs effets. On note par exemple une localisation de l'année déficitaire 1961 aux stations de l'arrière pays, dans la zone de Bertoua, Batouri et Lomié. Elle est suivie, dans la même région, par une année excédentaire, caractérisée à Bertoua, Batouri et Moloundou. Dans la partie occidentale de notre zone d'intérêt, l'année 1983 est déficitaire aux stations relativement peu éloignées de l'Atlantique (Kribi, Nyabessan et Ebolowa).



CENTRE



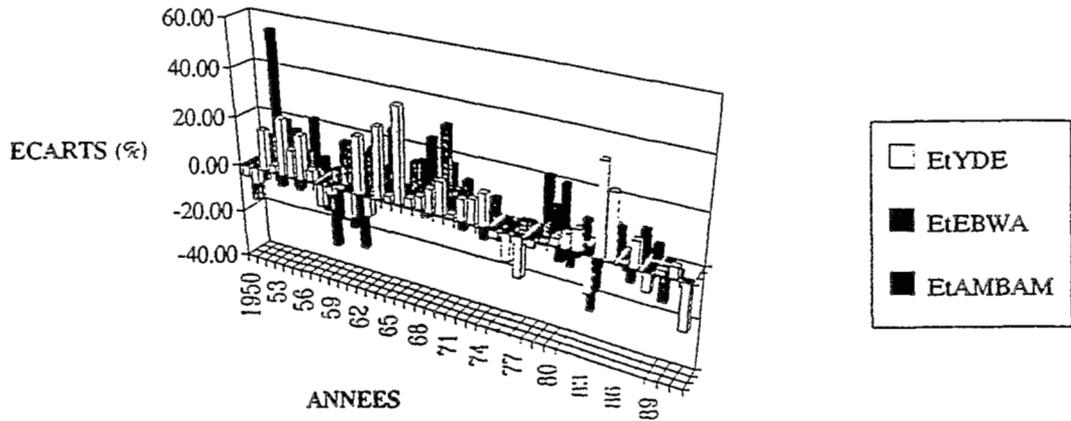
EST



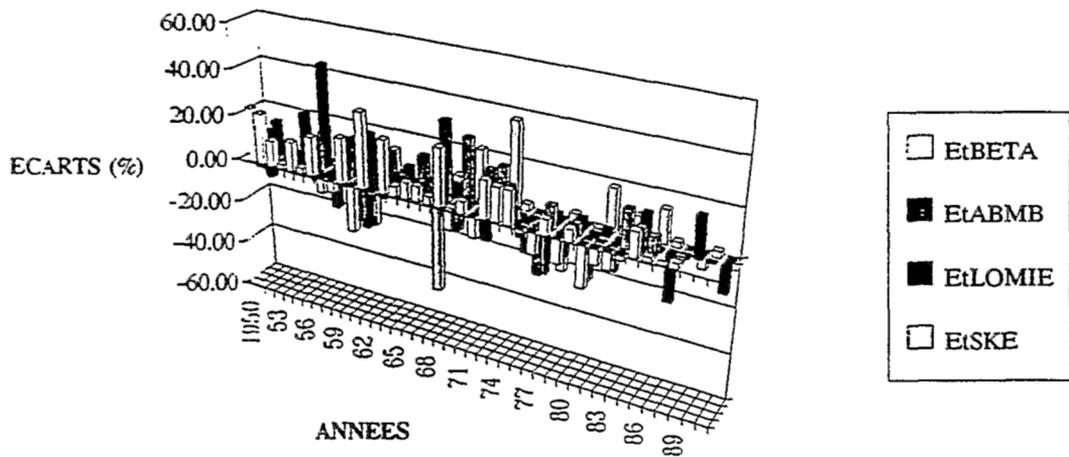
a) Zonalité latitudinale et fluctuations annuelles des précipitations.

Figure 2-2

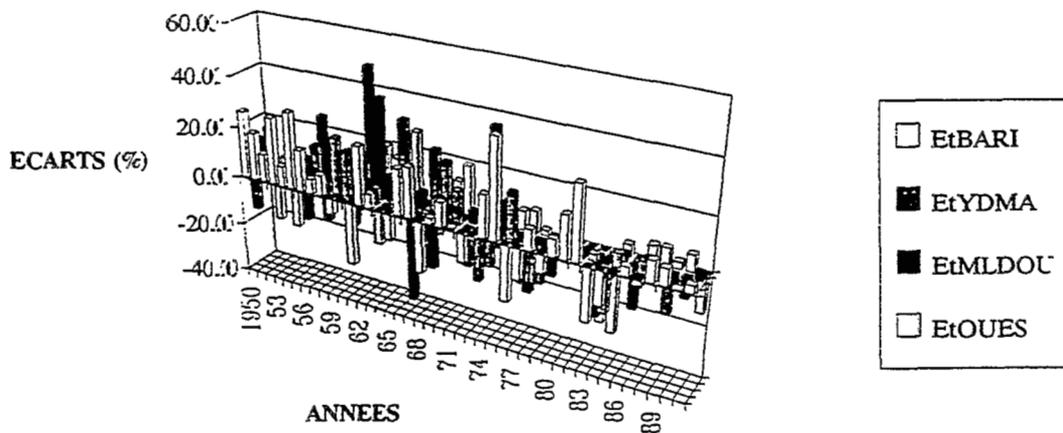
OUEST



CENTRE

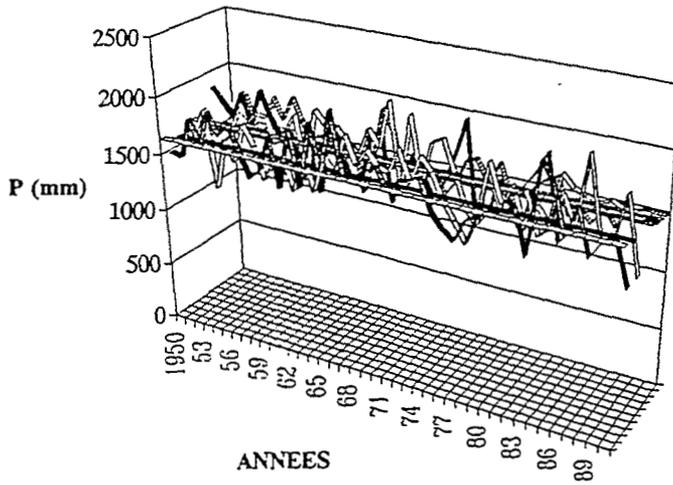


EST



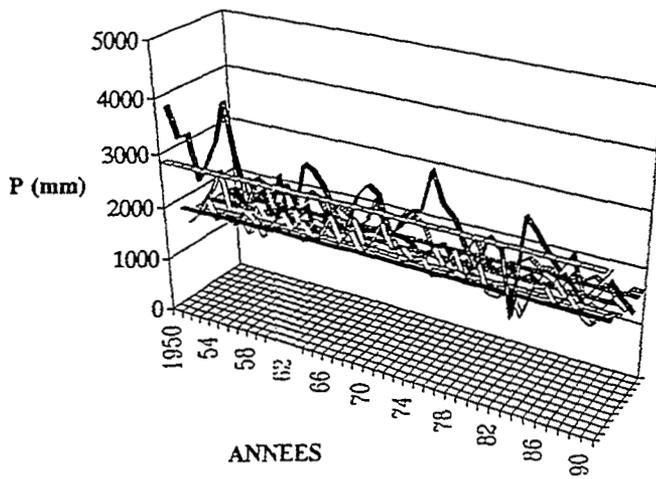
b) Zonalité latitudinale et évolution des écarts à la moyenne interannuelle des précipitations

Figure 2-2 (suite)



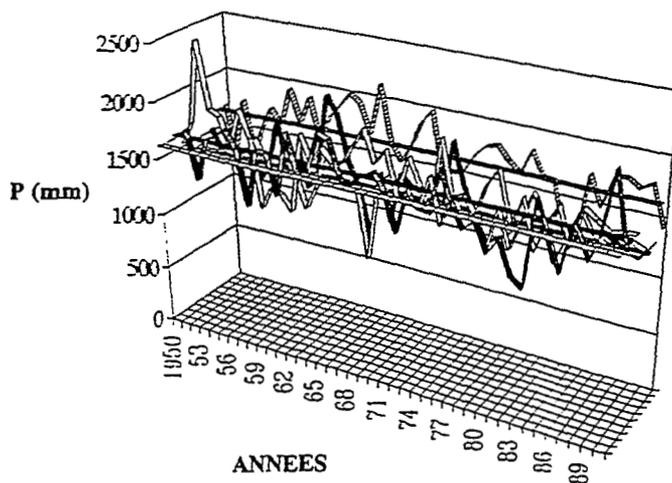
- PiaYDE
- PaYDE
- PiaAKGA
- PaAKGA
- ▨ PiaABMB
- PaABMB
- ▨ PiaBARI
- PaBARI
- ▨ PiaBBTI
- ▨ PaBBTI

CENTRE



- PiaKRIBI
- PaKRIBI
- PiaEBWA
- PaEBWA
- ▨ PiaSGMA
- PaSGMA
- ▨ PiaLOMIE
- PaLOMIE
- ▨ PiaYDMA
- ▨ PaYDMA

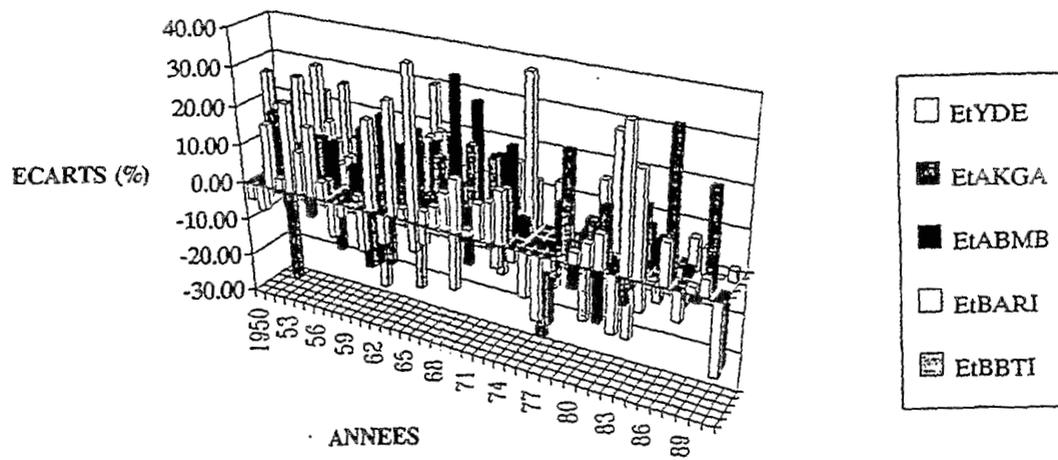
SUD



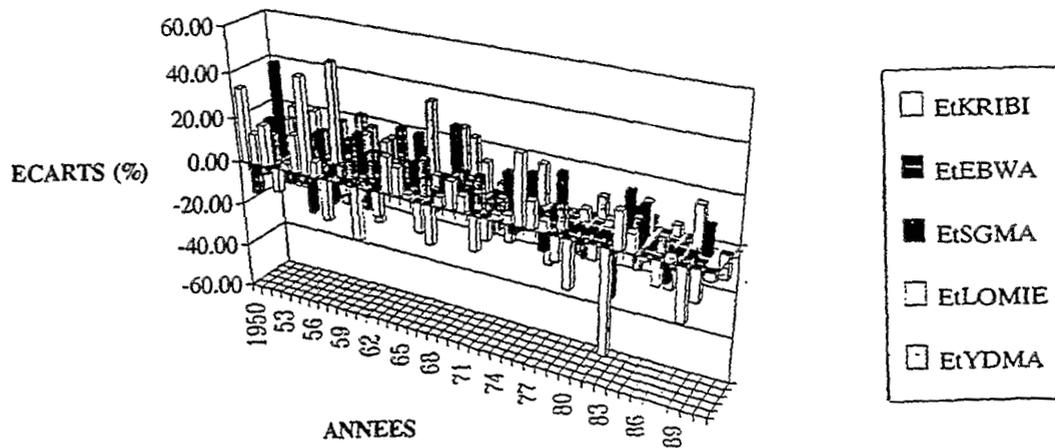
- PiaNYABE
- PaNYABE
- PiaAMBAM
- PaAMBAM
- ▨ PiaSKE
- PaSKE
- ▨ PiaMLDOU
- PaMLDOU
- ▨ PiaOUES
- ▨ PaOUES

a) Zonalité méridienne et fluctuations annuelles des précipitations

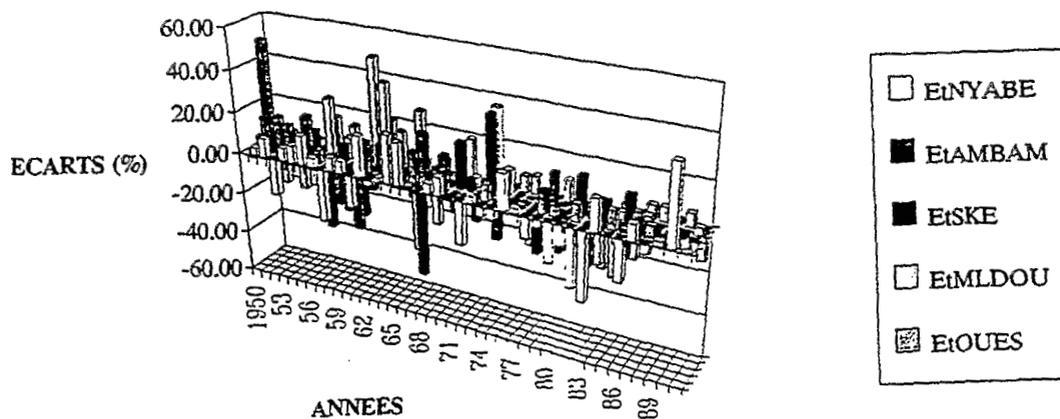
Figure 2-3



CENTRE



SUD



b) Zonalité méridienne et évolution des écarts à la moyenne des précipitations interannuelles

Figure 2-3 (suite)

Légendes des figures 2-2 et 2-3

Pa : Pluie annuelle ; Pia : Pluie interannuelle ; Et : Ecart à la moyenne pluviométrique interannuelle.
 YDE : Yaoundé ; AKGA : Akonolinga ; EBWA : Ebolowa ; SGMA : Sangmélina ; BETA : Bertoua ; ABMB :
 Abong-Mbang ; SKE : Souanké ; BARI : Batouri ; YDMA : Yokadouma ; MLDOU : Moloundou ; OUES :
 Ouesso ; NYABE : Nyabessan ; BBTI : Berbérati

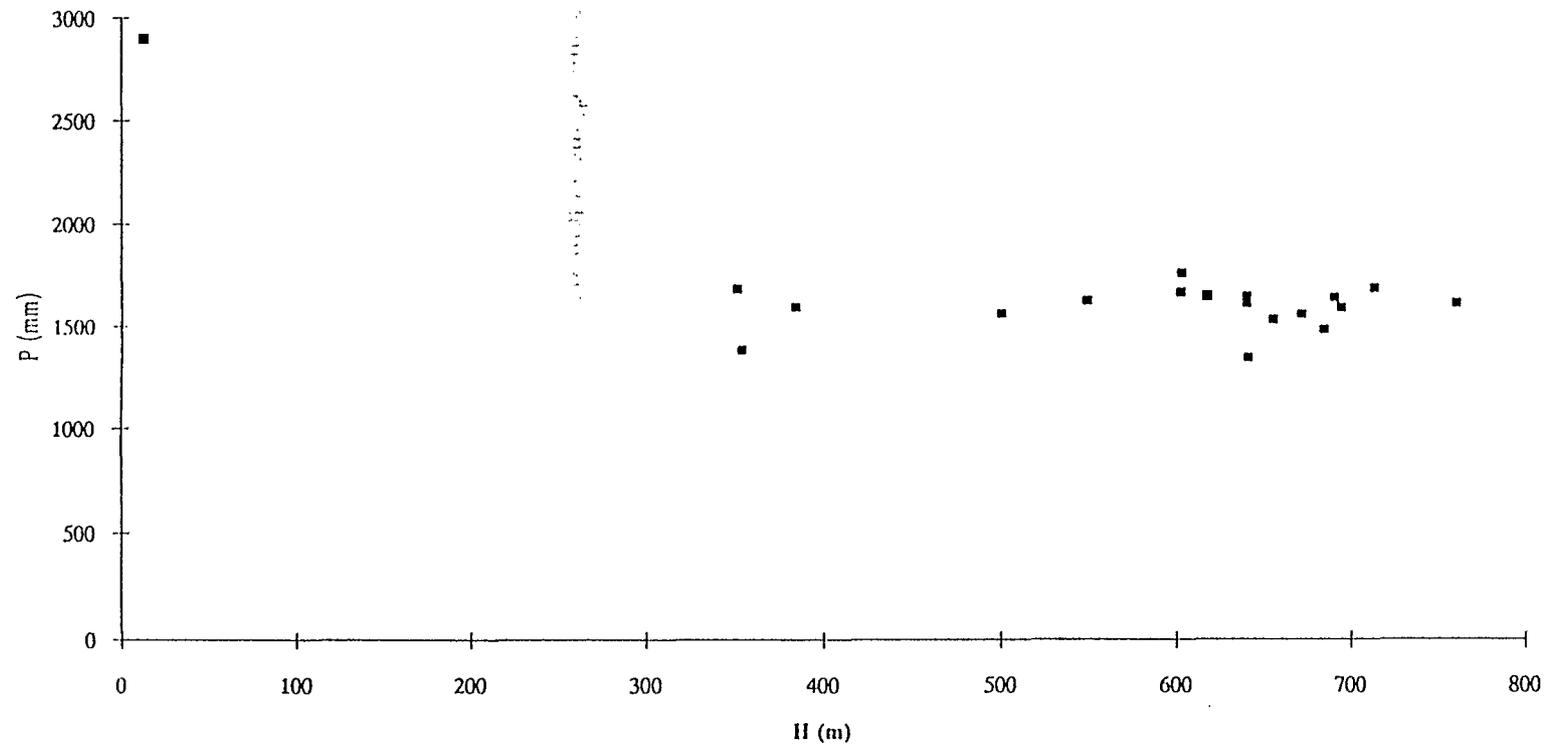


Figure 2-4 : Pluviométrie interannuelle en fonction de l'altitude

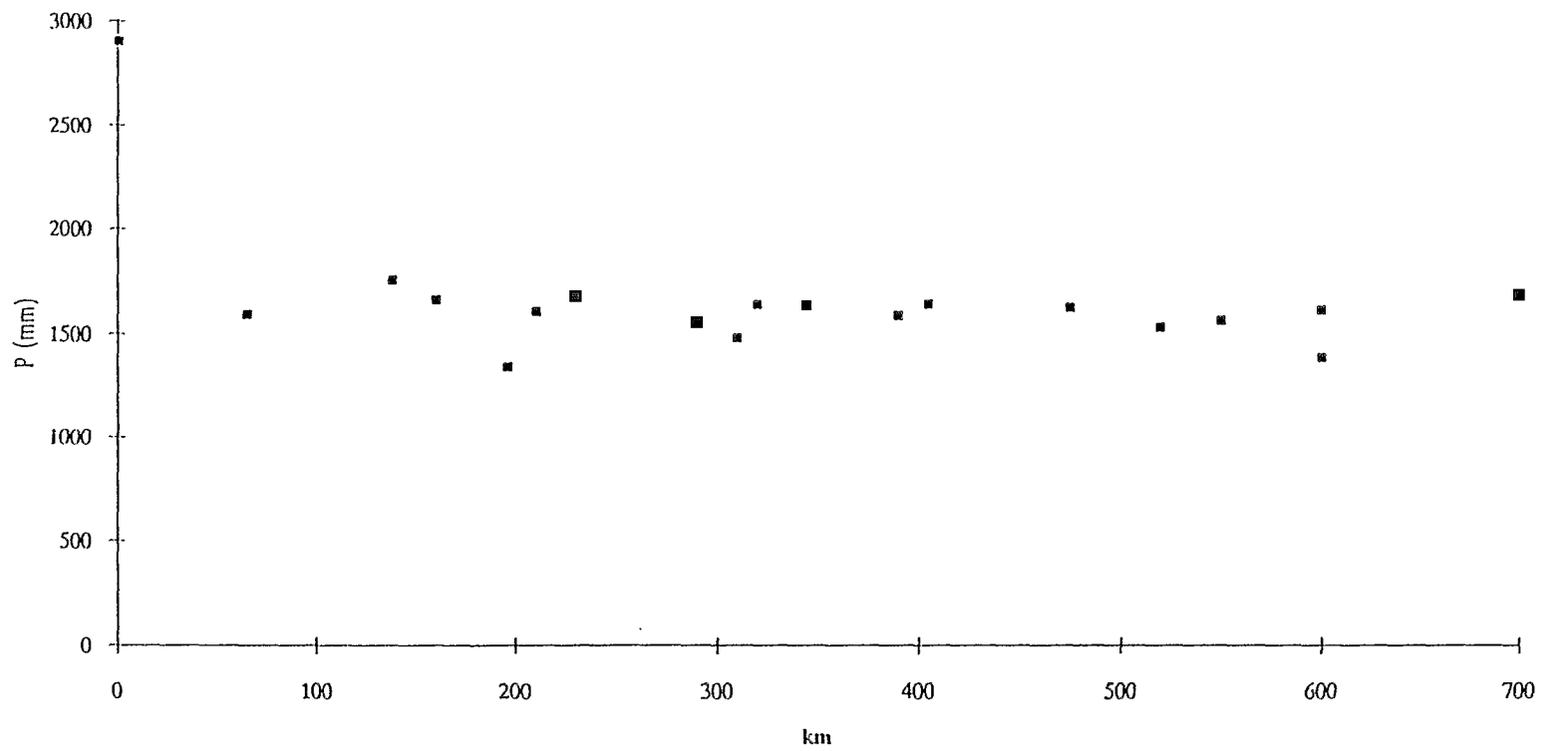


Figure 2-5 : Pluviométrie interannuelle en fonction de la distance à l'atlantique

A la suite de cette analyse, on peut dire que l'absence des mois sans pluie et les différences notées d'une station à l'autre sur l'apparition des années ou des séquences sèche, moyenne, et humide peuvent jouer un rôle considérable dans la constance du climat et sur la régularité des régimes hydrologiques et des exportations de matières. Cela signifie que le déficit pluviométrique en un point du bassin est compensé par l'excédent en un autre point. Les nappes phréatiques sont rechargées de manière à soutenir les écoulements des rivières en période d'étiage. Cette réalimentation continue limite l'abaissement des nappes qui peuvent ainsi maintenir l'humidité des sols. Les arbres s'alimentent en permanence en eau et peuvent donc conserver leur feuillage, de telle sorte que les premières pluies sont sans conséquence érosive grave. On doit également signaler la rétention de l'eau et des apports météoriques par la litière qui freine le ruissellement et par conséquent l'érosion.

Variabilité saisonnière spatiale des précipitations au cours des cycles étudiés

Les précipitations mensuelles des cycles 1989/90, 1990/91 et 1991/92 sont représentées sur les figures 2-6 a et b suivant les transects nord-sud et ouest-est respectivement.

La figure 2-6 a montre, pour le transect nord-sud, une accentuation de la petite saison sèche (juillet-août) depuis les hautes latitudes (Yaoundé-Batouri) vers l'équateur thermique (Bitam-Ouessou). Pour ce concerne le transect ouest-est (figure 2-6 a), on note, aux mêmes latitudes, des similitudes dans la variation de la pluie mensuelle.

Nous avons également calculé les pluies moyennes par bassin versant étudié à l'échelle interannuelle et de nos années d'observations, par la méthode des polygones de THIESSEN. Les résultats sont regroupés dans le tableau 2-4.

2.2. LE BASSIN VERSANT DE LA NGOKO

Les isohyètes interannuelles ainsi que ceux de nos campagnes de mesures sont reportés sur les figures 2-7 a à 2-7 d.

La carte de la figure 2-7 a montre qu'à l'ouest de l'isohyète 1 600 mm, qui a grossièrement la forme d'un triangle ayant pour sommets Souanké au sud-est, Lomié au centre et Yokadouma au nord-est, la pluviométrie est comprise entre 1 600 et 1 900 mm tandis qu'à l'est elle s'abaisse rapidement et atteint des valeurs de 1 300 mm à Moloundou.

a) Transect Nord-Sud

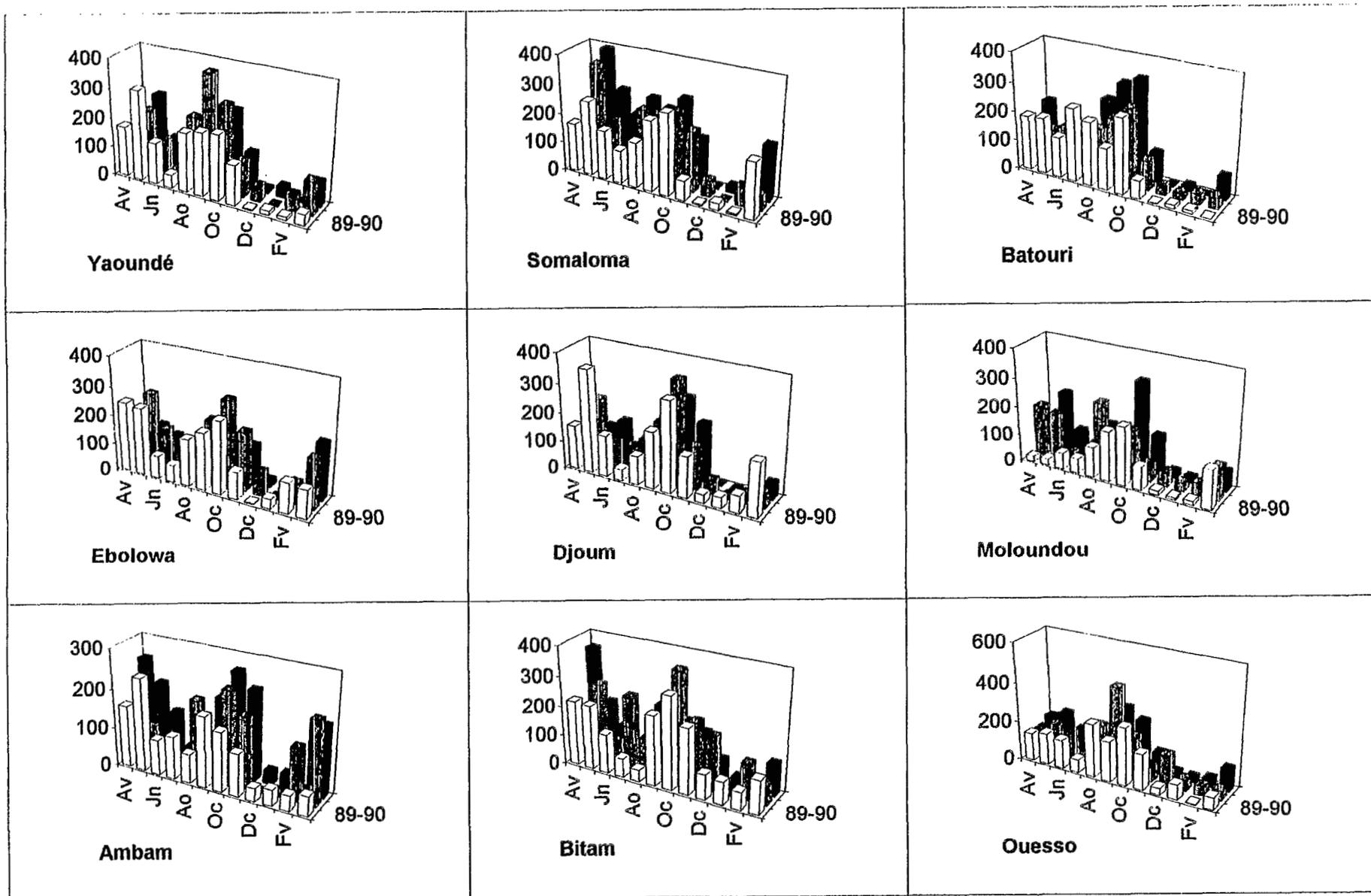


Figure 2-6 : Variations saisonnières spatiales des précipitations

b) Transect Ouest-Est

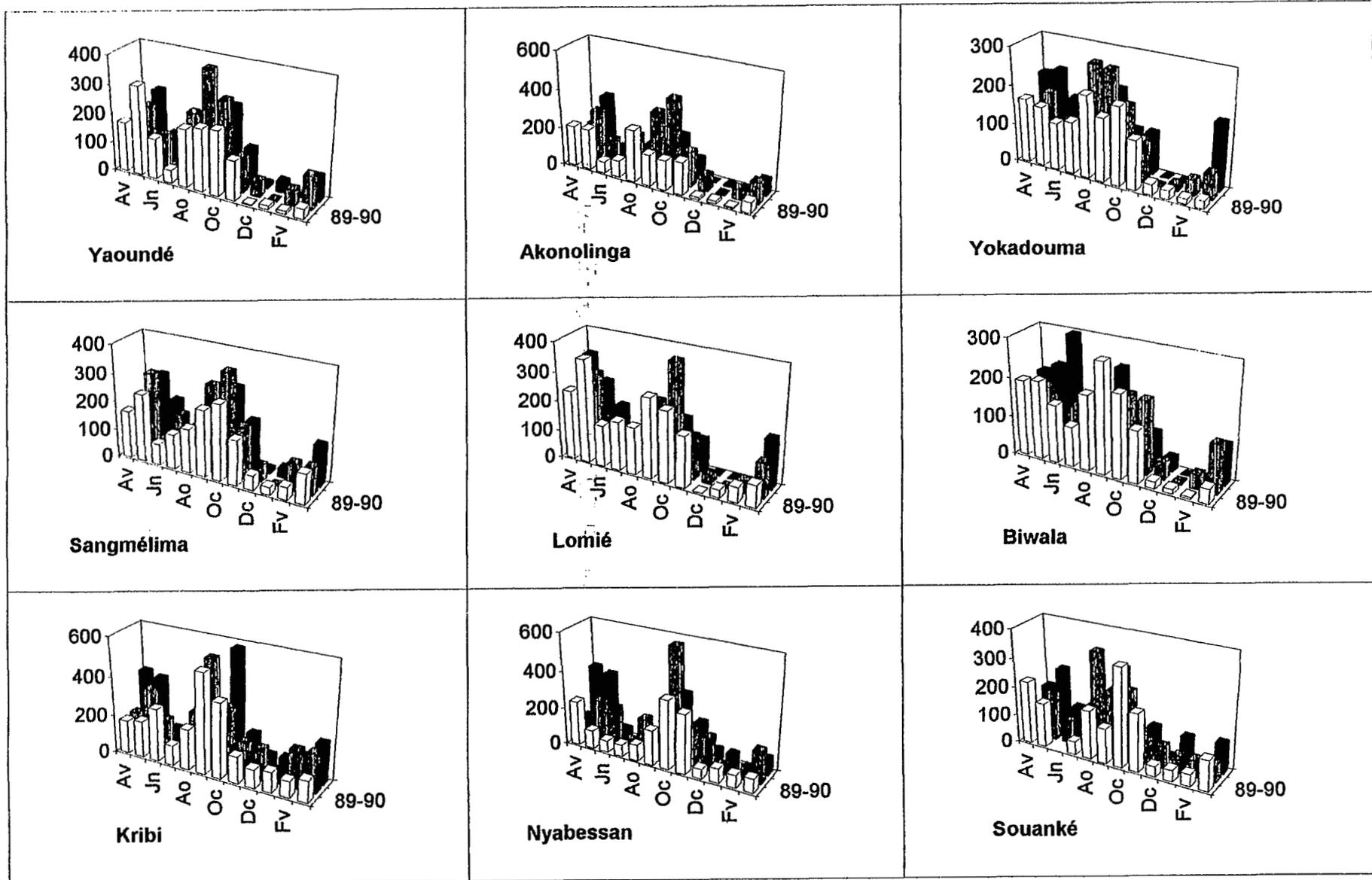


Figure 2-6 (Suite)

Tableau 2-4 : Pluviométrie moyenne par bassin versant en mm

C. D'EAU	STATIONS	1989/1990	1990/1991	1991/1992	1989/1992	Moyenne interannuelle
Boumba	Biwala	1685	1705	1530	1640	1640
Boumba	Moloundou-Bac	1350	1390	1365	1365	1385
Dja	Somalomo	1705	1545	1840	1695	1660
Dja	Bi	1705	1620	1690	1675	1710
Dja	Moloundou-SOTREF	1605	1610	1520	1580	1635
Ngoko	Moloundou	1480	1500	1440	1470	1510
Nyong	Akonolinga	1470	1755	1570	1600	1540
Nyong	Mbalmayo	1460	1770	1480	1570	1530
Ntem	Ngoazik	1795	1830	1500	1710	1675
Ntem	Nyabessan	1670	1740	1465	1625	1645

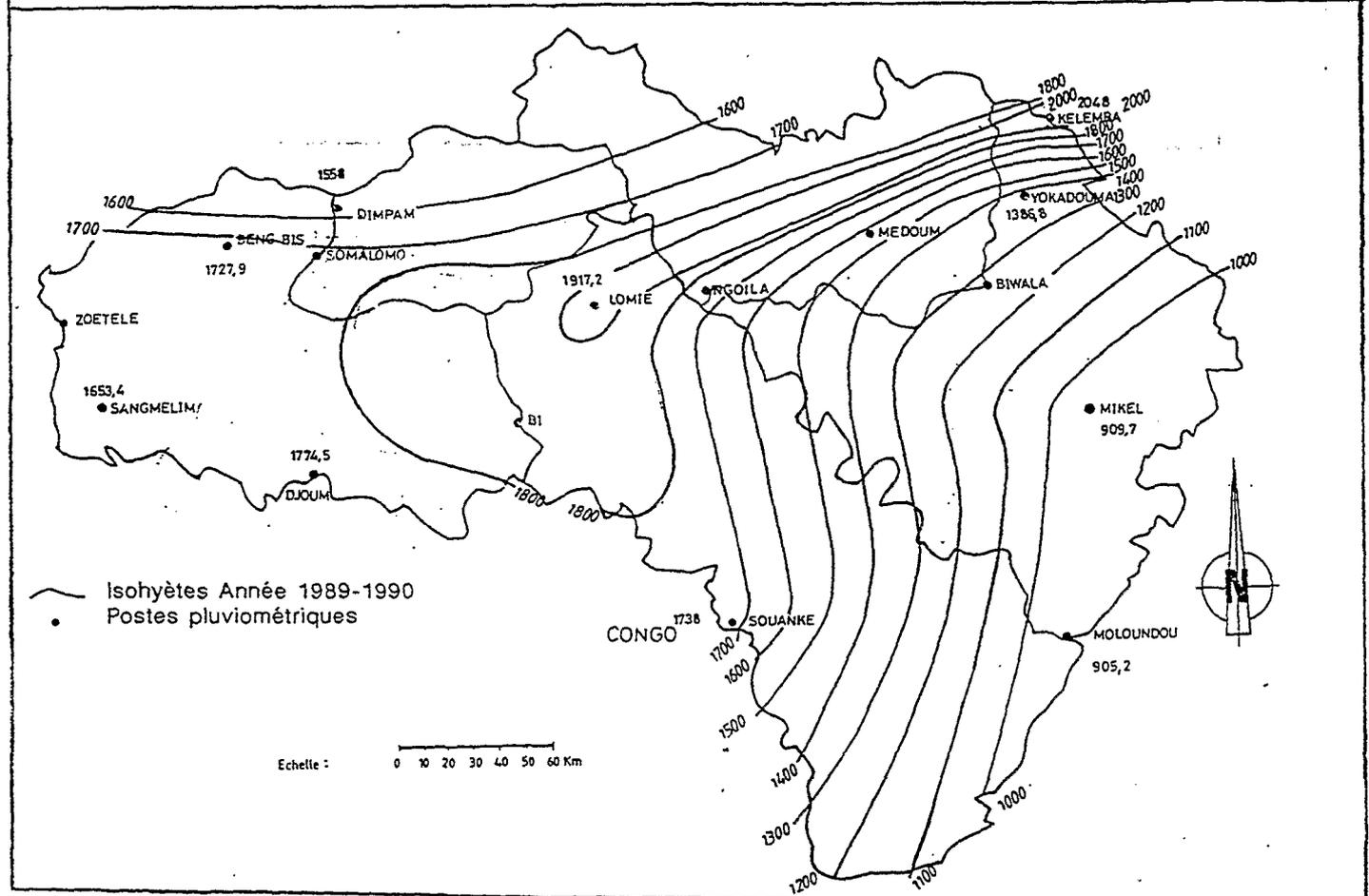
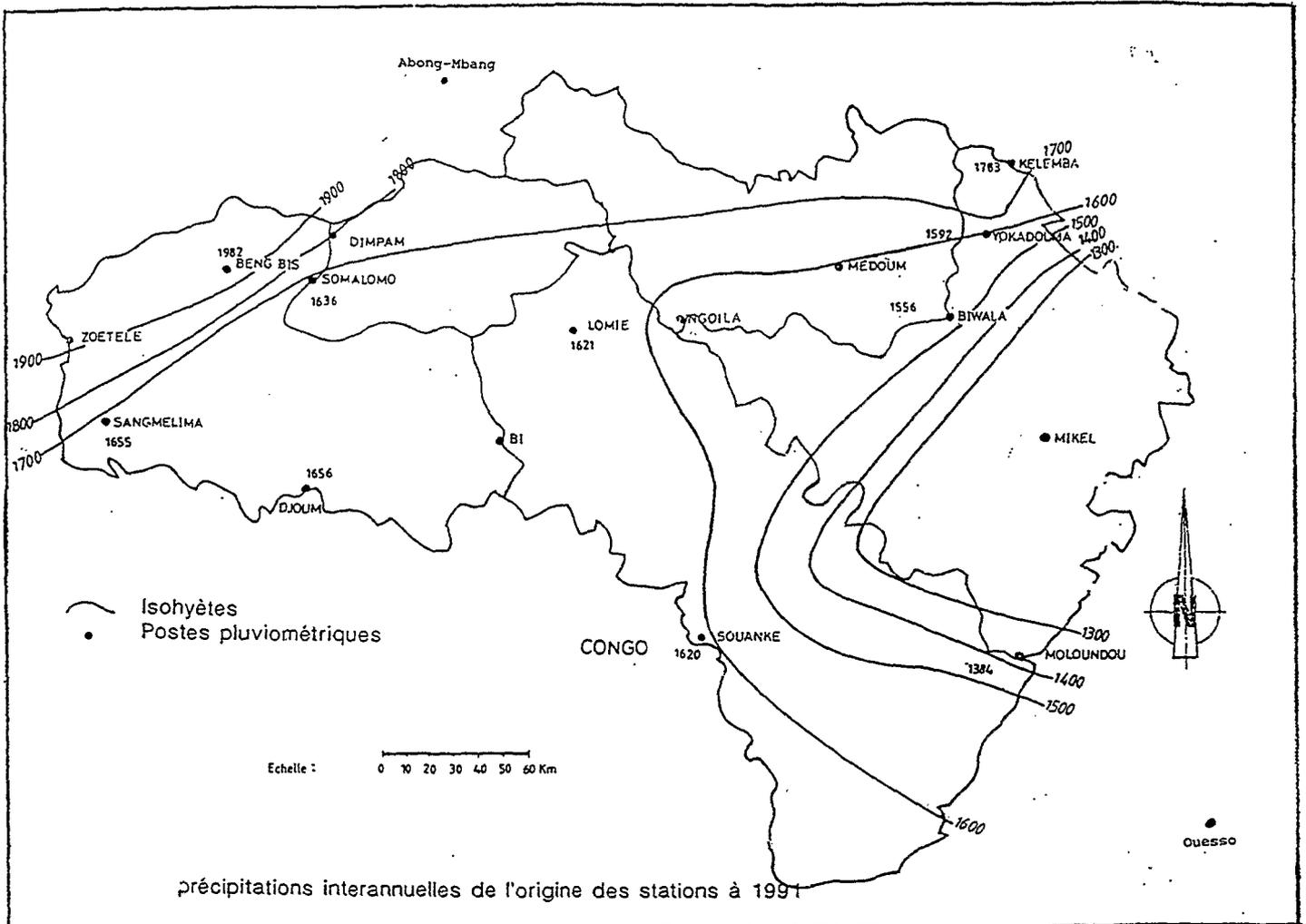


Figure 2-7 : Isohyètes du bassin versant de la Ngoko à Maloundou

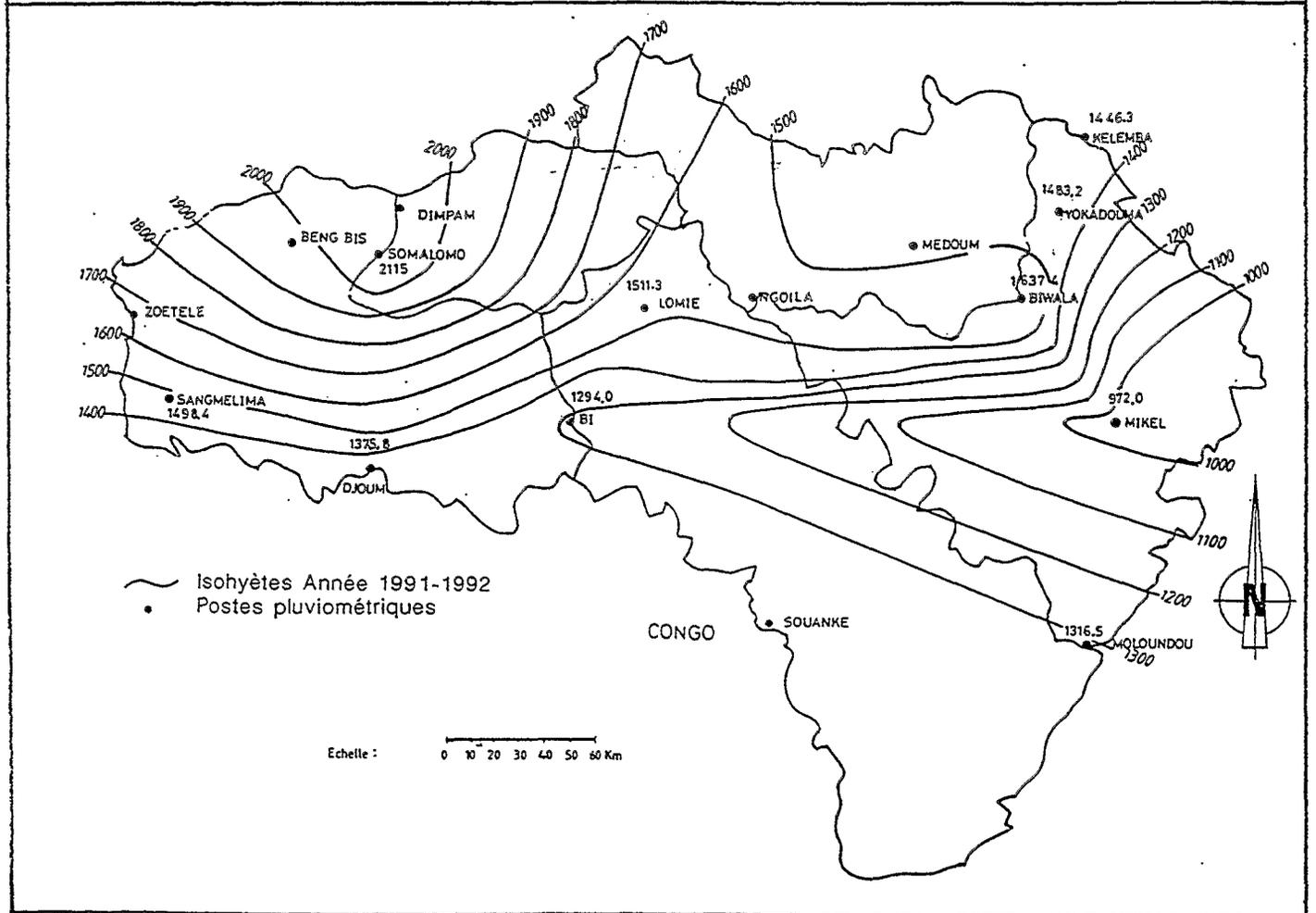
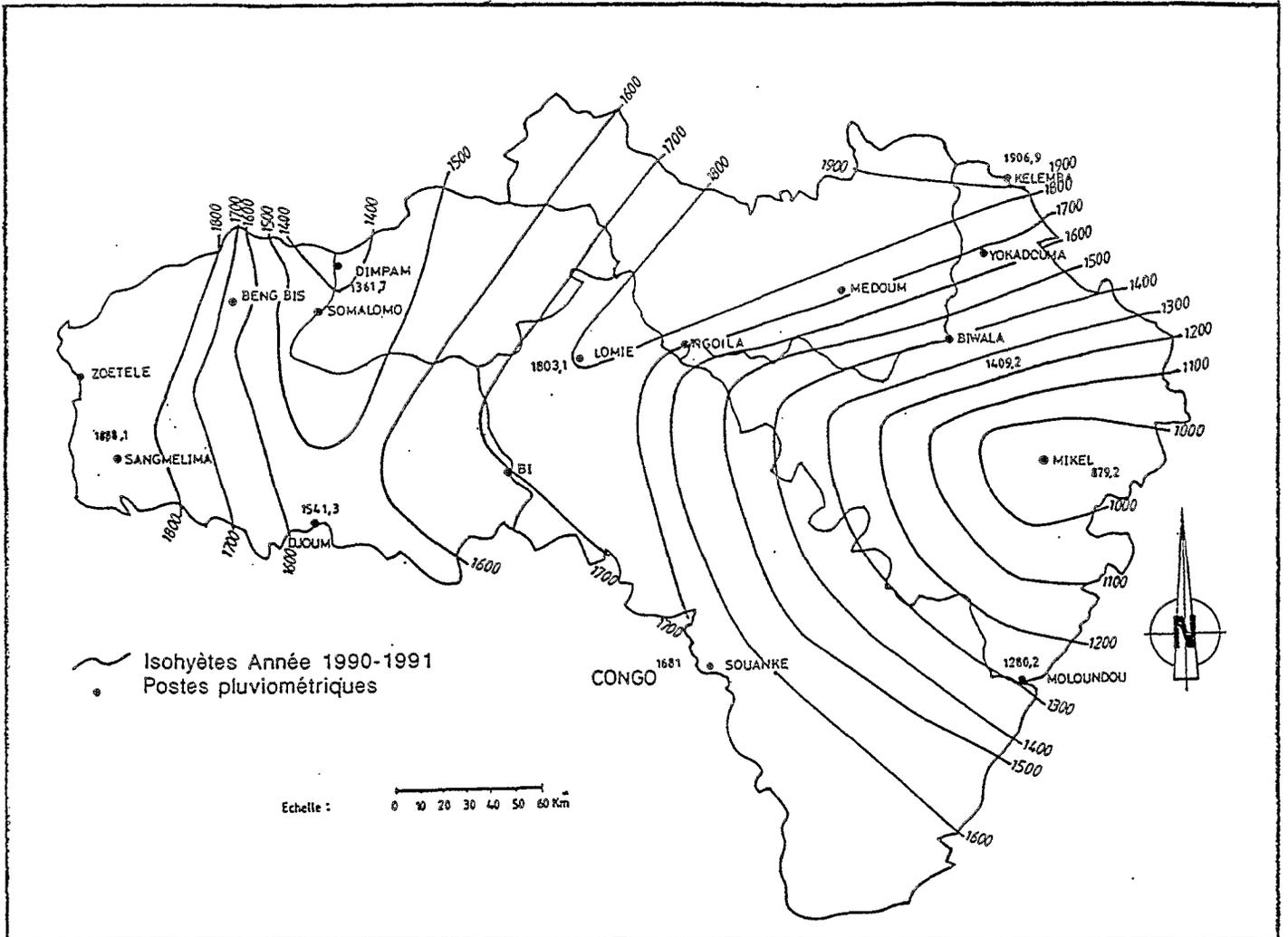


Figure 2-7 (suite)

Cette baisse est accentuée à Mickel où, à titre indicatif, les hauteurs pluviométriques annuelles sont restées inférieures à 1 000 mm de 1989 à 1991. La moyenne à cette station en trois ans est de 909 mm. Bien que cette valeur soit peu représentative compte tenu de la courte durée des mesures, elle constitue un élément de plus pour confirmer l'existence d'une anomalie climatique dont on a vu des séquelles lors de la description de la végétation et des sols. Ce déficit pluviométrique a déjà été constaté par plusieurs auteurs.

Dès 1959, SEGALEN et LETOUZEY ont indiqué une moyenne annuelle de 1 250 mm à Moloundou. En 1986, OLIVRY, après avoir trouvé des hauteurs de pluie de 1 608 mm à Yokadouma, 1 456 mm à Moloundou et de 1 666 mm à Ouesso note que les variations spatiales de la pluviométrie annuelle ne semblent pas répondre à une zonalité déterminée et que dans l'état actuel de nos connaissances, il n'était pas possible de dire si ces variations étaient dues à la topographie, la végétation ou l'hydrographie. A une date plus récente, SUCHEL (1987), devant les 1497 mm de pluie moyenne annuelle enregistrée à Moloundou s'étonne de " cette dotation bien maigre pour un climat typiquement équatorial". Il se demande si elle est réellement justifiable par la topographie locale en cuvette, ou si elle ne traduirait pas plutôt un manque de suivi des observations dans cette sous-préfecture du bout du monde ?

Dans la recherche d'une explication à ce déficit pluviométrique amorcée au 2.1., nous pensons que si elle était due à la mauvaise qualité de données à Moloundou (SUCHEL, 1987), elle se serait améliorée avec l'homogénéisation par le vecteur régional (MAHE, 1992). Or, on s'aperçoit que la hauteur pluviométrique à Moloundou trouvée après homogénéisation (1351 mm) est plutôt inférieure à celle des observations (1381 mm) avec une erreur de 2,22 %, ce qui est négligeable. De même, la méthode de double cumul (figure 2-8) entre les pluies observées de 1960 à 1991 à Yokadouma, à Souanké, à Moloundou et à Ouesso ne met pas en évidence une cassure nécessitant des corrections. Ces différents résultats semblent confirmer l'hypothèse des pédologues et des botanistes selon laquelle la présence des cuirasses, des termitières et prairies inondables sont des témoins de l'existence, à une époque d'un climat soudanien.

En ce qui nous concerne, compte tenu de la faible densité du réseau pluviométrique et de la courte série de mesures et de la complexité du problème, nous émettrons des hypothèses qui mériteraient d'être vérifiées par une multiplication des postes de mesures.

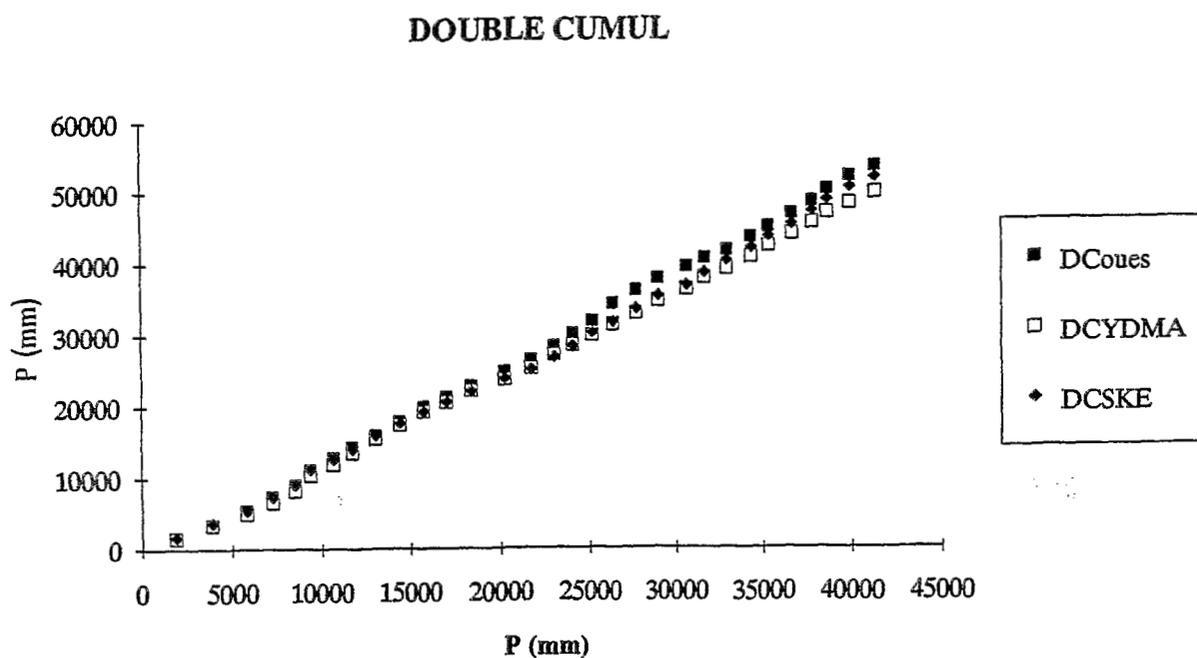


Figure 2-8 : Double cumul des précipitations annuelles

Légende :

DC : Double cumul

OUES : Ouesso ; YDMA : Yokadouma ; SKE : Souanké

Il est probable que la succession des collines d'environ 800 m d'altitude situées entre Biwala et Lokomo, constitue un obstacle à l'avancée de la mousson vers l'Est. Ces provoqueraient ainsi des pressions d'ascendance orographique. Dans ce cas, Mickel, Moloundou et Elendzo, derrière cette "barrière" orographique se trouveraient plus souvent sous une atmosphère plus sèche que les versants exposés à la mousson et recevraient de plus faibles précipitations que Lomié, Kelemba et Gari-Gombo par exemple.

Le cadre naturel et le déficit pluviométrique dans la région de Lokomo-Mickel-Moloundou peuvent conduire à des régimes hydrologiques et des exportations de matières assez différents de ceux du reste du bassin versant de la Ngoko.

Nous avons calculé les précipitations moyennes sur le bassin de la Ngoko à l'échelle interannuelle et annuelle des cycles étudiés sur le bassin de la Ngoko par la méthode des isohyètes. Les résultats ne montrent pas de différences notables avec ceux obtenus par la méthode de THIESSEN. En effet, la pluie moyenne interannuelle par la méthode des isohyètes est de 1 530 mm contre 1 512 mm par les polygones de THIESSEN, soit une différence de 1,2 %. Pour nos cycles d'étude, les méthodes des isohyètes et de THIESSEN donnent respectivement 1 477 et 1 476 mm (1989/90), 1 490 et 1 503 mm (1990/91) et 1 419 et 1 444 mm (1991/92) avec des différences variant de 0 à 2 %. Compte tenu du fait que nous utiliserons la méthode de THIESSEN dans les calculs des apports atmosphériques (chapitre 6), nous adoptons les résultats obtenus par ladite méthode (tableau 2-4).

En résumé, outre la variabilité spatio-temporelle de la pluviosité dans notre zone d'étude, l'analyse des régimes des précipitations a permis de relever une différence du fonctionnement hydro-pluviométrique des deux sous-bassins qui constituent le bassin versant de la Ngoko. En effet, le bassin de la Boumba est moins arrosé que celui du Dja. Cette division est certainement en relation avec les collines en aval de Biwala, qui constitueraient "une barrière" orographique à l'avancée de la mousson, d'où les faibles précipitations enregistrées dans la zone située derrière cet obstacle, où on note la présence des termitières et d'une forêt sémi-caducifoliée.

CHAPITRE 3

LES REGIMES HYDROLOGIQUES

Les stations principales sur lesquelles ont été effectués en grande partie les prélèvements des échantillons exploités dans cette étude, - Moloundou sur la Ngoko d'une part-, Moloundou-SOTREF sur le Dja et Moloundou-Bac sur la Boumba d'autre part-, ont été ouvertes en mai 1987 pour ce qui est de la première station et en avril 1989 pour ce qui est des deux dernières. Ceci signifie que du point de vue hydrologique, elles n'ont été suivies que pendant la période qui intéresse cette étude, à savoir de 1989 à mars 1992. Il convient de signaler en passant que le cycle hydrologique normal de notre zone d'intérêt débute le 01 avril et s'achève le 31 mars de l'année suivante.

Afin d'avoir une bonne approche du fonctionnement hydrochimique du bassin versant de la Ngoko, nous avons pensé qu'à défaut d'une longue chronique de débits à la station principale de Moloundou, nous pouvions nous inspirer des caractéristiques des régimes hydrologiques des stations en amont sur ses deux principaux formateurs, le Dja et la Boumba, de même que celles placées sur les cours d'eau drainant les bassins versants limitrophes à l'ouest à savoir : le Nyong en amont de Mbalmayo et le Ntem en amont des chutes de Menve'elé.

L'étude des facteurs qui conditionnent les régimes hydrologiques et même ceux des exportations des substances issues des versants nous a permis de retenir qu'il existe de nombreuses analogies entre les caractéristiques naturelles de ces différents bassins. Les observations hydrométriques ont démarré sur la plupart de ces stations il y a au moins trois décennies. Elles ont fait l'objet d'une étude hydrologique de la date de la création de chacune des stations à 1978 (OLIVRY, 1986) ; celle-ci a été complétée sur le Ntem jusqu'en 1983 (BOUM et al, 1983) ; à une date plus récente, MAHE (1992) a établi les bilans hydriques sur le Nyong à Déhane et le Ntem à Nyabessan jusqu'en 1989. On constate donc que les seules études sur le Dja et la Boumba restent celles du premier auteur cité. De plus, à Bi sur le Dja, elles ne portent que sur sept années d'observations.

Dans ce travail, nous nous proposons de réactualiser les données aux différentes stations jusqu'en mars 1992, afin d'en déduire les caractéristiques des cycles hydrologiques 1989-90, 1990-91 et 1991-92 pendant lesquels nous avons réalisé nos mesures à ces stations et à Moloundou sur la Ngoko, le Dja à la SOTREF et la Boumba au Bac. L'intérêt pour cette réactualisation s'appuie sur la présomption selon laquelle le débit à un point donné d'un cours d'eau - étant l'expression des précipitations et de leurs variabilités

spatio-temporelles, des facteurs naturels (morphologie, géologie, pédologie, végétation), des influences humaines et biologiques -, constitue un bon indice global du fonctionnement du bassin versant. Des variations démesurées de débits peuvent alors être considérées comme des indicateurs ou des réponses aux perturbations naturelles et/ou humaines de l'un des éléments ci-dessus ou de la combinaison de plusieurs d'entre eux, induisant par le fait même une modification des comportements hydrologique et hydrochimique du bassin versant intéressé.

Il ne s'agit donc pas ici de reprendre intégralement les travaux cités ci-dessus, mais d'en tirer des informations pour compléter celles obtenues dans ce travail, en vue d'une synthèse permettant la description du comportement hydrologique de l'ensemble de notre zone d'intérêt aussi bien dans l'espace que dans le temps ; on pourra ainsi, de proche en proche, reconnaître le fonctionnement de cet écosystème.

C'est à la suite de cette synthèse - qui incorpore directement les résultats obtenus de 1989 à 1992 aux dites stations -, que seront présentés et interprétés les résultats acquis pendant nos campagnes de mesures à Moloundou sur la Ngoko, le Dja à la SOTREF et la Boumba au Bac. Ils seront utilisés par la suite pour établir les bilans hydrologiques.

Afin de combler les nombreuses lacunes enregistrées sur les cours d'eau étudiés, nous avons, de proche en proche, utilisé les corrélations entre les modules des stations qui intéressent ou non ce travail, mais qui sont susceptibles de nous donner des estimations satisfaisantes (tableau 3-1), à l'instar de la station de Déhane sur le Nyong dont les modules ont été reconstitués jusqu'en 1989 (MAHE, 1992).

3.1. LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES REGIMES HYDROLOGIQUES DU DJA ET DE LA BOUMBA

Le bassins versant du Dja aux stations de Somalomo et de Bi d'une part, et le bassin de la Boumba à la station de Biwala d'autre part, bien que suivis depuis environ une trentaine d'années, n'ont pas encore fait l'objet d'une étude détaillée. Or, les deux cours d'eau se réunissent à Moloundou pour former la Ngoko dont le bassin versant constitue l'objet principal de ce travail. C'est la raison pour laquelle, en plus des modules annuels, nous allons étendre l'étude aux débits extrêmes et caractéristiques. De même, afin d'avoir l'ordre de grandeur des modules des années à caractère exceptionnel aux stations de Moloundou sur la Ngoko, le Dja à la SOTREF et la Boumba au Bac, nous allons décrire la répartition statistique des observations aux stations en amont. A

Tableau 3-1 : Corrélations entre les modules des stations de longue durée

TYPE DE CORRELATION	N	r
$QMBYo = 1.3436QNYa + 26.8$	33	0.866
$QMBYo = 0.2405QDEHa + 40.8$	36	0.7673
$QDSo = 0.5460QNYa + 18.3$	21	0.8465
$QDBi = 3.454QDSo + 7.57$	17	0.939
$QBWa = 0.5199QNYa + 60$	17	0.7115
$QNYAb = 1.216QNGOa + 88.3$	28	0.9364
Légende :		
Q = Module (m ³ /s) ; N : Nombre de valeurs ; r = Coefficient de corrélation		
MBYo : Nyong à Mbalmayo ; NYa : Nyong à Akonolinga ; DEHa : Nyong à Déhane;		
DSo : Dja à Somalomo ; DBi : Dja à Bi ;		
NYAb : Ntem à Nyabessan ; NGOa : Ntem à Ngoazik.		

l'échelle pluriannuelle, nous allons suivre les fluctuations des modules et de l'hydraulicité afin de comprendre comment réagissent les bassins aux oscillations, souvent en dents de scie, des précipitations dont on a largement parlé au chapitre précédent.

3.1.1. LE BASSIN VERSANT DU DJA

Nous étudions simultanément les caractéristiques hydrologiques des stations de Somalomo et de Bi sur le Dja malgré le décalage qui existe entre les dates de démarrage des observations (1955 pour Somalomo et 1972 pour Bi). Cette approche a l'avantage de faciliter l'identification de la période d'apparition des débits caractéristiques. Pour ce faire, nous allons affecter aux tableaux et aux figures présentant les résultats obtenus à Somalomo, l'indice a et à ceux présentant les résultats acquis à Bi, l'indice b. Pour des raisons de clarté, nous désignerons le débit exprimé en $m^3.s^{-1}$ par Q et le débit spécifique correspondant exprimé en $l.s^{-1}.km^{-2}$ par q.

La répartition statistique des débits extrêmes et des débits caractéristiques est donnée dans les tableaux 3-2 a et b et les courbes de variations correspondant représentées sur les figures 3-1 a et b.

Sur 36 années au cours desquelles les débits de basses eaux principales ont été observés à Somalomo, 17 minimas journaliers ont été enregistrés en mars, 11 en février et 3 en avril. En étiage secondaire, juillet et août en ont enregistrés 2 chacun et septembre un. Le minimum minimorum, d'une valeur de $3,71 m^3.s^{-1}$, a été observé le 25/03/83. Pour ce qui concerne les hautes eaux, octobre et novembre ont enregistré chacun 16 maximas journaliers, et septembre trois. Le maximum maximorum qui est de $266 m^3.s^{-1}$ a été observé le 01/06/64.

A Bi, sur les 18 minimas journaliers disponibles, 12 ont été observés en mars et 2 en février ; avril, juillet, août et septembre en ont enregistré 1 chacun. Le minimum minimorum est de $7,49 m^3.s^{-1}$ observé le 31/03/88. Pour ce qui est des maximas journaliers, ils sont concentrés aux mois de novembre (9) et d'octobre (7) ; on en compte 2 en septembre. Le maximum maximorum est de $736 m^3.s^{-1}$ observé le 21/10/85.

De ce passage en revue des débits extrêmes, on peut retenir que 80 % de débits d'étiage sont observés en mars à Somalomo tandis qu'à Bi cette proportion est de 84 %. Les

Tableau 3-2 : Répartition statistique des débits extrêmes et des débits caractéristiques

a)												
DJA A SOMALOMO : DEBITS MOYENS CARACTERISTIQUES ET EXTREMES (1955-1992)												
	ETIAGES		DEBITS CARACTERISTIQUES							CRUES		
	m.ins	min	DCE	DC11	DC9	DC6	DC3	DC1	DCC	M.ins	Max	
MED	8.67	11.9	15	19.2	32.7	56.8	83.6	134	163	186	176	
MOY	9.62	14.2	17.3	22.2	35.3	57.1	86.1	133	165	184	179	
ET	5.28	8.58	9.64	10.6	13.2	14.7	15.4	24.9	31.7	23.9	30.5	
Q1	11	17.8	22.2	25.7	43.6	65.4	95.8	150	180	189	189	
Q2	7.78	9.1	10.8	14.3	25.3	47.2	74.2	113	145	169	160	
Max	23.9	45.9	52.3	56.6	65.4	91.8	121	186	261	223	266	
min	3.62	3.71	4.68	9.82	16.8	29	50.6	92	109	143	122	

b)												
DJA A BI : DEBITS MOYENS CARACTERISTIQUES ET EXTREMES (1972-1992)												
	ETIAGES		DEBITS CARACTERISTIQUES							CRUES		
	m.ins	min	DCE	DC11	DC9	DC6	DC3	DC1	DCC	M.ins	Max	
MED	18.3	25.3	48.4	57.7	91.1	160	279	487	551	639	593	
MOY	25.7	33	48.4	63.2	99.6	177	297	497	579	625	600	
ET	24.3	23.9	25.3	27.2	32.9	59.9	76.2	74.2	72.4	67.4	69.6	
Q1	42.4	45	59.8	76.7	118	226	351	573	643	658	658	
Q3	14.6	15.4	28.8	44.2	85.2	135	252	448	526	560	542	
Max		86.1	92.1	134	176	325	483	640	724		736	
Min		5.98	19.5	33.1	55.3	85	192	370	448		479	

Légende : m.ins : minimum instantané ; min : minimum journalier

M. ins : Maximum instantané

Max : Maximum journalier

DC : Débit caractéristique

DCE : Débit caractéristique d'étiage

DCC : Débit caractéristique de crue

DCn : Débit caractéristique dépassé durant n mois

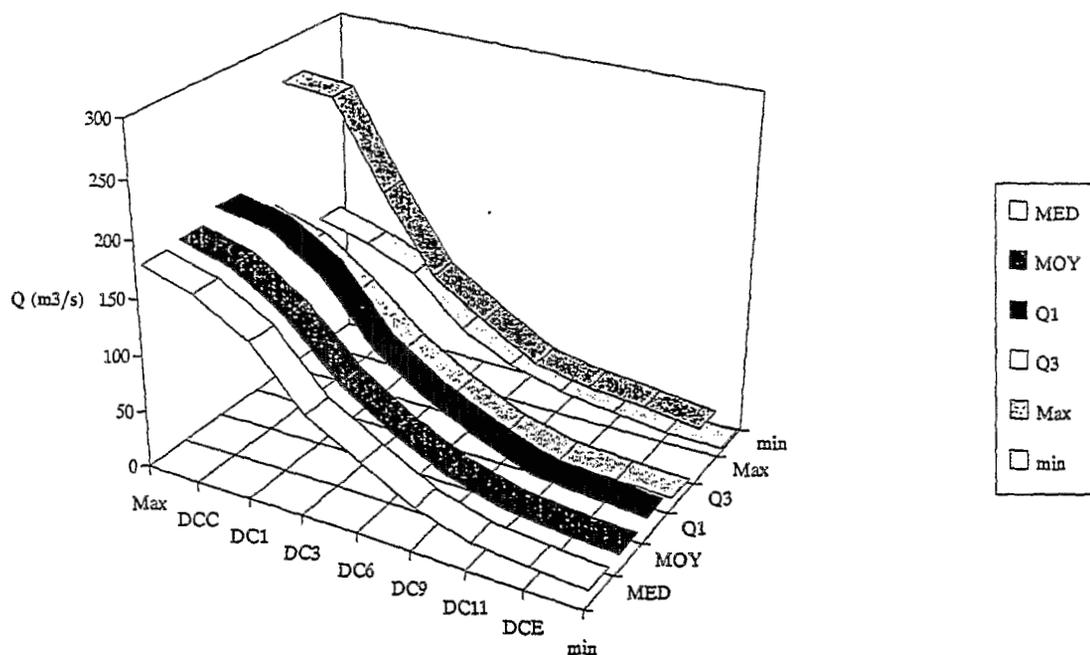
MED : Médiane

Moy : Moyenne

ET : Ecart type

Q1 : Premier quartile ; Q3 : troisième quartile

a) DJA A SOMALOMO (1953-1992)



b) DJA A BI (1972-1992)

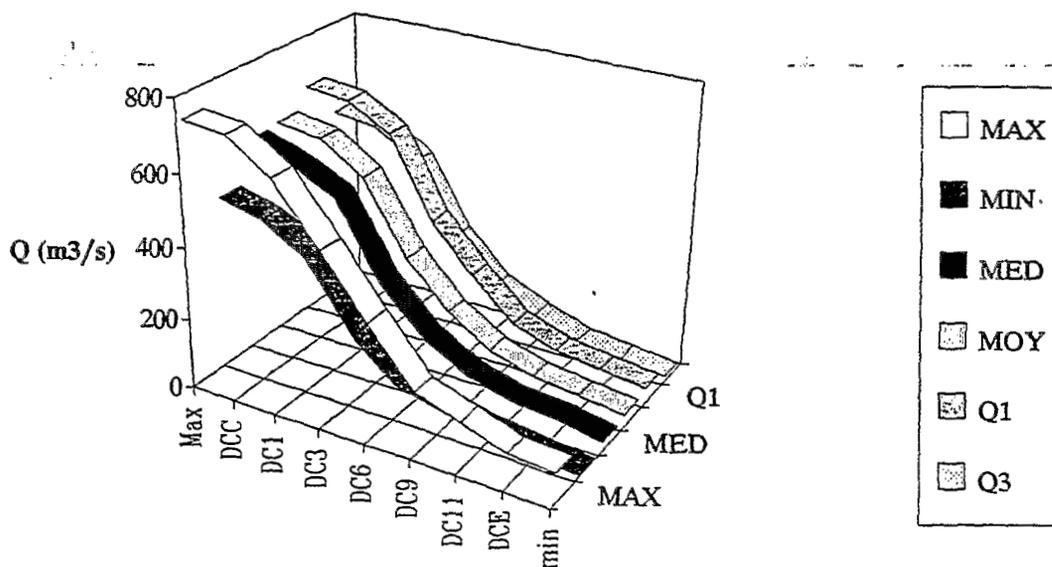


Figure 3-1 : Variations des débits extrêmes et des débits caractéristiques. Légende (cf. tableau 3-2)

maximas apparaissent en proportions égales en octobre et en novembre aux deux stations. On doit cependant signaler qu'ils sont parfois observés en septembre.

La répartition statistique des débits moyens mensuels et annuels est reportée dans les tableaux 3-3 a et b. Les courbes de variations saisonnières par paramètre sont représentées sur les figures 3-2 a et b. Celles-ci montrent que les régimes hydrologiques saisonniers suivent ceux des précipitations, à la seule différence qu'en hautes eaux un mois de décalage existe entre le maximum mensuel de pluie et celui de débit à Bi. En moyenne, le maximum d'écoulement mensuel est enregistré en octobre ($135 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et le minimum en février ($25,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) à Somalomo ; par contre, c'est au mois de novembre que l'écoulement moyen maximum est observé ($461 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), le minimum apparaissant en février ($69,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) comme à Somalomo. Pour ce qui est des débits mensuels extrêmes, le maximum a été observé en octobre 1964 à Somalomo ($231 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et en octobre 1985 à Bi ($682 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ; le minimum, qui est de $6,39 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ l'a été en mars 1983. Par contre, cet étiage n'est pas très marqué à Bi, le minimum étant enregistré plutôt en mars 1990 ($26,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

On peut donc s'attendre à des tonnages élevés de particules exportées en suspension entre septembre et novembre et faibles en février-mars ; à l'opposé, février-mars constituent les mois de fortes charges en solution ; celles-ci seront diluées par les eaux superficielles de septembre à novembre.

A l'échelle pluriannuelle, le module moyen est de $66,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à Somalomo, soit un débit spécifique de $12,1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$; il représente 30 % de celui de Bi qui est de $221 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit un débit spécifique de $11,3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Le rapport des modules interannuels aux deux stations est donc du même ordre de grandeur que celui qui existe entre les superficies de leur bassin versant (28 %).

Dans les tableaux 3-4 a et b sont reportés les modules annuels et les écarts à la moyenne interannuelle. L'examen de ces tableaux fait ressortir qu'à Somalomo l'année 1977-78, dont le module est de $43,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ soit un débit spécifique de $7,95 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, est la plus déficitaire. L'année 1974-75, d'un débit de $66,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ donc proche du module interannuel, est une année normale. L'année 1964-65, d'un débit de $96,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ soit $17,6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, est la plus excédentaire (tableau 3-5 a). Les variations des débits mensuels correspondant sont représentées sur la figure 3-3 a.

Si à Bi l'année sèche est la même qu'à Somalomo, avec un débit de $146 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit un débit spécifique de $7,48 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, il n'en est pas de même pour les années moyenne et

Tableau 3-3 : Répartition statistique des débits moyens mensuels et annuels. Légende (cf. tableau 3-2)

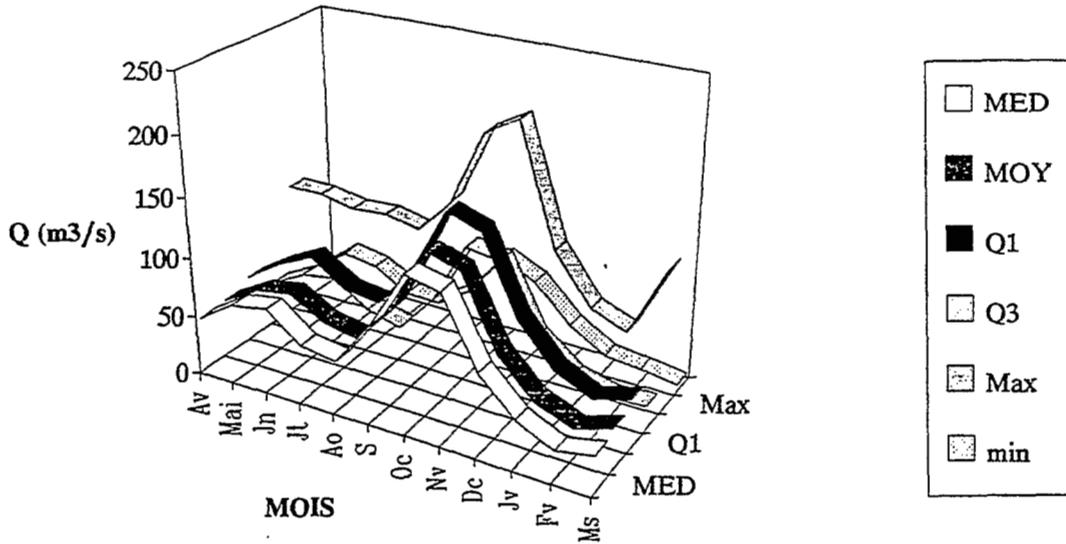
a) DJA A SOMALOMO : DEBITS MOYENS MENSUELS ET ANNUELS (1955-1992)

ANNEE	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	MOYENNE
MED	45.8	65.7	70.2	47.5	43	80.1	130	124	68.1	39.4	24.2	31.1	66.6
MOY	47.7	64.2	69.6	52.5	46.9	80	135	126	67.1	37.9	25.7	35.5	66.1
ET	18.3	15.1	17.1	21.1	23.3	25.2	34	31.4	21.4	13.6	11.9	22.8	14.6
Q1	54.7	73.5	87.2	67	62.7	98.6	154	145	82.6	48.1	33.5	42.2	77.9
Q3	35.6	50.5	55.2	34.5	26.7	59.3	112	108	50.7	26.9	18.9	20.3	53.5
Max	110	110	104	106	99.5	130	231	210	111	70.2	58.9	119	96.4
Min	21.6	43.8	38.7	20.6	20.1	38.5	76.7	63	33.2	14.7	11.1	6.39	43.5

b) DJA A BI : DEBITS MOYENS MENSUELS ET ANNUELS (1972-1992)

ANNEE	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jn	Fv	Ms	MODULE
MED	153	216	214	159	122	300	446	456	183	97.3	65.2	78.2	206
MOY	139	196	218	174	148	276	449	461	221	102	69.5	79.1	221
ET	68.9	70.6	83.5	91.1	96.7	114	136	134	83	33.9	32.4	38.2	47.8
Q1	167	238	309	249	222	361	546	580	299	140	87	125	256
Q3	97.4	169	164	124	82.6	228	430	432	167	90.6	50.8	55.6	196
Max	341	339	353	396	396	530	682	619	418	151	137	151	349
Min	88.5	89.6	128	73.5	65.8	109	217	228	136	44.8	31.9	26.8	146

a) DJA A SOMALOMO (1955-1992)



b) DJA A BI (1972-1992)

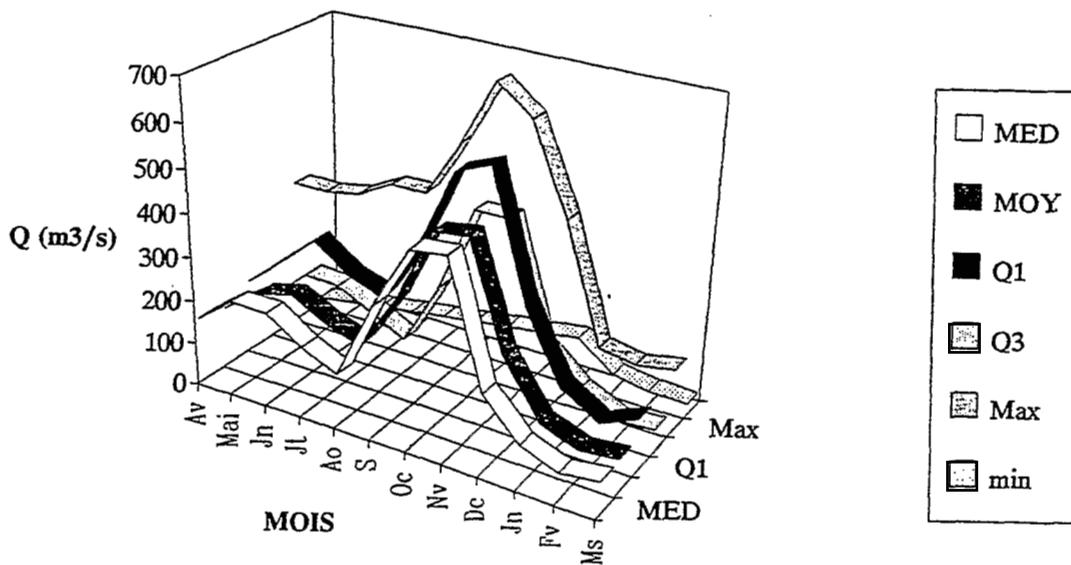


Figure 3-2 : Variations saisonnières des débits mensuels. Légende (cf. tableau 3-2)

Tableau 3-4 : Débits annuels et écarts à la moyenne interannuelle

a)					
DJA A SOMALOMO : DEBITS ANNUELS ET ECARTS A LA MOYENNE (1955-1992)					
ANNEE	MODULE	ECARTS	ANNEE	MODULE	ECARTS
	m3/s	%		m3/s	%
1955-56	46	-30.4	75-76	69	4.4
56-57	59	-10.7	76-77	56.1	-15.1
57-58	81.6	23.4	77-78	43.5	-34.2
58-59	46.9	-29.0	78-79	49.2	-25.6
59-60	72.9	10.3	79-80	51.7	-21.8
60-61	82.1	24.2	80-81	66.6	0.8
61-62	48.4	-26.8	81-82	59.1	-10.6
62-63	71	7.4	82-83	66.7	0.9
63-64	77.9	17.9	83-84	53.1	-19.7
64-65	96.4	45.8	84-85	80.9	22.4
65-66	74.9	13.3	85-86	94	42.2
66-67	89.6	35.6	86-87	55	-16.8
67-68	68.8	4.1	87-88	53.5	-19.1
68-69	79.5	20.3	88-89	68.8	4.1
69-70	85.8	29.8	89-90	81.7	23.6
70-71	63.2	-4.4	90-91	70.5	6.7
71-72	65.7	-0.6	91-92		
72-73	49.3	-25.4			
73-74	53.5	-19.1			
74-75	66.5	0.6			

b)					
DJA A BI : DEBITS ANNUELS ET ECARTS A LA MOYENNE (1972-1992)					
ANNEE	MODULE	ECARTS	ANNEE	MODULE	ECARTS
	m3/s	%		m3/s	%
1972-73	183	-17.2	85-86	349	57.9
73-74	206	-6.8	86-87	195	-11.8
74-75	268	21.3	87-88	193	-12.7
75-76	209	-5.4	88-89	245	10.9
76-77	198	-10.4	89-90	290	31.2
77-78	146	-33.9	90-91	256	15.8
78-79	196	-11.3	91-92		
79-80	181	-18.1			
80-81	248	12.2			
81-82	201	-9.0			
82-83	218	-1.4			
83-84	196	-11.3			
84-85	272	23.1			

Tableau 3-5 : Débits mensuels et annuels des années sèche , moyenne et humide

a)													
DJA A SOMALOMO : DEBITS MENSUELS ET ANNUELS DES ANNEES SECHE,													
MOYENNE ET HUMIDE													
ANNEE	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	MODULE
77-78	35.6	50.6	38.7	21.7	21.1	98.1	98	63	44.7	14.7	11.2	24	43.5
74-75	42	71.6	45.7	40.5	62.7	65	124	153	82.6	32.6	42.9	34	66.5
64-65	54.7	59.3	91.4	58.1	26.7	118	231	210	107	70.2	58.9	71.3	96.4

b)													
DJA A BI : DEBITS MENSUELS ET ANNUELS DES ANNEES S													
MOYENNE ET HUMIDE													
ANNEE	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jn	Fv	Ms	MODULE
AS :77-78	97.4	139	155	73.5	68	326	374	228	156	57.6	33.5	47.3	146
AM :82-83	119	227	257	209	149	274	443	561	158	59.5	31.9	125	218
AH :85-86	341	235	343	337	331	530	682	619	331	148	137	151	349

Légende : AS : Année sèche ; AM : Année moyenne ; AH : Année humide

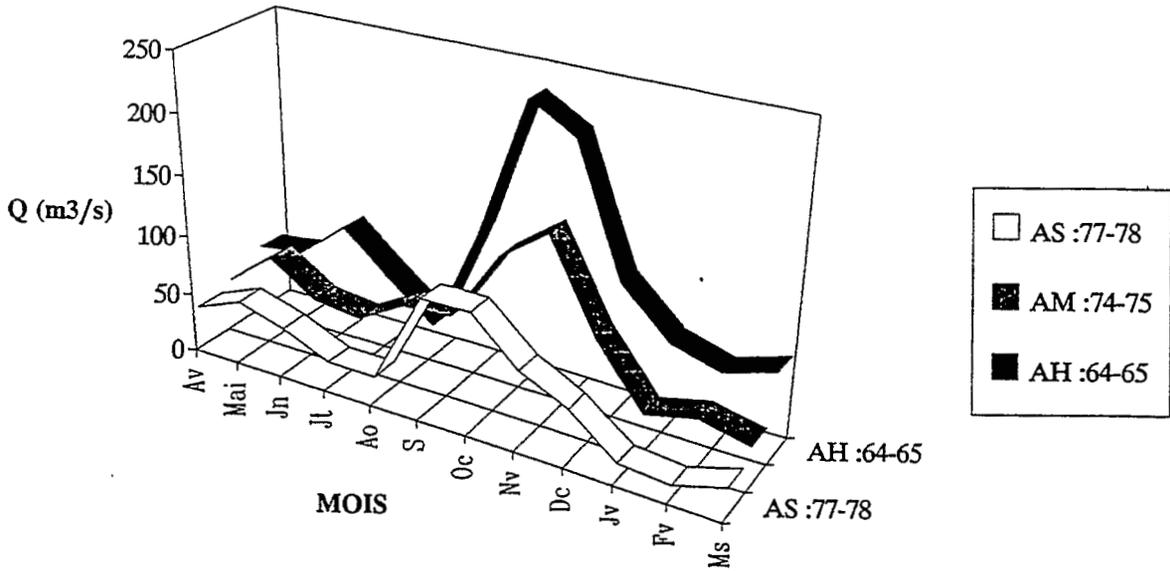
humide ; celles-ci correspondent respectivement à 1982-83 ($218 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, soit $q = 11,2 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$) et à 1985-86 ($349 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, soit $q = 17,9 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$). Les débits mensuels et annuels sont donnés dans le tableau 3-5 b et les courbes de variations saisonnières représentées sur la figure 3-3 b. On peut noter qu'aux deux stations l'année humide est imposée par le plus fort débit mensuel enregistré sur la période d'observations.

Les cycles hydrologiques de 1989 à 1992 qui intéressent cette étude n'ont été suivis aux deux stations qu'en 1990-91 et 1991-92 pour les raisons déjà évoquées. Néanmoins, nous avons estimé les modules de 1989-90 à l'aide des corrélations données au tableau 3-1. Ils sont de $89,1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, soit $q = 14,9 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ à Somalomo et de $290 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, soit $q = 14,2 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ à Bi. Dans les tableaux 3-6 a et b sont présentés les débits mensuels et annuels des années 1990-91 et 1991-92 en regard des moyennes interannuelles. Les courbes de variations saisonnières des débits correspondant sont reportées sur les figures 3-4 a et b. A Somalomo, les modules obtenus en 1990-91 ($70,5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, soit $q = 12,9 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$) et en 1991-92 ($66,8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, soit $q = 12,2 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$) sont comparables à la moyenne interannuelle ($66,1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) ; le module de 1989-90 reconstitué lui est légèrement supérieur. Le constat est le même à Bi où le module de 1990-91 est de $257 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, soit $q = 13,2 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ et celui de 1991-92 de $231 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, soit $q = 11,2 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$; le module reconstitué en 1989-90 est également supérieur à la moyenne interannuelle ($221 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). La comparaison entre ces cycles étudiés et les années sèches et humides ci-dessus montre, à l'une et à l'autre des stations, que les résultats obtenus à l'échelle annuelle de 1989 à 1992 sont compris entre les modules des années sèches et ceux des années humides.

Tableau 3-6 : Débits mensuels et annuels du Dja en amont de Moloundou de 1990 à 1992 (au regard des moyennes interannuelles de l'origine des stations à 1992)

(au regard des moyennes interannuelles de l'origine des stations à 1992)													
A- Dja à Somalomo													
ANNEE	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	MOD
MOY.	47.7	64.2	69.6	52.5	46.9	80	135	126	67.1	37.9	25.7	35.5	66.1
1990-91	25.7	68.7	63.1	24.4	60.1	100	151	153	102	42.9	25.4	28.8	70.5
1991-92	56.3	81.3	94.8	60.5	66.6	95.4	137	112	60.4	25	18.1	17.2	68.8
B- Dja à Bi													
MOY.	139	196	218	174	148	276	449	461	221	102	69.5	79.1	221
1990-91	63.6	238	232	91.5	222	361	537	588	418	144	84.8	95.9	256
1991-92	184	284	336	218	199	319	432	425	197	67.1	40.1	68.6	231

a) DJA SOMALOMO (1955-1992)



b) DJA A BI (1972-1992)

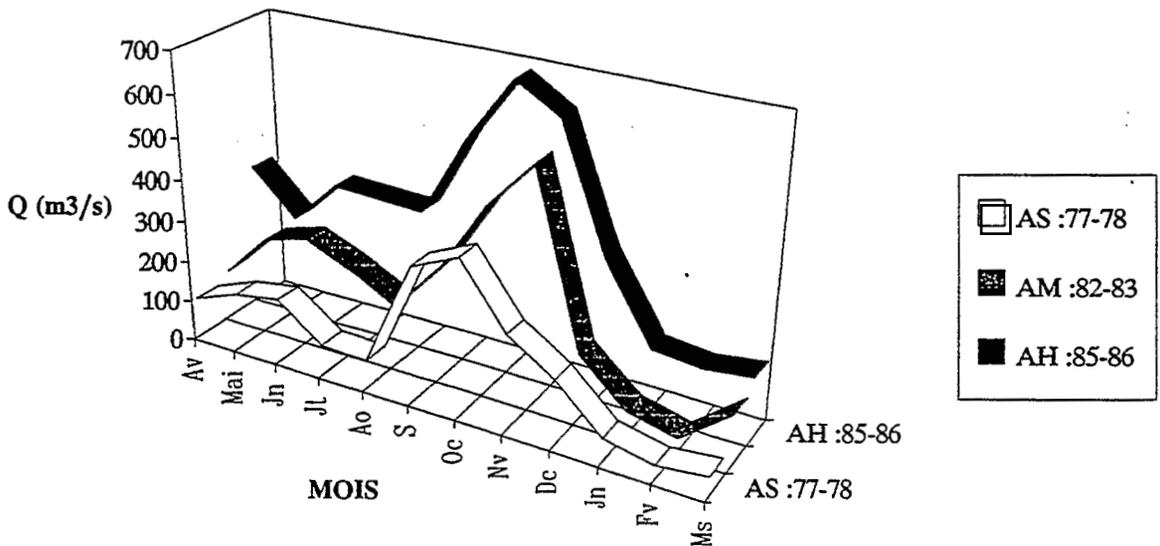
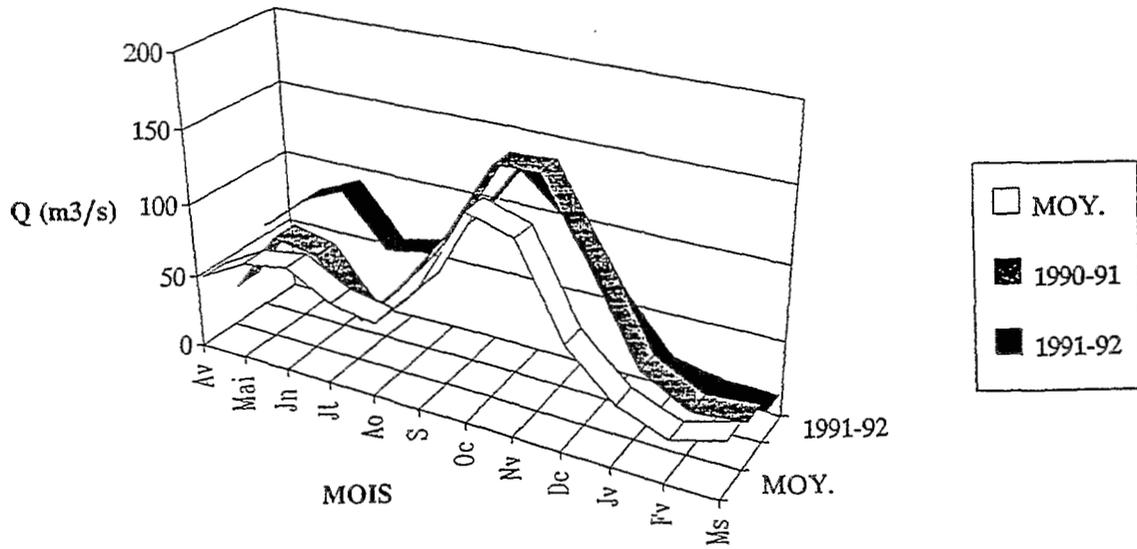


Figure 3-3 : Variations saisonnières des débits mensuels des années sèche moyenne et humide
Légende (cf. tableau 3-5)

a) DJA A SOMALOMO (1990-1992)



b) DJA A BI (1990-1992)

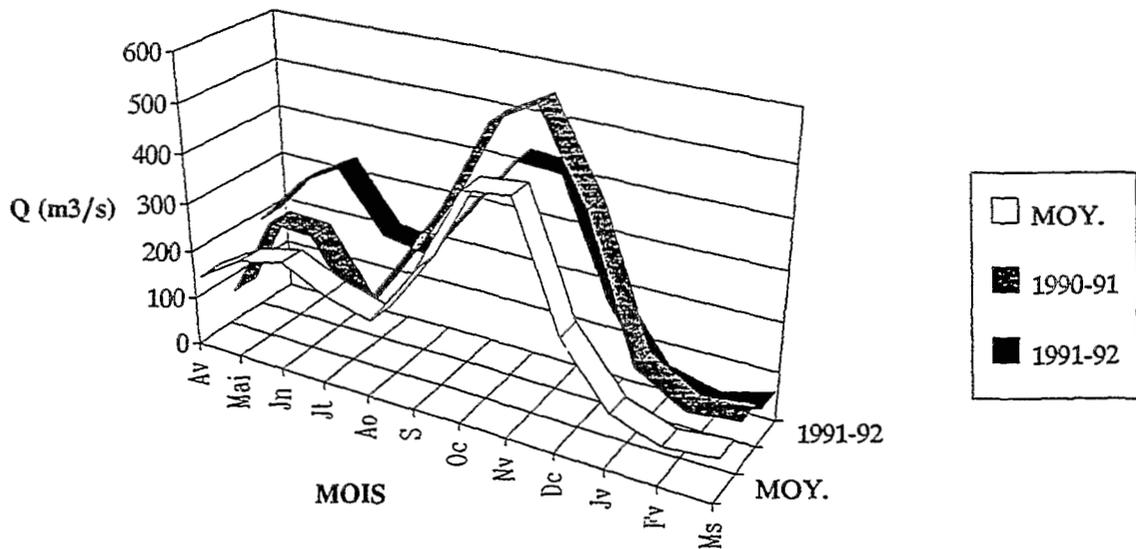


Figure 3-4 : Variations saisonnières des débits mensuels des cycles étudiés

On peut donc retenir à l'issue de cette analyse que les caractéristiques hydrologiques des cycles étudiés sont voisines de celles d'une année moyenne, avec cependant une tendance humide en 1989-90, sans doute imputable à l'incertitude sur les reconstitutions.

De l'ajustement statistique des modules observés représenté sur les figures 3-5 a et b, il ressort, pour un intervalle de confiance (IC) = 95 %, que les coefficients de variation (Cv) faibles (0,221 à Somalomo et 0,216 Bi) et que les tests de Chi-2, calculés à 1,2935 à Somalomo et à 0,25 à Bi permettent de dire que l'adéquation de la loi de GAUSS à ces échantillons est satisfaisante. L'irrégularité interannuelle (K3) est de 1,79 à Somalomo et de 1,76 à Bi.

Sur les figures 3-6 a et b et 3-7 a et b, sont représentées les fluctuations annuelles et l'évolution des écarts à la moyenne des modules. Après une période de débits excédentaires à Somalomo, débute en 1971 une période de débits déficitaires qui perdure jusqu'en 1984. Le démarrage des observations à Bi coïncide avec celui de cette séquence sèche. Elle est suivie depuis 1984 par l'alternance de deux années sèches et deux années humides. Depuis 1988, on assiste à une période moyenne, légèrement excédentaire en 1989-90.

L'étude des débits à différents pas de temps montre, - hormis la période humide allant de 1955 à 1971 qui n'a pas été observée à Bi, ce qui pourrait expliquer le débit spécifique plus fort à Somalomo qu'à Bi -, à la suite des faibles valeurs de coefficient de variation et d'irrégularité interannuelle obtenus aussi bien à Somalomo qu'à Bi, que le régime hydrologique du Dja est régulier. La période sèche observée de 1971 à 1984 sur le Dja est similaire à celle qu'ont connu les bassins versants des fleuves Sénégal et Niger (ORANGE, 1990) à la différence qu'elle a été plus marquée sur ces fleuves. Par ailleurs, sur ces fleuves, elle se poursuit alors que le cycle normal, - à tendance parfois humide -, a repris depuis 1985 le Dja. Il est possible que cette atténuation de la sécheresse et le retour au bout d'une dizaine d'années à la normale soient induits par l'existence de précipitations toute l'année et le maintien en permanence d'une forte humidité sur le bassin par la forêt dense primaire comme nous l'avons vu au premier chapitre.

3.1.2. LE BASSIN VERSANT DE LA BOUMBA

L'étude du régime hydrologique de la Boumba s'appuie sur les caractéristiques des débits mesurés à son exutoire de Biwala de 1965 à mars 1992. Le tableau 3-7 donne la

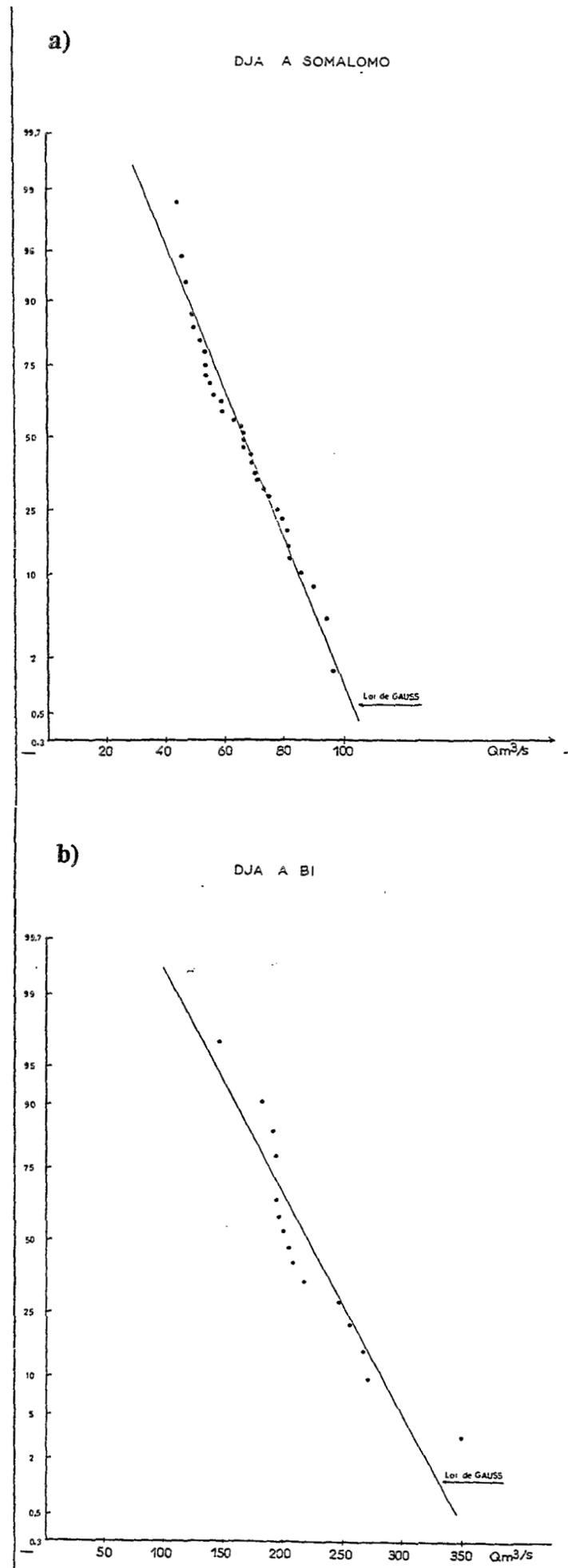
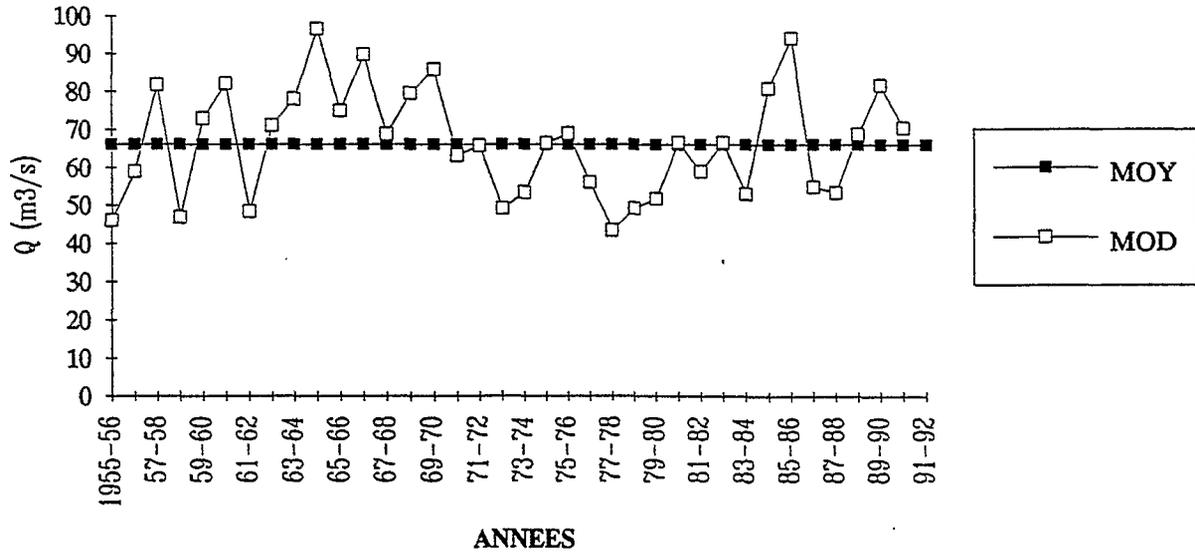


Figure 3-5 : Distribution statistique des modules. Valeurs observées

a) DJA A SOMALOMO (1955-1992)



b) DJA A BI (1972-1992)

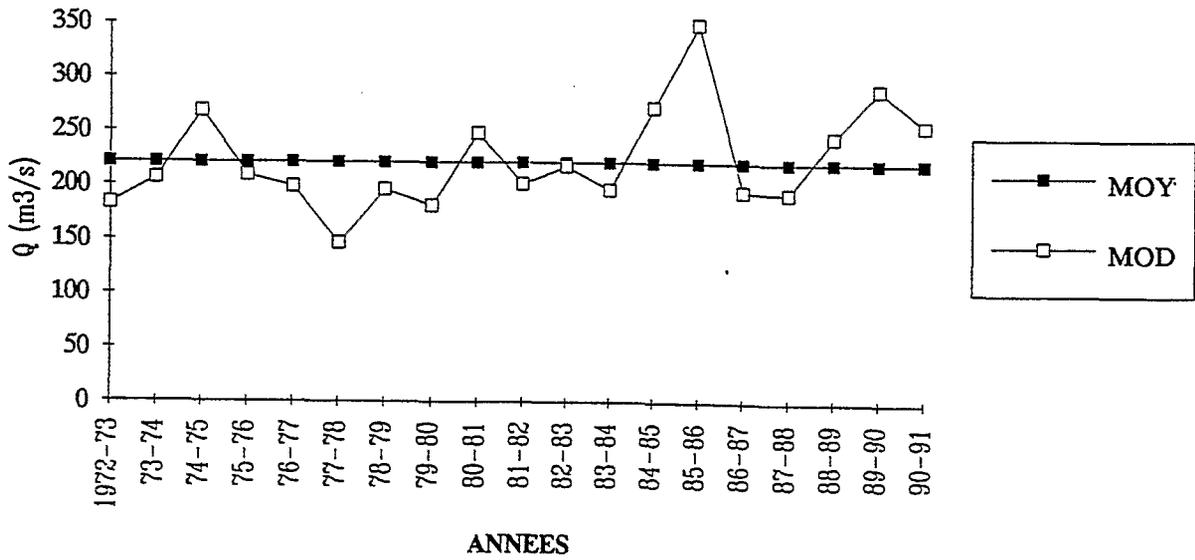
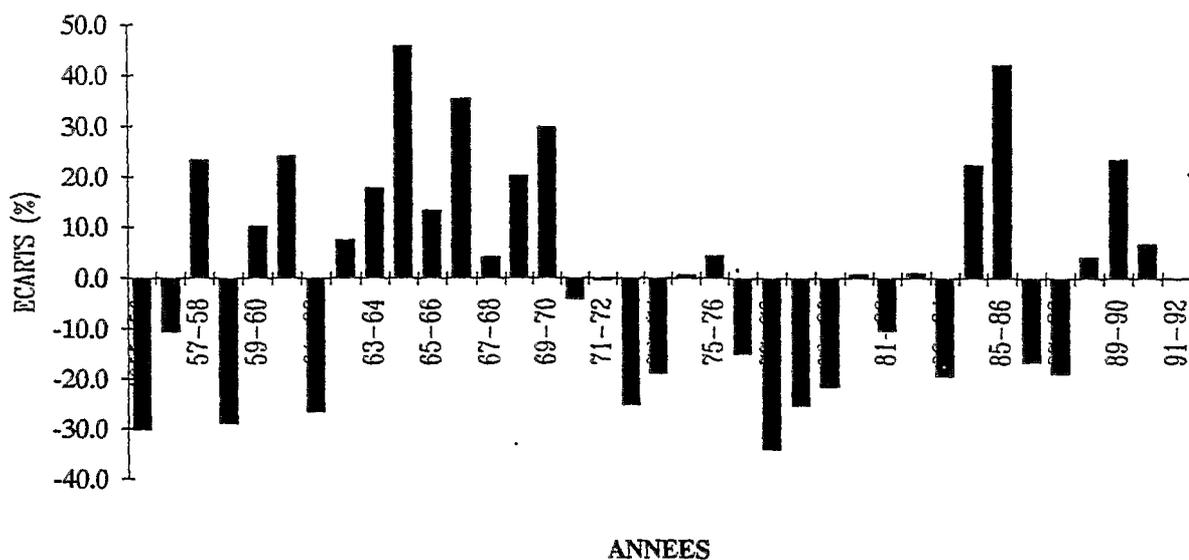


Figure 3-6 : Fluctuations annuelles des modules

Légende : Moy : Débit moyen interannuel ; Mod : Module

a) DJA A SOMALOMO (1955-1992)



b) DJA A BI (1972-1991)

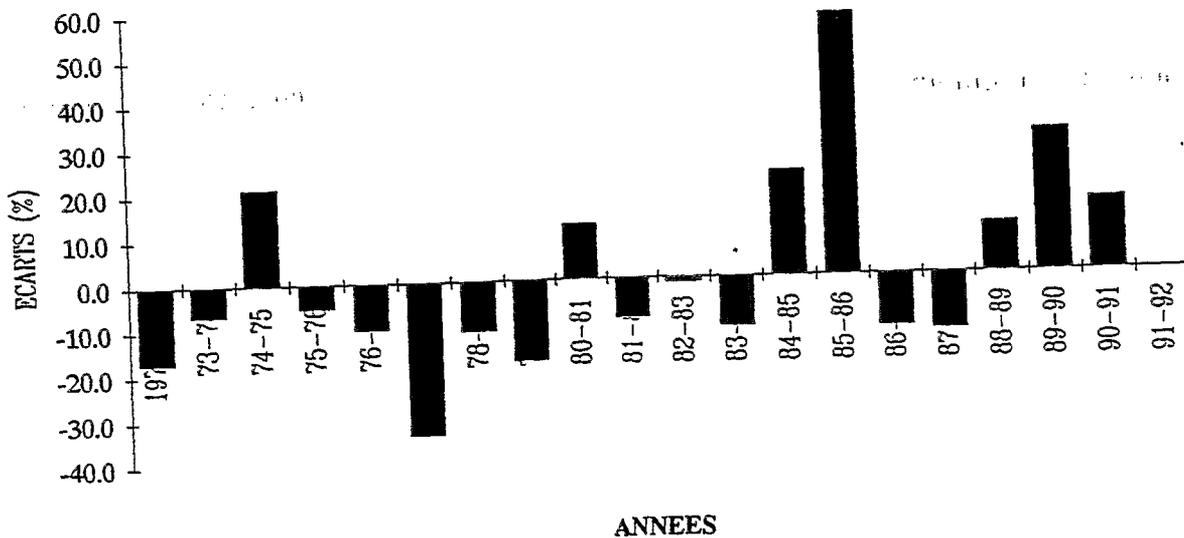


Figure 3-7 : Evolution des écarts à la moyenne interannuelle des modules

répartition statistique des débits extrêmes et caractéristiques. Les courbes de variation sont représentées sur la figure 3-8.

A l'échelle journalière, l'observation des minimas se répartit entre les mois de mars et d'avril qui en ont enregistrés huit chacun, février cinq et un en janvier et mai. Le minimum minimorum est de $4,07 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, mesuré le 27/03/83, donc presque à la même date qu'à Somalomo (25/03/83). Pour ce qui est des maximas, douze ont été observés en octobre, cinq en septembre et en novembre et un en juin. Le maximum du 02/06/79 étonne en ce sens que c'est la période des moyennes eaux dont les débits sont généralement inférieurs à ceux des hautes eaux de septembre à novembre. Le maximum maximorum, observé le 27/09/71, est de $949 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Les débits journaliers extrêmes apparaissent pour les minimas, en proportions égales en mars et en avril sur la Boumba, alors que sur le Dja ils le sont plutôt en février et en mars ; pour les maximas, ils sont concentrés surtout en octobre, celui de juin 1979 étant une exception tandis que sur le Dja ils apparaissent en proportions égales en octobre et en novembre.

La répartition statistique des débits mensuels est donnée dans le tableau 3-8 et leurs variations saisonnières sont représentées sur la figure 3-9. Au pas de temps mensuel, les variations des débits sont calquées sur celles des précipitations. En moyenne, l'écoulement maximum a lieu en octobre ($217 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et le minimum en février ($43,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ; ce dernier résultat montre que les mois de mars et d'avril enregistrent la plupart des minimas journaliers sans être pour autant les mois les plus secs. Le maximum mensuel a été observé en septembre 1971 ($473 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et le minimum en mars 1983 ($11,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) comme à Somalomo, signe de l'extension vers l'est de la grande sécheresse de 1983.

On pourra donc s'attendre à des quantités plus importantes de matières exportées en suspension par la Boumba de septembre à novembre tandis que le prolongement de l'étiage de février jusqu'en avril va induire des charges élevées de substances en solution soutirées à la roche-mère pendant la restitution des eaux par la nappe.

Le module interannuel a été calculé à $106 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en 27 années d'observations, soit un débit spécifique de $10,4 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, donc plus petit qu'à Somalomo et à Bi sur le Dja. Le tableau 3-9 contient les modules annuels et leurs écarts à la moyenne interannuelle. Il permet de dégager les années à caractère exceptionnel : l'année 1972-73, d'un module de $74,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 7,22 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ est sèche ; l'année 1970-71, d'un débit

Tableau 3-7 : Boumba à Biwala : débits moyens caractéristiques et extrêmes (1965-1992)

	ETIAGES		DEBITS CARATERISTIQUES							CRUES	
	m.ins	min	DCE	DC11	DC9	DC6	DC3	DC1	DCC	M.ins	Max
MED	17.3	19.5	31.2	37	58.8	85.3	137	220	274	316	315
MOY	18	23.2	31.8	39.2	58.6	84	135	217	296	328	352
ET	8.46	11	11.5	11.2	10.9	13.4	23.6	46	112	101	171
Q1	23.7	27.1	36.8	43.9	63.7	88.8	155	242	329	395	382
Q3	15	17.9	25.3	31.1	51.6	78.1	117	182	216	264	264
Max	35.9	51.6	58.2	64.8	84.7	113	169	338	656	514	949
Min	3.83	4.07	15.5	26.6	41.6	58.5	85.6	134	164	207	143

BOUMBA A BIWALA (1965-1992)

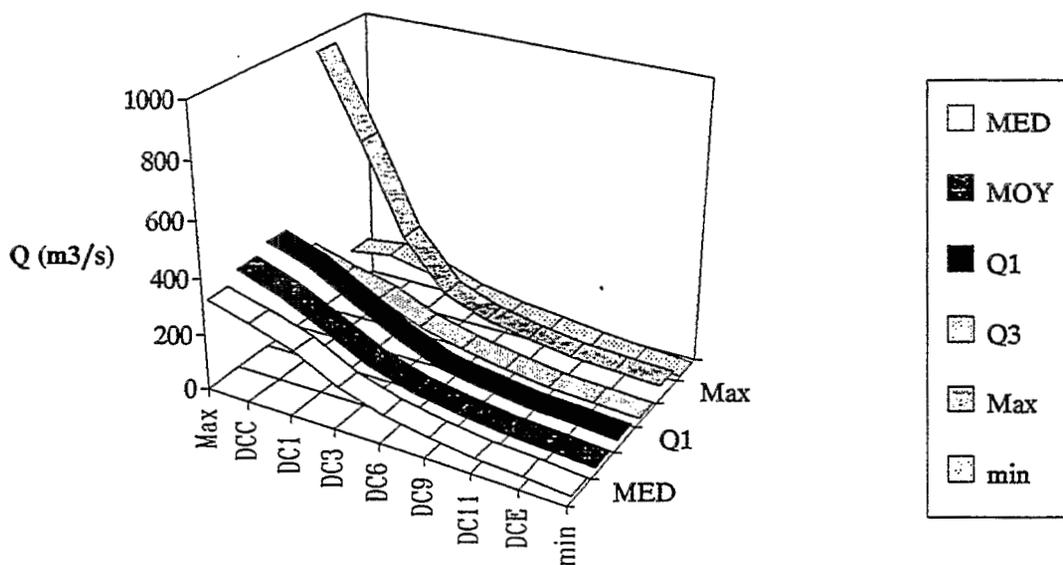


Figure 3-8 : Variations des débits caractéristiques et extrêmes. Légende (cf. tableau 3-2)

Tableau 3-8 : Boumba à Biwala : débits moyens mensuels et annuels (1965-1992)

ANNEE	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jn	Fv	Ms	MOYENNE
MED	62.2	75.1	78.8	74.9	93.1	155	213	169	89.1	60.1	39.1	41.8	107
MOY	61.7	78.5	84.4	81.9	101	172	217	177	93.2	60.6	43.1	46.9	106
ET	24	19.3	22.3	28.8	31.7	72.7	61.3	49.6	26.5	14.2	14.2	23.8	17.5
Q1	71.6	89.6	95.6	96.1	128	193	261	228	111	72.2	55.5	61.7	124
Q3	44.5	66.8	73.7	60.5	79.9	149	176	138	73.1	45.6	30.8	31.5	94.3
Max	138	122	122	149	166	473	367	260	155	85	65.2	108	143
Min	34.8	38.1	38	41.8	48.7	84.9	107	108	49.3	40.7	17.5	11.2	74.4

BOUMBA A BIWALA (1965-1992)

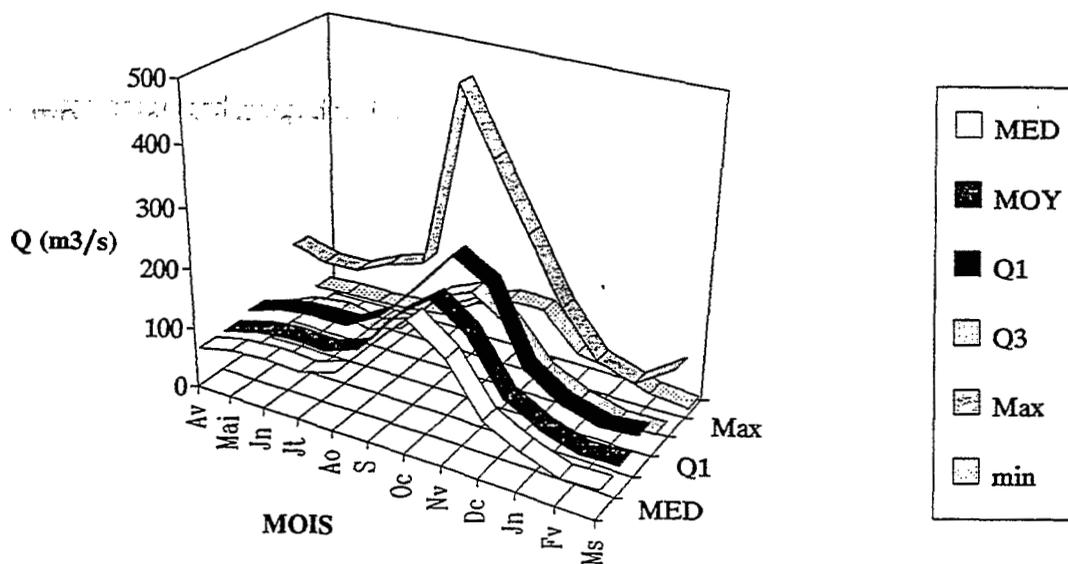


Figure 3-9 : Variations saisonnières des débits mensuels. Légende (cf. tableau 3-2)

comparable au module interannuel est normale ; elle est suivie par une année humide dont le débit est de $143 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 13,9 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (tableau 3-10 et figure 3-10). Sur la Boumba, les modules annuels extrêmes se produisent les mêmes années que les extrêmes mensuels.

Le tableau 3-11 contenant les résultats obtenus à l'issue de nos campagnes de mesures présente des modules annuels comparables à la moyenne interannuelle à savoir : $110 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en 1989-90, soit $q = 10,7 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$; $114 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en 1990-91, soit $q = 11,1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ et $139 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en 1991-92, soit $q = 13,5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. La figure 3-11 présente les variations saisonnières des débits mensuels au regard de celles des moyennes interannuelles. Dans l'ensemble, on ne note pas de différence sensible.

L'ajustement d'une loi statistique aux modules (figure 3-12) montre que leur distribution se fait suivant la loi normale. Le coefficient de variation (Cv) est de 0,164. Pour un intervalle de confiance (IC) = 95 %, le test de CHI-2 est égal à 0,2104, ce qui signifie que l'adéquation de la loi de Gauss est satisfaisante. L'irrégularité interannuelle (K3) est de 1,52 ; ajoutée à la faible valeur du coefficient de variation elles permettent de dire que le régime hydrologique de la Boumba est assez régulier.

Les fluctuations annuelles et l'évolution des écarts des modules à la moyenne interannuelle sont représentées sur les figures respectives 3-13 et 3-14. La période sèche observée sur le Dja aux stations de Somalomo et de Bi est relevée sur ces figures. Cette sécheresse est atténuée comme sur le Dja et comparativement à celle enregistrée à la même période sur les fleuves Sénégal et Niger. Elle est suivie en 1985-86 par une année humide qui alterne avec une année sèche. De 1988 à 1992 se succèdent des années normales dont la dernière est légèrement excédentaire.

D'une manière générale, l'étude des caractéristiques hydrologiques du Dja et de la Boumba met en relief, pour la période d'observations commune aux stations de Somalomo, de Bi et de Biwala, une séquence sèche allant de 1971 à 1984, confirmant ainsi l'extension dans le milieu forestier équatorial de la sécheresse connue à la même période en Afrique de l'ouest (GAC et al, 1987 ; ORANGE, 1990 ; MAHE, 1992). On pense que la forêt et la répartition des précipitations sur toute l'année ont joué un rôle considérable dans l'atténuation dont cette sécheresse fut l'objet dans notre zone d'étude, comme le montre l'hydraulicité. De 1985 à 1988 se sont succédées alternativement des années sèche et humide ; depuis 1988, elles se stabilisent autour de l'année hydrologique moyenne, indiquant par endroit une tendance excédentaire. Les cycles hydrologiques de 1989 à 1992 sont donc le prolongement de cette séquence normale.

Tableau 3-9 : Boumba à Biwala : débits annuels et écarts à la moyenne (1965-1992)

ANNEE	MODULE	ECARTS	ANNEE	MODULE	ECARTS
	m3/s	%		m3/s	%
1965-66	102	-3.8	80-81	116	9.4
66-67	124	17.0	81-82	101	-4.7
67-68	101	-4.7	82-83	103	9.6
68-69	125	17.9	83-84	94.3	-11.0
69-70	118	11.3	84-85	93.4	-11.9
70-71	107	0.9	85-86	133	25.5
71-72	143	34.9	86-87	84.1	-20.7
72-73	74.4	-29.8	87-88	135	27.4
73-74	111	4.7	88-89	108	1.9
74-75	108	1.9	89-90	110	3.8
75-76	110	3.8	90-91	114	7.5
76-77	96.2	-9.2	91-92	139	31.1
77-78	92.9	-12.4			
78-79	91.5	-13.7			
79-80	90.7	-14.4			

Tableau 3-10 : Boumba à Biwala : débits mensuels des années sèche, moyenne et humide

ANNEE	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jn	Fv	Ms	MODULE
AS : 72-73	72.9	60	59	52.9	48.7	102	149	108	56.2	41.6	61.1	81.8	74.4
AM : 70-71	71.6	67	71.5	74.9	97.4	201	261	199	95.4	52.9	28.6	61.7	107
AH : 71-72	66.4	61	76	87.7	111	473	367	193	116	70.9	48.5	41.8	143

BOUMBA A BIWALA (1965-1992)

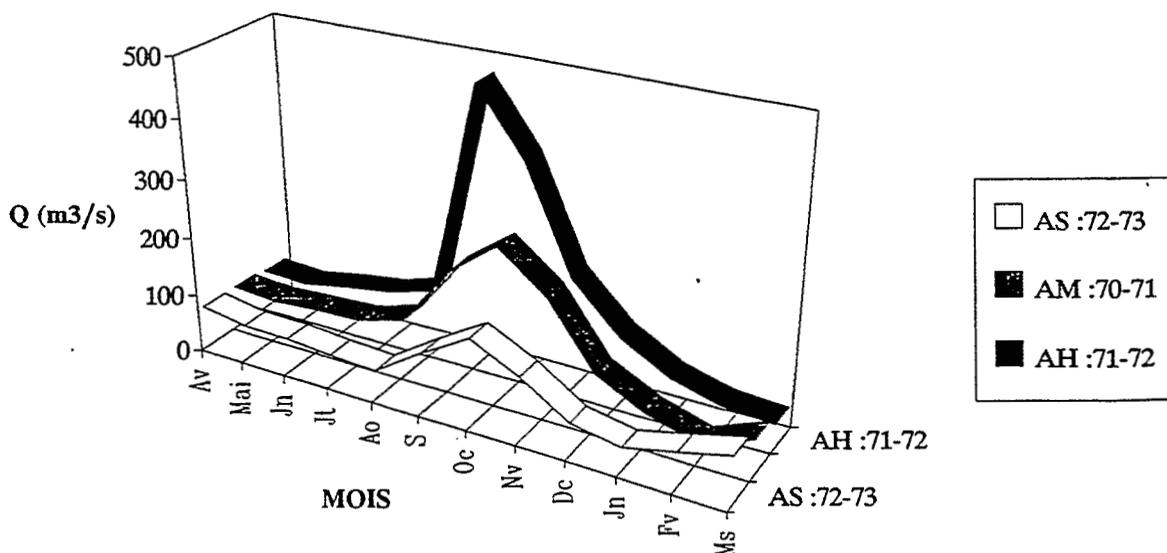


Figure 3-10 : Variations saisonnières des années sèche, moyenne et humide. Légende (cf. tableau 3-5)

Tableau 3-11 : Boumba à Biwala : débits mensuels et annuels 1989-1992
(au regard des moyennes de 1965 à 1992)

ANNEE	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	MOD
MOY	61.7	78.5	84.4	81.9	101	172	217	177	93.2	60.6	43.1	46.9	106
1989-90	37	60.7	84.6	84.4	144	175	209	246	119	76.9	51	26.8	110
1990-91	42.1	82.8	73.7	66.4	127	163	261	228	141	80.2	51.3	43.6	114
1991-92	81.9	89.8	131	113	171	254	314	225	136	73	44.6	37.9	139

BOUMBA A BIWALA (1989-1992)

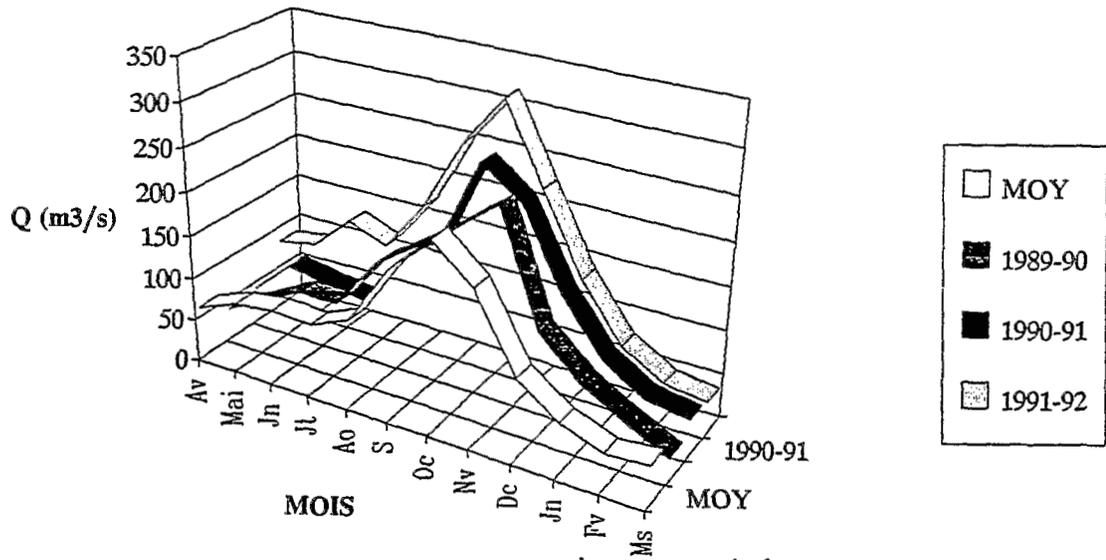


Figure 3-11 : Variations saisonnières des débits mensuels des cycles étudiés

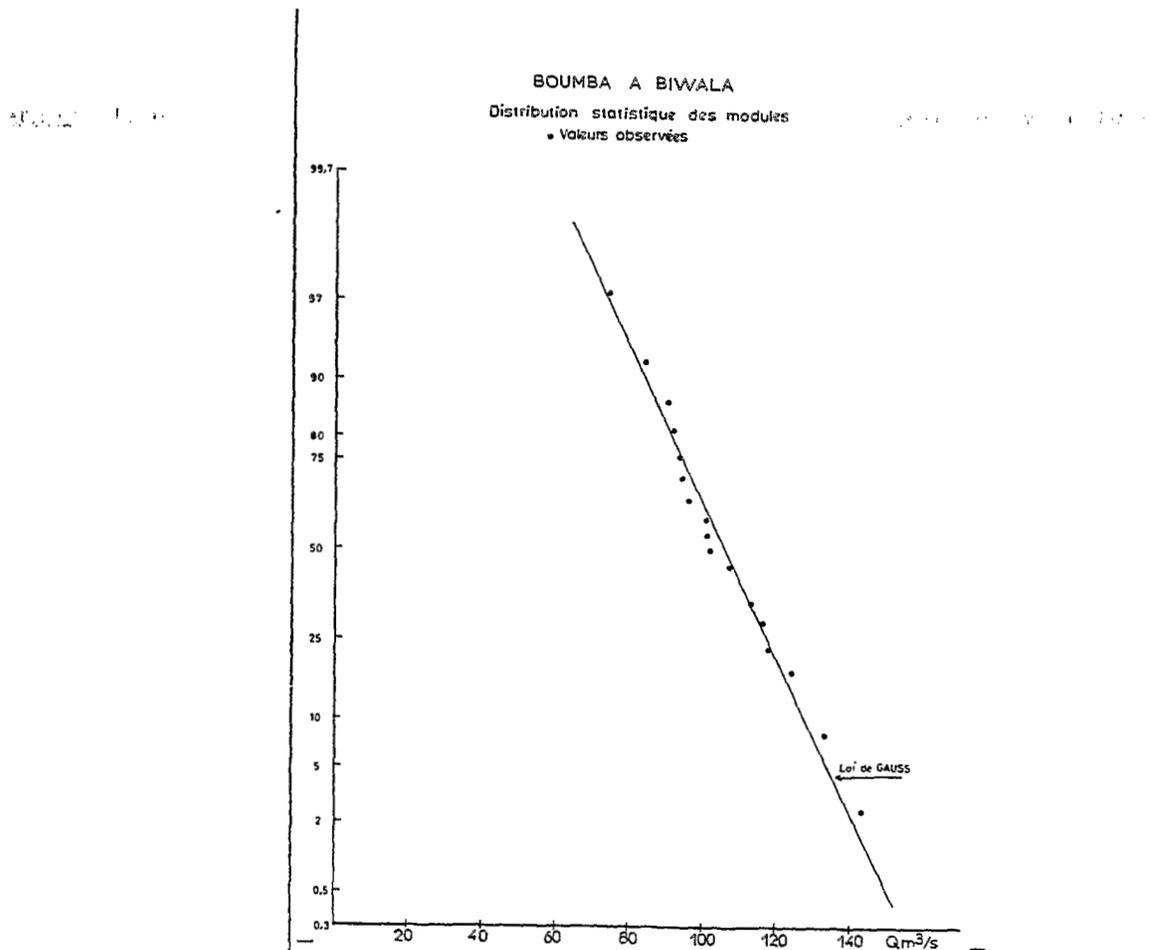


Figure 3-12 : Distribution statistique des modules. Valeurs observées

BOUMBA A BIWALA (1965-1992)

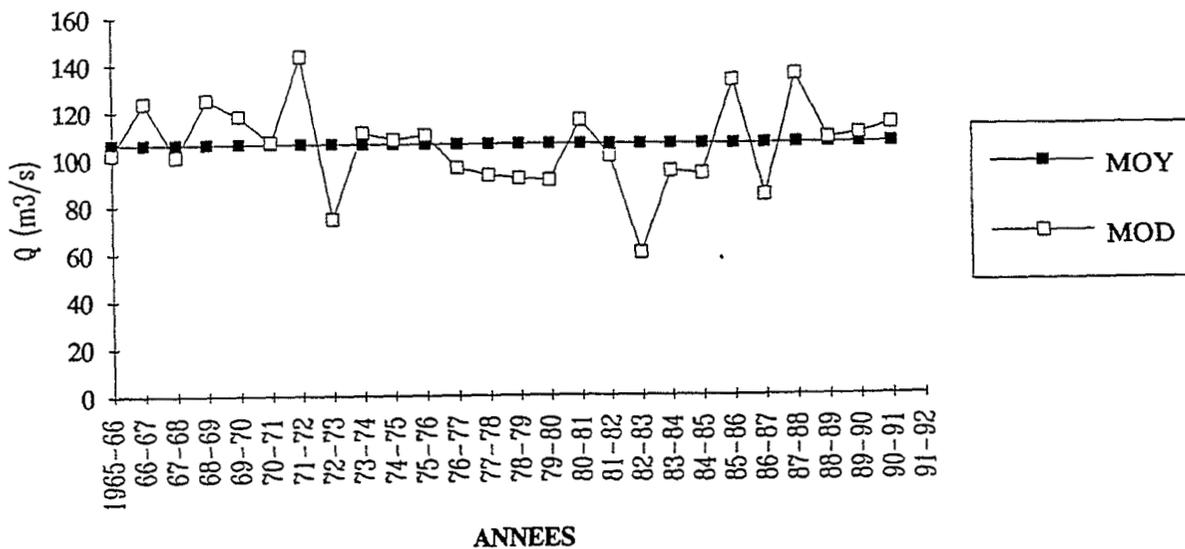


Figure 3-13 : Fluctuations annuelles des modules. Légende (cf. figure 3-6)

BOUMBA A BIWALA (1965-1992)

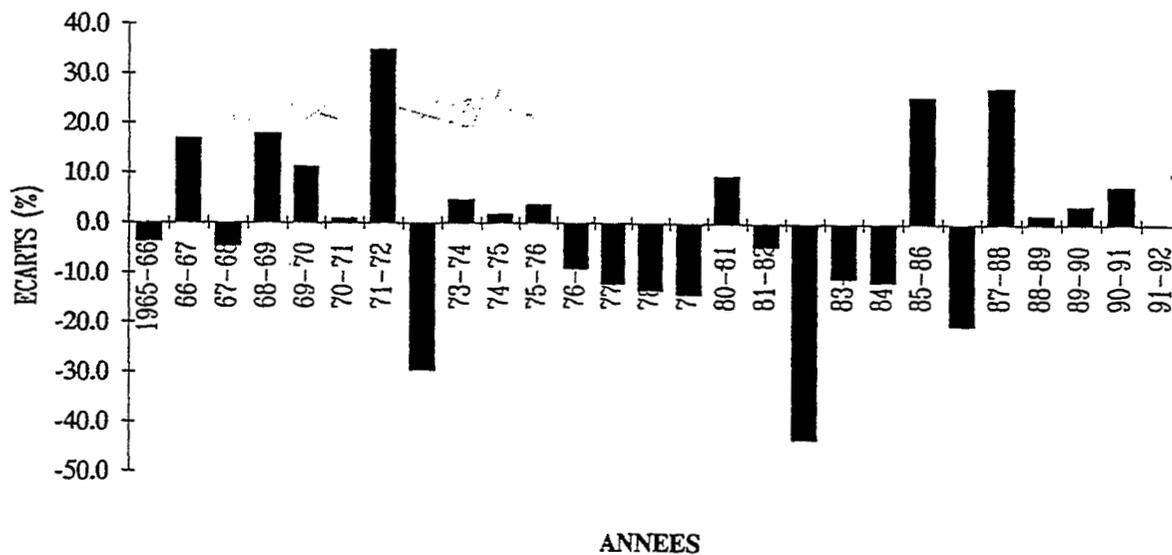


Figure 3-14 : Evolution des écarts à la moyenne interannuelle des modules

3.2. LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DU NYONG SUPERIEUR ET DU NTEM

Nous nous proposons d'analyser ensemble les caractéristiques des débits observés à Akonolinga et à Mbalmayo d'une part, et celles des débits obtenus à Ngoazik et Nyabessan d'autre part. Cette analyse est limitée aux paramètres essentiels qui permettent de caractériser les régimes hydrologiques dans leurs grandes lignes pour une confirmation ou non des conclusions auxquelles on a abouti au sous-chapitre précédent.

3.2.1. LE BASSIN DU NYONG SUPERIEUR

Nous désignons par l'indice a les tableaux et figures relatifs aux résultats obtenus à Akonolinga, et par b l'indice de ceux relatifs aux résultats obtenus à Mbalmayo sur le Nyong. Les observations à Akonolinga couvrent la période de 1954 à mars 1992 et celles de Mbalmayo la période de 1951 à mars 1992, donc légèrement supérieure à celle de Somalomo sur le Dja.

Les tableaux 3-12 a et b contiennent la répartition statistique des débits moyens mensuels du Nyong à Akonolinga et à Mbalmayo. Les variations saisonnières correspondantes sont représentées sur les figures 3-15 a et b. On observe, comme sur le Dja et la Boumba, que le régime hydrologique saisonnier est calqué sur celui des précipitations. En moyenne, les stations d'Akonolinga et de Mbalmayo enregistrent le maximum d'écoulement mensuel en novembre, avec des débits respectifs de 225 et de 344 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$; il en est de même de l'écoulement minimum, qui est enregistré en mars aussi bien à Akonolinga (18,9 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) qu'à Mbalmayo (50,8 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), à la seule différence qu'à cette dernière station il s'étend de février à mars. Les maximas mensuels sont également observés en novembre : à Akonolinga, il est de 343 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ en 1963 et à Mbalmayo il est de 514 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ l'année suivante. Le minimum mensuel est de 2,74 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ en avril 1983 à Akonolinga alors qu'à Mbalmayo il est plutôt observé en février 1987 (11,1 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$).

Les caractéristiques des régimes hydrologiques saisonniers montrent que les mois d'exportation des matières en suspension et en solution en quantités élevées sont les mêmes que ceux indiqués sur le Dja et la Boumba.

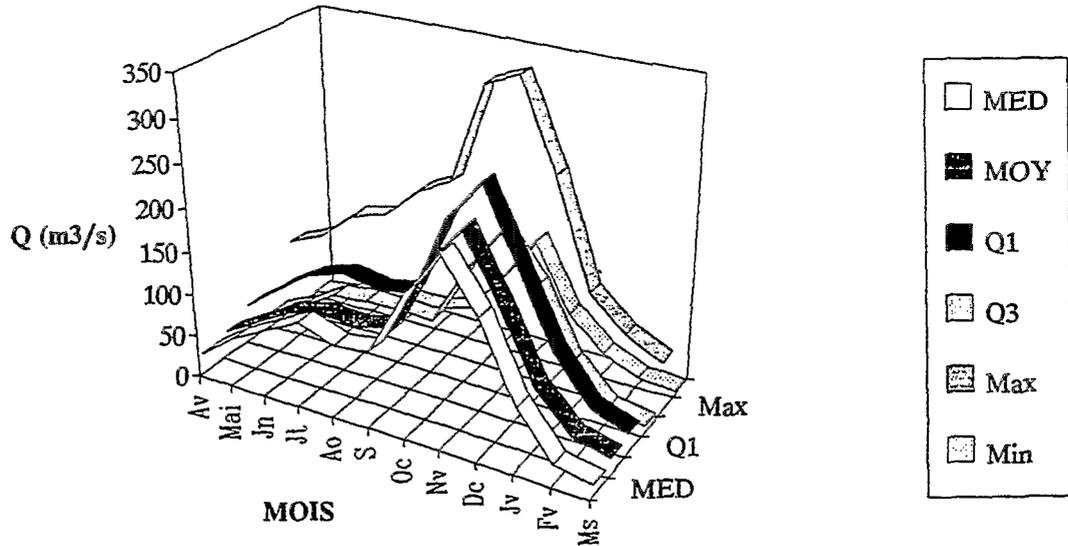
A l'échelle pluriannuelle, les modules et leurs écarts à la moyenne sont reportés dans les tableaux 3-13 a et b. A Akonolinga, le module interannuel est de 89,7 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, soit

Tableau 3-12 : Répartition statistique des débits moyens mensuels et annuels. Légende (cf. tableau 3-2)

a)													
NYONG A AKONOLINGA : DEBITS MOYENS MENSUELS ET ANNUELS (1954-1992)													
	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	MOYENNE
MED	24.4	54.1	76.1	96.6	81.5	85.5	163	216	159	72.3	22.4	13.2	97.2
MOY	29.9	53.1	77.3	86.0	81.4	92.1	173	225	153	71.6	28.1	18.9	89.7
ET	19.6	25.1	30.2	33.1	36.9	41.1	55.7	51.4	32.9	22.8	17.4	15.4	24.4
Q1	43.5	75	102	115	106	113	208	258	174	90.4	37.9	22.7	111
Q3	15.5	33.5	57.9	60.9	61.4	59.5	133	186	134	55.8	15.2	8.25	70.3
Max	86.5	104	138	148	186	206	326	343	242	118	81.4	59.3	128
Min	2.74	9.94	24.6	23.4	23	35.6	84.1	139	62.1	25.5	7.42	3.1	47.7

b)													
NYONG A MBALMAYO : DEBITS MOYENS MENSUELS ET ANNUELS (1951-1992)													
ANNEE	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	MOYENNE
MED	74.5	121	144	126	101	141	269	338	216	104	47.2	39.8	148
MOY	78.4	115.6	143.1	125.5	102.5	144.8	264.8	343.8	221.0	109.5	50.0	50.7	148.2
ET	33.2	41.8	42.7	50.1	41.0	50.9	61.5	73.9	51.1	31.2	24.8	30.0	29.4
Q1	100	142	179	160	131	178	318	385	243	132	61.3	68.2	165
Q3	56.5	85.4	113	89.8	74.2	112	214	290	190	88.6	30.7	26.6	127
Max	180	226	237	266	203	282	390	514	356	192	115	119	209
Min	19.9	48.3	61.5	53.3	26.2	46	156	179	126	59.2	11.1	15.4	104

a) NYONG A AKONOLINGA (1954-1992)



b) NYONG A MBALMAYO (1950-1992)

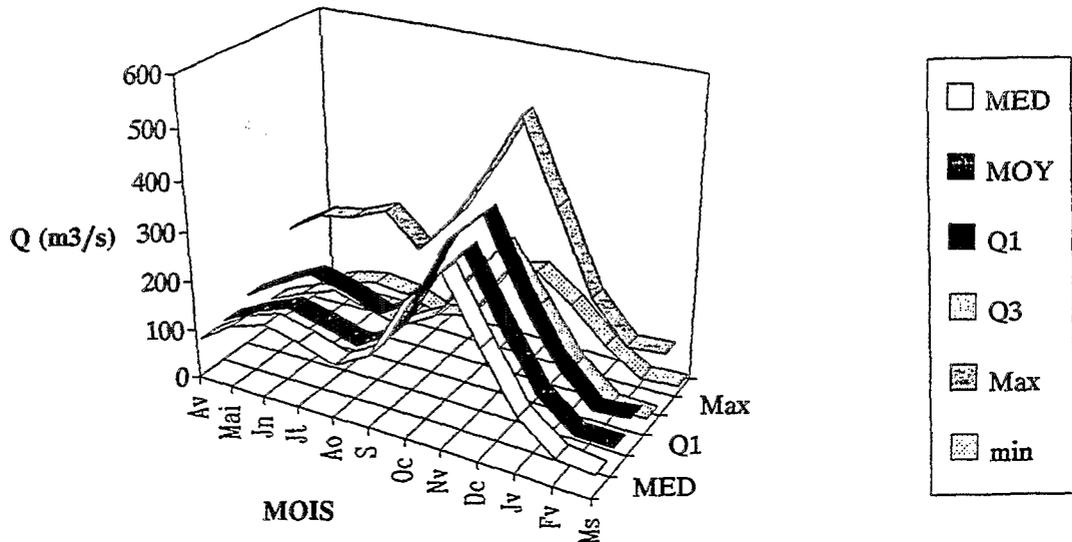


Figure 3-15 : Variations saisonnières des débits mensuels . Légende (cf. tableau 3-2)

Tableau 3-13 : Modules et leurs écarts à la moyenne

NYONG A AKONOLINGA : DEBITS ANNUELS ET ECARTS A LA MOYENNE (1954-1992)					
ANNEE	MODULE	ECARTS	ANNEE	MODULE	ECARTS
	m3/s	%		m3/s	%
1954-55	78.3	-12.7	75-76	95.3	6.2
55-56	87.2	-2.8	76-77	70.3	-21.6
56-57	93.7	4.5	77-78	63.3	-29.4
57-58	105	17.1	78-79	74.4	-17.1
58-59	76.3	-14.9	79-80	66.1	-26.3
59-60	97.5	8.7	80-81	93.3	4.0
60-61	98.2	9.5	81-82	65.2	-27.3
61-62	64.5	-28.1	82-83	83.1	-7.4
62-63	107	19.3	83-84	47.7	-46.8
63-64	104	15.9	84-85	118	31.5
64-65	121	34.9	85-86	128	42.7
65-66	92.6	3.2	86-87	48.1	-46.4
66-67	106	18.2	87-88	144	60.5
67-68	72.9	-18.7	88-89	92.4	3.0
68-69	103	14.8	89-90	116	29.3
69-70	126	40.5	90-91	128	42.7
70-71	90.4	0.8	91-92		
71-72	111	23.7			
72-73	75.4	-15.9			
73-74	97.2	8.4			
74-75	92.4	3.0			

B)- NYONG A MBALMAYO : DEBITS ANNUELS ET ECARTS A LA MOYENNE (1951-1992)					
ANNEE	MODULE	ECARTS	ANNEE	MODULE	ECARTS
	m3/s	%		m3/s	%
51-52	140	-5.4	75-76	137	-7.4
52-53	164	10.8	76-77	104	-29.7
53-54	117	-20.9	77-78	112	-24.3
54-55	133	-10.1	78-79	124	-16.2
55-56	127	-14.2	79-80	111	-25.0
56-57	165	11.5	80-81	146	-1.4
57-58	163	10.1	81-82	114	-23.0
58-59	123	-16.9	82-83	138	-6.8
59-60	157	6.1	83-84	90.9	-38.6
60-61	148	0.0	84-85	201	35.8
61-62	105	-29.1	85-86	199	34.5
62-63	180	21.6	86-87	123	-16.9
63-64	163	10.1	87-88	220	48.6
64-65	197	33.1	88-89	151	2.0
65-66	156	5.4	89-90	183	23.6
66-67	209	41.2	90-91	199	34.5
67-68	125	-15.5	91-92		
68-69	165	11.5			
69-70	188	27.0			
70-71	173	16.9			
71-72	159	7.4			
72-73	127	-14.2			
73-74	151	2.0			
74-75	138	-6.8			

$q = 10,7 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$; à Mbalmayo, il est de $148 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, soit $q = 10,9 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$. Le rapport entre les modules interannuels aux deux stations et celui existant entre les superficies des bassins versants qu'elles contrôlent sont comparables (60,6 et 61,6 % respectivement). Les débits spécifiques interannuels du Nyong à Akonolinga et à Mbalmayo sont proches de celui de la Boumba à Biwala. Par contre, ils sont inférieurs à ceux de Somalomo et de Bi sur le Dja. D'un débit de $47,7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, soit $q = 5,71 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$, l'année 1983-84 correspond à l'année la plus déficitaire à Akonolinga et à Mbalmayo où le débit est de $90,9 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, soit $q = 6,71 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$. L'année 1974-75, d'un module égal à $92,4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, est normale à Akonolinga alors qu'à Mbalmayo c'est plutôt l'année 1960-61 avec un débit de $148 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. L'année humide correspond à Akonolinga à 1985-86 avec un débit de $128 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, soit $q = 15,3 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ tandis qu'à Mbalmayo c'est plutôt 1966-67 dont le débit est de $209 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, soit $q = 14,4 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$. Les débits mensuels correspondant à ces années exceptionnelles sont reportés dans les tableaux 3-14 a et b et leurs variations saisonnières représentées sur les figures 3-16 a et b.

L'année 1989-90 des cycles hydrologiques de 1989 à 1992, n'a pas été observée aux deux stations pour les raisons déjà évoquées. Leurs modules ont néanmoins été estimés. Les résultats des deux années suivantes sont reportés dans les tableaux 3-15 a et b et représentés sur les figures 3-17 a et b au regard des moyennes interannuelles. En 1990-91 et 1991-92, les modules respectifs à Akonolinga et Mbalmayo sont 128 et $88,9 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et 199 et $148 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Aux deux stations, les modules des deux années d'observations sont proches ou légèrement supérieurs aux moyennes interannuelles. On en déduit que les caractéristiques des cycles étudiés sont moyennes à humides.

Les fluctuations annuelles des modules et l'évolution des écarts à la moyenne sont représentées sur les figures 3-18 a et b et 3-19 a et b respectivement. Elles montrent que les variations pluriannuelles des débits à Mbalmayo suivent assez bien celles des débits à Akonolinga. Elles sont également similaires à celles observées à Biwala sur la Boumba et à Somalomo sur le Dja, à la seule différence qu'à cette dernière station, la sécheresse débute deux ans plus tôt. A partir de 1985, on observe une alternance des années sèche et humide qui se stabilisent dès 1988 autour de la moyenne, période normale vécue sur le bassin jusqu'à l'heure actuelle. En somme, le comportement hydrologique du Nyong supérieur semble assez proche de celui de la Boumba sans toutefois se différencier de façon sensible de celui du Dja. Les cycles hydrologiques étudiés sur le Nyong en amont de Mbalmayo s'inscrivent également dans la séquence normale déjà décrite sur le Dja et la Boumba.

Tableau 3-14 : Débits mensuels et annuels des années sèche , moyenne et humide

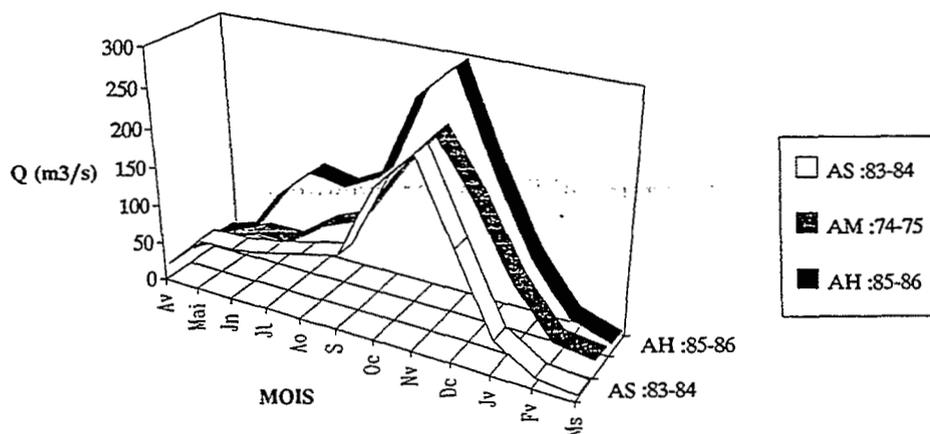
A)-

NYONG A AKONOLINGA : DEBITS MENSUELS DES ANNEES SECHE, MOYENNE ET HUMIDE													
ANNEE	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	MODULE
AS :83-84	17.9	61	62.8	69.7	81.5	91.6	187	236	137	39.5	8.76	3.5	47.7
AM :74-75	16.2	41	60.9	60.9	94.1	113	183	240	171	85	25.3	17.8	92.4
AH :85-86	15.5	29	91.8	133	124	148	257	300	188	93	29.4	11.4	128

B)-

NYONG A MBALMAYO : DEBITS MENSUELS DES ANNEES SECHE, MOYENNE ET HUMIDE													
ANNEE	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	MODULE
AS :76-77	97	116	125	70.6	54.9	75	183	266	140	76.6	24	15.7	104
AM :60-61	66.5	112	133	105	122	186	268	331	232	124	71.5	19.8	148
AH :66-67	85.1	226	237	266	185	173	306	448	323	150	68.4	36.6	209

a) NYONG A AKONOLINGA (1954-1992)



b) NYONG A MBALMAYO (1950-1992)

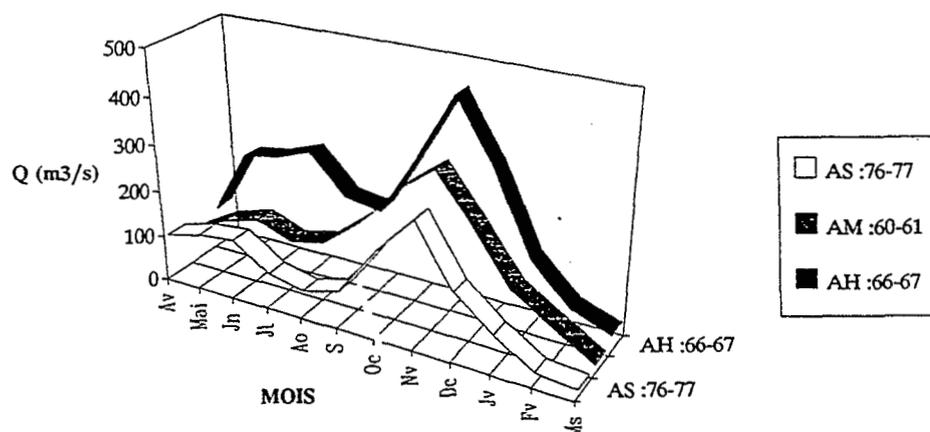


Figure 3-16 : Variations saisonnières des débits mensuels des années sèche, moyenne et humide

Tableau 3-15 : Débits mensuels des cycles étudiés en m³/s

a) Nyong à Akonolinga													
Année	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	Module
Moyenne	29,9	53,1	77,3	86	81,4	92,1	173	225	153	71,6	28,1	18,9	89,7
1990-91	13,6	46,4	79	33,9	56,7	124	270	358	245	123	58,2	19,2	128
1991-92	24,4	69,3	116	73,1	39,2	141	217	172	126	71,2	11,7	5,75	88,9
b) Nyong à Mbalmayo													
Moyenne	78,4	116	143	126	103	145	265	344	221	110	50	50,7	148
1990-91		89,2	133	58,3	103	194	390	508	356	192	105	55,9	199
1991-92	92,9	164	189	91,1	80,7	216	318	254	206	103	32,2	34,5	148

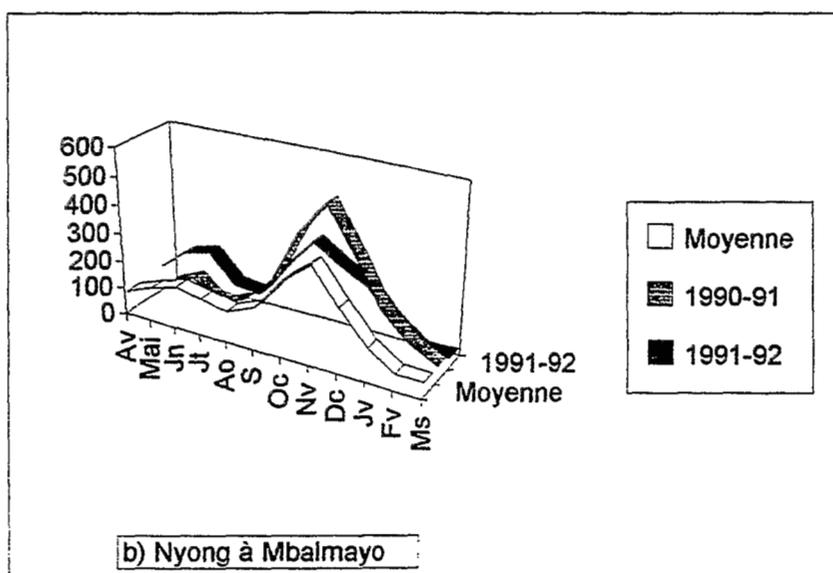
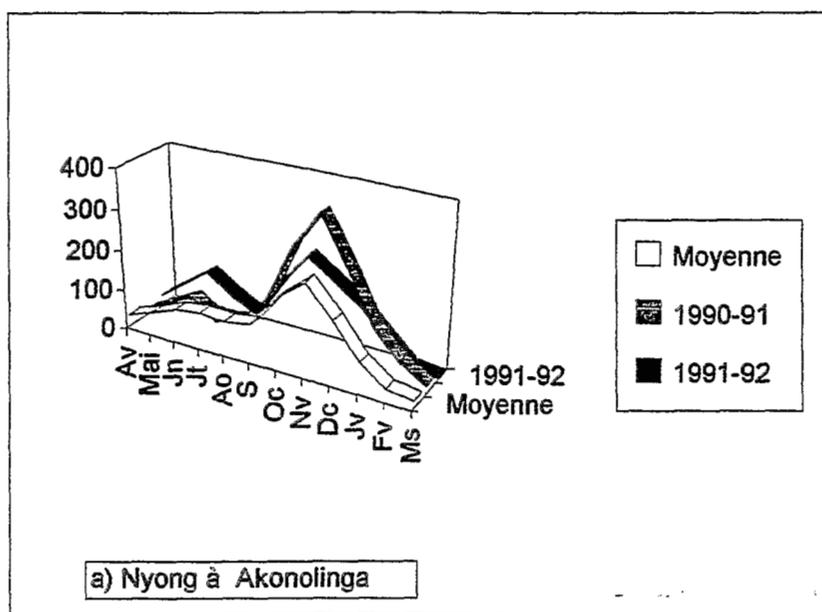
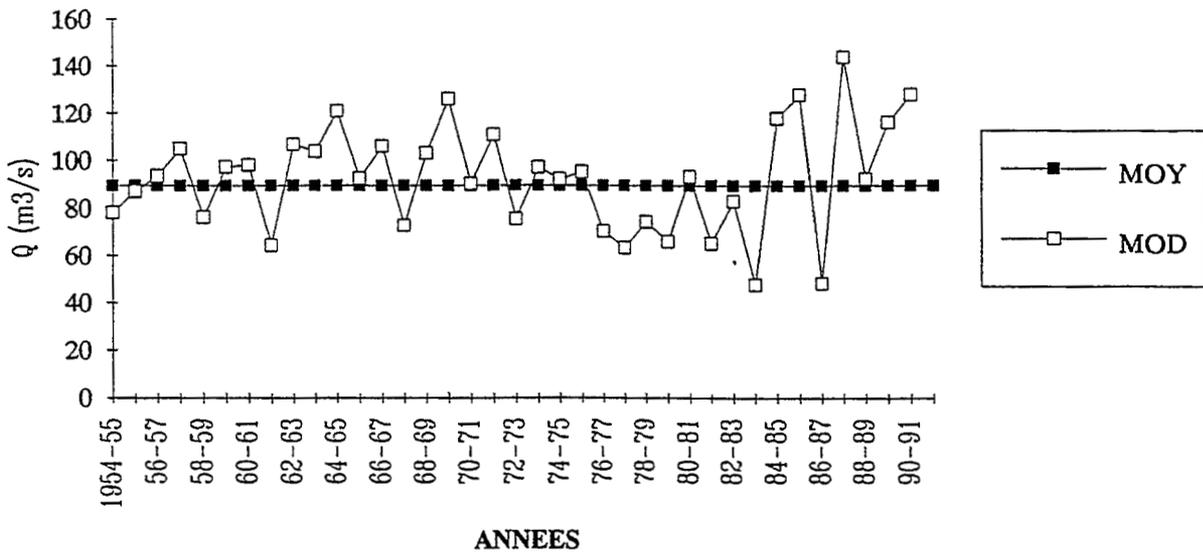


Figure 3-17 : Variations saisonnières des débits mensuels des cycles étudiés

a) NYONG A AKONOLINGA (1954-1992)



b) NYONG A MBALMAYO (1951-1992)

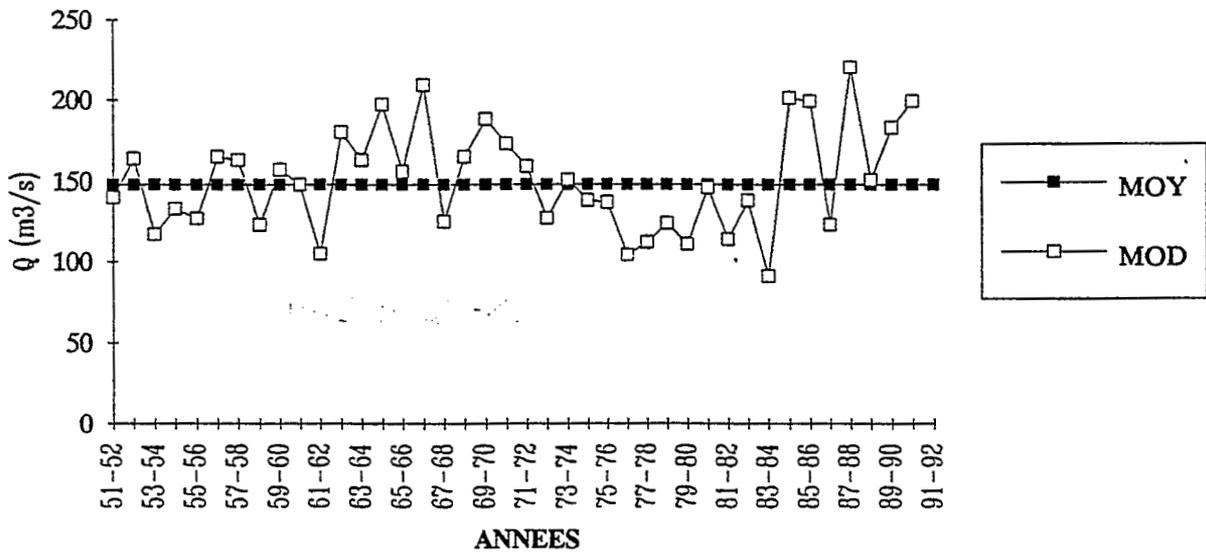
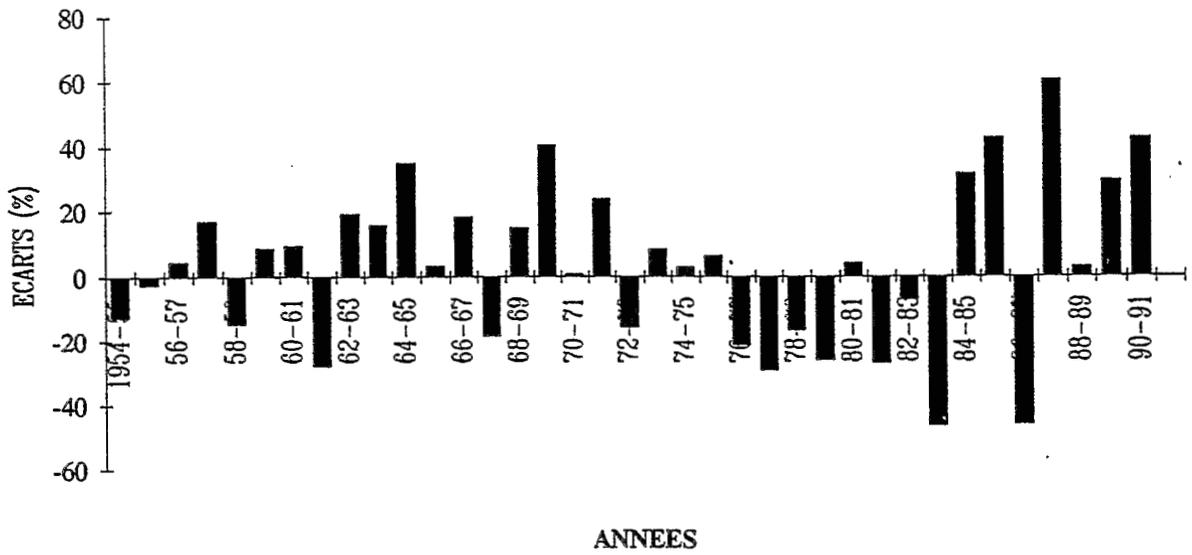


Figure 3-18 : Fluctuations annuelles des modules . Légende (cf. figure 3-6)

a) NYONG A AKONOLINGA (1954-1992)



b) NYONG A MBALMAYO (1951-1992)

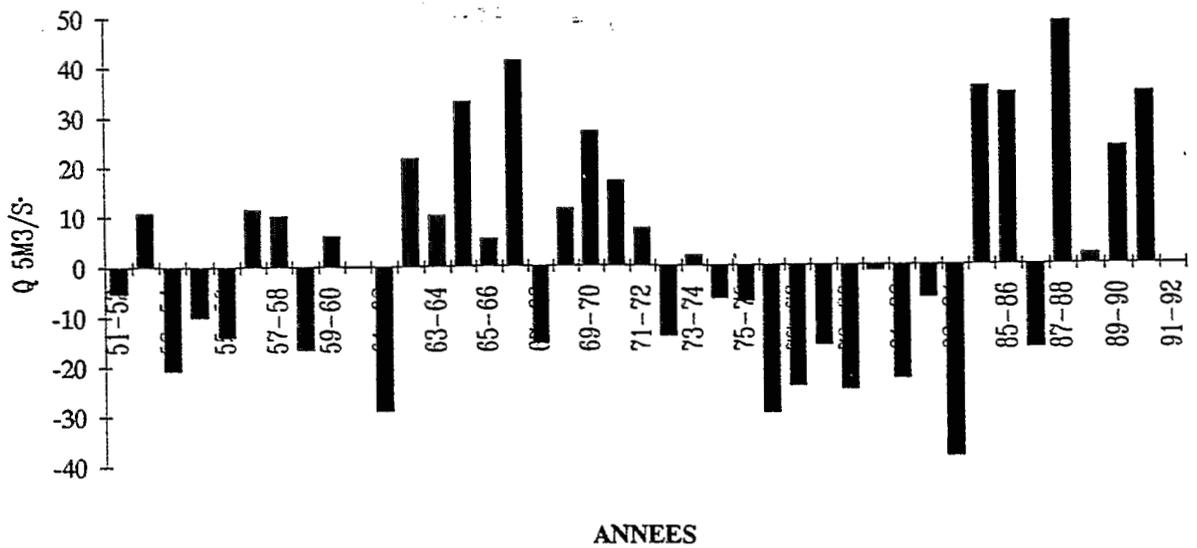


Figure 3-19 : Evolution des écarts à la moyenne interannuelle

3.2.2. LE BASSIN VERSANT DU NTEM

Les caractéristiques hydrologiques du Ntem vont être déterminées à partir des débits observés aux stations de Ngoazik et Nyabessan. A la station amont (Ngoazik), ils sont connus de 1954 à 1992 et en aval, à Nyabessan de 1957 à 1992. Le début des observations aux deux stations se situe dans la même décennie qu'à Somalomo sur le Dja, Akonolinga et Mbalmayo sur le Nyong. De la même manière que sur ces deux rivières, nous allons désigner par l'indice a les tableaux et figures présentant les résultats obtenus à Ngoazik et par l'indice b ceux des résultats acquis à Nyabessan.

Dans les tableaux 3-16 a et b est reportée la répartition statistique des débits moyens mensuels et annuels. Les courbes de variations saisonnières des débits, représentées sur les figures 3-20 a et b sont semblables à celles obtenues sur le Dja, la Boumba et le Nyong, en ce sens qu'elles sont calquées sur les régimes saisonniers des précipitations. Pendant les hautes eaux, en moyenne, l'écoulement maximum mensuel est enregistré en novembre aussi bien à Ngoazik ($586 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) qu'à Nyabessan ($972 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Par contre, pendant les basses eaux, en moyenne l'écoulement minimum mensuel est enregistré pendant les deux périodes d'étiage, à savoir : en février (Ngoazik : $Q = 88 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; Nyabessan : $Q = 144 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et en août (Ngoazik : $Q = 92 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; Nyabessan : $Q = 140 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Sur le Ntem, l'étiage secondaire se manifeste de la même manière que l'étiage principal, contrairement à ce que nous avons vu sur les rivières étudiées plus haut. Le débit maximum mensuel a été observé en novembre 1970 aux deux stations ; il est de $978 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à Ngoazik et de $1524 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à Nyabessan. Il en est de même du minimum mensuel qui a été enregistré en août 1958 à Ngoazik ($8,65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et à Nyabessan ($24,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

La correspondance entre les débits mensuels de la station en amont et ceux de la station en aval fonctionne de façon satisfaisante sur le Ntem, ce qui n'a pas été souvent le cas sur les autres cours d'eau. Une autre différence notable entre le Ntem et les cours d'eau précédents concerne la sévérité de l'étiage secondaire, pendant lequel sont d'ailleurs mesurés les minimas mensuels (août 1958) aux deux stations.

A l'échelle pluriannuelle, les modules et leurs écarts à la moyenne sont reportés dans les tableaux 3-17 a et b. Le module interannuel est de $255 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 14,1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ à Ngoazik et de $395 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 15 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ à Nyabessan. Le rapport entre les deux modules est de 64,6 %, soit de 4 % inférieur à celui qui existe entre les superficies des deux bassins versants (68,7 %). Il se dégage de ces résultats que le débit spécifique est plus élevé sur le Ntem que sur le Dja, la Boumba et le Nyong. Cette abondance de

Tableau 3-16 : Répartition statistique des débits moyens mensuels et annuels . Légende (cf. tableau 3-2)

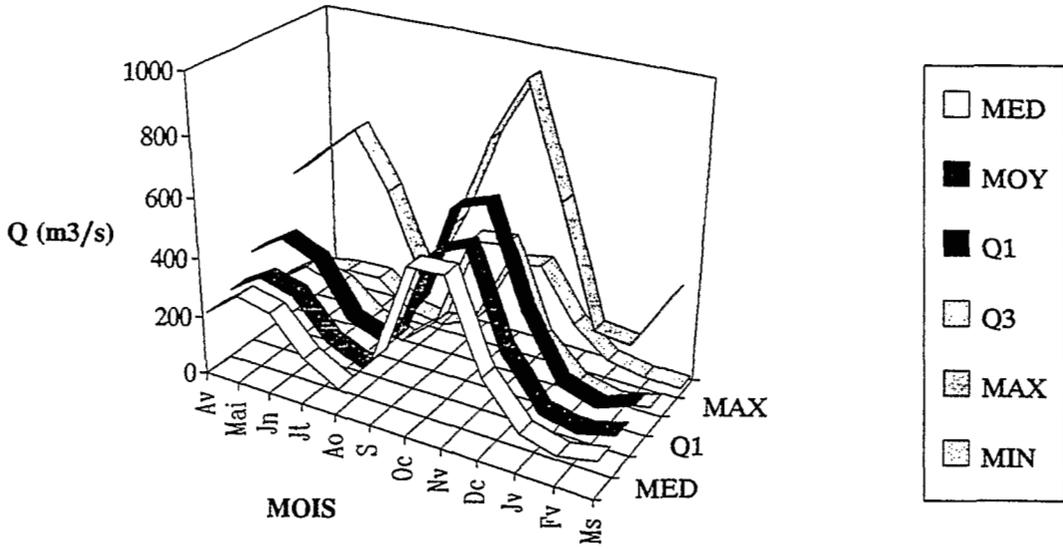
a)

NTEM A NGOAZIK : DEBITS MENSUELS ET ANNUELS (1954-1992)													
	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	MOY
MED	207	294	270	147	78	212	549	555	261	119	88	114	233
MOY	231	301	272	144	88	221	536	586	279	119	92	127	255
ET	103	117	108	81	50	93	121	143	98	44	41	67	56
Q1	310	386	335	162	120	279	628	670	354	149	113	160	298
Q3	155	234	200	108	64	167	476	493	206	86	62	88	199
Max	491	597	695	506	227	452	761	978	610	215	201	400	386
Min	96	113	116	28	9	52	292	317	144	50	28	23	139

b)

NTEM A NYABESSAN : DEBITS MOYENS MENSUELS ET ANNUELS (1957-1992)													
ANNEE	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	MOYENNE
MED	333	494	464	217	132	327	858	971	399	178	144	194	389
MOY	362	493	441	238	144	320	842	972	434	175	140	200	395
ET	143	188	161	135	75	123	164	247	119	42	53	85	74
Q1	408	581	550	276	178	397	972	1176	556	199	174	240	451
Q3	293	358	334	166	99	259	737	811	343	143	98	151	353
Max	873	1039	909	781	402	619	1278	1524	706	275	288	499	588
Min	161	241	171	53	24	61	530	495	256	87	61	60	216

a) NTEM A NGOAZIK (1954-1992)



b) NTEM A NYABESSAN (1957-1992)

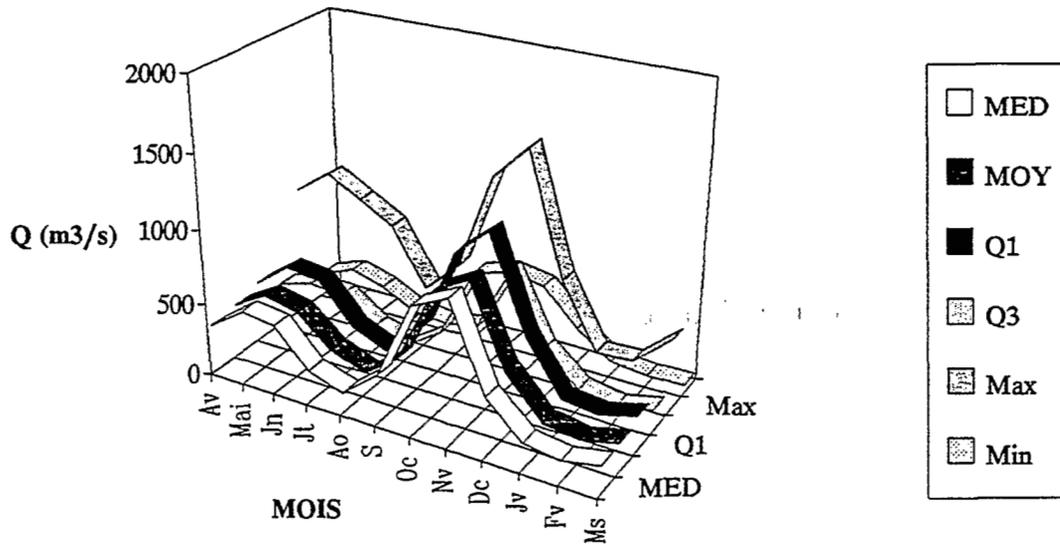


Figure 3-20 : Variations saisonnières des débits mensuels . Légende (cf. tableau 3-2)

l'écoulement traduit la manifestation des influences océaniques sur ce bassin, notamment de l'aval du bassin où elles sont plus prononcées.

L'année 1958-59 pendant laquelle ont été observés les minimas mensuels, correspond à l'année sèche aux deux stations. A Ngoazik son module est de $139 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 7,68 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ et à Nyabessan il est de $216 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 8,20 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Par contre, l'année moyenne n'est pas la même. A Ngoazik, elle correspond au cycle 1976-77 qui a un module de $82 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et à Nyabessan au cycle 1959-60 dont le module est $396 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. L'année humide s'identifie au cycle 1959-60, avec à Ngoazik un module de $386 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 21,3 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ et à Nyabessan un module de $588 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 22,3 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. A partir des tableaux 3-18 a et b contenant les débits mensuels, nous avons représenté les variations saisonnières sur les figures 3-21 a et b des dites années.

Les résultats des cycles hydrologiques de 1989 à 1992 présentent des lacunes pour la première année aux deux stations et des données douteuses pour la seconde année à Nyabessan. A partir des corrélations du tableau 3-1, nous avons estimé à 189 ($q = 10,4 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) et à $318 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($12,1 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) les modules respectifs à Ngoazik et à Nyabessan pour le cycle 1989-90. En 1990-91, ils sont $270 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($q = 12,1 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) à Ngoazik et de $417 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($q = 15,8 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) à Nyabessan. Le module observé en 1991-92 à Ngoazik est de $188 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 10,4 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$; à Nyabessan, il est de $326 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit un débit spécifique de $12,4 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Les tableaux 3-19 a et b contiennent les débits mensuels en regard des moyennes interannuelles ; leurs variations saisonnières sont reportées sur les figures 3-22 a et b. Comparés aux modules interannuels, les modules reconstitués présentent un déficit de l'ordre de 20 % en 1989-90 et un faible excédent (5 %) l'année suivante. L'année 1991-92 est également déficitaire et comparable à l'année 1989-90.

Les fluctuations annuelles des modules et l'évolution de leurs écarts à la moyenne sont représentées sur les figures 3-23 a et b et 3-24 a et b respectivement. A chacune de ces stations, elles mettent en relief une séquence humide de 1962 à 1971, suivie de la séquence sèche de 1971 à 1985 déjà décrite sur le Dja, la Boumba et le Ntem. Débute alors une alternance des années excédentaires et déficitaires jusqu'en 1987, année à partir de laquelle les cycles ont une tendance sèche à moyenne, exception faite de 1988-89 qui est légèrement humide. Dans l'ensemble, le Ntem présente des séquences humides, sèches et normales identiques à celles décrites sur le Dja, la Boumba et le Nyong. Mais la reprise observée sur ces bassins de 1985 à 1992 n'est pas assez nette sur le Ntem.

Tableau 3-17 : Modules et écarts à la moyenne interannuelle

a)						
NTEM A NGOAZIK : DEBITS ANNUELS ET ECARTS A LA MOYENNE (1954-1992)						
	ANNEE	MODULE	ECARTS	ANNEE	MODULE	ECARTS
		m3/s	%		m3/s	%
	1954-55	194	-23.92	75-76	227	-10.98
	55-56	228	-10.59	76-77	253	-0.78
	56-57	308	20.78	77-78	195	-23.53
	57-58	264	3.53	78-79	233	-8.63
	58-59	139	-45.49	79-80	212	-16.86
	59-60	276	8.24	80-81	228	-10.59
	60-61	329	29.02	81-82	232	-9.02
	61-62	199	-21.96	82-83	231	-9.41
	62-63	304	19.22	83-84	148	-41.96
	63-64	298	16.86	84-85	253	-0.78
	64-65	309	21.18	85-86	330	29.41
	65-66	286	12.16	86-87	166	-34.90
	66-67	386	51.37	87-88	234	-8.24
	67-68	291	14.12	88-89	290	13.73
	68-69	340	33.33	89-90	189	-25.88
	69-70	292	14.51	90-91	270	5.88
	70-71	290	13.73	91-92		
	71-72	198	-22.35			
	72-73	228	-10.59			
	73-74	203	-20.39			
	74-75	240	-5.88			

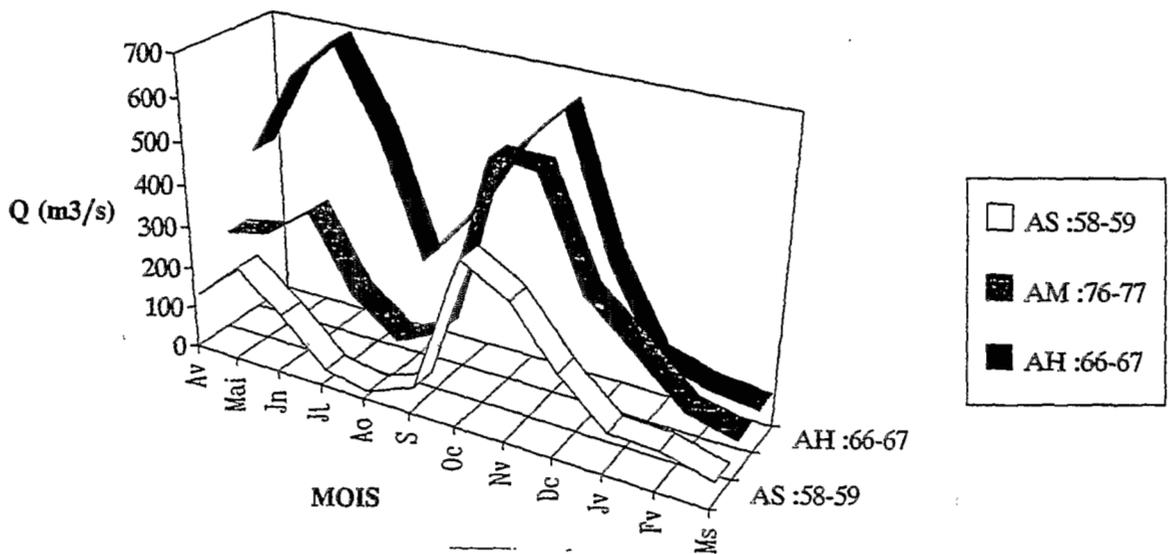
b)					
NTEM A NYABESSAN : DEBITS ANNUELS ET ECARTS A LA MOYENNE (1958-1992)					
ANNEE	MODULE	ECARTS	ANNEE	MODULE	ECARTS
	m3/s	%		m3/s	%
1958-59	216	-45.3	75-76	371	-6.1
59-60	396	0.3	76-77	419	6.1
60-61	467	18.2	77-78	356	-9.9
61-62	332	-15.9	78-79	372	-5.8
62-63	455	15.2	79-80	353	-10.6
63-64	385	-2.5	80-81	363	-8.1
64-65	437	10.6	81-82	379	-4.1
65-66	443	12.2	82-83	389	-1.5
66-67	588	48.9	83-84	259	-34.4
67-68	482	22.0	84-85	451	14.2
68-69	463	17.2	85-86	501	26.8
69-70	429	8.6	86-87	298	-24.6
70-71	452	14.4	87-88	373	-5.6
71-72	310	-21.5	88-89	466	18.0
72-73	351	-11.1	89-90	318	-19.5
73-74	338	-14.4	90-91	417	5.6
74-75	407	3.0	91-92		

Tableau 3-18 : Débits mensuels et annuels des années sèche, moyenne et humide. Légende (cf. tableau 3-5)

NTEM A NGOAZIK : DEBITS MENSUELS DES ANNEES SECHE, MOYENNE ET HUMIDE													
ANNEE	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	MODULE
AS :58-59	125	220	132	27.8	8.65	51.7	382	317	185	85.8	83.1	52.9	139
AM :76-77	235	256	335	162	77	130	558	555	309	214	110	82	253
AH :66-67	394	597	695	506	226	355	537	648	337	139	105	88.4	386

NTEM A NYABESSAN : DEBITS MENSUELS DES ANNEES SECHE, MOYENNE ET HUMIDE													
ANNEE	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	MOY
AS :58-59	196	361	183	52.6	24.2	61.3	547	495	317	143	144	91.6	216
AM :59-60	179	460	249	133	88.2	312	995	1176	608	170	174	202	396
AH :66-67	504	1039	909	781	311	436	819	1198	557	199	156	123	588

NTEM A NGOAZIK (1953-54)



NTEM A NYABESSAN (1957-1992)

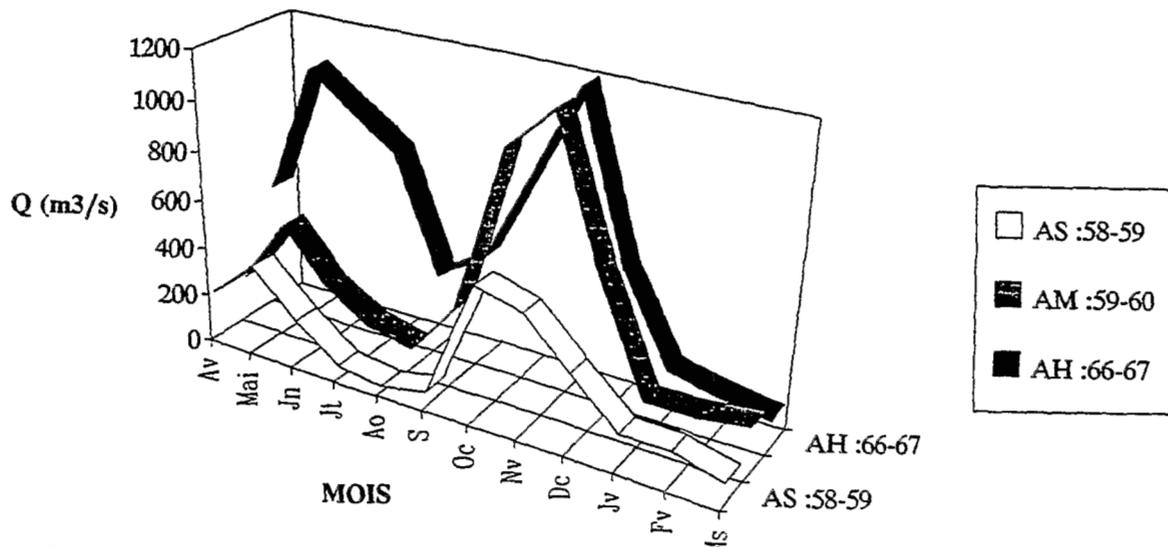


Figure 3-21 : Variations saisonnières des débits mensuels des années sèche, moyenne et humide

Tableau 3-19 : Débits mensuels des cycles étudiés en m³/s

a) Ntem à Ngoazik													
Année	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	Module
Moyenne	231	301	272	144	88	221	536	586	279	119	92	127	255
1990-91		249	200	62	84,4	277	539	733	436	170	87,5	136	269
1991-92	378	259	247	131	127	150	270	354	202	51,1	39,2	42,3	188
b) Ntem à Nyabessan													
Moyenne	362	493	441	238	144	320	742	972	434	175	140	200	395
1991-92	580	492	434	214	200	278	479	602	369	103	79,8	85,8	326

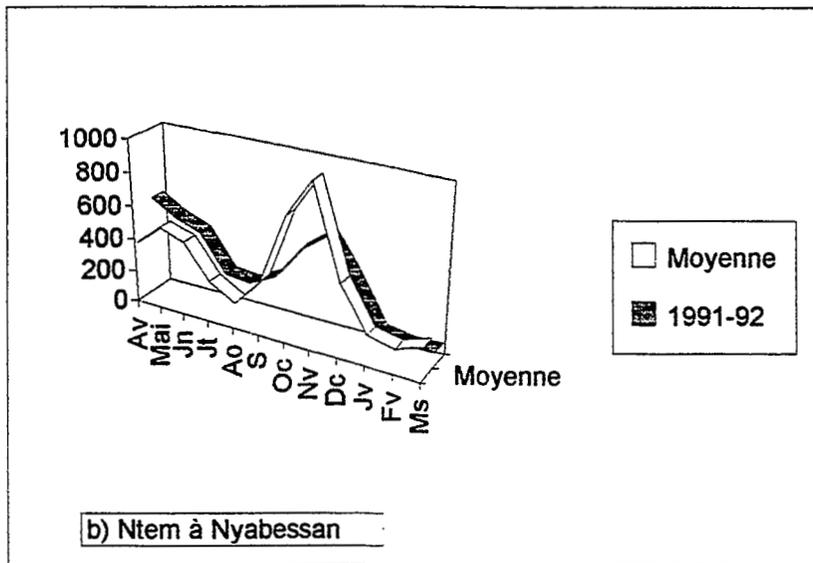
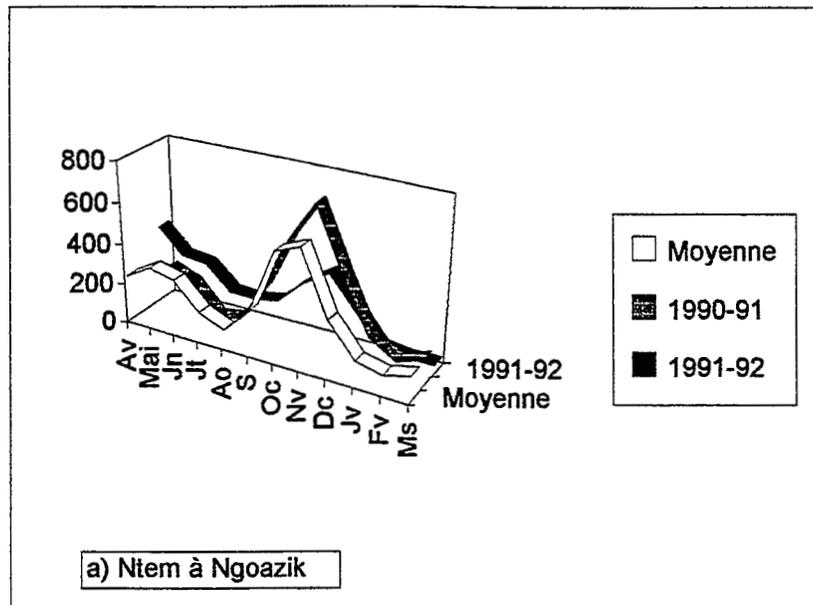
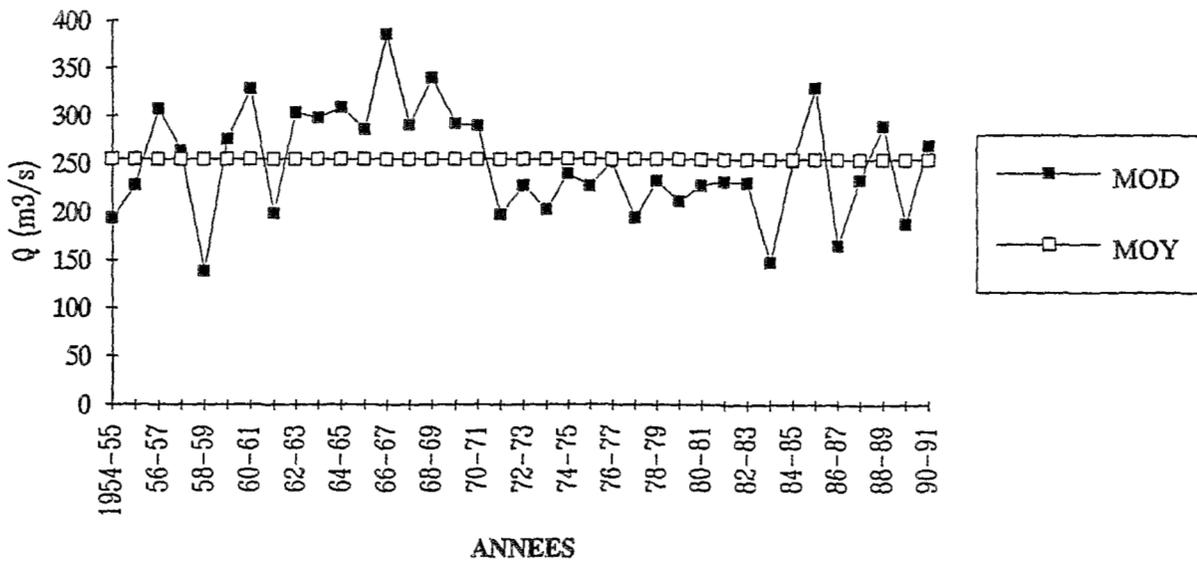
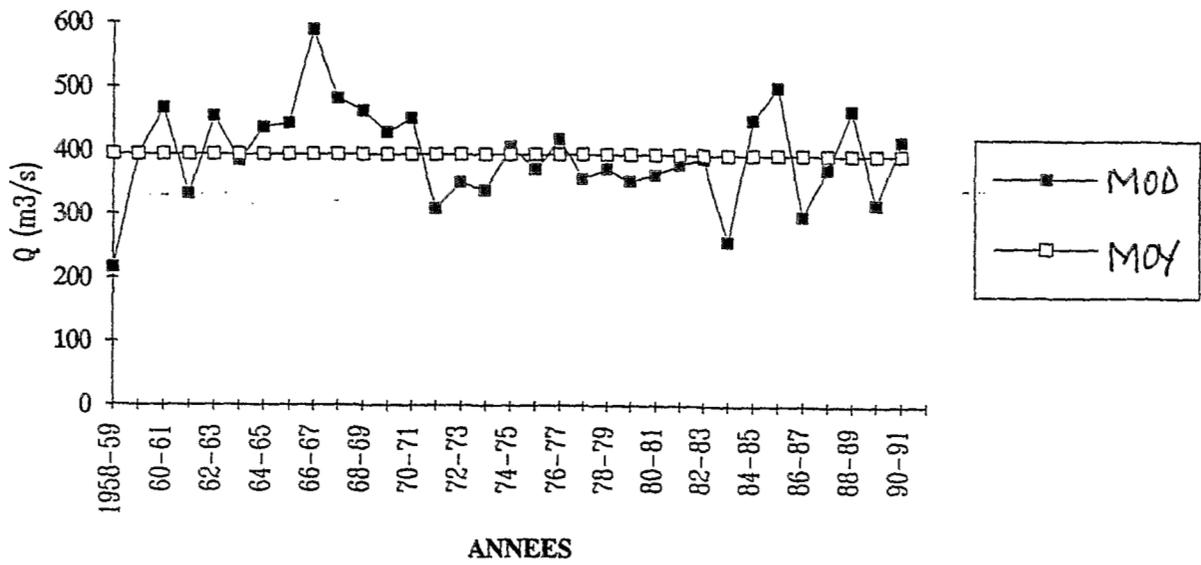


Figure 3-22 : Variations saisonnières des débits mensuels des cycles hydrologiques étudiés

a) NTEM A NGOAZIK (1954-1992)

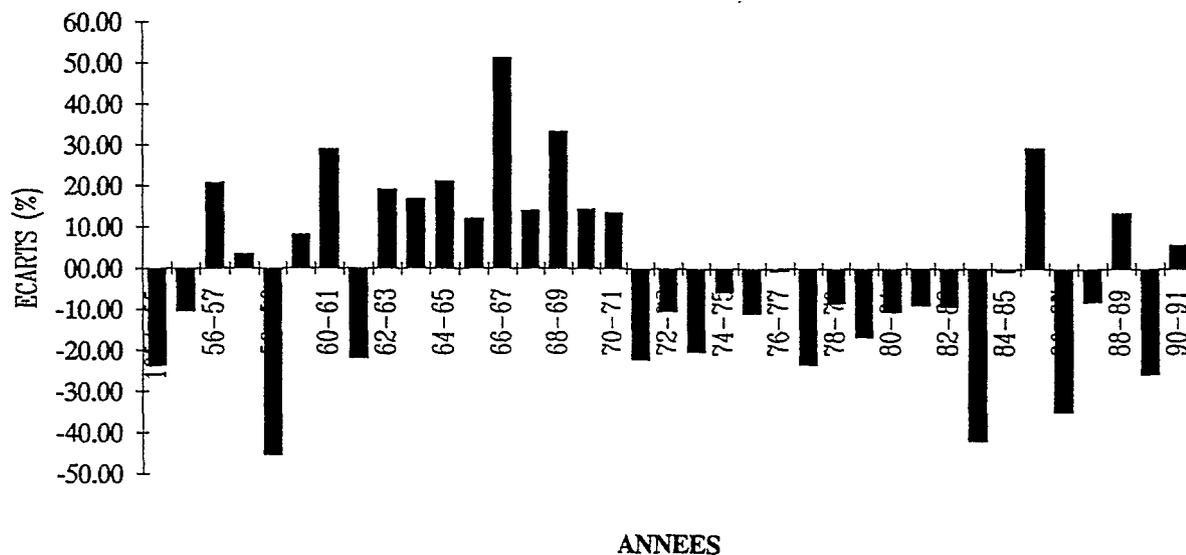


b) NTEM A NYABESSAN (1957-1992)



Figures 3-23 : Fluctuations annuelles des modules

NTEM A NGOAZIK (1954-1992)



NTEM A NYABESSAN (1957-1992)

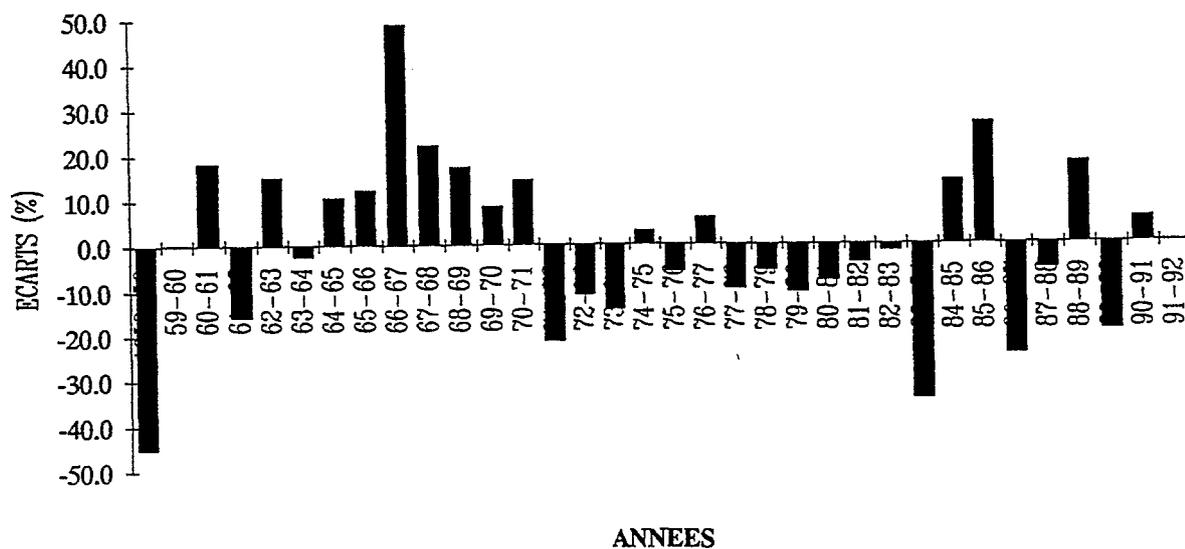


Figure 3-24 : Evolution des écarts à la moyenne interannuelle

D'une manière générale, les cours d'eau qui drainent la bande méridionale du milieu forestier du plateau sud-camerounais présentent des caractéristiques hydrologiques semblables, malgré des décalages notés sur les dates d'apparition de certains paramètres. Ces différences peuvent être dues aux variations de la pluviosité. Il est aussi possible qu'elles soient induites par la qualité des observations. Le Ntem s'individualise au niveau des deux périodes d'étiage aux caractéristiques voisines, en ce sens que l'étiage secondaire de juillet à août est aussi prononcé que l'étiage principal de février à mars, ce qui est conforme aux régimes saisonniers des précipitations (chapitre 2). L'abondance de l'écoulement sur le bassin du Ntem par rapport aux autres bassins est due aux influences océaniques, accentuée par une dégradation forestière poussée. Toutefois, ces influences océaniques n'entraînent pas un régime hydrologique côtier. En effet, les faibles coefficients de variation et d'irrégularité interannuelle du tableau 3-20 montrent que tous les cours d'eau étudiés ont des régimes hydrologiques assez réguliers, caractéristiques principales des fleuves en milieu équatorial humide où la forêt dense joue un rôle régulateur considérable. C'est ce qui explique l'atténuation de la sécheresse de 1971 à 1984 et le retour à la période normale dès 1988, contrairement aux fleuves du milieu soudanien. Les cycles hydrologiques de cette étude s'intègrent bien dans cette séquence normale.

D'après des Géomorphologues tels que ERHART (1955 et 1967) cité par SCHAWRTZ (1991), les phases climatiques humides correspondent à une forte altération ferrallitique, et pendant les phases sèches, l'érosion s'accroît et la pédogenèse est moins active. On peut donc s'attendre, pour ce qui concerne l'hydrochimie des cycles étudiés, soit à un état d'équilibre entre l'érosion et l'altération, soit à une prédominance du deuxième processus sur le second en raison du caractère moyen à tendance humide de la séquence allant de 1987 à 1992.

3.3. LES CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DES CYCLES ETUDIÉS SUR LE BASSIN AVAL DE LA NGOKO

Les écoulements superficiels étant les sites par excellence pour l'évaluation quantitative et qualitative des substances provenant de la dégradation mécanique, chimique et de l'activité biologique des bassins, il convient de les mesurer en même temps que les matériaux qu'ils véhiculent. Or, les stations de Moloundou sur la Ngoko, sur le Dja à la SOTREF et sur la Boumba au Bac ayant été spécifiquement créées pour ce travail, nous avons pensé qu'il était nécessaire de présenter les résultats d'hydrologie classique afin de mieux situer les particularités des cycles hydrologiques étudiés dans le contexte général des régimes hydrologiques de notre zone d'intérêt.

Tableau 3-20 : Modules et irrégularités interannuels des régions

MODULES INTERANNUELS ET EXTREMES (de l'origine des stations à 1992)									
COURS D'EAU	STATIONS	QiA	qiA	QAM	qAM	QAm	qAm	R	N
BOUMBA	BIWALA	106	10.4	143	13.9	74.4	7.22	1.92	27
DJA	SOMALOMO	66.1	12.1	96.4	17.6	43.5	7.95	2.18	37
DJA	BI	221	11.3	349	17.9	146	7.48	1.39	40
NYONG	AKONOLINGA	89.7	10.7	128	15.3	47.7	5.71	1.68	38
NYONG	MBALMAYO	148	10.9	209	15.4	90.9	6.71	2.3	41
NTEM	NGOAZIK	255	14.1	386	21.3	139	7.68	2.78	38
NTEM	NYABESSAN	395	15	588	22.3	216	8.2	2.72	35
Légende :									
QiA : Débit interannuel en m ³ /s ; qiA : débit spécifique interannuel en l/skm ² ;									
QAM : Maximum annuel ; QAm : minimum annuel ;									
R = QAM/QAm ; N : nombre d'années									

Cette présentation trouve également son utilité pour l'étude des variations saisonnières des teneurs en éléments particuliers et dissous, ainsi que pour l'établissement des bilans géochimiques qui s'appuient sur ceux des débits. L'importance du paramètre hydrologique dans l'approche du fonctionnement hydrochimique du bassin versant de la Ngoko justifie l'analyse, dans les lignes ci-après, des résultats et des caractéristiques hydrologiques de la Boumba au Bac et du Dja à la SOTREF d'abord, puis de ceux de la Ngoko pour chaque campagne de mesures.

3.3.1. LA BOUMBA A MOLOUNDOU-BAC ET LE DJA A MOLOUNDOU-SOTREF

L'intérêt du suivi hydrologique des deux tributaires de la Ngoko, la Boumba et le Dja, au niveau des stations de Moloundou-Bac et de Moloundou-SOTREF est de différencier les apports hydriques, particuliers, dissous et organiques par bassin avant le mélange plus ou moins homogène prélevé sur la Ngoko à environ 6 kilomètres en aval de ces stations. Leur proximité nous amène à étudier ensemble les résultats issus des mesures qui y ont été effectuées. On va également les comparer à ceux obtenus aux stations en amont. Aux tableaux et figures de la Boumba à Moloundou-Bac sont affectés les indices a et à ceux du Dja à Moloundou-SOTREF les indices b. Il convient de signaler que la courte période d'observations (3 ans) ne permet pas une analyse approfondie des débits extrêmes et des débits caractéristiques ; elle est donc limitée aux débits mensuels et annuels.

Les tableaux 3-21 a et b contiennent les débits mensuels et annuels des cycles hydrologiques 1989-90, 1990-91 et 1991-92. De l'étude de ces données, il ressort que les maxima mensuels ont été enregistrés aux deux stations pendant les mêmes mois (novembre pour les cycles 1989-90 et 1990-91 ; octobre pour le cycle 1991-92). Quant aux minima, ils ont été observés en avril 1990 et en mars 1992 également aux deux stations.

A l'échelle annuelle, le module est quasiment constant sur la Boumba à Moloundou-Bac au cours des trois campagnes ($286 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 10,5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ en 1989-90 ; $294 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 10,8 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ en 1990-91 et $293 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 10,7 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ en 1991-92). Sur le Dja à la SOTREF, hormis le module du cycle 1990-91 qui est un peu élevé ($488 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 12,3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$), ceux des cycles 1989-90 et 1991-92 sont comparables ($451 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 11,4 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ pour le premier et $457 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 11,7 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ pour le second).

L'étude comparée des variations saisonnières des débits de la Boumba à Moloundou-Bac (figure 3-25 a) avec celles de la Boumba à Biwala (figure 3-12) montre une allure commune aux deux stations. Mais les maxima mensuels, observés en novembre à la station aval, décalent d'un mois de ceux de l'amont, sauf en 1991-92 où ils sont enregistrés le même mois (octobre). Pour ce qui est des minima mensuels, seuls ceux de 1989-90 apparaissent le même mois (mars) aux deux stations.

Le module moyen des cycles étudiés est de $291 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 10,7 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ à la Boumba à moloundou-Bac et de $121 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 11,7 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ à la Boumba à Biwala. Le rapport entre les moyennes des débits annuels (41,6 %) est proche de celui qui existe entre les superficies des deux bassins (38 %). D'une façon générale, on note une diminution des débits spécifiques de Biwala à Moloundou sur la Boumba, à l'origine de laquelle serait le déficit pluviométrique de la région de Lokomo-Mickel-Moloundou dont nous avons parlé au deuxième chapitre.

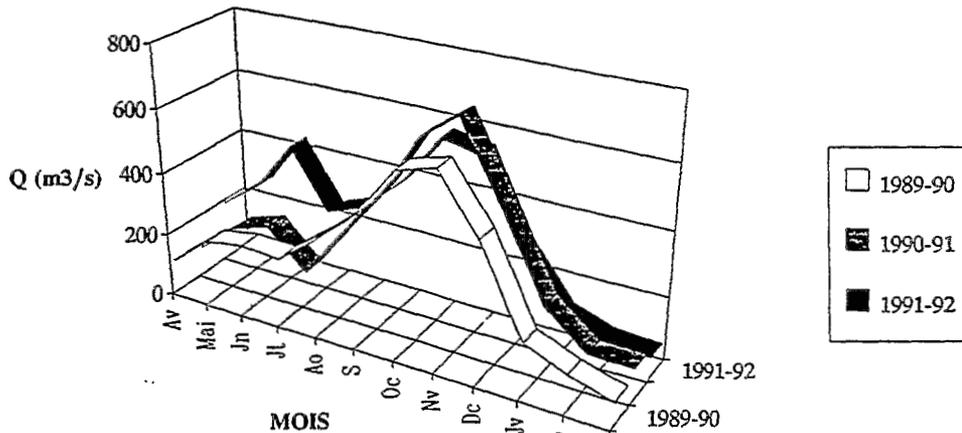
Sur le Dja, la comparaison entre les variations saisonnières des débits à Moloundou-SOTREF (figure 3-25 b) et celles de Somalomo et de Bi (figures 3-4 a et b) est limitée aux années 1990-91 et 1991-92 en raison de nombreuses lacunes enregistrées en 1989-90 aux stations en amont de la SOTREF. Les maxima mensuels à Moloundou-SOTREF et Bi sont observés les mêmes mois (novembre pour le cycle 1990-91 et octobre pour le cycle 1991-92). Il en est de même du minimum d'avril 1990 et de mars 1992. Les rapports entre les modules à Somalomo et Moloundou-SOTREF sont identiques (14,5 %) en 1990-91 et en 1991-92. Il en est de même de ceux existant pour les mêmes années entre Bi et Moloundou-SOTREF (52,7 % en 1990-91 et 50,5 % en 1991-92). Ces rapports sont, comme sur la Boumba, dans les mêmes ordres de grandeur que celles qui existent entre les superficies des deux bassins amont et celle du Dja à Moloundou-SOTREF, à savoir : 13,8 % pour le Dja à Somalomo et 49,1 % pour le Dja à Bi. Par ailleurs, on observe de façon globale que les débits spécifiques décroissent de l'amont vers l'aval, comme sur la Boumba.

D'une manière générale, les débits des cycles étudiés à Moloundou sur la Boumba au Bac et sur le Dja à la SOTREF suivent également la répartition des précipitations tel qu'on l'a vu sur les stations en amont. On note cependant le décalage d'un mois entre les débits mensuels extrêmes en amont et ceux des stations en aval, exception faite du minimum du cycle 1990-91 qui est observé en avril et du maximum du cycle 1991-92 qui apparaît en octobre à toutes les stations. Cette situation tient à la caractéristique particulièrement pluvieuse du cycle de l'année 1990, justifiée par des débits élevés en octobre et en novembre sur le Boumba au Bac (618 et $706 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et concentrés sur le

Tableau 3-21 : Débits mensuels et annuels des cycles hydrologiques (1989-90, 1990-91, 1991-92)

DEBITS MENSUELS ET ANNUELS (1989-1992)													
a) Dja à Moloundou-SOTREF													
ANNEE	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	MODULE
1989-90	121	379	344	434	635	871	1020	1120	629	311	210	148	451
1990-91	158	328	379	188	441	746	969	1200	686	365	207	180	487
1991-92	317	473	677	416	456	637	891	784	404	186	122	112	457
b) Boumba à Moloundou-Bac													
1989-90	105	201	221	211	306	411	575	609	436	169	115	74.2	286
1990-91	89.4	188	224	106	266	420	618	706	471	215	108	103	294
1991-92	189	276	435	250	292	409	569	547	287	122	75.4	65.6	293

a) Boumba à Moloundou-Bac



b) Dja à Moloundou-SOTREF

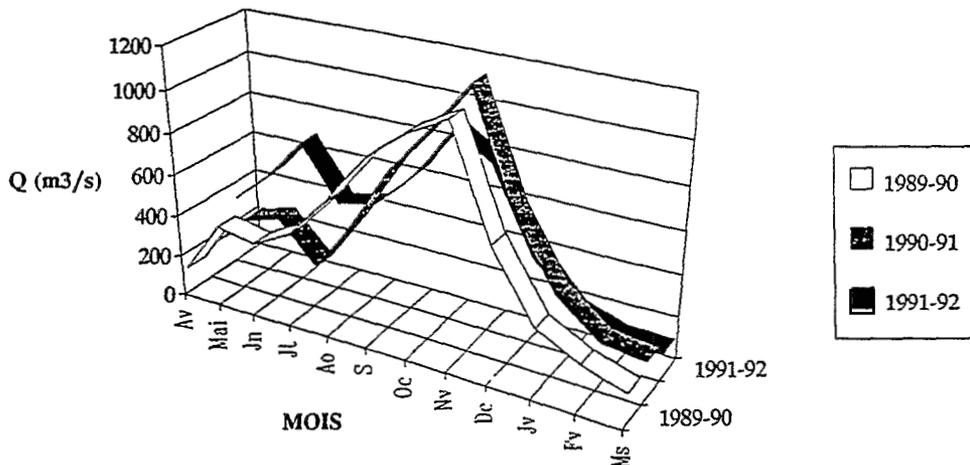


Figure 3-25 : Variations saisonnières des débits mensuels des cycles étudiés

mois de novembre sur le Dja à la SOTREF ($1200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). En effet, la recharge de la nappe doit avoir été largement suffisante, maintenant par le fait même son niveau relativement haut pour qu'elle contribue, avec les débits respectifs de 435 et de $677 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ exceptionnellement forts au mois de juin 1991, à l'apparition précoce des maxima mensuels en octobre.

On constate également que les proportions entre les modules d'une station à l'autre par rivière sont comparables à celles qui existent entre les superficies des bassins versants qu'elles contrôlent. On note une diminution des débits spécifiques de l'amont vers l'aval de chacun des cours d'eau. Il est possible qu'elle soit liée au déficit pluviométrique qu'enregistre la région de Lokomo-Mickel-Moloundou.

3.3.2. LE BASSIN VERSANT DE LA NGOKO A MOLOUNDOU

Les résultats acquis à la station principale de Moloundou sur la Ngoko au cours des années hydrologiques 1989-90, 1990-91 et 1991-92 sont analysés ici au regard de ceux des stations amont et des stations des bassins fluviaux voisins. La finalité de cette approche est de situer les cycles étudiés par rapport aux régimes hydrologiques actuels sur l'ensemble de la bande méridionale du plateau sud-camerounais d'une part, et d'estimer les modules des années exceptionnelles à Moloundou sur la Ngoko et ses affluents.

Le tableau 3-23 donne les débits mensuels et annuels des trois cycles hydrologiques à Moloundou sur la Ngoko. Les variations saisonnières des débits représentées sur la figure 3-26 montrent des courbes semblables à celles obtenues en amont sur le Dja et la Boumba ; les débits suivent donc la répartition saisonnière des précipitations. A l'échelle mensuelle, les débits extrêmes apparaissent aux mêmes mois qu'aux stations de l'amont, à savoir : - les maxima en novembre pour les cycles 1989-90 ($1520 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et 1990-91 ($1740 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), et en octobre pour le cycle 1991-92 ($1400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), les minima en mars pour les cycles 1989-90 ($203 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et 1991-92 ($177 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et en avril pour le cycle 1990-91 ($247 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

A l'échelle pluriannuelle, on ne note pas une grande variation entre les modules. En effet, le minimum a été enregistré en 1989-90 ; son débit est $734 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 10,9 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ et le maximum en 1990-91, d'un débit de $780 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 11,6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$; celui de 1991-92, qui est de $756 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 11,3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, a la même valeur que la moyenne des modules des deux premières campagnes. On constate également que d'une année à l'autre, les modules de la Ngoko à Moloundou sont

Tableau 3-22 : Débits mensuels et annuels des trois cycles hydrologiques à Moloundou sur la Ngoko

NGOKO A MOLOUNDOU : DEBITS MENSUELS ET ANNUELS de 1989 à 1992													
ANNEE	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	MOD
1989-90	291	527	552	550	752	1010	1360	1520	844	431	310	203	734
1990-91	247	497	546	293	651	1050	1550	1740	1160	525	305	298	780
1991-92	493	691	1060	637	737	1030	1400	1210	665	309	196	177	756

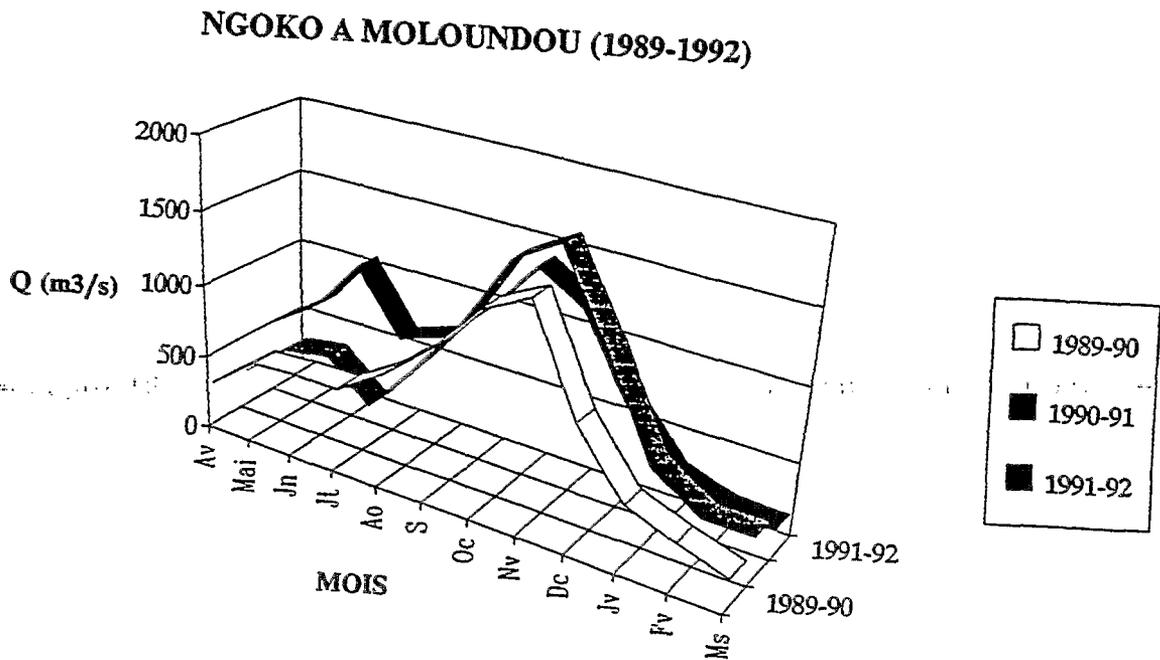


Figure 3-26 : Variations saisonnières des débits mensuels et annuels

comparables aux moyennes des modules de la Boumba à Moloundou-Bac et du Dja à Moloundou-SOTREF.

A partir de la distribution statistique des modules effectuées au paragraphe 3-1 et des rapports entre les modules des stations amont et des stations aval, nous avons estimé la moyenne : sur la Boumba à Moloundou-Bac à $286 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 10,4 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$; sur le Dja à Moloundou-SOTREF à $454 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 11,4 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$; sur la Ngoko à Moloundou à $780 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $q = 11,6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Ces résultats sont comparables, pour chaque station, aux modules des trois cycles étudiés et permettent de les situer dans la séquence moyenne décrite sur les bassins amont. D'autre part, ils sont proches des moyennes par OLIVRY (1986), hormis celle du Dja à la SOTREF. En effet, cet auteur trouve $285 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sur la Boumba au Confluent et $713 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sur la Ngoko à Moloundou. Sur le Dja, le débit de $428 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ est la somme du module du Dja à Ngbala et du bassin intermédiaire du côté de la République du Congo ; la différence constatée entre ce débit et la moyenne reconstituée dans cette étude peut être imputée au fait que les stations considérées, et par conséquent les bassins qu'elles contrôlent, ne sont pas les mêmes.

Le tableau 3-23 récapitule les modules des cycles étudiés et les modules interannuels. On peut dire que la prise en compte des résultats obtenus pendant nos campagnes de mesures aux stations en amont de Moloundou sur le bassin versant de la Ngoko et celles des cours d'eau des bassins limitrophes à l'ouest a permis de conclure que les trois années hydrologiques sont dans l'ensemble normales à humides. On a également montré que les cours d'eau de l'ensemble de la zone présentent une régularité des régimes hydrologiques. En définitive, aux stations de Moloundou sur la Boumba au Bac, sur le Dja à la SOTREF et sur la Ngoko, les cycles hydrologiques 1989-90, 1990-91 et 1991-92 s'intègrent bien dans cette séquence moyenne qui sévit sur la bande méridionale du plateau sud-camerounais depuis 1988. De ce point de vue, les résultats hydrochimiques obtenus sur le bassin versant de la Ngoko au cours de ces années peuvent être considérés comme représentatifs des moyennes.

Tableau 3-23 : Débits annuels des cycles hydrologiques 1989-90, 1990-91 et 1991-92

BASSIN VERSANT DE LA NGOKO : RECAPITULATION DES MODULES de 1989 à 1992													
(au regard des moyennes de l'origine des stations à 1992)													
		1989-90	1989-90	1990-91	1990-91	1991-92	1991-92	1989-92	1989-92	MODULES INTERANNUELS			
		Q	q	Q	q	Q	q	QmC	qmC	QiA	qiA	QiA	qiA
COURS D'EAU	STATIONS									*	*	**	**
BOUMBA	BIWALA	110	10.7	114	11.1	139	13.5	121	11.7	106	10.4	108	10.1
BOUMBA	MOLOUNDOU-BAC	286	10.5	294	10.8	293	10.7	291	10.7			285	10.4
DJA	SOMALOMO	81.7	14.9	70.7	12.9	66.8	12.2	73.1	13.4	66.1	12.1	66	12.3
DJA	BI	290	14.2	257	13.2	231	11.8	259	13.3	221	11.3	220	11.3
DJA	MOLOUNDOU-SOTREF	451	11.4	488	12.3	457	11.5	465	11.7			428	10.3
NGOKO	MOLOUNDOU	734	10.9	780	11.6	756	11.3	757	11.3			713	10.5
NYONG	AKONOLINGA	116	13.9	128	15.3	89.9	10.6	111	13.3	89.7	10.7	93	11.1
NYONG	MBALMAYO	183	13.5	199	14.7	148	10.9	177	13	148	10.9	154	11.3
NTEM	NGOAZIK	189	10.4	270	14.9	188	10.4	216	11.9	255	14.1	273***	15.1***
NTEM	NYABESSAN	318	12.1	417	15.8	326	12.4	354	13.4	395	15	414***	15.7***
Légende :													
		Q = Débit annuel en m ³ /s ; q = débit spécifique en l/skm ² ; mC : moyen du cycle étudié ; iC : interannuel											
		* : cette étude ; ** : OLIVRY, 1986 ; *** : BOUM et al, 1983											

CONCLUSION

L'analyse des régimes pluviométriques a montré la variabilité spatio-temporelle de la pluviosité n'est pas toujours en phase d'une station à une autre. Elle a aussi permis de relever l'existence d'un déficit pluviométrique dans l'axe Yokadouma-Moloundou, lié sans doute à l'obstacle orographique constitué par la succession des collines d'environ 800 m d'altitude située en aval de Biwala.

De l'étude des régimes hydrologiques, il ressort une réponse similaire des bassins étudiés aux variations pluviométriques. Cette réponse est caractérisée par une période humide allant de 1962 à 1972, suivie d'une période sèche dont la fin se situe en 1984. Depuis, il sévit dans notre zone d'étude une période moyenne à humide dans laquelle s'intègre nos cycles d'observations (1989 à 1992).

Au terme de ces analyses, nous avons établi les bilans hydrologiques (tableau 3-24). Globalement, ce tableau fait ressortir un déficit hydrique de l'ordre de 75 à 80 %, dû en particulier à l'évapotranspiration.

Tableau 3-24 : Bilans hydrologiques

C. D'EAU	STATIONS	1989/1990					1990/1991					1991/1992					1989/1992					Moyenne Interannuelle					
		P	Ve	Le	De	Ke	P	Ve	Le	De	Ke	P	Ve	Le	De	Ke	P	Ve	Le	De	Ke	P	Ve	Le	De	Ke	
Boumba	Biwala	1685	3,47	340	1345	20,2	1705	3,6	350	1355	20,5	1530	4,38	425	1105	27,8	1640	3,82	370	1270	22,6	1640	3,34	325	1315	19,8	
Boumba	Mol.-Bac	1350	9,02	330	1020	24,4	1390	9,27	340	1050	24,5	1365	9,24	340	1025	24,9	1365	9,18	340	1025	24,9	1385					
Dja	Somalomo	1705	2,58	475	1230	27,9	1545	2,23	410	1135	26,5	1840	2,11	385	1455	20,9	1695	2,31	425	1270	25,0	1660	2,08	380	1280	22,9	
Dja	Bi	1705	9,15	470	1235	27,6	1620	8,1	415	1205	25,6	1690	7,28	375	1315	22,2	1675	8,17	420	1255	25,1	1710	6,97	360	1350	21,1	
Dja	Mol.-SOTREF	1605	14,2	360	1245	22,4	1610	15,4	390	1220	24,2	1520	14,4	365	1155	24,0	1580	14,7	370	1210	23,4	1635					
Ngoko	Moloundou	1480	23,1	345	1135	23,3	1500	24,6	370	1130	24,7	1440	23,8	355	1085	24,7	1470	23,9	360	1110	24,5	1510					
Nyong	Akonolinga	1470	3,66	440	1030	29,9	1755	4,04	485	1270	27,6	1570	2,8	340	1230	21,7	1600	3,5	420	1180	26,3	1540	2,83	340	1200	22,1	
Nyong	Mbalmayo	1460	5,77	430	1030	29,5	1770	6,28	465	1305	26,3	1480	4,67	345	1135	23,3	1570	5,58	415	1155	26,4	1530	4,67	345	1185	22,5	
Ntem	Ngoazik	1795	5,96	330	1465	18,4	1830	8,51	470	1360	25,7	1500	5,93	330	1170	22,0	1710	6,81	380	1330	22,2	1675	8,04	445	1230	26,6	
Ntem	Nyabessan	1670	10	380	1290	22,8	1740	13,2	500	1240	28,7	1465	10,3	390	1075	26,6	1625	11,2	425	1200	26,2	1645	12,5	475	1170	28,9	

Légende :

P : Pluviométrie moyenne sur le bassin versant en mm ;
 Ve : Volume écoulé en 10^9 m³ ; Le : Lamme d'eau écoulée en mm ;
 De : Déficit d'écoulement en mm ; Ke : Coefficient d'écoulement en %
 Moyenne interannuelle de l'origine des stations à 1992.

*"A l'échelle mondiale, il a fallu attendre le XX^e siècle
pour que les grandes organisations internationales
attirent l'attention sur l'importance de la forêt,
facteur de prospérité des terres et
de protection contre l'érosion"*

*Encyclopédie Universelle (1988)
Article Forêts, Corpus 7*

TROISIEME PARTIE

**OBSERVATIONS ET FONCTIONNEMENT CHIMIQUES
DES HYDROSYSTEMES**

INTRODUCTION

Cette partie porte à la fois sur les matières transportées en suspension et en solution par les écoulements fluviaux, sur les substances dissoutes des eaux pluviales, sur la matière organique et les isotopes de l'eau. Elle traite en même temps du fonctionnement hydrochimique du bassin versant de la Ngoko et de ceux des bassins voisins.

A juste titre, elle aurait pu être divisée en deux parties comme nous l'avions initialement envisagé dans le plan de cette thèse. Dans ce cas, la première aurait porté sur les méthodes de mesure et les techniques d'analyse, la variabilité spatio-temporelle des matières et les relations entre les différents éléments, tandis que la seconde aurait été consacrée à l'établissement des bilans et à l'analyse du fonctionnement hydrochimique des bassins. Mais on s'est rendu compte qu'il était très difficile de traiter de la première sans faire ressortir simultanément le comportement hydrochimique du milieu d'où partent les éléments étudiés. Afin de ne pas nous répéter, nous avons pensé que, pour des raisons de synthèse, il valait mieux fusionner les deux parties de manière à mettre en évidence les relations entre les matériaux évacués et les phénomènes qui les régissent. Ce souci justifie la multiplicité des chapitres (6). Certains, à l'instar des chapitres 4, 8 et 9, de volume moins important, soulignent la place accordée aux volets comme les travaux antérieurs, les isotopes et la situation de nos résultats hydrochimiques aux échelles régionale et planétaire.

En l'absence d'une étude hydrochimique antérieure sur le bassin de la Ngoko et en raison de la courte durée de nos observations, nous analyserons d'abord les travaux réalisés sur d'autres bassins des régions tropicales, afin d'en dégager les enseignements pouvant orienter la réalisation de notre étude. Ce chapitre sera suivi par la description des méthodes d'échantillonnage et des techniques d'analyses ainsi que la critique des résultats. Les observations des substances minérales et organiques transportées en suspension et en solution, étudiées en même temps que le fonctionnement hydrochimique, porteront d'une part, sur le bassin principal, la Ngoko, et d'autre part, sur les autres bassins. Les apports atmosphériques seront également pris en compte dans ces deux chapitres. En complément aux analyses hydroclimatique et hydrochimique, on consacra un chapitre à l'étude des isotopes stables des eaux pluviales et fluviales. Bien que ces paramètres n'aient été observés que pendant la dernière campagne de notre étude, ils constitueront une base pour leur prise en compte dans les prochaines recherches hydrochimiques en zone forestière équatoriale humide. On terminera par une étude comparée des résultats à l'échelle locale, régionale et mondiale.

CHAPITRE 4

ENSEIGNEMENTS TIRES DES TRAVAUX ANTERIEURS

Sans reprendre le détail des travaux sur les transports de matières réalisés sur quelques bassins du plateau sud-camerounais, ce chapitre a pour but de donner une idée sur les régimes spatio-temporels des exportations de matières dans cette région, à défaut d'études analogues sur le bassin de la Ngoko.

Dans cette optique, on se contentera des études de transports solides réalisées sur les bassins versants du Mbam et de la Sanaga (NOUVELOT, 1967 et 1972 et OLIVRY, 1977), ainsi que sur celui du Ntem (BOUM et al, 1983). En ce qui concerne les substances dissoutes, les observations sur la qualité des eaux du Nyong à Mbalmayo nous donneront un ordre de grandeur (OLIVRY et al, 1976).

4.1. LES REGIMES DE TRANSPORTS SOLIDES SUR LE MBAM, LA SANAGA ET LE NTEM

Nous nous proposons ici d'analyser certains aspects du régime d'exportation fluviale des matières en suspension observées sur le Ntem, bassin limitant au sud-ouest celui de la Ngoko. Un rapport avait été publié à l'issue des campagnes 1981/82 et 1982/83 (BOUM et al, 1983).

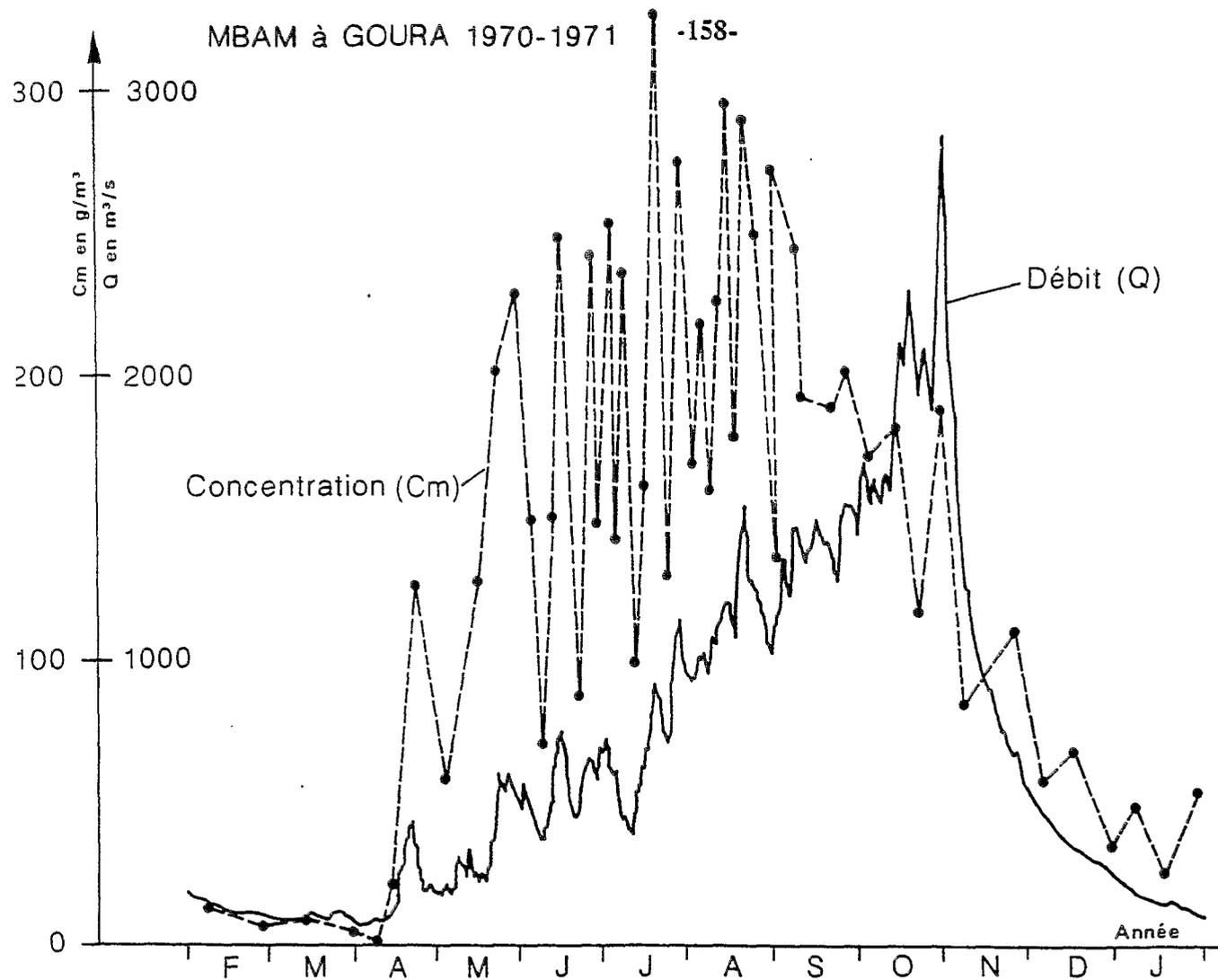
Le but recherché ici est de dégager les caractéristiques des régimes de transport solides et des méthodes de calcul de flux pouvant être utilisées sur le bassin de la Ngoko. Avant de développer ces différents aspects, nous allons d'abord examiner les travaux publiés par NOUVELOT (1969 et 1972) et OLIVRY (1977) sur le Mbam et la Sanaga.

4.1.1. RAPPELS DE QUELQUES RESULTATS SUR LE MBAM ET LA SANAGA

Des mesures de transport solide ont été réalisées de 1969 à 1973 sur le Mbam à Goura et la Sanaga à Nachtigal. Les variations saisonnières des concentrations de matières en suspension sont représentées sur la figure 4-1. D'après NOUVELOT (1972), les caractéristiques de transports solides sont quasiment les mêmes sur les deux bassins.

Globalement, en début de saison des pluies, de mars-avril à juillet, les concentrations augmentent très fortement avec les débits. Les premières pluies tombent sur un sol sans

MBAM à GOURA 1970-1971 -158-



SANAGA à NACHTIGAL 1969

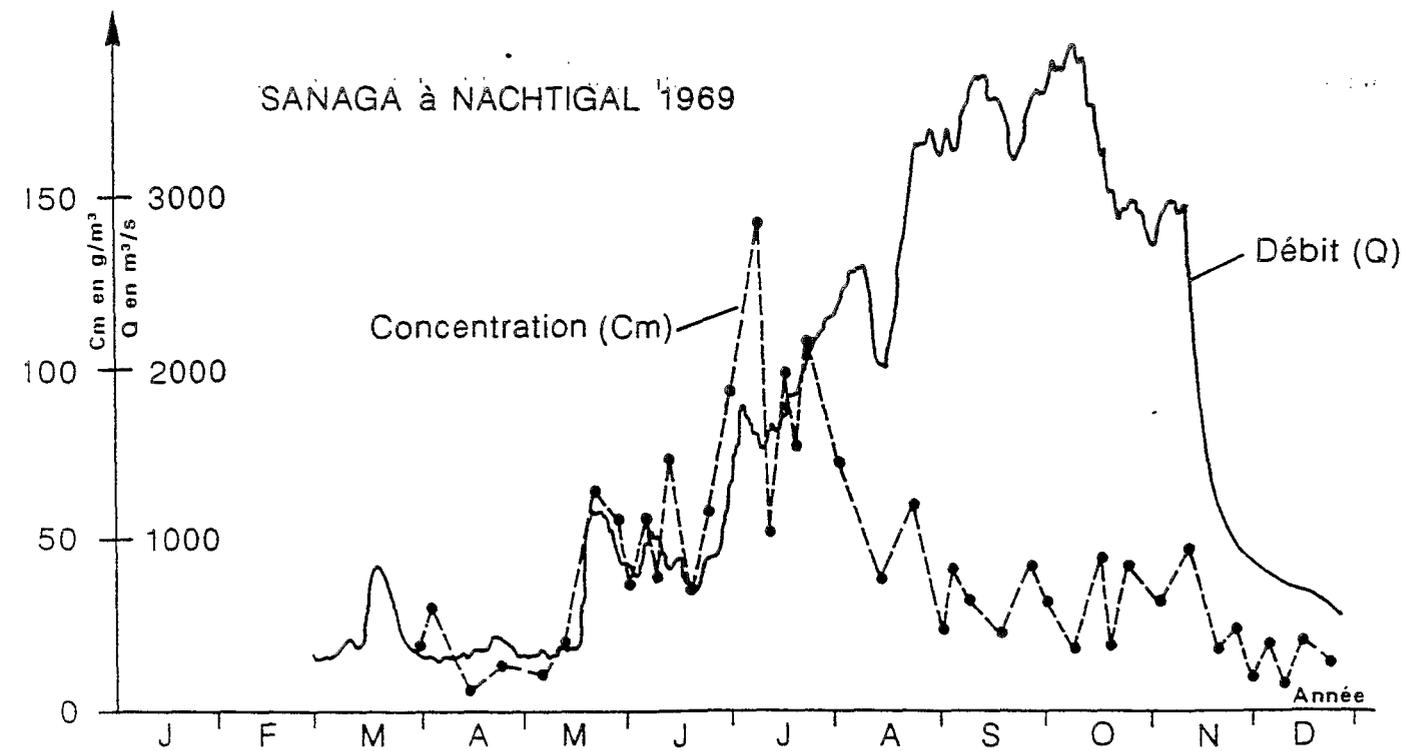


Figure 4-1 : Variations saisonnières des concentrations de matières en suspension sur le Mbam et la Sanaga d'après NOUVELOT (1972), modifié.

protection et le ruissellement qui en résulte nettoie la surface du sol pulvérulente et desséchée.

En saison des pluies, de juillet à mi-novembre, les débits augmentent alors que les concentrations diminuent brutalement le premier mois, puis lentement les mois suivants. On note une relative stabilité de la charge solide pendant les plus hautes eaux, de septembre à octobre, due à l'apparition de la végétation qui intercepte les gouttes de pluies, réduisant par le fait même leur action mécanique sur le sol.

A la fin de saison de pluies, lorsque la décrue est amorcée, la turbidité décroît plus rapidement ; cette décroissance s'accroît en saison sèche, les matériaux transportés ne provenant plus que de l'érosion du lit et des berges.

La figure 4-2 donne l'évolution moyenne des concentrations en fonction des débits. OLIVRY (1977), confirme les caractéristiques des régimes de transports solides sur les deux bassins déjà mentionnées par NOUVELOT (1972). Il précise néanmoins que la turbidité reste importante durant presque toute la saison des pluies sur le Mbam et que le maximum, généralement observé en juillet sur les deux bassins, peut être décalé en juin ou en août.

Nous reviendrons sur certains résultats du Mbam et de la Sanaga pour les comparer à ceux obtenus sur la Ngoko.

4.1.2. LE TRANSPORT SOLIDE SUR LE BASSIN DU NTEM

4.1.2.1. Les régimes saisonniers de la charge solide en suspension

Des observations de matières en suspension ont été réalisées sur le Ntem de 1980 à 1984 à Nyabessan (station en aval) et de 1981 à 1984 à Ngoazik (station en amont). Comme nous l'avons signalé plus haut, nous nous proposons ici d'analyser certains aspects que nous n'avons pas pris en compte dans le rapport des campagnes complètes 1981/82 et 1982/83 (BOUM et al, 1983). Il convient également de rappeler que ces deux années ont une hydraulité proche de la moyenne (-1,5 à -9,5 %).

Le tableau 4-1 donne les concentrations et les débits mensuels. Sur la figure 4-3, nous avons représenté les teneurs moyennes mensuelles en charge solide en fonction des débits mensuels qui les véhiculent par station pour le cycle hydrologique 1981/82.

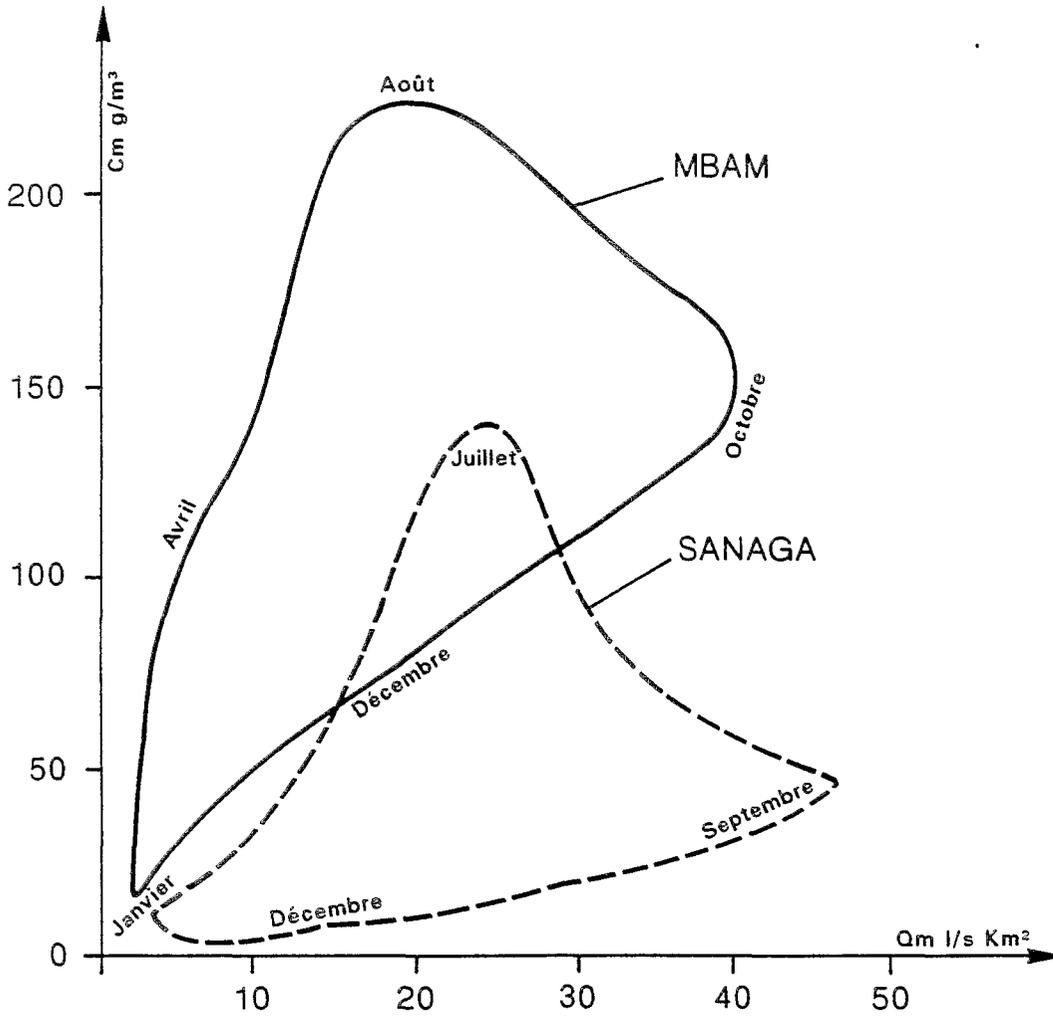


Figure 4-2 : Evolution de la charge solide en fonction du débit sur le Mbam et la Sanaga d'après OLIVRY (1977), modifié.

Tableau 4-1 : Concentrations des matières en suspension et débits solides mensuels du Ntem

Concentrations moyennes des MES et débits mensuels du Ntem									
NGOAZIK									
		1981/82			1982/83				
	MOIS	Qlmens	Cmens	Qsmens	Qlmens	Cmens	Qsmens		
		m3/s	mg/l	kg/s	m3/s	mg/l	kg/s		
	Av	169			160	21.0	3.4		
	Mai	386	26.5	10.2	364	25.5	9.3		
	Jn	314	26.1	8.2	210	22.9	4.8		
	Jt	110	25.4	2.8	116	20.5	2.4		
	Ao	52.1	22.5	1.2	71.1	15.0	1.1		
	S	190	27.1	5.1	234	20.0	4.7		
	Oc	476	27.9	13.3	476	26.9	12.8		
	Nv	532	27.2	14.5	769	27.1	20.9		
	Dc	213	31.6	6.7	232	24.8	5.8		
	Jv	135	23.8	3.2	74.6	21.9	1.6		
	Fv	95.4	21.7	2.1	33.3	15.6	0.5		
	Ms	107	22.3	2.4	23.4	14.2	0.3		
NYABESSAN									
	Av	314	21	6.594	315	19.7	6.2055		
	Mai	621	32.2	19.9962	638	21.3	13.5894		
	Jn	505	25.3	12.7765	411	23.6	9.6996		
	Jt	201	23.9	4.8039	224	19.2	4.3008		
	Ao	196	23	2.6068	135	20	2.7		
	S	291	24.4	7.1004	404	23	9.292		
	Oc	727	30.8	22.3916	835	31.1	25.9685		
	Nv	960	34.5	33.12	1191	32.3	38.4693		
	Dc	367	29.7	10.8999	398	24.1	9.5918		
	Jv	253	26.9	6.8057	139	20.1	2.7939		
	Fv	171	14.6	2.4966	68.8	17.4	1.19712		
	Ms	222	18.9	4.1958	60	12.975	0.7785		

A Ngoazik, en l'absence de la mesure du mois d'avril, les concentrations des matières en suspension diminuent avec les débits de 29 g.m^{-3} pour un débit de $386 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en mai à 25 g.m^{-3} pour un débit de $52 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en août. Ensuite, elles croissent rapidement avec le débit jusqu'en septembre où la charge solide est de 30 g.m^{-3} pour un débit de $190 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Elles gardent cette valeur, malgré l'augmentation des débits, jusqu'au maximum de crue en novembre. En décrue, elles sont de 31 g.m^{-3} en décembre avant de décroître avec le débit jusqu'à l'étiage de février-mars pendant lequel la teneur est de 22 g.m^{-3} pour un débit de $100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

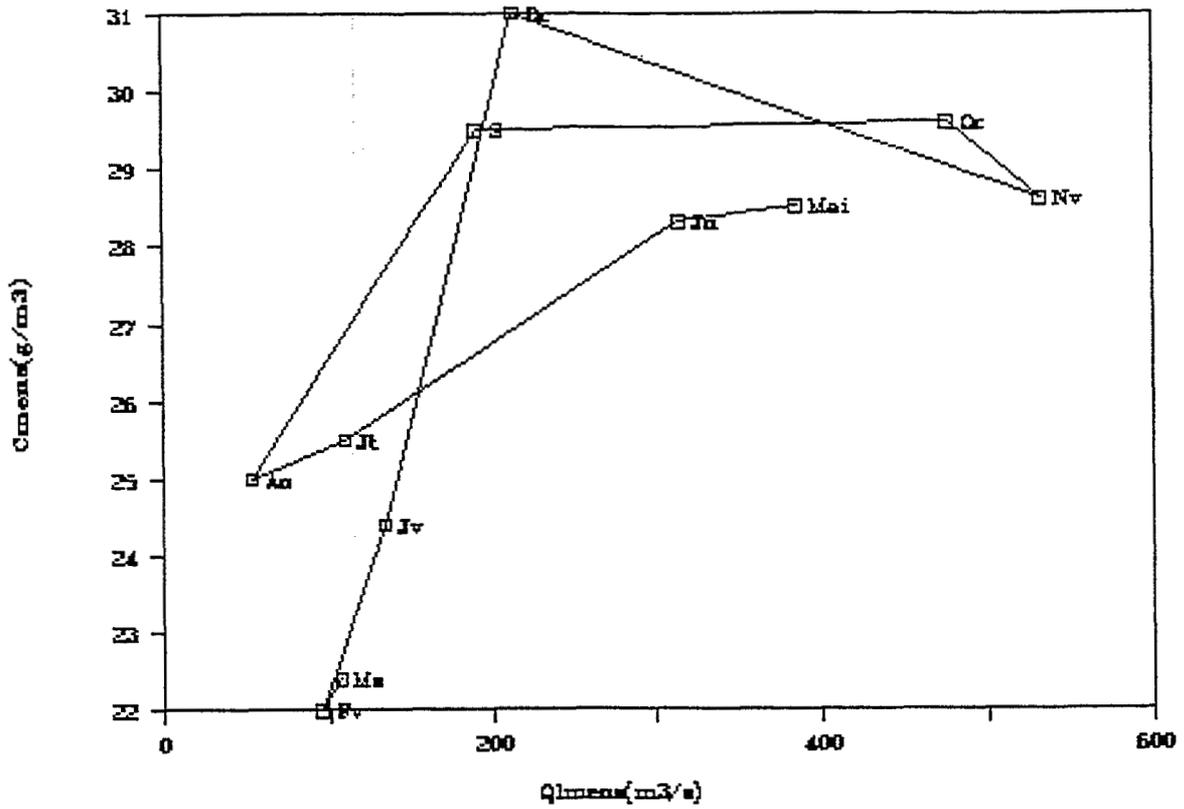
A Nyabessan, les concentrations en charge solide augmentent avec les débits de 21 g.m^{-3} pour un débit de $314 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en avril à 35 g.m^{-3} pour un débit de $620 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en mai. Elles décroissent ensuite avec le débit jusqu'en août où la teneur est de 26 g.m^{-3} pour un débit $93 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Elles croissent à nouveau avec le débit jusqu'au maximum de crue en novembre où la concentration est de 35 g.m^{-3} pour un débit de $960 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Elles gardent cette valeur malgré la diminution des débits jusqu'en décembre, avant de baisser avec les débits jusqu'à l'étiage de février où la teneur est de 18 g.m^{-3} pour un débit de $160 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Il se dégage de ce commentaire qu'exception faite de la décrue de novembre à décembre à Ngoazik, le transport particulaire a évolué dans le même sens que les débits sur le Ntem en 1981/82. C'est ainsi qu'on a observé deux maximums de charge solide, le premier en mai correspondant à la crue secondaire, le second en novembre correspondant à la crue principale. A Nyabessan, le maximum de la charge en suspension est identique pour les deux crues.

De la même manière que ci-dessus, nous avons représenté sur la figure 4-4 l'évolution des matières en suspension au cours du cycle hydrologique 1982/83. Contrairement au cycle précédent et en dehors de l'augmentation de la charge solide lors de la décrue de mai à juin à Nyabessan, l'évolution, sensiblement la même aux deux stations, peut être décrite comme suit :

- Au début de la petite saison de pluies, les matières en suspension augmentent avec le débit d'avril à mai. Elles passent de 22 g.m^{-3} à 25 g.m^{-3} pour des débits respectifs de 160 à $360 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à Ngoazik et de 20 à 23 g.m^{-3} pour des débits respectifs de 290 à $640 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à Nyabessan.

a) Ntem à Ngoazik



b) Ntem à Nyabessan

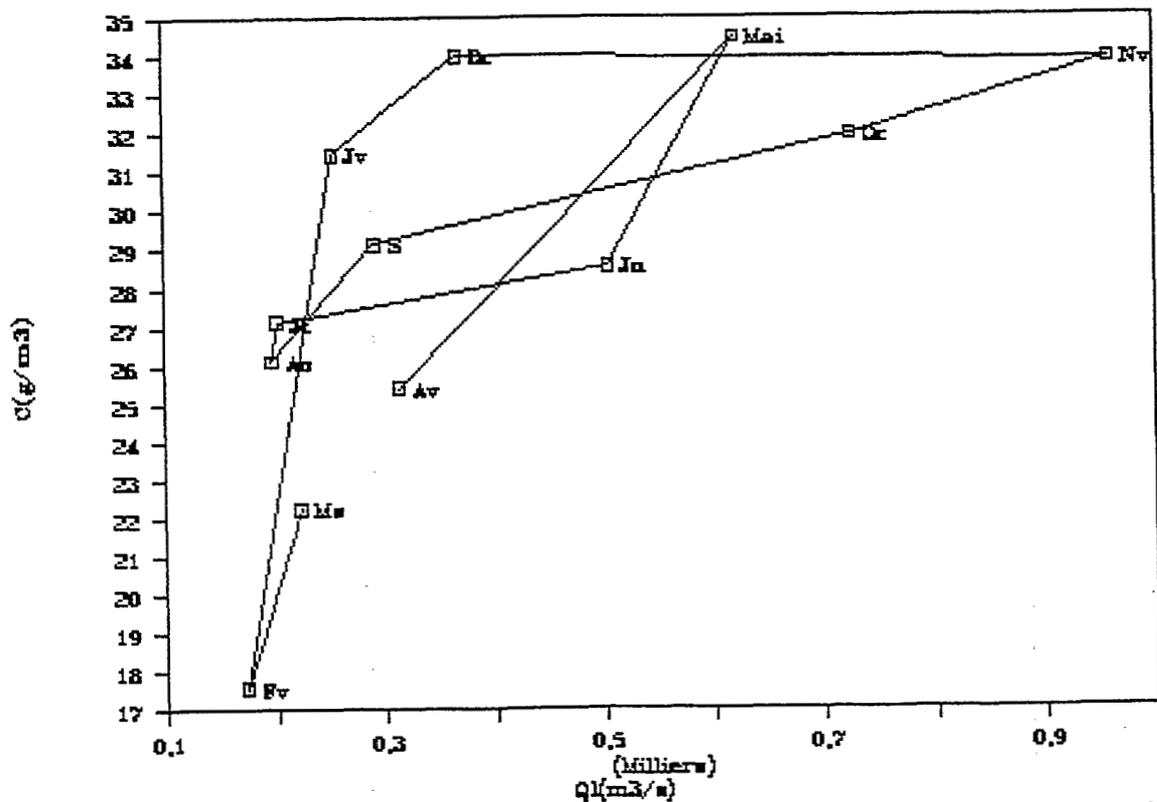
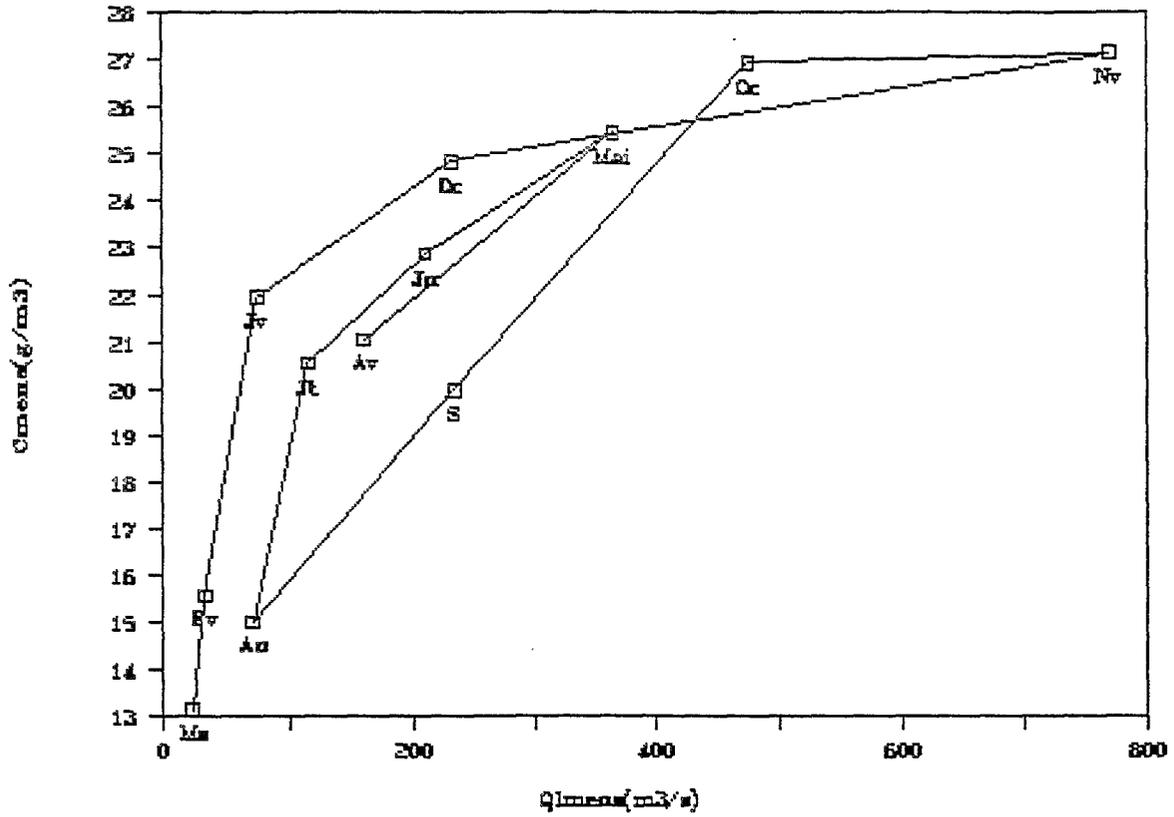


Figure 4-3 : Evolution de la charge solide mensuelle en fonction de débit sur le Ntem en 1981/82.

a) Ntem à Ngoazik



b) Ntem à Nyabessan

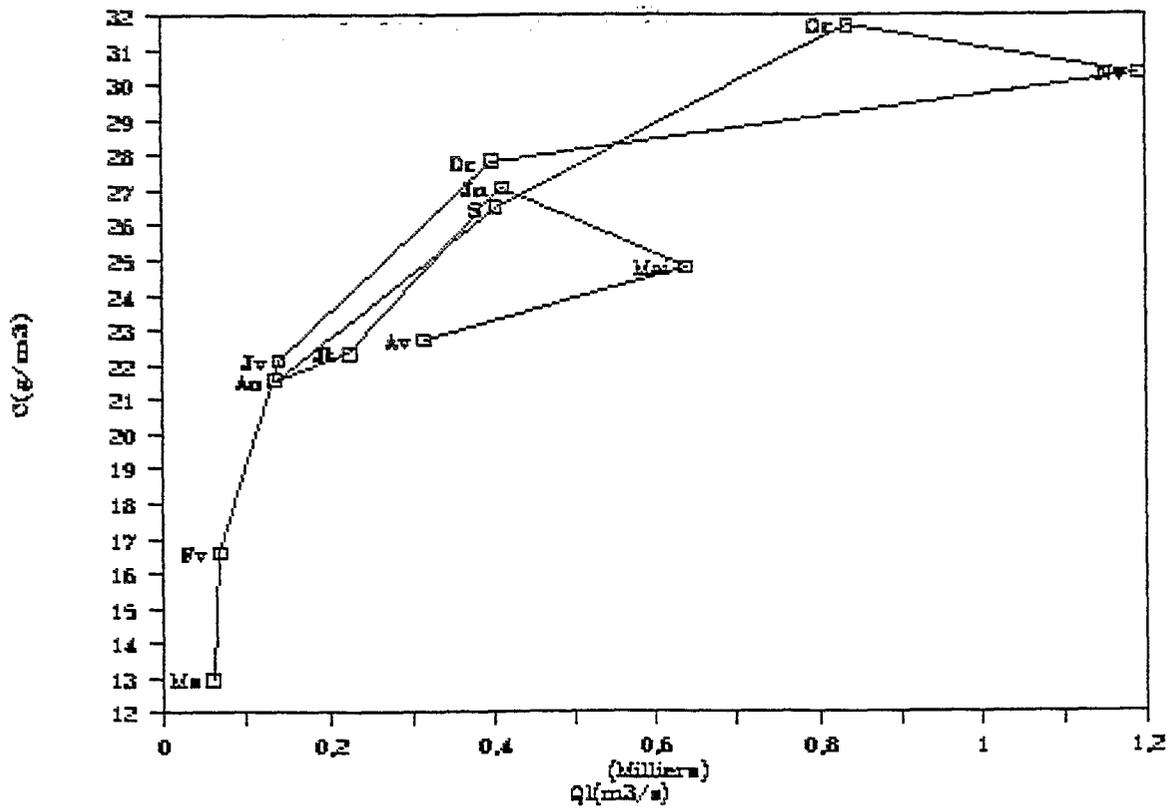


Figure 4-4 : Evolution de la charge solide mensuelle en fonction de débit sur le Ntem en 1982/83.

- Pendant la décrue, elles baissent jusqu'au minimum de débit d'août. Les teneurs sont de 16 g.m^{-3} pour un débit de $70 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à Ngoazik et de 20 g.m^{-3} pour un débit de $135 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à Nyabessan.

- Au début de la grande saison de pluies, elles augmentent avec les débits pour atteindre des teneurs de 30 g.m^{-3} pour un débit de $480 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en octobre à Ngoazik et 32 g.m^{-3} pour un débit de $1190 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en novembre à Nyabessan.

- Quand s'amorce la décrue, les concentrations baissent avec les débits jusqu'en étiage. Les teneurs minimales, de l'ordre de 14 g.m^{-3} en mars, sont les mêmes à Ngoazik et à Nyabessan pour des débits respectifs de 23 et $60 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Cette analyse fait ressortir qu'en 1982/83, les concentrations de matières en suspension sur le Ntem ont varié dans le même sens que les débits qui les ont véhiculées.

En résumé, le suivi saisonnier de la charge solide sur le Ntem fait ressortir que les teneurs évoluent dans le même sens que les débits. Les teneurs minimales, qui coïncident avec les débits d'étiage principal et secondaire, sont de l'ordre de 15 g.m^{-3} à Ngoazik. Elles varient de 15 à 20 g.m^{-3} lors de leur transfert à Nyabessan. Mesurées en l'absence des apports en eau de surface, elles proviennent essentiellement de l'érosion du lit et des berges. Leurs valeurs voisines aux deux stations semblent indiquer que les modes de production et de transfert de matériaux de l'amont vers l'aval se manifestent de façon constante en saison sèche.

En saison de pluies, les concentrations croissent avec le débit de façon identique aux deux stations. Cette augmentation, qui est de 20 % en petite saison de pluies et de l'ordre de 40 % en grande saison de pluies est faible par rapport à celle observée sur le Mbam et la Sanaga. De même, à l'inverse du Mbam et de la Sanaga où le maximum de charge solide est mesuré à la montée de la crue, sur le Ntem, les concentrations maximales coïncident avec le maximum de crue. Ce schéma est également contraire à celui rencontré sur la plupart des cours d'eau tropicaux, où généralement le maximum de concentration des matières en suspension précède celui des débits (CARRE, 1972; NOUVELOT, 1977; OLIVRY, 1977; GAC, 1980; GAC et al, 1987; OLIVRY et al, 1988 et ORANGE, 1990). Bien qu'on note un retard d'un mois au cours du transfert de matériaux de Ngoazik à Nyabessan, tout se passe comme si la production des matériaux se faisait de façon identique sur les versants.

Au regard du faible écart entre les teneurs minimales et maximales des matières en suspension observées respectivement en étiage et pendant le maximum de crue, on peut dire que la production des matériaux sur les versants n'est pas très intense.

4.1.2.2. Choix d'une méthode d'évaluation des flux de matières

Le choix d'une méthode de calcul des tonnages de matières exportées à l'exutoire d'un bassin dépend du nombre et de la fréquence des observations ainsi que de leur nature.

La méthode utilisée pour les calculs des flux de matières particulières sur les bassins du Mbam et de la Sanaga (NOUVELOT, 1972 et OLIVRY, 1977) et sur le bassin du Ntem (BOUM et al, 1983) prend en compte la cadence des observations (quotidiennes ou tous les deux jours). Elle se ramène soit à la somme des poids journaliers, soit au planimétrage de la surface délimitée par la courbe des débits solides en fonction du temps, et par conséquent au calcul de l'intégrale ci-dessous :

$$F_p = \int Q_s dt \quad (4-1)$$

avec :

- F_p : flux de matières en tonnes par an ;
- Q_s : débit solide en kg/s ;
- t : temps en secondes.

A l'issue d'une synthèse avec regroupement en deux catégories (stochastique et déterministe) des différentes méthodes étudiées par de nombreux auteurs, KATTAN (1989) rappelle que seule la méthode prenant en compte l'enregistrement continu des débits et des concentrations de matières permet un calcul précis des flux. Il s'agit en d'autres termes de la méthode de la formulation 4-1.

Si cette méthode peut être adaptée aux observations hebdomadaires de matières en suspension à Moloundou sur la Ngoko, en revanche on ne peut l'utiliser pour le calcul de flux de matières dissoutes et aux autres stations en raison du grand intervalle qui sépare les prélèvements. Par conséquent, il convient de choisir une autre méthode qui donne des résultats convenables. Pour cela, il nous a paru utile de comparer les résultats obtenus sur le Ntem par la méthode (4-1) à ceux donnés par les formules suivantes :

$$F_p = K.V_e.\Sigma C_i/n \quad (4-2)$$

et

$$F_p = K.V_e.\Sigma C_i.Q_i / \Sigma Q_i \quad (4-3)$$

aves :

- n : nombre d'observations de la variable C ;
- C_i : ième concentration C en $g.m^{-3}$;
- Q_i : débit du mois d'observation de C_i en $m^3.s^{-1}$;
- V_e : volume annuel écoulé en m^3 ;
- $K=31,5.10^3$: coefficient de conversion de F_p en tonnes.an⁻¹.

Le tableau 4-2 donne les différents résultats de même que l'erreur par rapport à la méthode (4-1). Les résultats en (1) au tableau 4-2 peuvent être différents de ceux de BOUM et al (1983) dans la mesure où leurs calculs avaient porté sur l'année hydrologique allant du 01 mars au 28 février, alors qu'ici elle va du 01 avril au 31 mars de l'année suivante.

La méthode (4-2) repose sur la moyenne arithmétique des concentrations instantanées des matières mesurées. Les erreurs par rapport à la première méthode varient entre 1 et 15 %. L'inconvénient de cette méthode, qui pourtant est la plus simple, est de surestimer ou de sous-estimer le tonnage de matières suivant la période (étiage ou hautes eaux) pendant laquelle les mesures sont effectuées.

En revanche, la méthode (4-3), qui consiste à pondérer les concentrations instantanées par les débits qui les véhiculent, présente l'avantage de prendre en compte les débits instantanés et les débits moyens des mois pendant lesquels sont faites les observations. Elle donne des résultats beaucoup plus proches de la première, avec des erreurs variant entre 0 et 5 %.

En règle générale, on peut noter que plus la fréquence d'échantillonnage est élevée et régulière, plus le calcul des flux de matières est précis. Ainsi, la méthode (4-3) qui donne les mêmes résultats que l'intégration du solidogramme, sera utilisée pour l'évaluation des flux dans cette étude.

Tableau 4-2 : Flux particuliers du Ntem calculés selon trois méthodes

Flux particuliers sur le Ntem calculés selon trois méthodes											
Année	Ngoazik					Nyabessan					
	1	2		3		1	2		3		
	Fp	Fp	Er	Fp	Er	Fp	Fp	Er	Fp	Er	
1981/82	210150	188940	10.1	197480	6.03	351630	346630	1.42	353100	0.42	
1982/83	178070	166550	6.47	185970	4.44	359770	311650	13.4	344820	4.17	
Légende :											
Fp : Flux particulière en tonnes/an											
Er : Erreur en %											
1 : BOUM et al (1983) modifié											
2 : méthode (4-2)											
3 : méthode (4-3)											

4.2. LES TRANSPORTS DISSOUS SUR LES BASSINS DU NYONG, DU MBAM ET DE LA SANAGA

Des observations des substances transportées en solution ont été faites en 1973/74 sur quelques bassins du Cameroun, parmi lesquels le Nyong, le Mbam et la Sanaga (OLIVRY et NAAH, 1978 et 1988). Afin de fixer les idées sur la qualité des eaux fluviales dans notre zone d'intérêt, nous nous proposons de rappeler les principales caractéristiques données par ces auteurs, en nous attardant sur le cas du Nyong qui fait partie de cette étude.

Du suivi des variations spatiales, il ressort que le pH est acide sur le Nyong (6 à 6,6) et est plus alcalin sur le Mbam et la Sanaga (7 à 7,7). Cette acidité serait due à la présence de la végétation aquatique (*Echinichloa stagnina*) sur le lit du Nyong et de la forêt inondée. Les eaux sont dans l'ensemble peu minéralisées. La minéralisation augmente du Nyong vers la Sanaga et le Mbam.

Pour ce qui est des régimes saisonniers, les fortes teneurs en éléments dissous sont observées en période de basses eaux (vidange des nappes plus chargées) et les faibles, en période de hautes eaux (dilution par les écoulements). S'agissant particulièrement du Nyong, son régime hydrologique avec ses deux périodes d'étiage et de crue, entraîne deux maximas (février-mars et août) et deux minimas (juin et octobre-novembre) de concentrations de substances dissoutes, mais de faible amplitude. OLIVRY et NAAH (1978) soulignent que sa faible minéralisation devrait être imputée au degré avancé de la ferrallitisation des sols.

En résumé, de l'ensemble des travaux relatifs aux transports de matières sur les bassins fluviaux du Cameroun Méridional proches de notre zone d'étude, on peut extraire un certain nombre d'enseignements pour la suite de ce travail :

- Les régimes saisonniers des matières en suspension sur le Mbam et la Sanaga sont identiques. Leur évolution est semblable au schéma classique rencontré sur la plupart des cours d'eau tropicaux, avec un maximum de concentrations précédant celui des débits.

- A l'opposé, les maxima de la charge en suspension sur le Ntem sont observés en même temps que ceux des débits.

- La méthode de calcul de flux basée sur la pondération des concentrations par les débits semble la mieux adaptée pour nos observations.
- Les eaux étudiées et particulièrement celles du Nyong sont faiblement minéralisées. Elles sont de type bicarbonaté calco-magnésien.

CHAPITRE 5

LES METHODES D'ECHANTILLONNAGE ET LES TECHNIQUES D'ANALYSES DES EAUX

Nous allons aborder ce chapitre par quelques rappels des techniques de mesures utilisées dans les travaux antérieurs et sur les conditions de déroulement de nos observations, ainsi que la qualité des résultats qui en découlent.

Pour ce qui est des matières en suspension, la méthode de prélèvements des échantillons utilisée sur le Mbam, la Sanaga et le Ntem, ainsi que celle de leur traitement est la même (NOUVELOT, 1969 et 1972 ; BOUM et al, 1983). Il s'agit, en plus du jaugeage solide sur lequel nous reviendrons un peu plus loin, des prélèvements dans des jerricans de 10 litres d'eau tous les jours pendant la saison des pluies et tous les deux jours pendant la saison sèche. Ces eaux sont traitées dans des dame-jeannes transparentes de 10 litres par décantation. Celle-ci consiste en une adjonction de 20 millilitres de sulfate d'alumine. L'eau surnageant est siphonnée et le résidu filtré. Les filtres chargés sont séchés à 105 °C, puis pesés.

5.1. LE PROTOCOLE D'ECHANTILLONNAGE

A la station principale de Moloundou sur la Ngoko, le protocole de prélèvement des matières en suspension (MES) diffère de celui des matières dissoutes. De même, l'extension de l'étude aux autres stations hydrométriques de la région et aux eaux pluviales a rendu difficile l'utilisation des mêmes méthodes à tous les sites de prélèvement reportés sur la figure 5-1. Nous nous proposons donc de décrire les méthodes d'échantillonnage par type de paramètre en faisant ressortir les modifications apportées à certains sites.

5.1.1. LES MATIERES EN SUSPENSION

L'échantillonnage des matières en suspension (MES) sur la Ngoko à Moloundou se fait de façon simultanée avec le jaugeage au moyen d'un tuyau relié à une pompe Japy. Le long d'une section en travers, on prélève 1 litre d'eau en trois points sur cinq verticales dont on a au préalable mesuré les vitesses de courant, soit au total 15 x 1 litre d'eau :

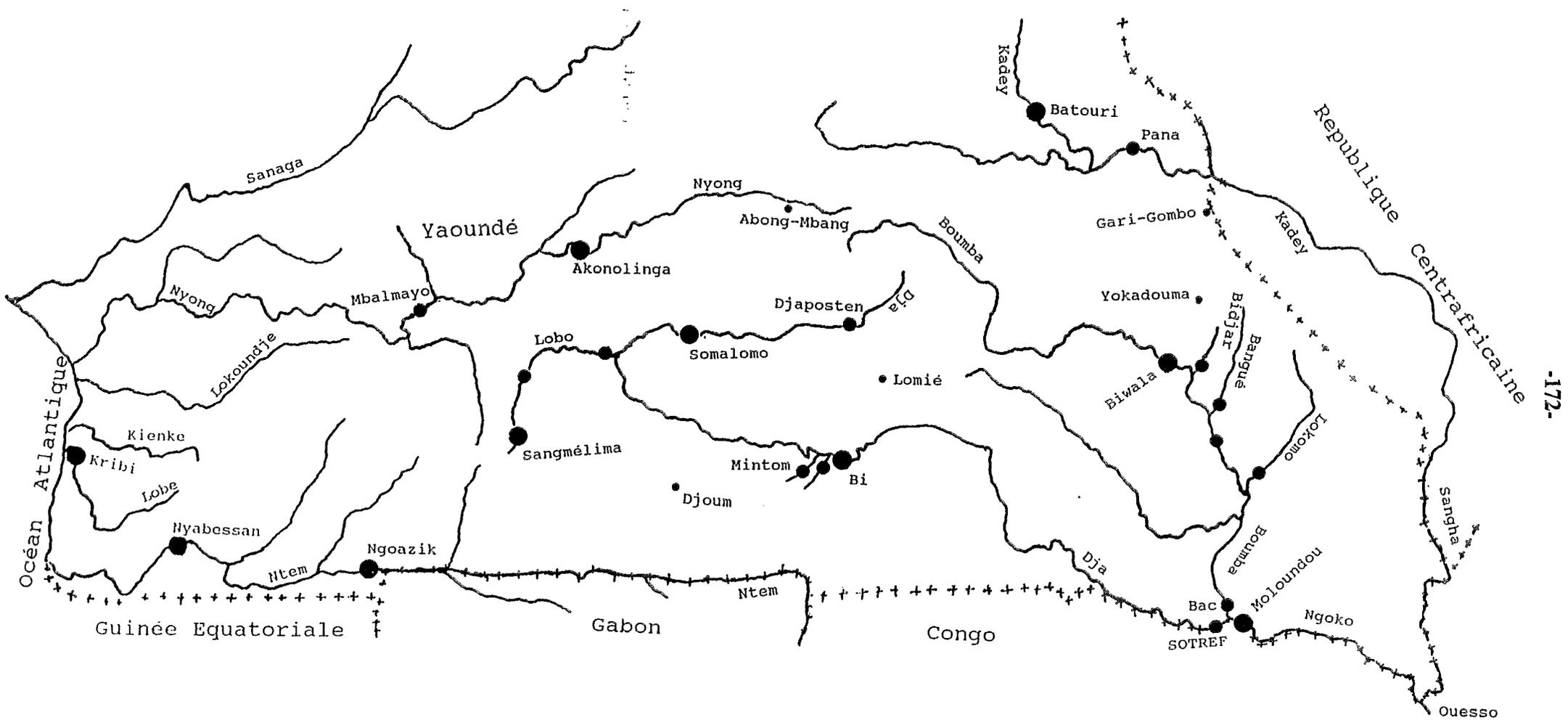


Figure 5-1 : Localisation des sites de prélèvements des eaux pluviales et fluviales

- Cours d'eau ; +++ Limite des Etats
 • Eaux pluviales ; ● Eaux fluviales ;
 ● Eaux pluviales et fluviales

c'est le jaugeage complet (Jc). Par rapport au prélèvement sur une seule verticale (OLIVRY et al, 1988), cette méthode, bien que laborieuse, a l'avantage de prendre en compte la variabilité des MES sur toute la section. La concentration moyenne de Jc est déterminée par l'intégrale des concentrations ponctuelles. Ce jaugeage complet est couplé à un échantillon que nous appelons témoin du jaugeage (Tj), puisé à 20 cm de la surface au site où l'observateur prélève 2 litres d'eau chaque semaine. L'intérêt de cet échantillon témoin est d'établir une corrélation entre la concentration moyenne de Cj et celle de Ct. A l'aide de cette corrélation, on peut déterminer les concentrations moyennes (Cjh) correspondant aux échantillons hebdomadaires (Ch). On a effectué au total 22 jaugeages complets.

Il convient aussi de signaler qu'avant le jaugeage complet sur la Ngoko, on prélève 1 l d'eau à 20 cm de la surface sur la Boumba au Bac et sur le Dja à la SOTREF. Ces prélèvements se font généralement au milieu du cours d'eau, à un point où les vitesses du courant sont maximales. L'objectif est d'évaluer la contribution de chaque tributaire en charges particulières et dissoutes, à celles de la Ngoko. Cette méthode de prélèvement est également utilisée aux stations de Somalomo et de Bi sur le Dja, de Biwala sur la Boumba, d'Akonolinga et de Mbalmayo sur le Nyong, de Ngoazik et de Nyabessan sur le Ntem, mais suivant les opportunités lors des campagnes de mesures à Moloundou.

5.1.2. LES MATIERES DISSOUTES

Le protocole d'échantillonnage diffère suivant qu'il s'agit des éléments dissous dans les eaux pluviales ou fluviales.

5.1.2.1. Les eaux pluviales

En raison des difficultés signalées plus haut, il n'a pas été possible de recueillir des échantillons d'eaux pluviales fraîches et d'en mesurer les paramètres physico-chimiques in situ, sauf pour des pluies tombant au moment où nous nous trouvions sur le terrain.

Le tableau 5-1 présente les caractéristiques des postes de collecte des eaux pluviales et la période correspondant à chaque prélèvement. Le transect de collecte va de l'océan Atlantique à l'ouest (Kribi) à environ 700 km à l'est (Gari-Gombo).

Exception faite de Kribi dont l'échantillon, indiqué comme référence à la mer, a été recueilli à l'occasion d'une tournée par nos soins, les 14 postes d'échantillonnage sont répartis et gérés comme suit :

Tableau 5-1 : Caractéristiques des postes d'échantillonnage des eaux pluviales et types de prélèvement

CARACTERISTIQUES DES POSTES D'ECHANTILLONNAGE DES EAUX PLUVIALES ET TYPES DE PRELEVEMENTS																			
Poste	Orga.	Loca.	PR	DT	DA	Année	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	Total
Akonolinga	Météo	ICA	++	++	290	1989/90					c. Ao-Jv								1
						1990/91					1			c. Nv-Jv					2
						1991/92		c. Mai-Jn											1
Somalomo	CRH	V	++	-	320	1989/90								1	1	1	1	1	5
						1990/91	1	1	1					2	1	1	1	1	9
						1991/92	c. Av-Jn				1	c. S-Nv							3
Abong-Mbang	Météo	ICA	++	+	390	1989/90					c. Ao-Dc								1
						1990/91	1	1		1				2	1	1	1	1	9
						1991/92		c. Mai-Jn			1			c. Oc-Nv					3
Lomié	Météo	ICA	+	+	405	1990/91	c. Av-Ao												2
						1991/92		1			c. Ao-Oc								2
Batouri	Météo	ECA	+	+	520	1989/90	c. Av-Oc							1		1			3
						1990/91	1	1	1	1	1								5
						1991/92	1	1	c. Jn-Jt		1								4
Gari-Gombo	PA	ECA	++	++	620	1989/90					c. Jn-Jv								1
						1990/91	1	1						1	1	1			5
						1991/92				1	1	1		1					4
Yokadouma	Météo	ICA	++	++	600	1989/90	c. Av-Nv												1
						1990/91									c. Dc-Jv				1
						1991/92					1	1							2
Biwala	CRH	V	++	-	550	1990/91	1	1	1	1	1		c. Oc-Nv						6
						1991/92			1	1	1	1	1	1	1				6

Tableau 5-1 (suite)

Moloundou	CRH	ECA	++	-	600	1989/90	c. Av-Dc									1	1	1	4	
						1990/91	1	1	1	1				c.Nv-Dc		1	1	1	8	
						1991/92	1			1	2	1	1	1					7	
Sangmélima	CRH	ECA	++	++	230	1989/90								c. Ao-Jv						
						1990/91	c. Av-Mai							1	1	c.Jn-Fv			4	
Djoum	PA	ICA	++	++	310	1990/91								1	1	1			3	
						1991/92	c.Av-Mai												1	
Bi	CRH	V	++	-	400	1990/91								1	1				2	
						1991/92		1											1	
Ngoazik	CRH	V	++	+	160	1990/91	c. Av-Jn							1	1	1	1	1	1	7
Nyabessan	CRH	V	++	-	65	1990/91								1	1	2	c. Jv-Ms		5	
Kribi	Tournée	V	++	++	1	1990/91								1					1	
Légende :																				
Orga. : Organisme ; Loca. : Localisation du poste pluviométrique																				
Météo : Météorologie Nationale ; PA : Poste Agricole ; CRH : Centre de Recherches Hydrologiques																				
CA : Centre Administratif (I=Intérieur et E=Extérieur) ; V : Village																				
PR : Proximité de la route (+=proche et ++=très proche) ;																				
DT ; Densité du trafic routier (- = moins dense, +=dense et ++=très dense)																				
DA : Distance par rapport à l'Atlantique en km ; c. : cumul de pluie sur plusieurs mois																				

- Cinq appartiennent à la Météorologie Nationale ;
- Deux appartiennent au Ministère de l'Agriculture ;
- Sept ont été installés dans le cadre de cette étude par le Centre de Recherches Hydrologiques

Pour ce qui est de leur localisation par rapport aux centres urbains et aux axes routiers, neuf postes sont à l'intérieur ou à proximité de centres administratifs et cinq dans les villages ; tous les postes sont situés à proximité des axes routiers plus ou moins fréquentés. Suivant la densité du trafic routier, la poussière soulevée par les véhicules (aucune des routes n'est bitumée) pourrait contaminer les eaux précipitées.

La densité des sites de collecte des eaux pluviales est d'un poste pour 7500 km² sur le bassin de la Ngoko, d'un poste pour 6700 km² sur le bassin du Nyong, d'un poste pour 13 200 km² pour le bassin du Ntem et d'un poste pour 20 400 km² sur celui de la Kadey.

Le nombre d'échantillons analysés est de 137, dont 77 sur le bassin de la Ngoko avec 19 à Moloundou, 15 sur le bassin du Nyong, 12 sur le bassin du Ntem, 13 sur celui de la Kadey et un à Kribi près de l'océan Atlantique.

En ce qui concerne les dispositifs de prélèvement, nous avons installé des pluviomètres en plastique à lecture directe aux stations hydrométriques et météorologiques. Pour un mois donné, l'observateur, après chaque lecture, cumule l'eau de pluie dans un jerrican en plastique de 20 litres. Lors des campagnes de mesure sur le terrain, nous prélevons une aliquote de 250 ml de ce mélange d'eau de pluie mensuelle. Les jerricans sont rincés à l'eau distillée afin d'être utilisés les mois suivants. Nous signalons que le temps de séjour de l'eau et son transfert d'un récipient à l'autre peuvent être à l'origine de la perturbation et de la contamination des échantillons. De même, certains prélèvements correspondent à la pluie cumulée sur plusieurs mois par manque de jerricans et/ ou à l'irrégularité des tournées.

5.1.2.2. Les eaux fluviales

L'échantillonnage des eaux de la Ngoko destinées à l'analyse chimique se fait en prélevant un flacon d'un litre en plastique à col rond à 20 cm de la surface. Les mesures physico-chimiques in situ ont donné des valeurs différentes d'une verticale à l'autre. En rive gauche et en rive droite, elles étaient respectivement proches de celles des échantillons prélevés au préalable sur la Boumba au Bac et sur le Dja à la SOTREF.

Ces différences indiquent que les eaux des deux affluents de la Ngoko ne sont pas encore mélangées à Moloundou-ville.

En reprenant l'opération à Malapa, section de jaugeage située à 3 km en aval de Moloundou, on a constaté une bonne homogénéité des paramètres physico-chimiques. De même, la valeur moyenne des paramètres était proche de celle de l'échantillon prélevé sur la verticale médiane. Cette approche a permis de limiter l'échantillonnage à 1 litre d'eau puisé à 20 cm de la surface, au milieu du fleuve, au point où les vitesses de courant sont les plus fortes. Cet échantillon, prélevé à 1 km en aval de Malapa, est jugé représentatif de la section en travers.

Aux stations en amont et à celles des bassins voisins, 1 litre d'eau est prélevé dans les mêmes conditions simultanément avec l'échantillon des MES.

Le tableau 5-2 donne l'inventaire par bassin versant des prélèvements et du nombre d'échantillons analysés. Les sites de prélèvement de type 1 correspondent aux stations hydrométriques de Moloundou sur la Ngoko, sur le Dja à la SOTREF et sur la Boumba au Bac, implantées dans le cadre de cette étude : ce sont les sites d'échantillonnage permanent. Le type 2 comprend les stations du réseau hydrométrique situées en amont de Moloundou sur le Dja et la Boumba ou sur les bassins voisins (Nyong, Ntem et Kadey). Quant au type 3, il comprend tous les autres points d'échantillonnage des affluents du Dja et de la Boumba non équipés de stations hydrométriques, mais sur lesquels se font également les prélèvements occasionnels.

Au total, cent seize (116) échantillons ont été analysés dont dix-sept (17) sur la Ngoko à Moloundou. Le Dja à la SOTREF et la Boumba au Bac en comptent 13 chacun. En amont de ces stations, dix-sept (17) analyses ont été faites sur le Dja, dont 6 à Somalomo et 4 à Bi et les autres sur les affluents ; trente-trois (33) sur la Boumba dont 12 à Biwala et 21 sur les affluents. Pour ce qui est des bassins voisins, le Nyong compte 9 analyses (7 à Akonolinga et 2 à Mbalmayo), le Ntem 7 (4 à Ngoazik et 3 à Nyabessan) et la Kadey 7 (3 à Batouri et 4 à Pana).

Sur le terrain, on mesure les paramètres physico-chimiques (température, pH, conductivité et bicarbonates). Une aliquote de 250 ml, destinée à l'analyse chimique, est également filtrée in situ à l'aide d'un set de filtration Millipore en plastique sur des filtres Whatman en cellulose de 0,45 microns de porosité.

Tableau 5-2 : Inventaire des échantillons des eaux fluviales prélevés et analysés

Inventaire des échantillons des eaux fluviales prélevés et analysés																	
C. D'EAU	STATIONS	Type	Année	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	N. Ech.	N. An.
Boumba	Biwala	2	1989/90								1					1	1
			1990/91	1						1			1	1	4	4	
			1991/92	1		1	1	1	1			1	1			8	7
Boumba	Mol.-Bac	1	1989/90	1		1					2		1		1	6	3
			1990/91		1			1						1	1	4	3
			1991/92	1		1	1	1	1	1	2			1		9	7
Dja	Somalomo	2	1989/90								1					1	1
			1990/91	1							1		1		3	3	
			1991/92			1	1					1		1		4	2
Dja	Bi	2	1990/91	1							2	1			4	4	
Dja	Mol.-SOTREF	1	1989/90	1		1					2		1		1	6	3
			1990/91		1			1						1	1	4	4
			1991/92	1		1	1	1	1	1	2		1			9	6
Ngoko	Moloundou	1	1989/90	1		1					1		1		1	5	5
			1990/91		1			1			2		1		1	6	5
			1991/92	1		1	1	1	1	1	2		1	1		10	7
Nyong	Akonolinga	2	1989/90								1					1	1
			1990/91	1							1			1	1	4	3
			1991/92		1	1	1	1			1		1			6	3
Nyong	Mbalmayo	2	1990/91		1						1					2	2
			1991/92										1			1	0
Ntem	Ngoazik	2	1990/91	1						1		1				3	3
			1991/92											1		1	1
Ntem	Nyabessan	2	1990/91	1						1		1				3	3
Kadey	Batouri	2	1991/92	1		1	1		1		1		1			6	3
Kadey	Pana	2	1991/92	1		1	1	1	1		1		1			7	4
Bidjar	Bandekok	3	1990/91							1				1	1	3	2
			1991/92	1		1	2	1	1		1		1			8	5
Bangué	Bangué	3	1990/91							1				1	1	3	2
			1991/92	1		1	1	1	1		1		1			7	5
Lokomo	Lokomo	3	1990/91							1				1	1	3	2
			1991/92	1		1	1	1	1		1		1			7	5
Dja	Djaposten	3	1990/91											1		1	1
			1991/92		1						1					2	0
Afamba	Sangmelima	2	1990/91							1					1	1	
Kon	Mintom	3	1990/91								1				1	1	
Ebé	Zoébéfam	3	1990/91								1	1			2	2	
Lobo	Kombé	3	1990/91								1				1	1	
Lobo	Assok	3	1990/91								1				1	1	
Légende :																	
Type 1 : Stations hydrométriques d'échantillonnage permanent																	
Type 2 : Stations hydrométriques d'échantillonnage ponctuel																	
Type 3 : Sites d'échantillonnage ponctuel																	
N. Ech. : Nombre d'échantillons prélevés ; N. An. : Nombre d'échantillons analysés																	

5.1.3. LE CARBONE ORGANIQUE

L'échantillon du carbone organique est une aliquote de 250 ml prélevée sur le litre d'eau des matières dissoutes. Elle est filtrée à l'aide d'un set de filtration en verre sur des filtres en fibres de verre de 0,7 microns de porosité. Le matériau retenu sur le filtre est destiné à la détermination du carbone organique particulaire (COP). Pour le carbone organique dissous (COD), on prélève une partie du filtrat dans un tube en verre et on y ajoute 2 microlitres de HgCl_2 pour stopper l'activité biologique.

5.1.4. LES ISOTOPES

L'échantillonnage des eaux pour l'analyse isotopique se fait simultanément avec celui des eaux des matières dissoutes. Un flacon à double bouchon en verre de 60 ml est rempli et refermé à 20 cm de la surface afin d'éviter les bulles d'air.

5.2. LES TECHNIQUES D'ANALYSES

5.2.1. LES MATIERES EN SUSPENSION

Le traitement au laboratoire des échantillons d'eau a consisté, d'une part à la quantification des charges solides en suspension, et d'autre part à l'analyse de ces matériaux.

* La détermination des concentrations des MES s'est faite au Centre National des Sols de Nkolbisson à Yaoundé, au moyen d'une rampe de filtration Millipore. On utilise des filtres Whatman de porosité 0,45 microns préalablement séchés et pesés. Les filtres chargés sont séchés à 105 °C à l'étuve, puis pesés. La différence de poids entre le filtre chargé et le filtre vierge, ramenée au litre, donne la teneur en MES de l'échantillon.

Les matériaux issus de la filtration de l'aliquote de 250 ml sur le terrain sont également séchés et pesés. Leurs teneurs peuvent être utilisées d'une part, pour contrôler celles des échantillons filtrés au laboratoire, d'autre part, pour établir des relations avec les matières dissoutes correspondantes.

Le dépouillement du jaugeage solide se fait suivant le même principe que celui du jaugeage liquide. Il consiste en une double intégration dont l'équation est :

$$Q_s = \int \int C_i.V_i.dp.dl \quad (5-1)$$

avec :

Q_s : débits solide en $kg.s^{-1}$;

l : largeur de la section en m ;

p : profondeur d'une verticale en m ;

V_i : vitesse au point i en $m.s^{-1}$;

C_i : concentration des MES au point i en $g.m^{-3}$.

Cette méthode permet une détermination plus précise de la concentration moyenne de MES dans le cours d'eau véhiculées par le débit liquide Q_l suivant la formule :

$$C_j = Q_s/Q_l \quad (5-2)$$

Les prélèvements ponctuels sont traités de la même manière et leurs concentrations sont corrigées à l'aide de la concentration moyenne (C_j) du jaugeage complet.

* Les analyses granulométrique, minéralogique et chimique ont été réalisées à l'ORSTOM-Bondy sur quelques filtres sélectionnés en fonction du point de prélèvement (milieu du cours d'eau) et de l'importance de la charge. Malgré ces précautions, le poids de la matière minérale sur chaque filtre s'est avéré trop faible pour une analyse granulométrique même au Sedigraph. Il en est de même pour les analyses géochimique et minéralogique dont seule la nature des argiles a pu être déterminée.

Les techniques utilisées ont consisté dans un premier temps, à récupérer les MES de chaque filtre dans de l'eau permutée, puis à les attaquer par de l'eau oxygénée à 30 volumes pour détruire la matière organique et disperser les argiles. Elles sont pesées après séchage à 40 °C.

L'analyse granulométrique a porté sur la fraction fine (inférieure à 50 microns). Elle est séparée de la fraction sableuse (supérieure à 50 microns) par tamisage humide sur tamis de maille 50 microns. Après pesage, on la passe au SEDIGRAPH 5000ET qui en trace la courbe granulométrique.

Quant à la minéralogie, elle s'est limitée à un inventaire des minéraux, d'une part à la loupe binoculaire pour la fraction sableuse, et d'autre part par analyse diffractométrique des minéraux argileux de la partie fine.

5.2.2. LES MATIERES EN SOLUTION

Les analyses sont faites suivant les méthodes ci-après :

- Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ et K^+ : spectrométrie d'absorption atomique à flamme, limites de détection inférieure à 0,1 ppm et reproductibilité de 3 à 5 % ;
- Cl^- , SO_4^{--} , NO_3^- et PO_4^{---} : chromatographie ionique (modèle DIONEX 2010i), limites de détection 0,01 mé.l^{-1} et reproductibilité de 1 à 3 % ;
- SiO_2 , Al et Fe : spectrométrie d'émission de plasma (ICP), limites de détection 10 ppb, soit 0,01 mg.l^{-1} et reproductibilité de 2 à 4 %.

Les mesures de pH, de conductivité et de l'alcalinité sont reprises au laboratoire. Les bicarbonates sont dosés au titrimètre automatique de marque Mettler. Les techniques d'analyse des eaux pluviales sont identiques à celles décrites ci-dessus.

5.2.3. LE CARBONE ORGANIQUE

Les analyses du carbone organique particulaire et dissous ont été effectuées respectivement à l'Institut de Géologie du Bassin de l'Aquitaine (IGBA) et à l'Université de Perpignan.

* Le carbone organique particulaire

Les mesures sont faites sur un analyseur carbone LECO CS 125. Elles consistent en une combustion à haute température (1100 °C) dans un four après décarbonatation des échantillons avec du HCl 2N durant une nuit à 60 °C.

La mesure du CO₂ dégagé est faite sur une cellule Infra-rouge. Il s'agit d'une technique classique (CAUWET, 1975), remise à jour pour les problèmes de décarbonatation (CAUWET, 1985). La précision a été excellente pour tous les échantillons puisque les coefficients de variation sont inférieures à 5 %.

*** Le carbone organique dissous**

Les analyses ont été faites sur un analyseur carbone SHINADZU TOC 500. Le principe est le même que ci-dessus, à la différence que la combustion se fait à 680 °C et que la décarbonatation ne dure qu'une vingtaine de minutes.

Cette technique est très récente et a apporté des améliorations considérables à la détermination de ce paramètre, pour lequel des sous-dosages étaient à craindre du fait d'une mauvaise oxydation de la matière organique (CAUWET, 1984 ; CAUWET et al, 1990 ; SUGIMURA and SUZUKI, 1990).

La précision des mesures a été excellente puisque les coefficients de variation sont inférieures à 2 %. Les valeurs fortes ne sont pas dues aux erreurs, dans la mesure où les analyses des échantillons concernés ont été systématiquement répétées 2 à 3 fois.

5.2.4. LES ISOTOPES STABLES DE L'EAU

La composition isotopique des eaux de pluie et des écoulements de surface a été déterminée au Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie isotopique de l'Université de Paris Sud. Elle est limitée à l'Oxygène-18 et au Deutérium.

*** Oxygène-18**

Le dosage de l'Oxygène-18 se fait sur un échantillon de 3 ml. Il est dégazé à 3 reprises par condensation et liquéfaction sous vide. Le troisième dégazage est suivi d'un piégeage de CO₂. La mesure de l'Oxygène-18 de l'eau passe par la détermination de la

composition isotopique du CO₂ au Spectromètre de masse double collecteur 602 C. Il s'agit de la mesure différentielle suivant l'étalon (R = ¹⁸O/¹⁶O) représentant la composition isotopique moyenne des eaux océaniques ou Standard Mean Oceanic Water (SMOW), d'après CRAIG (1961). Elle s'exprime par :

$$\delta = \left[\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{éch.}})}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{ét.}})} - 1 \right] \times 10^3 \quad (5-3)$$

Avec :

O_{éch.} : Oxygène de l'échantillon

O_{ét.} : Oxygène de l'étalon

L'erreur de dosage admise est de l'ordre de +/-0,2 pour mille.

* Deutérium

La détermination du Deutérium est également réalisée au Spectromètre de masse double collecteur 602 D. Elle se fait sur de l'hydrogène gazeux obtenu après réduction de l'échantillon de 8 µl d'eau par du zinc à 470 °C. L'erreur admise sur les résultats est comprise entre +/-2 pour mille.

5.3. PRESENTATION ET CRITIQUE DES RESULTATS D'ANALYSES CHIMIQUES

Les résultats d'analyses chimiques des eaux sont de bonne qualité lorsque l'équilibre ionique est vérifié. Cet équilibre est contrôlé par le calcul de l'erreur relative (Er) qui traduit le degré de neutralité électrique des ions en solution. L'erreur peut être due à la limite de détection de certains ions, à la présence de la matière organique, au stockage trop long des échantillons et aux erreurs de dosage (MEYBECK, 1986).

D'après SCHOELLER (1962), l'erreur admise varie de +/-2 % pour les eaux dont la somme des cations ou des anions est supérieure à 30 meq.l⁻¹ à +/-10 % pour celles dont elle est inférieure à 1 meq.l⁻¹. Les eaux de notre zone d'étude appartiennent à cette dernière catégorie.

La précision de la balance ionique a été calculée suivant la formule :

$$Er(\%) = (\Sigma\text{cations} - \Sigma\text{anions}) / (\Sigma\text{cations} + \Sigma\text{anions}) \cdot 200 \quad (5-3)$$

où Er est l'erreur relative en pourcentage.

5.3.1. LES EAUX FLUVIALES

Le tableau 5-3 donne la répartition du nombre d'analyses par tranche d'erreur et par site d'échantillonnage des eaux fluviales. Dans le commentaire ci-dessous, l'erreur en pourcentage est exprimée en valeur absolue.

Sur un total de 112 analyses des eaux fluviales, environ 4 % des résultats ont une erreur nulle ; 29 % une erreur comprise entre 0 et 5 % ; 23 % une erreur comprise entre 5 et 10 % et 44 % une erreur au-delà de 10 %. Globalement, 56 % des échantillons analysés ont des résultats de précision acceptable.

A la station de Moloundou sur la Ngoko, sur 19 analyses, une (1) présente une balance ionique nulle ; six (6) une erreur comprise entre 0 et 5 % ; quatre (4) ont une erreur comprise entre 5 et 10 % et huit (8) une erreur dépassant 10 %.

A la station de Moloundou-SOTREF sur le Dja, sur 12 analyses, quatre présentent une erreur comprise entre 0 et 5 % ; deux (2) ont une erreur comprise entre 5 et 10 % et six (6) une erreur dépassant 10 %.

A la station de Moloundou-Bac sur la Boumba, sur 13 analyses, trois (3) ont une erreur comprise entre 0 et 5 % ; cinq (5) une erreur comprise entre 5 et 10 % et les cinq (5) autres une erreur au-delà de 10 %.

Aux sites de prélèvements occasionnels en amont de Moloundou, la répartition sur les deux tributaires de la Ngoko s'établit comme suit :

- Sur le Dja, sur 16 analyses, l'erreur sur un résultat est nulle ; trois ont une erreur comprise entre 0 et 5 % et douze (12) une erreur dépassant 10 %.

- Sur la Boumba, sur 30 analyses, la balance ionique de l'une est nulle ; sept ont une erreur comprise entre 0 et 5 % , dix (10) une erreur comprise entre 5 et 10 % et douze (12) une erreur située au-delà de 10 %.

Tableau 5-3 : Nombre d'analyses par tranche d'erreur en pourcentage des eaux fluviales

Eaux fluviales : nombre d'analyses par tranche d'erreurs en %								
C. D'EAU	STATIONS	Er<-10	-10<Er<-5	-5<Er<0	Er=0	0<Er<5	5<Er<10	Er>10
Boumba	Biwala	1	2	2	0	1	0	3
Boumba	Mol.-Bac	2	5	1	0	1	0	3
Dja	Somalomo	1	0	1	0	0	0	3
Dja	Bi	0	0	0	0	1	0	3
Dja	Mol.-SOTREF	3	1	3	0	1	1	3
Ngoko	Moloundou	3	1	4	1	2	3	5
Nyong	Akonolinga	1	0	2	0	1	1	2
Nyong	Mbalmayo	0	0	0	1	0	0	1
Ntem	Ngoazik	0	0	2	0	0	1	1
Ntem	Nyabessan	1	0	0	0	0	0	1
Kadey	Batouri	0	1	0	0	2	0	0
Kadey	Pana	0	1	2	0	0	1	0
Bidjar	Bandekok	3	2	1	0	0	0	1
Bangué	Bangué	2	3	1	0	0	0	1
Lokomo	Lokomo	0	3	2	1	0	0	1
Dja	Djaposten	1	0	0	0	0	0	0
Afamba	Sangmelima	1	0	0	0	0	0	0
Kon	Mintom	0	0	0	0	1	0	0
Ebé	Zoébéfam	0	0	0	1	0	0	1
Lobo	Kombé	1	0	0	0	0	0	0
Lobo	Assok	1	0	0	0	0	0	0
Légende : Er : Erreur en %								

Aux stations des bassins voisins, sur 22 analyses, l'erreur sur une est nulle ; neuf (9) ont une erreur comprise entre 0 et 5 %, cinq (5) ont une erreur comprise entre 5 et 10 % et sept (7) une erreur dépassant 10 %.

De ce qui précède, il se dégage que les résultats d'analyse des eaux du Dja sont moins précis que ceux des eaux de la Boumba, en raison de la forte dilution des eaux du Dja. Sur le bassin de la Boumba, les résultats d'analyse des eaux de la Bidjar, de la Bangué et de la Lokomo ont une précision encore meilleure du fait de leur forte minéralisation.

En raison de la taille réduite de nos échantillons, ceux dont les analyses d'erreur dépassent 10 % n'ont pas été systématiquement éliminés. Certains dont les erreurs étaient peu différentes de 10 % ont été conservés. Par ailleurs d'autres, dont la différence de balance ionique était due au non dosage des ions comme les nitrates et les sulfates, ont été valorisées par estimation des éléments manquants.

5.3.2. LES EAUX PLUVIALES

A l'instar des eaux fluviales, nous avons reporté dans le tableau 5-4 la répartition du nombre d'échantillons par tranche d'erreur et par site d'échantillonnage des eaux pluviales. Mais, en raison du conditionnement de ces dernières par l'acide nitrique ou par l'acide sulfurique, le calcul de la balance ionique de 103 échantillons acidifiés sur un total de 137 n'a pas été possible, seuls les cations et les chlorures ayant été dosés.

Sur les 34 échantillons non acidifiés, six (6) ont une erreur comprise entre 0 et 5 % ; cinq (5) ont une erreur comprise entre 5 et 10 % et vingt-trois (23) ont une erreur au-dessus de 10 %.

L'acidification de 75 % des échantillons d'eau de pluie rend la critique des résultats d'analyse difficile, dans la mesure où celle-ci ne porte que sur une proportion très réduite de prélèvements (25 %). Néanmoins, on note que les résultats obtenus pour les apports atmosphériques dissous sont dans l'ensemble moins précis que ceux des apports fluviaux. Cette imprécision est due, à la faible minéralisation des eaux pluviales et à une éventuelle contamination anthropique, la plupart des postes de collecte étant situés dans les centres urbains et/ou à proximité des routes.

Tableau 5-4 : Nombre d'analyses par tranche d'erreur en pourcentage et d'échantillons acidifiés des eaux pluviales

Eaux pluviales : nombre d'échantillons par tranche d'erreur et d'échantillons acidifiés								
Poste	Er<-10	-10<Er<-5	-5<Er<0	Er=0	0<Er<5	5<Er<10	Er>10	E. Ac.
Akonolinga	1	0	0	0	0	0	0	3
Somalomo	4	1	0	0	1	0	0	12
Abong-Mbang	1	1	0	0	1	0	0	8
Lomié	1	0	0	0	0	0	0	4
Batouri	0	1	0	0	1	0	0	15
Gari-Gombo	2	0	0	0	0	0	0	9
Yokadouma	2	0	0	0	0	0	0	2
Biwala	2	0	0	0	0	0	0	2
Moloundou	5	1	1	0	1	1	0	12
Sangmélina	1	0	0	0	0	0	0	4
Djoum	0	0	0	0	0	0	0	4
Bi	0	2	0	0	0	0	0	1
Ngoazik	1	0	0	0	0	1	0	3
Nyabessan	2	0	0	0	0	0	0	2
Lobé (Kribi)	1	0	0	0	0	0	0	0
Légende :								
Er : Erreur en % ; E. Ac. : Echantillon Acidifié n'ayant pas fait l'objet de calcul d'erreur								

Afin de ne pas réduire davantage la taille des échantillons, seuls les échantillons acidifiés ayant de fortes teneurs en cations ont été éliminés. Pour le reste, nous avons procédé aux corrections de la même manière que pour les analyses des eaux fluviales.

En résumé, vingt-deux jaugeages complets ont été effectués à Moloundou sur la Ngoko. Les teneurs moyennes en MES de ces jaugeages constituent une bonne chronique pour la précision sur la charge solide. D'autre part, près de 60 % des résultats d'analyses des substances dissoutes ont une erreur comprise entre 0 et 10 % (en valeur absolue), en dépit de la faible minéralisation des eaux étudiées. En conséquence, on peut s'attendre à une bonne évaluation des transports de matières en suspension et en solution en vue d'une meilleure analyse du fonctionnement hydrochimique de cet écosystème forestier. C'est de ces différents aspects que nous parlerons dans les prochains chapitres, non sans préciser auparavant que compte tenu du commentaire ci-dessus, les données de base ne seront pas publiées dans ce mémoire, ce afin d'éviter toute utilisation qui ne prendrait pas en compte les conditions environnementales de cette étude. Ainsi, nos analyses et nos interprétations porteront essentiellement sur les charges moyennes pondérées par les débits pour ce qui est des matières fluviales, et par les hauteurs d'eau précipitées en ce qui concerne les apports atmosphériques.

CHAPITRE 6

OBSERVATIONS DES TRANSFERTS DE MATIERES ET FONCTIONNEMENT HYDROCHIMIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA NGOKO

Les rivières et les fleuves transportent dans leurs eaux les indices de dégradation des versants qu'ils drainent. Il s'agit des substances particulières et dissoutes provenant de l'érosion des sols et de l'altération des roches sous-jacentes ainsi que de la matière organique. Dans ce chapitre, nous tentons de comprendre le fonctionnement hydrogéochimique de l'écosystème forestier naturel drainé par la Ngoko, à partir des observations de matériaux qu'elle véhicule. Pour cette analyse qui s'appuiera sur différents aspects, nous procéderons de la manière suivante :

- Nous suivrons les substances minérales particulières et dissoutes dans leur variabilité spatio-temporelle de l'amont vers l'aval, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif. Sur le plan qualitatif, on s'attardera sur la composition minéralogique des matières en suspension et sur le carbone organique. Pour les matières en solution, rappelons qu'on se limitera à la silice et aux ions majeurs, notamment le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium pour les cations, les bicarbonates, les chlorures, les sulfates et les nitrates pour les anions. Signalons aussi que des analyses de fer et d'aluminium en solution ont été effectuées sur quelques échantillons ; mais les résultats, en nombre réduit, semblent peu significatifs et par conséquent, ne pourront faire l'objet d'une quelconque analyse ;
- Nous examinerons les apports en éléments dissous des eaux pluviales en même temps que les matières transportées en solution par les écoulements ;
- Nous analyserons les observations de carbone organique particulière et dissous.

Suivant la taille des échantillons, les substances seront étudiées, d'une part aux stations de Somalomo, Bi et Moloundou-SOTREF sur le Dja et de Biwala et Moloundou-Bac sur la Boumba, et d'autre part, à la station de Moloundou sur la Ngoko. Une telle démarche vise à suivre l'évolution des matériaux au cours du transfert des zones de production vers l'exutoire du bassin. En l'occurrence, lorsque les caractéristiques principales du comportement hydrochimique du bassin seront identiques d'une station à l'autre, on ne s'y attardera que pour relever d'éventuelles variantes de détail.

6.1. OBSERVATIONS ET TRANSFERTS DE MATIERES EN SUSPENSION

6.1.1. LE BASSIN VERSANT DU DJA

Le Dja à Somalomo

A Somalomo, les observations ont été effectuées de novembre 1989 à novembre 1991. Le tableau 6-1 donne les concentrations moyennes et extrêmes des matières particulaires par année.

La concentration moyenne sur les 3 cycles est de $16,2 \text{ mg.l}^{-1}$. Les concentrations extrêmes sont de $37,4 \text{ mg.l}^{-1}$ pour le maximum et de 7 mg.l^{-1} pour le minimum.

Tableau 6-1 : Dja à Somalomo (1989-1992) : Concentrations moyennes et extrêmes des matières particulaires en mg.l^{-1}

Année	Moy (mg/l)	ET	CV (%)	Maxi (mg/l)	Mini (mg/l)	N
1989/90	9,6	1,6	16,7	12,5	7	13
1990/91	16,2	4,7	29	34,5	8,9	31
1991/92	22,9	6,4	28	37,4	13,3	18

Légende :

Moy : moyenne ; ET : écart-type ; CV : coefficient de variation ; Maxi : maximum ; Mini : minimum ; N : nombre d'échantillons.

En ce qui concerne le cycle hydrologique 1990/91, les teneurs moyennes mensuelles de la charge solide, calculées en pondérant les concentrations ponctuelles par les débits (formule 4-3), sont données dans le tableau 6-2. La figure 6-1 représente leur évolution en fonction des débits.

La concentration du mois d'avril, de l'ordre de 20 g.m^{-3} , reste constante jusqu'en mai tandis que le débit passe de 26 à $69 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Par contre, de mai à juin, alors que le débit

Tableau 6-2 : Concentrations moyennes et flux mensuels du Dja à Somalomo et à Bi

Cycle	Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	Annuel	
Dja à Somalomo (1989/90)														
1989/90	C(mg/l)							9,8	10,0	8,9	9,9		(9,7)	
	Fm													
1990/91	C(mg/l)	20,1	19,5	15,3	16,4	16,6	17,1	13,1	14,3	13,9	14,5	15,6	18,7	15,4
	Fm	1337	3467	2499	1037	2592	4427	5132	5653	3662	1607	1026	1397	34308
	Fm/Fa	3,9	10,1	7,3	3,0	7,6	12,9	15,0	16,5	10,7	4,7	3,0	4,1	
	Ve/Va	3,0	8,0	7,4	2,8	7,0	11,7	17,6	17,8	11,9	5,0	3,0	3,4	
1991/92	C(mg/l)			15,8	26,2	24,3	20,6	25,6	13,3				(22,6)	
	Fm			3936	4162	4259	5161	9214	3915				(47627)	
Dja à Bi														
1990/91	C(mg/l)	14,4	15,8	10,0				21,0	13,0				(16,5)	
	Fm	2367	9736	6038				32075	14032				(6,9)	
Légende :														
C : concentration moyenne mensuelle en mg/l														
F : Flux particulaire en tonnes ; m : mensuel ; a : annuel														
V : volume écoulé en m ³ ; m : mensuel ; a : annuel														
Fm/Fa et Vm/Va : contribution mensuelle en %														
() : valeur estimée														

varie très peu, elle diminue rapidement à 15 g.m^{-3} . Elle passe à 16 g.m^{-3} en juillet pour un débit de $25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ avant de remonter avec le débit jusqu'en septembre à 17 g.m^{-3} pour un débit de $100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Elle évolue ensuite en sens inverse du débit qui continue à augmenter jusqu'au maximum de novembre ($150 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) où elle est de 14 g.m^{-3} . Elle garde cette valeur en dépit de la diminution du débit qui passe à $25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. L'augmentation du débit de février à mars ($29 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) entraîne une croissance rapide des concentrations à une valeur (19 g.m^{-3}) proche de celle du début du cycle hydrologique.

Un premier constat se dégage de cette évolution des matières en suspension. Il concerne les maximas de concentrations observées dès la montée des eaux de la petite saison des pluies, plutôt qu'à la montée ou au maximum de crue de la grande saison des pluies comme sur le Mbam et la Sanaga d'une part, et sur le Ntem (chapitre 4) d'autre part. Un report au cycle précédent permet d'apporter quelques éléments d'interprétation. Le mois de mars 1990 ayant été très sec (son débit est de $13 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), les premières pluies responsables du passage de ce débit à $25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en avril, puis à $70 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en mai, ont nettoyé les particules déposées par le vent sur la voûte forestière et les matériaux détachés de la surface du sol qui, une fois véhiculés dans le cours d'eau, se sont ajoutés à ceux déjà existants et provenant de l'érosion des berges et de la remise en suspension des sédiments du lit.

En dehors de l'augmentation de la charge solide de mars à mai, et de la diminution des concentrations de mai à juillet, tout se passe comme si les concentrations étaient stationnaires durant le reste de l'année quelle que soit la variation des débits. Ce deuxième constat semble renforcer l'idée selon laquelle, sur le bassin du Dja à Somalomo, seules les premières pluies tombant après la grande saison de pluies auraient une action érosive. Cette tendance serait due à l'importance du couvert végétal et à l'atténuation de la petite saison sèche de juillet à août qui est plus marquée lorsqu'on va vers l'équateur, donc sur le Ntem où l'érosion est plus intense à partir du mois d'août. On pense qu'en amont du Dja, pendant la petite saison sèche, la surface du sol ne dessèche pas suffisamment de façon à être vulnérable par les pluies d'août-septembre, d'où l'augmentation peu sensible des concentrations des matières pendant cette période. En outre, de septembre à novembre, comme les débits augmentent sans s'accompagner d'un apport de matériaux, le phénomène de dilution entraîne la baisse des concentrations.

De décembre à février, avec la diminution des débits et la stabilité des concentrations, tout se passe comme si l'érosion du lit et des berges se manifestait de façon constante.

L'augmentation de la charge particulaire de février à mars est le résultat d'un apport de matériaux des versants suite aux premières pluies qui sont à l'origine de la montée un peu précoce des eaux survenue dès la fin du mois de février. Cet accroissement rapide de la charge solide vient une fois de plus appuyer l'hypothèse d'une érosion plus forte dès la fin de la grande saison sèche.

Afin de comprendre davantage les régimes de matières particulaires, on a calculé la contribution de chaque mois au flux annuel exporté en 1990/91 (tableau 6-2). Nous avons représenté sur la figure 6-2 les pourcentages mensuels des flux particulaire et hydrique annuels. Cette figure montre une participation des mois d'avril, mai, août, septembre et mars plus élevée au flux particulaire qu'au flux hydrique. C'est en effet au cours de ces mois que l'érosion des versants est intense. Par ailleurs, pendant les hautes eaux (octobre et novembre), on note une contribution comparable des tonnages exportés et des volumes écoulés.

Le bilan de transport solide du cycle 1990/91 est de 36.10^3 t, soit un transport spécifique de $6,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. En le considérant comme étant le plus précis des 3 cycles en raison du nombre élevé d'observations et de la méthode d'évaluation de flux (4-1), on peut dire que celui de l'année 1989/90 (25.10^3 t, soit un transport spécifique de $4,6 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) est d'environ 30 % plus faible. Par contre, celui du cycle 1991/92, évalué à 48.10^3 t, soit un transport spécifique de $8,7 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$, est de l'ordre de 35 % plus élevé. Pour expliquer ces différences, on s'est reporté aux périodes de mesures et aux interprétations données ci-dessus. On peut alors déduire que la faible valeur de la première campagne est due aux lacunes d'observations de début des crues secondaires et principales, seules périodes au cours desquelles on a pu déceler un apport de matériaux provenant des versants. En revanche, la forte valeur de la dernière campagne semble avoir été surestimée en l'absence des observations de la période d'étiage principal (janvier-février).

En règle générale, malgré les lacunes d'observation, les résultats du transport spécifique particulaire traduisent une érosion faible, liée certainement au fait que le bassin versant du Dja à Somalomo est une réserve forestière protégée, et par conséquent peu anthropisée.

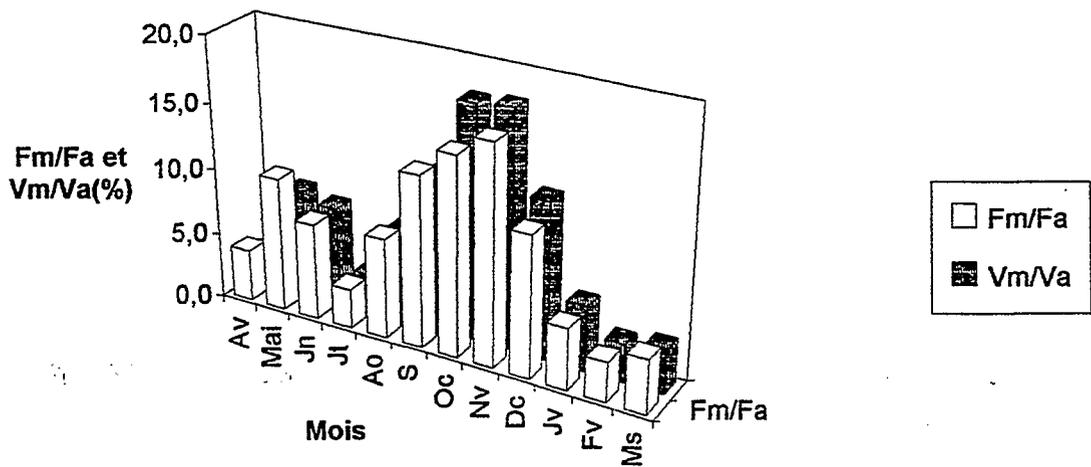


Figure 6-2 : Dja à Somalomo (1990/91) : Contributions mensuelles en pourcentage aux flux annuels particulaire et hydrique

Légende :

Fm : Flux particuliers mensuels ; Fa : Flux annuels en tonnes ;

Vm : Volume écoulé mensuel ; Va : Volume annuel en m³.

Le Dja à Bi

Les observations du transport de matières en suspension sur le Dja à Bi n'ont couvert que la période d'avril à décembre 1990.

Les concentrations varient entre 8 à 25 g.m⁻³. La teneur moyenne des matières en suspension est de 15,3 g.m⁻³, avec un écart-type de 4,6 et un coefficient de variation de 30 %.

Les concentrations moyennes mensuelles pondérées par les débits et les flux correspondants sont donnés dans le tableau 6-2. Ce tableau indique une faible variation de la charge solide d'avril à mai (de 14,4 à 15,8 g.m⁻³) en dépit de l'augmentation des débits (de 64 à 238 m³.s⁻¹). Puis, alors que le débit reste quasiment constant de mai à juin, la charge en suspension décroît jusqu'à 10 g.m⁻³. Pour le reste des observations, on peut juste noter que la teneur de la charge en suspension de novembre est le double de celle de juin, le débit ayant également évolué dans la même proportion. Elle décroît avec le débit de novembre à décembre où la concentration est de 13 g.m⁻³ pour un débit de 418 m³.s⁻¹.

Globalement, en dépit des lacunes d'observations à Bi, l'allure générale de la charge en suspension en fonction des débits suit celle de Somalomo, à la différence que les concentrations des hautes eaux secondaires sont plus faibles à Bi qu'à Somalomo. A l'inverse, celles des hautes eaux principales sont plus fortes à Bi qu'à Somalomo. On peut lier cette différence à l'ampleur que prend déjà la petite saison sèche et au couvert végétal moins dense sur le bassin intermédiaire du Dja.

Le flux particulaire a été évalué à 134.10³ t à Bi, soit un transport spécifique de 6,9 t.km⁻².an⁻¹. Bien que proche de la dégradation trouvée pour le même cycle à Somalomo, cette valeur semble sous-estimée pour deux raisons :

- d'une part, elle ne prend pas en compte la montée des hautes eaux principales qui contribuent pour près de 40 % aux tonnages annuels exportés à Somalomo ;
- et d'autre part, à cause des régions de Sangmélina, Djoum et Zoétéélé qui, comme nous l'avons signalé au premier chapitre, sont soumises à l'action de l'homme et comportent par conséquent beaucoup plus de surfaces hors couvert végétal favorables à l'érosion mécanique.

Le Dja à Moloundou-SOTREF

Les observations des matières en suspension à Moloundou-SOTREF sur le Dja couvrent la période d'avril 1989 à novembre 1991. Au total, quatre-vingt-dix-huit (98) échantillons ont été prélevés mais sont inégalement répartis sur les 3 cycles hydrologiques. En raison de la régularité des mesures 1990/91, nous axerons nos analyses sur les résultats de ce cycle, sans toutefois négliger ceux des deux autres.

Le tableau 6-3 donne les teneurs moyennes et extrêmes de la charge en suspension par campagne de mesures.

Tableau 6-3 : Dja à Moloundou-SOTREF (1989-1992) : Concentrations moyennes et extrêmes des matières en suspension en mg.l^{-1}

Année	Moyenne	ET	CV	Maxi	Mini	N
1989/90	21	7,6	36,2	36,8	7,2	24
1990/91	26,8	9	33,6	53	14,4	44
1991/92	40,2	11,2	27,9	63,1	10	30

Légende :

Moy : moyenne ; ET : écart-type ; CV : coefficient de variation ; Maxi : maximum ; Mini : minimum ; N : nombre d'échantillons.

La concentration maximale de la charge solide est de $63,1 \text{ g.m}^{-3}$. Elle a été observée le 03/08/1991. La concentration minimale ($7,2 \text{ g.m}^{-3}$), a été observée le 05/03/1990. La teneur moyenne des matières sur les 3 cycles est $29,3 \text{ g.m}^{-3}$. Au vu de l'ensemble des valeurs, on peut dire que la variabilité des teneurs de la charge en suspension sur le Dja est plus forte à Moloundou-SOTREF qu'à Somalomo.

Pour ce qui est du cycle hydrologique 1990/91, les concentrations moyennes mensuelles, calculées en les pondérant par les débits et les flux correspondants sont reportés dans le tableau 6-4. De la figure 6-3 représentant leur évolution en fonction des débits se dégagent les commentaires ci-dessous.

D'avril à mai, la charge en suspension croît de 22 à $34,7 \text{ g.m}^{-3}$ en même temps que le débit qui passe du simple ($160 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) au double ($328 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). Puis elle décroît jusqu'en

Tableau 6-4 : Concentrations moyennes et flux mensuels du Dja à Moloundou-SOTREF

Dja à Moloundou-SOTREF (1989-1992) : Concentrations moyennes et flux mensuels														
Cycle		Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	Annuel
1989/90	C	24,1		29,3					23,2	27,9	21,6	17,4	11,4	(23,4)
	Fm	7664		26488					68376	46049	17624	9576	4421	(332796)
1990/91	C	22,0	34,2	24,4	20,6	36,2	38,4	33,0	26,0	30,8	27,4	21,3	18,6	37,4
	Fm	9138	29519	24305	10177	41929	75207	84036	81919	55546	26283	11610	8796	458465
	Fm/Fa	2,0	6,4	5,3	2,2	9,1	16,4	18,3	17,9	12,1	5,7	2,5	1,9	
	Ve/Va	2,7	5,6	6,5	3,2	7,5	12,8	16,6	20,5	11,7	6,2	3,5	3,1	
1991/92	C	37,8	42,3	43,4	42,5	40,6	38,3	37,0	38,2					(39,8)
	Fm	31530	52621	77127	46434	48681	64140	86536	78696					(573480)
Légende :														
		C : concentration moyenne mensuelle en mg/l												
		F : Flux particulaire en tonnes ; m : mensuel ; a : annuel												
		V : volume écoulé en m3 ; m : mensuel ; a : annuel												
		Fm/Fa et Vm/Va : contribution mensuelle en %												
		() : valeur estimée												

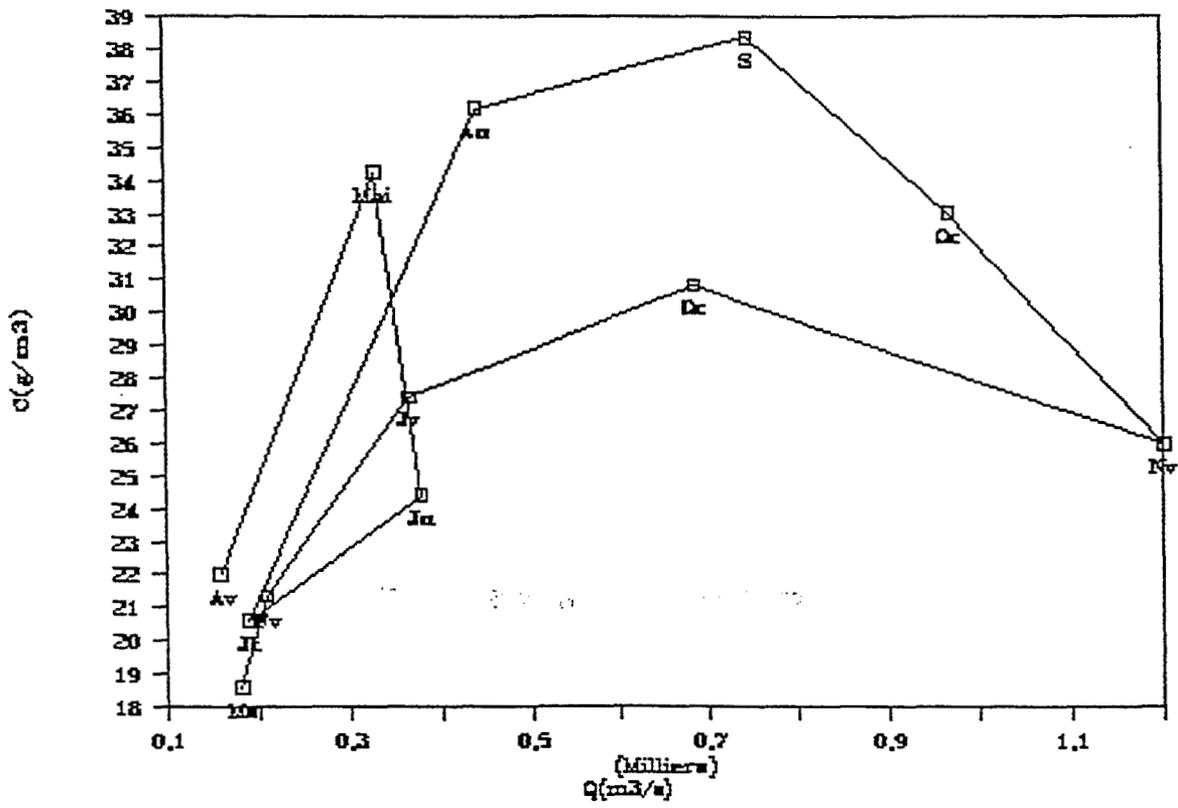


Figure 6-3 : Dja à Moloundou-SOTREF (1990/91) : Evolution de la charge solide mensuelle en fonction de débit

juillet (19 g.m^{-3}) alors que le débit continue à augmenter jusqu'en juin ($378 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) avant de diminuer le mois suivant ($188 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$).

A partir de juillet, la teneur en charge solide augmente rapidement avec le débit et ce jusqu'en septembre (37 g.m^{-3} pour un débit de $746 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). Alors que le débit continue à monter vers son maximum de novembre ($1200 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), la concentration baisse à 26 g.m^{-3} . Elle garde cette valeur constante pendant la décrue jusqu'en janvier avant de baisser à nouveau pour atteindre 18 g.m^{-3} pour un débit de $180 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en mars.

De l'évolution saisonnière de la charge solide, on note l'existence de deux maxima (en mai et septembre) et deux minima (en juillet et mars) de concentrations des matières en suspension. La relation entre la charge particulaire véhiculée par le Dja et les versants qu'il draine peut-être expliquée de la manière suivante :

- La montée de crue des moyennes eaux s'accompagne d'un apport de matériaux arrachés des versants dénudés par les premières pluies tombant après la grande saison sèche. Compte tenu du temps de transfert des zones de production en amont vers l'exutoire de Moloundou-SOTREF en aval, le maximum est observé en mai (un mois après celui de Somalomo), soit un mois avant celui du débit.

- Le minimum de la charge en suspension observé en juillet, est en phase avec le débit d'étiage. Les substances proviennent essentiellement de l'érosion de berges et du lit.

- L'augmentation de la charge solide de juillet à son maximum de septembre (deux mois avant celui du débit) traduit, comme pour les moyennes eaux, un apport supplémentaire de matériaux arrachés des versants. En ce qui concerne la baisse des concentrations de septembre à novembre, elle s'explique par une montée des eaux qui se poursuit sans apports de particules, les premiers écoulements superficiels les ayant toutes transportées. Par conséquent, les écoulements qui suivent ont plutôt un effet de dilution sur les matériaux déjà existants.

- Cette baisse de concentrations se poursuit pendant la décrue jusqu'à son minimum qui coïncide avec le débit d'étiage principal en mars. Comme on l'a dit pour l'étiage secondaire, les matériaux de l'étiage principal proviennent également de l'érosion des berges et du lit.

En règle générale, on peut dire que l'évolution de la charge en suspension à Moloundou-SOTREF sur le Dja suit, avec un ou deux mois de retard, celle du Dja à

Somalomo. Ce décalage est imputé à la propagation de l'onde de crue des moyennes et des hautes eaux dont les maxima sont observés un mois plus tôt à Somalomo.

La figure 6-4 représente la contribution mensuelle au flux particulaire et au volume écoulé annuels. Elle montre que pendant la montée des eaux, la contribution en pourcentage du flux particulaire mensuel est supérieure à celle du flux hydrique pour un même mois. Cette tendance est inversée au maximum de crue et en décrue.

Le flux particulaire exporté à Moloundou-SOTREF par le Dja en 1990/91 est de 458.10^3 t, soit un transport spécifique de $11,8 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Les tonnages respectifs des cycles 1989/90 et 1991/92 sont évalués à 333.10^3 t, soit un transport spécifique de $8,4 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$, et à 573.10^3 t, soit un transport spécifique $14,4 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Comme nous l'avons vu sur le Dja à Somalomo, comparativement au flux du cycle 1990/91, celui de la première campagne est faible tandis que celui de la dernière est élevé et ce dans les proportions respectives de 29 et 22 %.

En se reportant une fois de plus aux périodes d'observations, il semble que le transport spécifique est sous-estimé pour la première campagne de mesures à cause des lacunes d'observations d'août à octobre (montée des hautes eaux principales), la participation de ces 3 mois au flux annuel étant de 45 % en 1990/91. Par contre, l'absence des observations de janvier à mars (période d'étiage), mois dont la participation au flux annuel a été de 15 % en 1990/91, a certainement contribué à une surestimation de flux pour la dernière campagne.

Par ailleurs, si les flux à Somalomo et à Moloundou-SOTREF ont varié dans les mêmes proportions de la première à la deuxième campagne (30 %), on note une réduction des écarts de variation entre la deuxième et la troisième campagne sur la station en aval (22 % contre 34 % à Somalomo). Au vu de l'ordre de grandeur des différents flux et leurs variations, on peut confirmer que le tonnage particulaire exporté par le Dja à Bi a été sous-estimé. En outre, l'intensité de l'érosion mécanique sur le bassin du Dja semble augmenter d'un facteur 2 de l'amont (Somalomo) vers l'aval (Moloundou-SOTREF), ce qui confirme l'hypothèse d'une grande participation du bassin intermédiaire, notamment des régions de Sangmélina, Djoum et Zoétélé où l'anthropisation est plus accentuée.

En définitive, le suivi temporel des substances particulières sur le bassin fluvial du Dja semble indiquer une constance des processus d'érosion à l'issue des 3 campagnes, en dépit bien sûr des lacunes d'observations. En revanche, à l'échelle spatiale, on note une érosion plus faible en amont qu'en aval. Cette augmentation semble liée au degré de

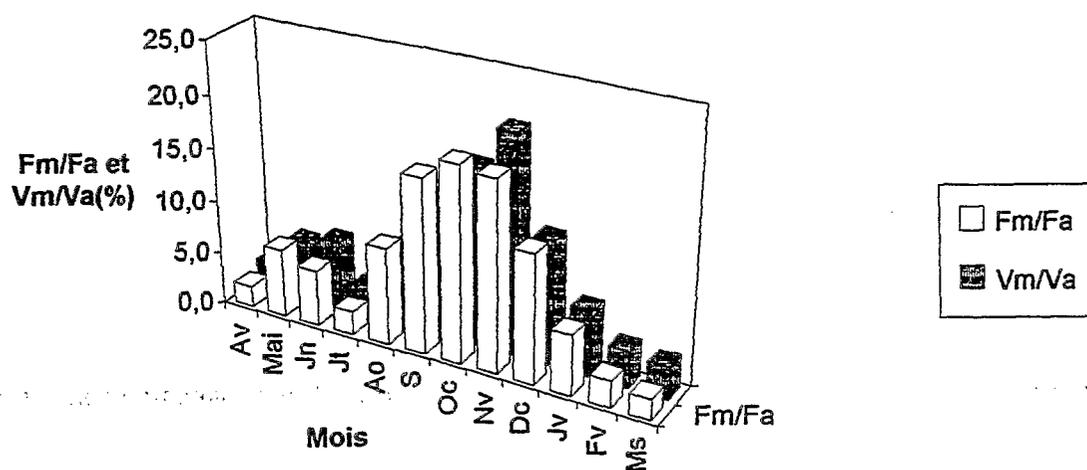


Figure 6-4 : Dja à Moloundou-SOTREF (1990/91) : Contributions mensuelles en pourcentage aux flux annuels particulaire et hydrique

perturbations de certaines zones par les activités humaines. Néanmoins, en dépit de la différence des taux de dégradation spécifique, on note que le transfert de matériaux des entités de production en amont vers l'exutoire du bassin à Moloundou-SOTREF suit, avec un décalage d'un à deux mois, le régime des débits, donc des précipitations.

D'autre part, l'évolution des concentrations pendant la grande saison de pluies est semblable à celle décrite sur le Mbam et la Sanaga (NOUVELOT, 1972 et OLIVRY, 1977) et à celle des autres cours d'eau tropicaux (CARRE, 1972; GAC, 1980; GAC et al, 1987; OLIVRY et al, 1988 et ORANGE, 1990). Elle est différente de celle observée sur le Ntem. Par contre, le transport spécifique sur le Dja à Moloundou-SOTREF en 1990/91 est inférieur à ceux trouvés sur le Mbam et la Sanaga et voisin de ceux trouvés sur le Ntem à Ngoazik et à Nyabessan en 1981/82 et 1982/83. Ceci signifie donc que, malgré la différence de variabilité spatio-temporelle observée sur le Dja et le Ntem, l'intensité d'érosion est en définitive la même, sans doute en raison de leur appartenance à une même zone géographique.

6.1.2. LE BASSIN VERSANT DE LA BOUMBA

Les observations de matières en suspension ont été effectuées sur la Boumba aux stations hydrométriques de Biwala en amont et de Moloundou-Bac en aval. Parallèlement, entre ces deux stations et dans l'axe Yokadouma-Moloundou, nous avons prélevé quelques échantillons sur 3 de ses affluents, à savoir la Bidjar à Bandekok, la Bangué à Bangué et la Lokomo à Lokomo.

Dans ce qui suit, nous analyserons dans un premier temps les résultats obtenus à Biwala. Puis, avant d'analyser ceux de Moloundou-Bac, nous ferons une estimation des apports particuliers des affluents de la Boumba en aval de Biwala.

La Boumba à Biwala

Les observations des matières en suspension sur la Boumba à la sortie de Biwala ont porté sur les cycles hydrologiques 1990/91 et 1991/92. Au total, quarante-six (46) échantillons ont été prélevés dont 28 couvrent entièrement le premier cycle cité et 18 le second.

On donnera d'abord quelques caractéristiques sur l'ensemble des résultats des deux campagnes de mesure. Le tableau 6-5 représente les concentrations moyennes et extrêmes de la charge en suspension.

Tableau 6-5 : Boumba à Biwala (1990-1992) : Concentrations moyennes et extrêmes des matières particulaires en mg.l^{-1}

Année	Moy (mg/l)	ET	CV (%)	Maxi (mg/l)	Mini (mg/l)	N
1990/91	35,7	19,1	53,5	104	15,3	28
1991/92	48,9	18,9	38,6	84,4	15,5	18

Légende :

Moy : moyenne ; ET : écart-type ; CV : coefficient de variation ; Maxi : maximum ; Mini : minimum ; N : nombre d'échantillons.

Il ressort que la concentration maximale, observée le 31/08/1990, est de 104 g.m^{-3} tandis que la concentration minimale, observée le 17/03/91, est de $15,3 \text{ g.m}^{-3}$. La concentration moyenne sur les deux cycles d'observation est de $42,3 \text{ g.m}^{-3}$.

Le tableau 6-6 regroupe les concentrations moyennes mensuelles et les flux correspondants. Nous avons reporté sur la figure 6-5 l'évolution des concentrations moyennes mensuelles du cycle 1990/91 en fonction des débits. Elle a la même allure générale que celle rencontrée sur le Dja à Moloundou-SOTREF. Mais, quelques variantes méritent d'être relevées :

- La première porte sur l'absence des concentrations maximale et minimale des moyennes et des basses eaux secondaires respectivement. En effet, pendant la petite saison des pluies, la concentration augmente de 32 g.m^{-3} en avril à 48 g.m^{-3} en juillet tandis que le débit, après un passage du simple au double en mai ($83 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), se stabilise autour de cette valeur jusqu'en juillet. Le petite saison sèche, moins marquée dans ce bassin, pourrait expliquer cette augmentation continue des concentrations.

- La deuxième concerne l'augmentation rapide de la charge solide avec le débit de juillet à août où elle atteint une teneur de 104 g.m^{-3} pour un débit de $127 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Cette valeur, bien que forte du fait qu'elle est ponctuelle, rend néanmoins compte de l'intensité de l'érosion en début de la montée des hautes eaux principales. Elle précède de deux mois le maximum de débit observé en octobre.

En dehors de ces différences, la suite de l'évolution, à savoir de septembre à mars, est quasiment identique à celle décrite sur la Dja à Moloundou-SOTREF.

Tableau 6-6 : Concentrations moyennes et flux mensuels de la Boumba à Biwala

Boumba à Biwala (1990-1992) : Concentrations moyennes et flux mensuels														
Cycle		Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	Annuel
1990/91	Cm	32,4	37,4	38,3	49,5	104,0	47,8	42,3	44,5	32,5	21,7	18,6	19,7	44,5
	Fm	3590	8135	7416	8646	34711	20479	28998	26659	12059	4577	2510	2259	160039
	Fm/Fa	2,2	5,1	4,6	5,4	21,7	12,8	18,1	16,7	7,5	2,9	1,6	1,4	
	Vm/Va	3,1	6,1	5,4	4,9	9,3	11,9	19,1	16,7	10,3	5,9	3,8	3,2	
1991/92	Cm	62,2	51,0	49,1	38,4	40,0	53,4	74,8	24,5					(50,8)
	Fm	13387	12047	16899	11405	17958	35647	61724	14487					(222563)
	Légende :													
		Cm : concentration moyenne mensuelle en mg/l												
		F : flux particulaire en tonnes ; m : mensuel ; a : annuel												
		V : Volume écoulé en m3 ; m : mensuel ; a : annuel												
		Fm/Fa et Vm/Va : contribution mensuelle aux flux annuels en %												
		() : valeur estimée												

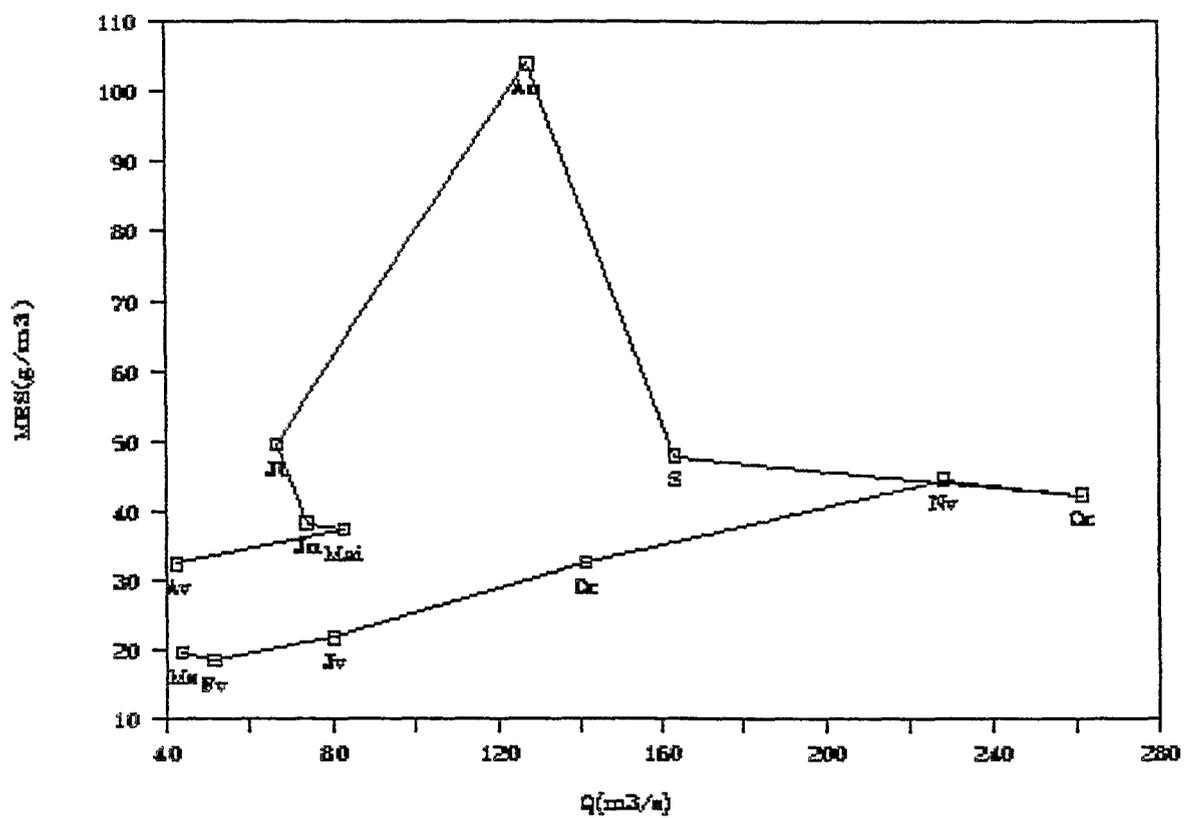


Figure 6-5 : Boumba à Biwala (1990/91) : Evolution de la charge solide mensuelle en fonction du débit

Il convient cependant de signaler que les concentrations des substances solides provenant de l'érosion des berges et du lit sont plus élevées sur la Boumba (20 à 30 g.m⁻³).

La figure 6-6 représente la contribution mensuelle aux flux particulaire et hydrique annuels. D'avril à mai, les proportions mensuelles d'apports en éléments solides et en écoulements au total annuel sont comparables. Sauf en août, son pourcentage de participation au flux particulaire (22 %) est plus du double de celui de l'écoulement. Par contre, pendant la décrue et l'étiage principal (décembre à mars), en proportion mensuelle les apports hydriques sont supérieurs aux apports particuliers. La contribution de ces mois au flux solide est d'environ 15 %.

Les flux annuels des matériaux exportés en suspension à Biwala par la Boumba sont de 160.10³ t en 1990/91, soit un transport spécifique de 15,5 t.km².an⁻¹ et 223.10³ t en 1991/92, soit un transport spécifique de 21,6 t.km².an⁻¹.

Le flux du cycle hydrologique 1991/92 est de 28 % plus élevé que celui de la campagne 1990/91. Comme sur le Dja à Somalomo et à Moloundou-SOTREF, le manque de mesure de matières en décrue et en étiage (décembre à mars) pourrait expliquer cette surestimation de flux. Par contre, comparativement aux résultats obtenus à ces deux stations du Dja en 1990/91, on constate que le transport spécifique de ladite année sur la Boumba est plus élevé (15,5 contre 6,8 et 11,8 t.km⁻².an⁻¹). Il suppose de ce fait une érosion plus intense sur les versants qu'elle draine. En effet, la forte activité humaine dans la région de Yokadouma et l'intervention de la société ZAPI-Est appuient cette hypothèse. Elle est d'ailleurs renforcée par le fait que les mois de fortes concentrations correspondent ou suivent ceux de la préparation des champs aux semis.

En somme, en plus des variantes relevées plus haut, on note que l'érosion mécanique est plus accentuée sur le bassin de la Boumba à Biwala que sur celui de Dja. Dans ce qui suit, on verra si elle se fait de façon continue sur tout le bassin.

La Bidjar à Bandekok, la Bangué à Bangué et la Lokomo à Lokomo

Compte tenu du caractère particulier de la zone de Mikel (vallée de la Bangué-Lokomo) développé aux premier et second chapitres, on ne saurait passer directement à l'analyse des résultats obtenus à Moloundou-Bac, sans avoir auparavant parlé de ceux des rivières drainant l'axe Yokadouma-Moloundou. Le tableau 6-7 donne les

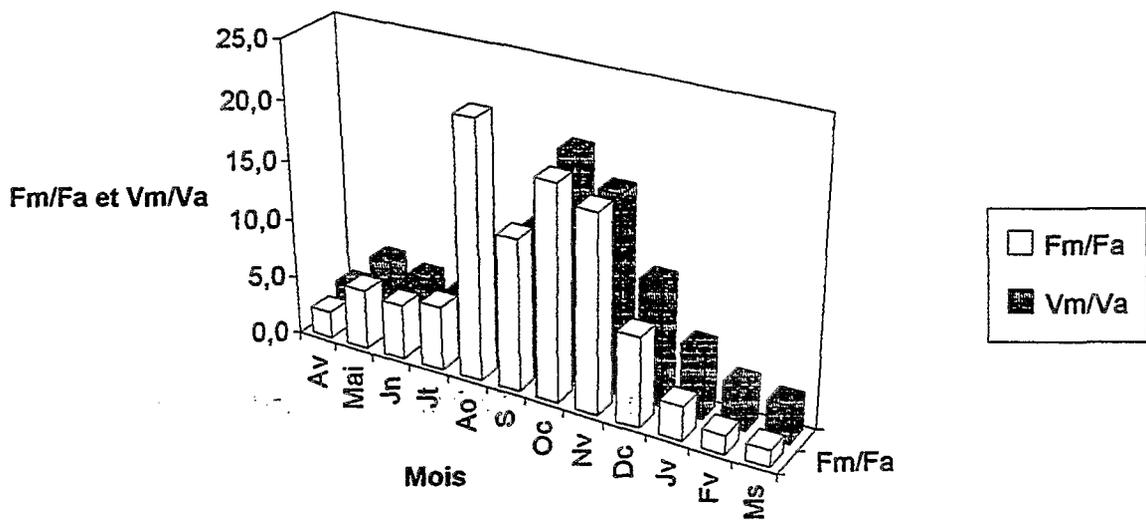


Figure 6-6 : Boumba à Biwala (1990/91) : Contributions mensuelles en pourcentage aux flux annuels particulaire et hydrique

caractéristiques des concentrations des matières en suspension sur les 3 bassins d'avril à novembre 1991.

Tableau 6-7 : Concentrations moyennes et extrêmes des matières particulaires (mg.l^{-1}) des tributaires de la Boumba en aval de Biwala en 1991/92

Rivière	Moy (mg/l)	ET	CV (%)	Maxi (mg/l)	Mini (mg/l)	N
Bidjar	26,9	14	52	53,3	12,3	6
Bangué	37	18,1	48,9	59,3	12,4	6
Lokomo	19,7	8,41	42,7	32	6	6

Légende :

Moy : moyenne ; ET : écart-type ; CV : coefficient de variation ; Maxi : maximum ; Mini : minimum ; N : nombre d'échantillons.

La première remarque concerne les dates d'observation des concentrations extrêmes. Elles sont les mêmes sur les 3 rivières, à savoir le 25/04/1991 pour la concentration minimale et le 06/06/1991 pour la maximale. On peut également noter que la plus forte concentration a été mesurée sur la Bangué ($59,3 \text{ mg.l}^{-1}$) et la plus faible sur la Lokomo (6 mg.l^{-1}). Les concentrations moyennes sont de $26,9 \text{ mg.l}^{-1}$ sur la Bidjar, de 37 mg.l^{-1} sur la Bangué et de $19,7 \text{ mg.l}^{-1}$ sur la Lokomo.

En marge des caractéristiques de ces teneurs de la charge en suspension, il nous a paru important de donner un ordre de grandeur du transport spécifique correspondant, et ce à partir du débit spécifique mesuré à Moloundou-Bac sur la Boumba, évidemment à défaut des mesures hydrologiques sur les 3 rivières. L'intérêt de cette reconstitution est de se faire une idée sur le comportement hydrochimique de cette partie du bassin à pluviométrie déficitaire et d'évaluer sa contribution au transport solide sur la Boumba à l'exutoire de Moloundou-Bac.

Les calculs aboutissent à un flux de $1,74.10^3 \text{ t}$, soit un transport spécifique de $10,7 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur la Bidjar, de 45.10^3 t , soit un transport spécifique de $13,8 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur la Bangué et de $18,2.10^3 \text{ t}$, soit un transport spécifique de $6,98 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur la Lokomo.

Il ressort de ces évaluations des transports spécifiques particulières que l'érosion est plus intense sur la Bangué que sur la Lokomo. Cette différence s'explique par le fait que la

Bangué draine les régions anthropisées de Yokadouma tandis que la Lokomo draine les zones faiblement peuplées de Béla-Lipongo.

La Boumba à Moloundou-Bac

Les observations de matières en suspension sur la Boumba à Moloundou-Bac couvrent la période d'avril 1989 à novembre 1991. La répartition des 77 échantillons traités est de 16 (1989/90), 25 (1990/91) et 36 (1991/92).

Le tableau 6-8 donne les concentrations moyennes et extrêmes par cycle d'observation. La concentration maximale est de 68 mg.l^{-1} . Elle a été mesurée le 03/08/1991, en l'occurrence le même mois que celui de l'observation de la forte concentration (104 g.m^{-3}) à Biwala.

Tableau 6-8 : Boumba à Moloundou-Bac (1989-1992) : Concentrations moyennes et extrêmes des matières particulaires en mg.l^{-1}

Année	Moy (mg/l)	ET	CV (%)	Maxi (mg/l)	Mini (mg/l)	N
1989/90	23,7	11,6	49	56,1	6,67	16
1990/91	29,4	11,8	40,1	58,9	12,5	25
1991/92	39	13,1	33,6	68,3	10,3	36

Légende :

Moy : moyenne ; ET : écart-type ; CV : coefficient de variation ; Maxi : maximum ; Mini : minimum ; N : nombre d'échantillons.

Il en est de même pour la concentration minimale ($6,6 \text{ mg.l}^{-1}$), observée le 31/03/90. La concentration moyenne est de $30,7 \text{ mg.l}^{-1}$.

Pour ce qui est du cycle 1990/91, on a regroupé dans le tableau 6-9 les concentrations moyennes mensuelles et les flux correspondants. la figure 6-7 représente leur évolution en fonction des débits. Elle montre que la courbe a la même allure que celle de Biwala. Cependant, une analyse plus détaillée permet de relever des différences.

Tableau 6-9 : Concentrations moyennes et flux mensuels de la Boumba à Moloundou-Bac

Tableau 6-10 : Boumba à Moloundou-Bac (1989-1992) : Concentrations moyennes et flux mensuels														
Cycle		Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	Annuel
1989/90	Cm	23,3		47,6					20,0	27,0	24,3	15,4	6,6	(24,4)
	Fm	6429		27594					31989	30930	10807	4645	1287	(220509)
1990/91	Cm	22,3	37,1	39,4	19,6	58,9	34,1	30,6	33,7	34,0	26,0	25,4	18,3	33,7
	Fm	5755	18319	23172	5460	41174	37638	49698	62617	42144	14691	7196	4955	312820
	Fm/Fa	1,8	5,9	7,4	1,7	13,2	12,0	15,9	20,0	13,5	4,7	2,3	1,6	
	Vm/Va	2,5	5,3	6,3	3,0	7,5	11,9	17,5	20,0	13,4	6,1	3,1	2,9	
1991/92	Cm	26,7	40,0	44,1	40,1	48,5	40,3	32,3	27,0					(38,1)
	Fm	13253	29015	50463	26331	37193	43309	48369	38805					(352487)
Légende :														
		Cm : concentration moyenne mensuelle en mg/l												
		F : flux particulaire en tonnes ; m : mensuel ; a : annuel												
		V : Volume écoulé en m ³ ; m : mensuel ; a : annuel												
		Fm/Fa et Vm/Va : contribution mensuelle aux flux annuels en %												
		() : valeur estimée												

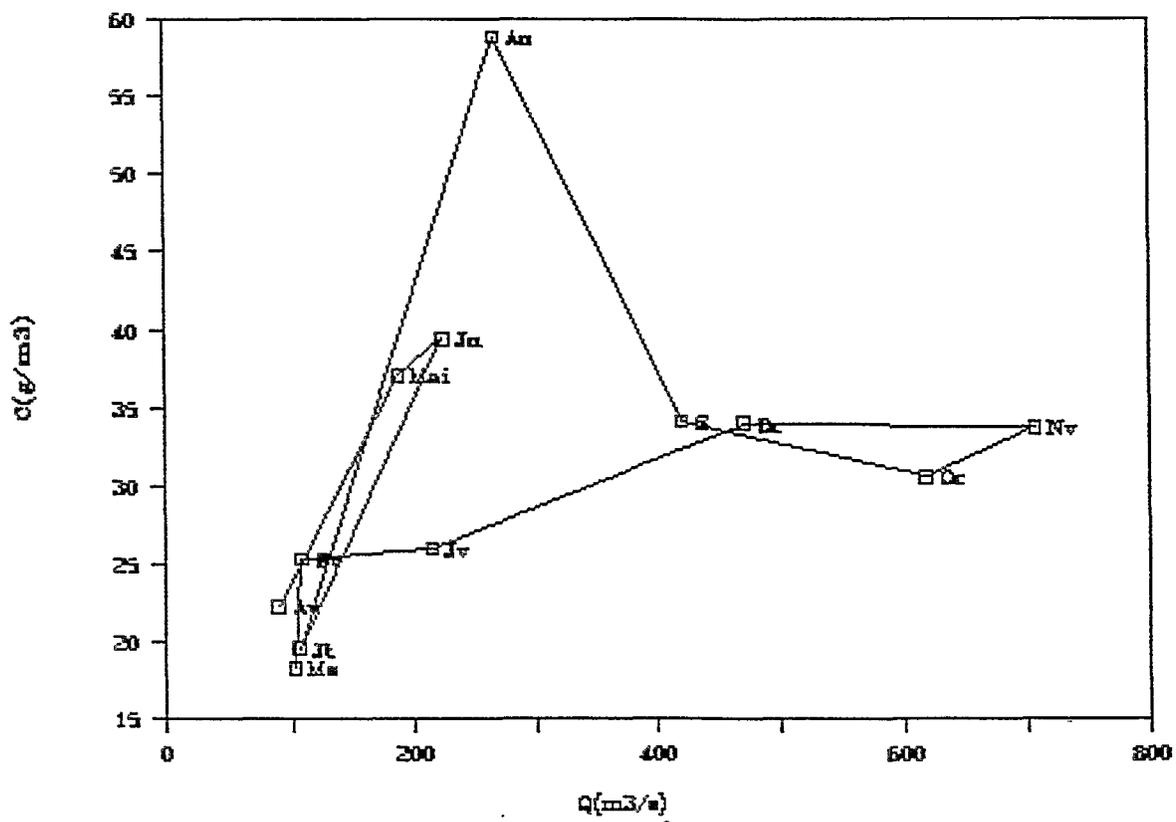


Figure 6-7 : Boumba à Moloundou-Bac (1990/91) : Evolution de la charge solide mensuelle en fonction du débit

Il s'agit de l'apparition à Moloundou-Bac d'une part, d'un maximum de concentration en mai-juin (42 g.m^{-3} pour un débit de $224 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), lié à la petite saison des pluies, et d'autre part, d'un minimum en juillet ($19,6 \text{ g.m}^{-3}$ pour un débit de $106 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) correspondant à l'étiage secondaire. Les variantes relevées ici sont similaires à celles rencontrées sur le Dja entre Somalomo et Moloundou-SOTREF. Comme indiqué sur le Dja, elles sont également induites ici par l'accentuation de la petite saison sèche lorsqu'on va vers l'équateur.

Pour le reste, on peut rappeler que la concentration de la charge en suspension augmente rapidement avec le débit de juillet à août où elle atteint un maximum de 60 g.m^{-3} pour un débit de $266 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Puis, alors que le débit continue à augmenter, elle baisse à 35 g.m^{-3} en septembre, valeur qu'elle garde jusqu'au maximum de débit liquide en novembre ($706 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). Pendant la décrue, la concentration reste constante de novembre à décembre. Elle diminue ensuite jusqu'en mars où elle a une valeur voisine de celle de juillet ($18,4 \text{ g.m}^{-1}$ pour un débit de $103 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). Rappelons que le maximum de concentration précède de 2 mois celui du débit comme en amont et sur les stations du Dja.

Nous avons représenté sur la figure 6-8 les apports mensuels (en pourcentage) aux flux annuels particulaire et hydrique. L'allure générale de la variation des apports est analogue à celle décrite à Biwala.

Le pourcentage du flux particulaire du mois d'août est environ le double (14 %) de celui de l'écoulement, comme à Biwala. D'autre part, il y a égalité entre les proportions des flux particulaire et hydrique de novembre (20 %), comme ce fut également le cas pour le mois du maximum de débit (octobre) à Biwala, le décalage étant dû à la propagation de l'onde de crue.

L'évaluation des quantités de particules transportées par campagne de mesure aboutit à un flux de 221.10^3 t , soit un transport spécifique de $8,1 \text{ t.km}^2.\text{an}^{-1}$ pour le cycle 1989/90, de 313.10^3 t , soit un transport spécifique de $11,5 \text{ t.km}^2.\text{an}^{-1}$ pour le cycle 1990/91 et de 352.10^3 t , soit un transport spécifique de $12,9 \text{ t.km}^2.\text{an}^{-1}$ pour le cycle 1991/92.

Pour des raisons déjà évoquées au sujet des flux annuels à Somalomo et à Moloundou-SOTREF, on constate, par rapport au cycle 1990/91, que le flux du premier cycle étudié est sous-estimé de 30 % tandis que celui du dernier cycle est surestimé de 12 %. Il ressort que la sous-estimation du flux de la première campagne est identique à celle trouvés pour la même année à Somalomo et à Moloundou-SOTREF.

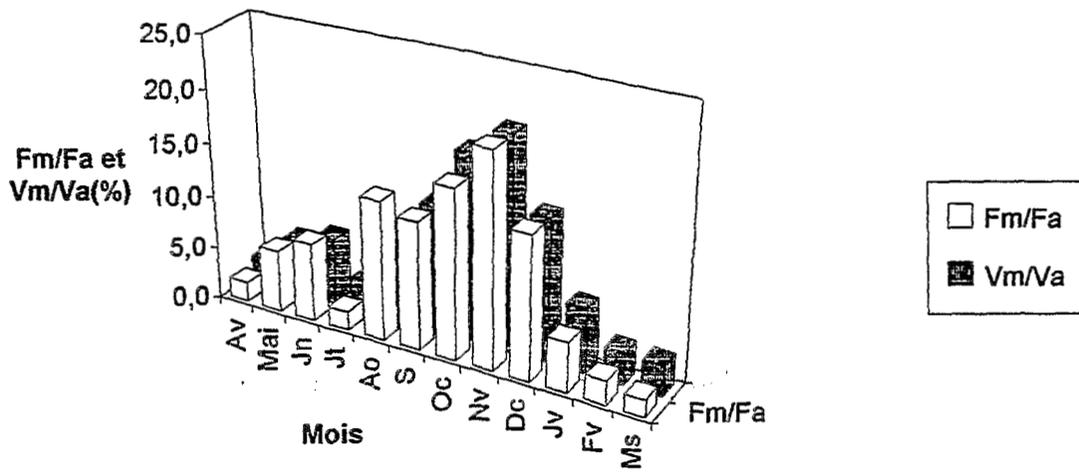


Figure 6-8 : Boumba à Moloundou-Bac (1990/91) : Contributions mensuelles en pourcentage aux flux annuels particulaire et hydrique

Par contre, l'erreur sur l'évaluation du flux de la dernière campagne à Moloundou-Bac est encore plus réduite que celle trouvée sur le Dja à Moloundou-SOTREF ; ce qui permet de dire, qu'en dépit du manque d'observations de décembre 1991 à mars 1992, le résultat trouvé est acceptable.

En considérant le cycle complet sur la Boumba à Biwala et à Moloundou-Bac, on constate que le transfert de matières en suspension des zones de production (région de Yokadouma) vers l'aval (Moloundou) fait ressortir une diminution du transport spécifique d'environ 25 %. Elle peut être imputée, non seulement au déficit pluviométrique de l'axe Yokadouma-Moloundou, mais aussi à la dilution par les affluents peu chargés mentionnés plus haut, auxquels s'ajoute la Bek qui draine un bassin peu anthropisé.

En résumé, le suivi des matières en suspension pendant le cycle hydrologique 1990/91, d'une part, sur le Dja à Somalomo et à Moloundou-SOTREF, et d'autre part, sur la Boumba à Biwala et à Moloundou-Bac montre aussi bien des similitudes que de variantes. Pour les similitudes, il s'agit principalement :

- de l'augmentation du transport particulaire en même temps que les débits en début des saisons de pluies ;
- du maximum de concentration qui précède de 2 mois celui de la crue principale ;
- des concentrations relativement élevées des substances provenant du sapement des berges et de l'érosion du lit qui semblent se manifester de façon constante en raison de la régularité des régimes hydrologiques ;
- du transport spécifique comparable aux exutoires en aval des deux bassins.

Les variantes de détail concernent :

- sur le bassin versant du Dja, l'augmentation de l'intensité de l'érosion hydrique de l'amont vers l'aval avec une forte participation du bassin intermédiaire (régions de Sangmélina et de Djoum) ;
- sur le bassin de la Boumba, la diminution de l'érosion hydrique de l'amont de Biwala (région de Yokadouma) vers l'aval, avec la dilution de la charge solide lors de son transfert par les eaux peu chargées des affluents de la partie intermédiaire du bassin.

6.1.3. LE BASSIN VERSANT DE LA NGOKO A MOLOUNDOU

Le suivi spatio-temporel des régimes de matières en suspension discuté ci-dessus a été mené jusque-là dans l'intérêt de mieux comprendre le comportement du milieu naturel drainé par la Ngoko à l'égard de l'érosion mécanique.

D'autre part, compte tenu du suivi plus régulier dont cette station a été l'objet du point de vue de la charge en suspension (95 échantillons) et du fait que celle-ci peut être moyennée dans le cours d'eau à partir du jaugeage solide, on tentera de reconstituer la charge solide des mois manquants à partir de la courbe de variation des débits solides tracée au regard de leurs homologues liquides. Cette reconstitution vise à dégager d'autres informations l'augmentation de la charge solide observée de la première à la dernière campagne sur le Dja et la Boumba.

Les teneurs en matière particulaire des jaugeages complets

Au total, vingt-deux jaugeages solides ont été réalisés sur la Ngoko à Moloundou. Le tableau 6-10 en donne les concentrations moyennes (C_j) ainsi que les charges des échantillons témoins (C_t) correspondants.

On observe que C_j varie entre $12,1 \text{ mg.l}^{-1}$ (mars 1990) et $56,6 \text{ mg.l}^{-1}$ (août 1990) tandis que C_t varie entre $12,8 \text{ mg.l}^{-1}$ (mars 1990) et $51,7 \text{ mg.l}^{-1}$ (août 1990).

La finalité des jaugeages solides étant la détermination de la concentration moyenne des substances particulières du cours d'eau correspondante aux matières contenues dans un échantillon ponctuel, il était nécessaire d'établir une relation entre les concentrations moyennes des jaugeages complets et celles des échantillons témoins

Cette relation, représentée sur la figure 6-9, est une régression linéaire d'équation :

$$C_j = 1,1096.C_t - 1,9710 \quad (6-1)$$

avec :

$n = 22$: taille de l'échantillon ;

$r^2 = 0,813$: coefficient de corrélation

Tableau 6-10 : Ngoko à Moloundou (1989-1992) : Jaugeages liquide et solide

Ngoko à Moloundou : Jaugeages complets				
Ref	DATE	Ql	Cj	Tj
		m3/s	mg/l	mg/l
1	12/11/88	1270	22,2	30,8
2	18/01/89	317	21,9	22,9
3	15/04/89	233	21,3	17,4
4	28/06/89	590	39,8	38,6
5	11/11/89	1750	25,3	28,8
7	31/01/90	462	24,0	23,5
8	31/03/90	204	12,1	12,8
9	14/05/90	495	41,1	40,6
10	15/08/90	620	56,6	51,7
11	01/11/90	1790	27,3	36,3
12	07/11/90	1830	27,5	33,9
13	31/01/91	388	30,1	25,1
14	18/03/91	268	19,6	18,9
15	26/04/91	579	45,8	39,5
16	07/06/91	1270	47,2	40,8
17	19/07/91	556	50,6	44,7
18	27/08/91	913	49,4	39,1
19	28/09/91	1230	19,7	20
20	05/10/91	1240	31,7	33,6
21	07/11/91	1310	34,3	27
22	15/11/91	1240	39,2	31,2
Légende :				
Cj : Concentration moyenne du jaugeage complet				
Tj : concétration de l'échantillon témoin				

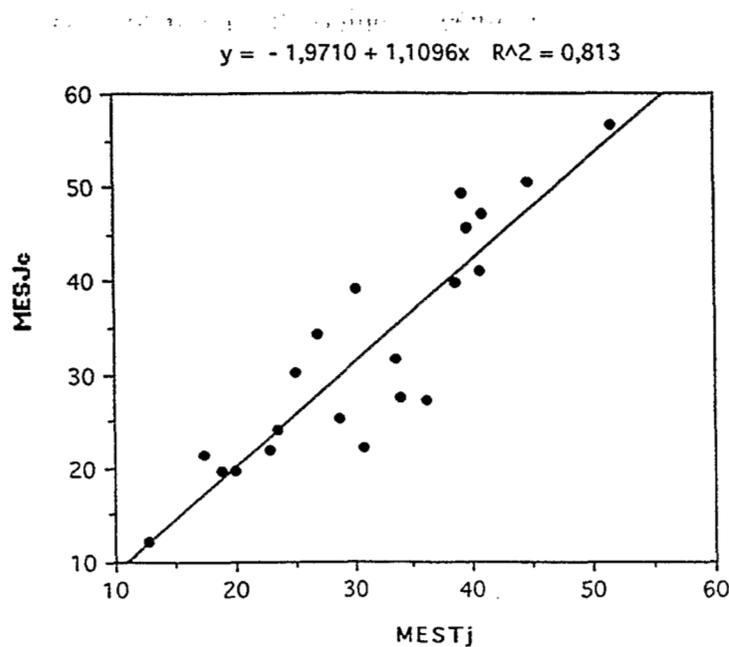


Figure 6-9 : Relation entre les teneurs moyennes de matières particulaires des jaugeages solides et celles des échantillons témoins

Cette relation est du même type que celle établie par NOUVELOT (1972) sur le Mbam à Goura. Elle permet de calculer la concentration moyenne (C_{jh}) dans la Ngoko relative à chaque échantillon hebdomadaire prélevé en surface.

La détermination de la concentration moyenne mensuelle de la charge particulaire sur la Ngoko est faite de la même manière que sur ses tributaires, à la différence qu'on inclut dans le calcul les concentrations des jaugeages complets.

On peut préciser pour terminer que les jaugeages complets, loin de se substituer aux prélèvements ponctuels et réguliers qui du reste constituent la meilleure méthode d'évaluation de flux particulaire, permettent de calculer leur concentration moyenne sur la section du cours d'eau.

Les régimes de matières en suspension

Le tableau 6-11 donne les concentrations moyennes et extrêmes pour les 3 cycles étudiés. La concentration maximale est de 71 mg.l^{-1} . Elle a été observée le 17/08/91, le même mois qu'à Biwala et à Moloundou-Bac. On peut en déduire une bonne correspondance de ces fortes concentrations de matières avec celles du mois d'août à Biwala. La concentration minimale, observée le 19/02/90, est de $5,4 \text{ mg.l}^{-1}$. La concentration moyenne est de $31,6 \text{ mg.l}^{-1}$. On note que les valeurs de l'écart-type et du coefficient de variation sont voisines de celles trouvées sur la Boumba à Moloundou-Bac.

Tableau 6-11 : Ngoko à Moloundou (1989-1992) : Concentrations moyennes et extrêmes des matières particulaires en mg.l^{-1}

Année	Moy (mg/l)	ET	CV (%)	Maxi (mg/l)	Mini (mg/l)	N
1989/90	21,7	8,45	38,9	39,8	5,4	18
1990/91	28,6	11,6	40,6	60	13,	27
1991/92	44,6	13,7	30,7	71	16	31

Légende :

Moy : moyenne ; ET : écart-type ; CV : coefficient de variation ; Maxi : maximum ; Mini : minimum ; N : nombre d'échantillons.

En raison du nombre réduit de lacunes d'observations des matières en suspension sur la

Ngoko (mai et septembre pour le cycle 1989/90 et de décembre à mars pour le cycle 1991/92), on a reconstitué graphiquement les charges solides correspondantes. Le tableau 6-12 regroupe les teneurs moyennes et les flux particuliers mensuels. La figure 6-10 représente l'évolution des concentrations en fonction des débits. Elle montre des courbes similaires à celles déjà décrites sur les stations en amont. Cependant, on relève une différence notable quant au sommet de la courbe du cycle 1989/90 situé plutôt en juin qu'en août comme sur les cycles suivants. En l'absence d'observation aux stations en amont pendant le mois d'août de la même année, il est difficile de porter une appréciation sur cette évolution.

Afin de suivre le transfert de matériaux des sous-bassins de la Ngoko ainsi que leur participation aux flux à la sortie de Moloundou, le cycle 1990/91 sera déjà discuté de façon plus détaillée.

On observe que la concentration croît avec le débit d'avril ($21,3 \text{ g.m}^{-3}$ et $259 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) à juin ($33,5 \text{ g.m}^{-3}$ et $573 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) puis elle chute à $16,7 \text{ g.m}^{-3}$ en juillet avant de remonter pour atteindre le maximum en août ($60,1 \text{ g.m}^3$ et $684 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). Elle décroît à nouveau jusqu'en novembre et se stabilise autour de 30 g.m^{-3} quel que soit le débit jusqu'en janvier, avant de baisser à 20 g.m^{-3} en février et en mars. Cette évolution est similaire à celle décrite pour la même année sur le Dja à Moloundou-SOTREF et la Boumba à Moloundou-Bac.

De façon schématique sur les trois cycles hydrologiques, on note une constance des teneurs en MES pendant la grande saison sèche, suivie d'une augmentation pendant la petite saison des pluies. Elles baissent ensuite pendant la petite saison sèche avant de croître brusquement pour atteindre un maximum en début de la grande saison des pluies. La tendance globale est une augmentation de la charge solide avec les premières eaux après les saisons sèches, suivie d'une diminution avec le maximum des crues jusqu'à une relative stabilité en décrue et pendant les étiages.

Le comportement du bassin de la Ngoko à Moloundou est donc analogue à celui de ses affluents. On rappelle que le ruissellement sous forêt étant très réduit, les fortes teneurs en charge particulaire de juin et d'août proviennent surtout des surfaces hors couvert végétal (routes, champs cultivés et villages). S'agissant effectivement des cultures, d'après ATAYI et KIPSCHEER (1980) et SIEFFERT (1992), les champs sont préparés pour les semis en avril et en juillet confirmant que les matériaux des versants sont arrachés presque exclusivement des zones cultivées.

Tableau 6-12 : Concentrations moyennes et flux mensuels de la de la Ngoko à Moloundou

Ngoko à Moloundou (1989-1992) : Concentrations moyennes et flux particuliers mensuels et annuels														
Cycle		Av	Mai	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Ms	Annuel
1989/90	C(mg/l)	21,3	26,0	39,8	23,0	28,1	25,3	20,8	21,0	22,7	24,6	9,5	10,4	(23)
	Fm	17134,6	37843,0	60706,8	34936,6	58339,0	70430,0	81775,0	93598,8	52854,9	20946,2	8104,6	5821,5	542491,0
	Fm/Fa	3,2	7,0	11,2	6,4	10,8	13,0	15,1	17,3	9,7	3,9	1,5	1,1	
	Vm/Va	3,5	6,3	6,6	6,6	9,0	12,0	17,0	19,3	10,1	3,7	3,7	2,4	
1990/91	C	21,3	32,7	33,5	16,7	60,1	45,1	34,5	34,7	29,3	30,2	21,7	19,7	34,7
	Fm	14497,9	44858,4	50445,8	13517,4	108032,9	130730,6	152500,2	166607,1	93786,5	43730,4	18248,8	16204,5	853160,5
	Fm/Fa	1,7	5,3	5,9	1,6	12,7	15,3	17,9	19,5	11,0	5,1	2,1	1,9	
	Vm/Va	2,8	5,6	6,1	3,3	7,3	11,8	18,0	19,5	13,0	5,9	3,4	3,3	
1991/92	C(mg/l)	44,3	46,7	45,7	43,3	53,5	43,5	35,4	35,3	32,2	22,7	12,6	9,6	(42,2)
	Fm	60305,8	89100,2	133670,9	76127,1	108822,9	123692,1	136755,9	121248,3	59130,0	19342,1	6832,8	4677,8	939705,8
	Fm/Fa	6,4	9,5	14,2	8,1	11,6	13,2	14,6	12,9	6,3	2,1	0,7	0,5	
	Vm/Va	5,7	8,0	12,3	7,4	8,5	11,9	16,2	14,4	7,7	3,6	2,3	2,1	

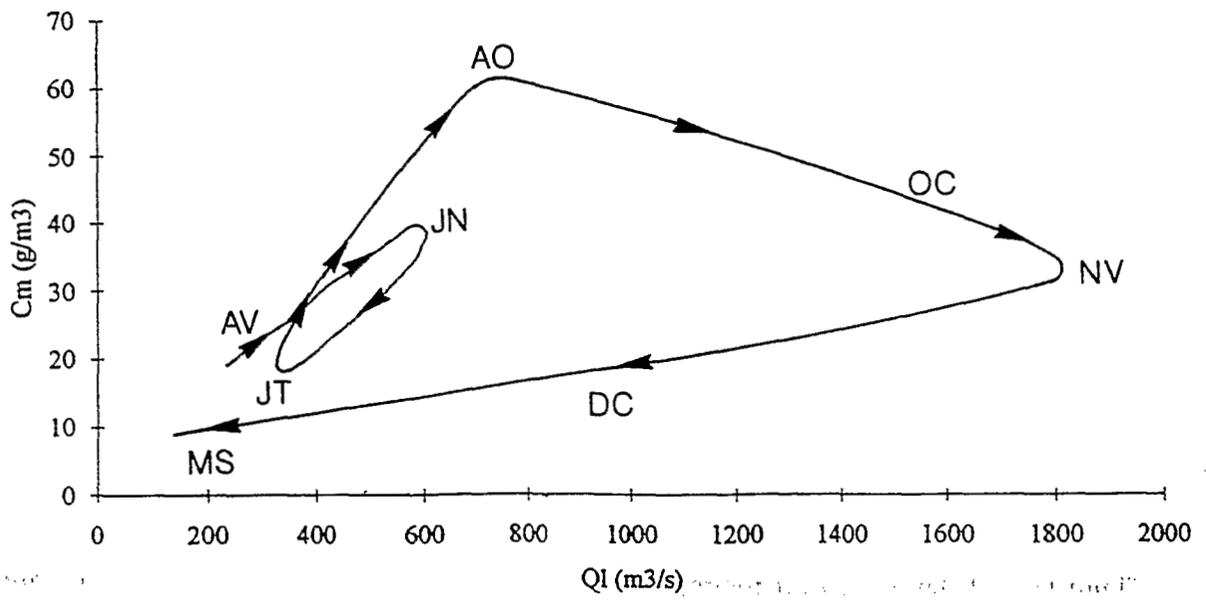


Figure 6-10 : Ngoko à Moloundou (1989/92) :
Evolution de la charge solide moyenne mensuelle en fonction de débit

La figure 6-11 représente la contribution mensuelle aux flux annuels particulaire et hydrique. On en déduit que le mois de novembre participe le plus et en proportions égales (18 %) aux deux types de flux. D'autre part, en pourcentage, les apports mensuels en flux particulaire pendant la montée des eaux sont supérieurs à ceux des écoulements. Cette tendance est inversée en décrue.

Le flux particulaire du cycle complet 1990/91 est de 853.10^3 t, soit un transport spécifique de $12,7 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Quant à ceux des cycles 1989/90 et 1991/92, pour des raisons évoquées plus haut, ils ont été évalués d'une part, à partir uniquement des résultats des observations selon la méthode 4-3 comme sur les stations du Dja et de la Boumba, et d'autre part après reconstitution des données manquantes selon la méthode 4-1 utilisée pour le cycle 1990/91. Dans le premier cas, on aboutit à un flux de 532.10^3 t, soit un transport spécifique de $7,9 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1989/90 et à un flux de 1006.10^3 t, soit un transport spécifique de $15 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1991/92. Dans le second cas, il est de 542.10^3 t, soit un transport spécifique de $8,1 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1989/90 et de 940.10^3 t, soit un transport spécifique de $14 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$.

En comparant les résultats obtenus par les deux méthodes d'évaluation de flux, il ressort un écart de 2,5 % pour la campagne 1989/90 et de 6,7 % pour celle de 1991/92. On en déduit que les résultats sont peu différents quelle que soit l'approche utilisée. Par conséquent, les flux calculés correspondent assez bien aux quantités de matières évacuées à Moloundou.

Par contre, en les discutant de la même manière que sur le Dja et la Boumba, à savoir qu'on considère le flux du cycle 1990/91 comme étant plus précis, il ressort suivant la première ou la seconde approche, que le flux du cycle 1989/90 est de 38 ou 36 % plus faible tandis que celui du cycle 1991/92 est de 18 ou 10 % plus élevé. A signaler également une réduction de l'écart (2 % en 1989/90 et de 8 % en 1991/92) lorsqu'on considère la deuxième approche.

Sur le Dja et la Boumba, on a imputé l'augmentation rapide du transport spécifique du premier au second cycle, puis lente du second dernier cycle étudié, respectivement à une sous-estimation en 1989/90 et à une surestimation en 1991/92 des quantités de matières exportées dues aux lacunes d'observation. Toutefois, sans rejeter cette hypothèse, les résultats ci-dessus sont suffisamment significatifs pour prendre en considération l'hypothèse d'une augmentation de l'intensité de l'érosion sur les versants.

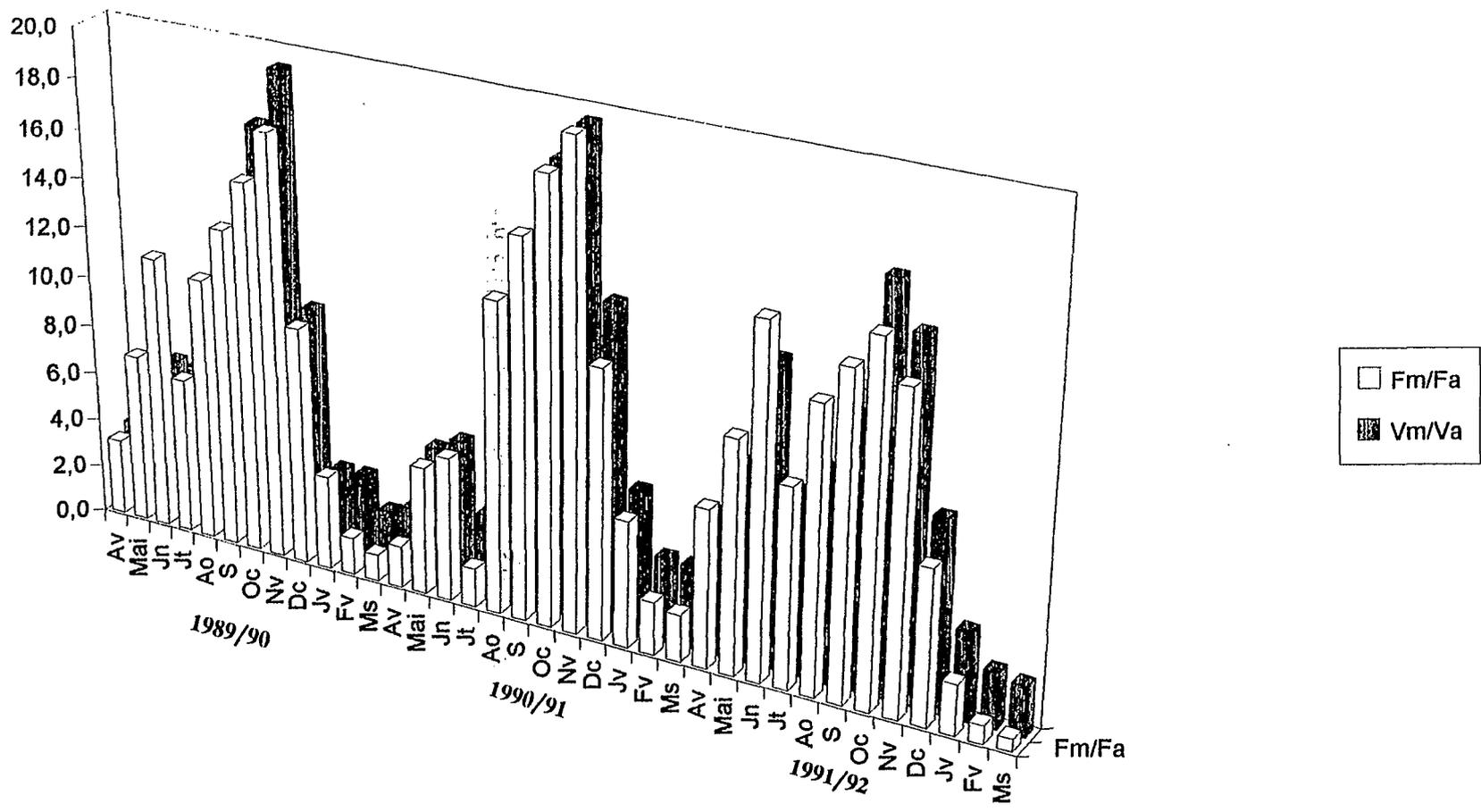


Figure 6-11 : Ngoko à Moloundou (1989/92) : Contributions mensuelles en pourcentage aux flux annuels particulaire et hydrique

En effet, de l'amont vers l'aval du bassin, en considérant les flux mensuels mesurés d'avril à novembre 1991, on s'aperçoit que le total des huit mois (850.10^3 t) est voisin du flux annuel du cycle complet 1990/91 (853.10^3 t). Si on ajoute à ces matières exportées en huit mois celles de décembre 1991 à mars 1992 (ces quatre mois ont contribué pour 16 % au flux de 1990/91), le flux annuel de 1991/92 sera bien supérieur à celui de 1990/91. Compte tenu de la régularité des régimes hydrologiques démontrée au troisième chapitre et des concentrations relativement élevées des substances provenant de l'érosion des berges et du lit, on peut penser que cette hypothèse est pertinente.

Dans le même ordre d'idée, si on fait le calcul des flux des cycles 1989/90 et 1990/91 sur la Ngoko à Moloundou sans les mois de mai et de septembre (mois non observés lors de la première campagne), on obtient 542.10^3 t en 1989/90 et 678.10^3 t en 1990/91. Les deux scénarios, de même que l'évaluation par la méthode 4-3, aboutissent en 1989/90 à un flux inférieur à celui correspondant à 10 mois d'observation en 1990/91.

D'autre part, on note une bonne correspondance entre les moyennes des transports spécifiques des bassins du Dja à Moloundou-SOTREF et de la Boumba à Moloundou-Bac et le transport spécifique de la Ngoko à Moloundou pour les trois cycles d'étude (tableau 6-13). Les différences relevées peuvent être expliquées par le fait que les calculs sur les bassins en amont portent sur des concentrations de surface alors que sur la Ngoko elles ont été ramenées à la moyenne dans la section.

Tableau 6-13 : Transports spécifiques du Dja à Moloundou-SOTREF, de la Boumba à Moloundou-Bac et de la Ngoko à Moloundou en $t.km^{-2}.an^{-1}$.

Année	Dja	Boumba	Moyenne Dja-Boumba	Ngoko
1989/90	8,4	8,1	8,2	8,0
1990/91	11,8	11,5	11,7	12,5
1991/92	14,4	12,9	13,7	13,9
Moyenne	11,5	10,8	11,2	11,5

En définitive, pour le Dja l'érosion qui est faible à Somalomo en raison de la réserve forestière, augmente avec la forte anthropisation des régions de Sangmélisma-Djourn vers l'aval à Moloundou-SOTREF. A l'inverse, sur la Boumba, elle est forte à Biwala en

raison de l'anthropisation poussée de la région de Yokadouma et diminue vers Moloundou-Bac de suite de la dilution par les eaux peu chargées de la Lokomo et de la Bek drainant des zones peu habitées. Le suivi des matériaux des zones de production sur le bassin de la Ngoko et leur transfert à l'exutoire de Moloundou pose le problème d'échelle. En effet, de ce qui précède, on retient qu'il n'est pas prudent d'extrapoler les résultats de la charge solide d'un point du bassin à un autre sans vérifier l'égalité des conditions environnementales et des processus qui l'induisent.

Par ailleurs, on a noté une augmentation de l'ordre de 30 à 60 % de la dégradation spécifique de la première à la dernière année de l'étude sur tous les bassins. En dépit des lacunes d'observation, on pense qu'elle traduit une augmentation de l'érosion des versants émanant d'une anthropisation de plus en plus poussée.

Cette hypothèse nous a incité à rechercher des informations sur les exploitations forestières dans notre bassin. D'après la Direction des Forêts, douze permis d'exploitation ont été octroyés de 1989 à 1992. Les premières statistiques tirées du rapport d'activités de la Conservation des Forêts de l'Est, indiquent que le volume d'abattage est passé 282.10^3 m^3 en 1990 à 395.10^3 m^3 en 1992, soit une augmentation de 30 %. Ce rapport souligne par ailleurs que depuis 1989, suite au mauvais fonctionnement du chemin de fer Brazzaville-Pointe-Noire, la quasi-totalité des grumes du bassin de la Ngoko (même pour les Sociétés congolaises), est évacuée par route.

De ce qui précède, on peut dire que les superficies dénudées sur le bassin de la Ngoko ont augmenté (trouées d'abattage, pistes de débardage, campements forestiers). Le Centre Technique Forestier Tropical-CTFT (1989) précise que l'extraction de 25 m^3 de bois par hectare détruit 10 à 15 % de la superficie forestière. Par ailleurs, l'acheminement des grumes par route entraîne l'ouverture de nouvelles pistes et des travaux d'entretien des anciennes routes. Ces pistes favorisent la création de champs de cultures qui, selon les données de la conférence de Rio (1992), sont responsables de 65 % de la déforestation. D'autre part, en Guyane, FRITSCH et SARRAILH (1986) ont observé, après déforestation sur les bassins expérimentaux d'ECEREX, un accroissement des transports solides de 16 à 50 % par rapport à ceux de l'écosystème naturel dont la moyenne ($11 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) est comparable à celle de la Ngoko. Ces auteurs précisent également que les 12 à 17 t.ha^{-1} correspondent à un volume de terre inférieur à celui déplacé par les caterpillars lors du débardage ou du dessouchage d'un gros arbre. Ces informations renforcent l'hypothèse selon laquelle l'augmentation du transport particulaire des deux dernières années de notre étude traduit une intensification de la dégradation des versants.

6.1.4. GRANULOMETRIE ET MINERALOGIE DES MATIERES EN SUSPENSION

Les résultats des analyses granulométrique et minéralogique obtenus sur l'ensemble des bassins étudiés seront examinés dans ce paragraphe.

Les tributaires de la Ngoko

On analysera ici les résultats granulométriques et minéralogiques du Dja (Somalomo et Moloundou-SOTREF) et de la Boumba (Biwala et Moloundou-Bac). Parallèlement, on dira quelques mots sur ceux du Nyong (Akonolinga) et du Ntem (Nyabessan).

La granulométrie

La granulométrie porte sur les fractions de matières minérales de diamètre inférieur et supérieur à 50 microns. Le tableau 6-14 en donne le pourcentage pondéral ainsi qu'une estimation de la matière organique. Les fractions fines et sableuses sont exprimées en pourcentage par rapport au poids de la matière minérale obtenue après destruction de la matière organique par de l'eau oxygénée.

Sur les tributaires de la Ngoko, on note également une prédominance de la fraction fine sur la fraction sableuse dans les mêmes proportions (94 à 97 % à Biwala sur la Boumba et à Moloundou-SOTREF sur le Dja), avec cependant une valeur plus faible (87 %) sur la Boumba à Moloundou-Bac. Cette différence, qui implique 13 % de la fraction supérieure à 50 microns, peut être expliquée par un transport important de sables provenant de la Basse Boumba dont le substratum géologique est constitué de quartzites et de grès.

Sur le Nyong et le Ntem, les résultats portent sur les moyennes eaux. A cette période, la fraction fine prédomine sur les deux bassins. Elle est de 93 % sur le premier et de 96 % sur le second. L'absence des observations pour les autres saisons ne permet pas de faire davantage de comparaison.

En définitive, on peut retenir que dans l'ensemble la fraction fine prédomine sur la Boumba, le Dja, le Nyong et le Ntem. Elle est liée à la nature des particules érodées et aux conditions de leur transfert.

Tableau 6-14 : Poids de la fraction minérale ou supérieure sur les bassins amont et sur les bassins voisins de la Ngoko à Moloundou

Bassins voisins et amont de la Ngoko :									
Poids de la fraction minérale inférieure ou supérieure à 50 µm en %									
COURS D'EAU	STATIONS	Année	Mois	Jour	P.B.	M.O.	P.M.	F<50 µm	F>50 µm
Boumba	Biwala	1989/90	11,0	18,0	26,1	39,9	15,7	94,3	5,7
		1990/91	4,0	15,0	16,1	5,0	15,3	97,4	2,6
Boumba	Moloundou-Bac	1990/91	5,0	14,0	8,1	7,4	7,5	86,7	13,3
Dja	Moloundou-SOTREF	1989/90	3,0	31,0	10,6	15,1	9,0	96,7	3,3
		1990/91	5,0	14,0	23,5	16,6	19,6	93,8	6,1
			8,0	13,0	62,4	9,5	56,5	95,4	4,6
Nyong	Akonolinga	1990/91	4,0	16,0	14,2	36,0	9,1	93,4	6,6
			5,0	2,0	7,5	25,3	5,6	92,9	7,1
Ntem	Nyabessan	1990/91	4,0	25,0	8,8	42,1	5,1	96,1	3,9
Légende :									
P.B.: poids brut de la matière en suspension en mg									
M.O.: matière organique en %									
P.M.: Poids de la fraction minérale en mg									
F<50 ou F>50 µm: Fraction de taille inférieure ou supérieure à 50 µm en % de P.M.									

Les minéraux de la fraction sableuse

L'observation de la fraction sableuse à la loupe binoculaire indique qu'elle est constituée principalement des quartz fins dont la quantité est fonction des saisons. Elle est forte dans les échantillons de moyennes et hautes eaux et faible dans ceux des basses eaux. Les quantités élevées des hautes eaux proviennent de la dégradation des versants. Les faibles quantités d'étiage proviennent uniquement de l'érosion du lit et d'une remise en suspension des matériaux fins existant dans le cours d'eau.

La minéralogie des argiles

La nature des argiles obtenue par analyse diffractométrique s'est limitée à un inventaire des minéraux. Par bassin versant, elle indique :

- Sur le Nyong à Akonolinga, un peu de kaolinite et des minéraux amorphes.
- Sur le Dja à Somalomo, de la kaolinite et de l'illite bien cristallisées, des traces de feldspath et beaucoup de produits amorphes (silice).
- Sur le Dja à Moloundou-SOTREF, de la kaolinite et de l'illite bien cristallisées, de la gibbsite, des traces de smectite ou de chlorite, des feldspaths et beaucoup de minéraux amorphes (silice). On a également observé des traces de phytolites, traduisant ainsi l'importance de la végétation sur le bassin.
- Sur la Boumba à Moloundou-Bac, de la kaolinite, un peu d'illite et des traces de feldspath et de quartz, beaucoup de produits amorphes.

Finalement, on peut dire qu'à défaut d'une quantification des minéraux argileux, l'analyse de la fraction fine a au moins permis de noter :

- Une prédominance des produits amorphes regroupant la silice et les hydroxydes.
- une confirmation de la présence des espèces argileuses classiques des forêts tropicales, notamment de la kaolinite qui provient de l'altération des feldspaths alcalins.

Le bassin de la Ngoko

Sur la Ngoko à Moloundou, les jaugeages complets ont permis de recueillir des quantités suffisantes de sédiments pour des déterminations granulométriques et minéralogiques plus détaillées.

La granulométrie

Le tableau 6-15 regroupe les caractéristiques granulométriques d'un culot de centrifugation et de cinq jaugeages complets répartis sur les quatre saisons. Dans l'ensemble, il indique une prédominance des argiles quelle que soit la saison, avec des proportions pondérales situées en général au-delà de 70 %.

Tableau 6-15 : Ngoko à Moloundou : Caractéristiques granulométriques des matières en suspension en %.

Date	Argiles	Limons fins	Limons grossiers	Sables
12/07/90	84,5	9,85	3,93	1,47
31/01/91	78,7	15,7	3,93	1,64
18/03/91	78,8	16,3	3,45	1,45
07/06/91	83,3	10,9	3,94	1,39
05/10/91	82,5	14,7	0,98	1,78
07/11/91	73,2	19,5	4,88	2,40

On relève que le pourcentage d'argile est plus élevée dans les échantillons d'étiage (85 % en juillet) et de la montée des eaux (82 % en octobre). La remise en suspension des sédiments fins du lit du cours d'eau ainsi que le nettoyage des poussières déposées sur la voûte forestière par les premières pluies pourraient expliquer les fortes proportions argileuses mesurées pendant les périodes ci-dessus. A l'inverse, elles sont plus faibles dans les échantillons des hautes eaux (73 % en novembre). On pourrait l'expliquer par le fait qu'à cette période les vitesses du courant d'eau sont suffisamment fortes pour maintenir en suspension des particules de dimension plus grande.

Les proportions pondérales des limons fins sont comprises entre 10 % en juillet et 20 % en novembre tandis que celles des limons grossiers varient entre 1 % en octobre et 5 % en novembre. Quant aux sables, la plus faible proportion a été mesurée en mars (1,45 %) et la plus forte en novembre (2,4 %). Il se dégage de ce qui précède que les limons et les sables fins sont plus abondants dans les suspensions des hautes eaux de novembre.

Bien qu'il y ait de grandes quantités d'argiles dans les sédiments de la Ngoko toute l'année, on note néanmoins des tendances saisonnières se traduisant par des proportions pondérales plus élevées pendant l'étiage et faibles pendant les crues. Cette tendance est analogue à celle indiquée par GAC et al (1987) sur la Gambie.

Les minéraux de la fraction sableuse

L'observation des sables à la loupe binoculaire indique des éléments identiques à ceux trouvés sur les tributaires de la Ngoko. De même, le quartz fin est l'élément le plus abondant, surtout dans les échantillons des hautes eaux de novembre. En proportion, les quantités de quartz transportées par la Ngoko sont plus élevées que celles véhiculées par le Nyong et le Ntem.

La minéralogie des argiles

La composition minéralogique des argiles est assez homogène et comparable à celle des bassins en amont. En effet, l'inventaire donne l'essentiel des minéraux décrits sur les bassins en amont, à savoir la kaolinite, l'illite, les feldspaths, un peu de chlorites ou de smectites et beaucoup de produits amorphes. On doit cependant signaler que les proportions d'illite et de feldspaths sont plus élevées en moyennes et en hautes eaux qu'en basses eaux.

En résumé, on peut dire que les déterminations granulométriques et minéralogiques n'ont pas montré une grande variabilité spatio-temporelle aussi bien sur les bassins en amont que sur la Ngoko à Moloundou. Cette homogénéité peut être expliquée, non seulement par l'absence d'une véritable saison sèche et par l'extension des principales roches-mères sur les bassins des deux tributaires de la Ngoko, le Dja et la Boumba, mais aussi par une altération analogue très ancienne de type "ferrallitique", sur l'ensemble du bassin.

Pour ce qui est de la granulométrie, les argiles prédominent avec des proportions pondérales dépassant généralement 70 %. S'agissant de la minéralogie, on note que en plus de la kaolinite qui est l'argile classique et abondante du milieu forestier tropical, l'illite, la chlorite ou la smectite, les feldspaths et les produits amorphes sont représentés. Ces minéraux sont identiques à ceux trouvés sur le Congo par BARUSEAU et al (1989) qui indiquent que l'homogénéité des minéraux argileux reflète celle des pédogenèses ferrallitiques affectant les sols du bassin versant du Congo.

6.2. LES MATIERES EN SOLUTION

Les différentes espèces chimiques observées dans les écoulements superficiels peuvent avoir des origines diverses : atmosphère, lithosphère, pédosphère, biosphère, hydrothermalisme (MEYBECK, 1984). Dans cette étude, en plus des substances exportées en solution par les écoulements, nous étudierons également celles apportées par les pluies.

De nombreux auteurs ont déjà étudié à la fois les éléments dissous des cours d'eau et des précipitations (GIBBS, 1967, 1970 et 1972 ; DOUGLAS, 1968; CLEAVES et al, 1970 ; MATHIEU, 1972 ; STALLARD and EDMOND, 1981 ; MEYBECK, 1984 ; PACES, 1986 ; LELONG et ROOSE, 1986 ; NKOUNKOU et PROBST, 1986 ; GAC et al, 1987 ; KLING, 1987 ; KATTAN, 1989 ; DURAND, 1989 ; DURAND et al, 1991 et 1992 ; ORANGE, 1990 ; FORTI et al, 1991 et 1992 ; PROBST, 1992 ; SEYLER et al, 1993). L'intérêt de cette approche a été dans l'ensemble, en déduisant les apports atmosphériques, généralement d'origine océanique, de proposer des bilans géochimiques à l'exutoire des bassins afin d'évaluer l'altération des roches. D'autres tels que YOBOUE (1991) ; LACAUX et al (1992) et LEFEIVRE (1993) ont étudié essentiellement les apports météoriques.

Dans ce mémoire, nous avons décidé, compte tenu de la complexité des écoulements en milieu forestier et de l'importance du déficit hydrique par évapotranspiration, de nous limiter à une étude comparée des apports pluviaux et fluviaux en cations et en silice par bassin versant, la déduction des apports atmosphériques étant limitée aux anions. Cette approche ne remet aucunement en question celle que nous avons utilisée dans la publication faite sur les premières campagnes de mesure sur le bassin de la Ngoko (SEYLER et al, 1993).

Ainsi donc, nous traiterons d'abord de la composition chimique des eaux de pluie collectées aux différents postes pluviométriques. Nous parlerons ensuite des espèces

chimiques exportées de l'amont vers l'aval de la rivière avant de les comparer à celles des précipitations.

6.2.1. COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE PLUIE

La connaissance des apports atmosphériques en milieu forestier n'est pas facile, en raison de l'intervention de nombreux facteurs propres au milieu. En effet, en plus de la source océanique par pulvérisation des gouttelettes d'eau de mer (évaporation mécanique), les espèces chimiques proviennent également des poussières continentales (sahariennes) et de l'activité biologique auxquelles s'ajoutent les éléments figurés organiques (MATHIEU, 1972). L'origine anthropique doit être également signalée (feux de brousse, pollution industrielle). Dans cette étude, nous ne distinguerons pas ces différentes substances, ainsi que les constituants des précipitations acquis par les processus de "rainout" et de "washout" (capture des particules au sein et sous les nuages). Nous nous limiterons donc aux résultats de 83 analyses des pluies incidentes collectées à 9 postes pluviométriques sur l'ensemble du bassin de la Ngoko.

La discussion des résultats s'articulera autour de 3 volets :

Le premier volet est essentiellement descriptif. Il consiste en un passage en revue des paramètres physico-chimiques ponctuels. On détermine également la concentration moyenne de chaque élément. Elle est calculée en pondérant les concentrations ponctuelles par les hauteurs de pluie considérées d'une part, et d'autre part en les ramenant à la superficie en utilisant les coefficients de THIESSEN (SEYLER et al, 1993).

Le second volet concerne la variabilité spatiale des éléments atmosphériques de la côte atlantique vers l'arrière-pays. Pour ce faire, on intègre les résultats obtenus aux postes pluviométriques des bassins voisins. On évoquera les relations entre les espèces chimiques.

Le troisième volet se rapporte aux bilans des apports atmosphériques d'une part, par station et d'autre part, par bassin versant.

6.2.1.1. Descriptif des résultats

Les paramètres physico-chimiques (pH et conductivité) ont été mesurés uniquement pour les échantillons non acidifiés. En ce qui concerne la composition chimique des

eaux de pluie, les analyses ont été effectuées pour les éléments majeurs suivants : Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^- , NO_3^- et SiO_2 . Les moyennes seront comparées dans la mesure du possible à celles rencontrées dans la littérature. Les résultats sont regroupés dans le tableau 6-16.

* Le pH

Le pH varie entre 4,5 et 7,4. La moyenne est de 6,36, avec un coefficient de variation (CV) = 10 % pour un nombre d'échantillon (N)=33. Cette valeur est voisine de celle mesurée à Barombi-Mbo (6,93) au Cameroun (KLING, 1987), et à celle observée à Kédougou (6,54) au Sénégal (ORANGE, 1990).

Si on se réfère à la distinction par le pH des eaux de pluie acides ($\text{pH} < 5,6$) et des eaux de pluie alcalines ($\text{pH} > 5,6$) d'après FORTI et NEAL (1992), on peut conclure que dans l'ensemble nos eaux appartiennent à cette dernière catégorie. Toutefois, il importe de signaler que nos mesures ont été faites sur des pluies ayant séjourné au moins un mois dans les jerricans. De ce point de vue, nous pensons que les résultats auraient été différents si les mesures avaient été faites immédiatement après la chute de pluie.

* La conductivité

La conductivité varie entre 7 et 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La conductivité moyenne à 25°C est de 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (CV = 54 % et N = 33). Elle est comprise entre celle trouvée à Barombi-Mbo (11,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$) par KLING (1987) et celle observée à Kédougou (19 $\mu\text{S}/\text{cm}$) par ORANGE (1990).

MATHIEU (1972) et MEYBECK (1984) ont fait une synthèse sur les origines des éléments majeurs dans les eaux météoriques. Dans ce qui suit, nous nous proposons de donner la gamme de variation des concentrations et la moyenne des teneurs en éléments dissous des précipitations sur le bassin versant de la Ngoko en indiquant les origines probables.

* Le calcium

Une partie du calcium atmosphérique tire son origine des sels marins et une autre de l'aérosol transporté par les vents. Compte tenu de l'éloignement de notre bassin par rapport à l'Atlantique, il est surtout d'origine continentale. Les teneurs en calcium sur le bassin de la Ngoko varient entre 0,1 et 3,81 mg.l^{-1} . Les fortes teneurs sont mesurées en saison sèche (février, mars et juillet) ou en début des saisons de pluies (avril et août) aux stations de la partie orientale du bassin (Biwala, Yokadouma et Moloundou) Elles peuvent être imputées aux poussières minérales transportées pendant les saisons sèches

Tableau 6-16 : Teneurs moyennes et extrêmes en éléments dissous des précipitations en mg.l⁻¹

Teneurs moyennes et extrêmes en éléments des précipitations sur le bassin versant de la Ngoko												
	pH	COND μS/cm	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO3 mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	NO3 mg/l	SiO2 mg/l	Md mg/l
MOY	6,5	15,9	1,2	0,2	0,8	0,6	1,6	0,7	0,7	0,4	0,2	6,3
STD	0,7	8,6	0,9	0,1	0,7	0,5	0,8	0,4	0,5	0,2	0,2	2,0
CV	10,2	53,9	81,1	69,4	86,7	94,2	49,1	61,6	73,6	54,8	91,2	31,1
MAX	7,4	41,0	3,8	0,6	2,5	2,7	4,3	2,1	2,4	0,9	1,0	10,2
MIN	4,5	7,3	0,1	0,0	0,1	0,0	0,6	0,1	0,0	0,1	0,0	2,0
N	33	33	83	83	83	83	33	33	33	33	33	33

et mélangées à celles accumulées sur la voûte forestière. La concentration moyenne est de $1,17 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 81 % et N = 83). elle est comparable à celle observée sur le bassin forestier d'Amitioro ($1,38 \text{ mg.l}^{-1}$) en Côte d'Ivoire par MATHIEU (1972).

* Le magnésium

Le magnésium des eaux pluviales a une origine océanique. Mais dans notre bassin, le rôle joué par la végétation est notable. Les teneurs mesurées sont faibles ($0,024$ à $0,644 \text{ mg.l}^{-1}$). La concentration moyenne est de $0,182 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 69 % et N = 83). Cette teneur est comparable à celle trouvée sur le bassin forestier d'Iboké ($0,13 \text{ mg.l}^{-1}$) en Côte d'Ivoire (YOBOUE, 1991).

* Le sodium

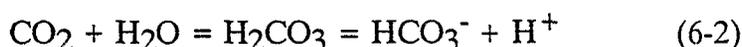
Le sodium a une origine marine. Mais les sources continentales ne sont pas à exclure dans notre bassin. Les teneurs observées varient entre $0,092$ et $2,53 \text{ mg.l}^{-1}$. La concentration moyenne est de $0,763 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 87 % et N = 83). Comme pour le Mg, la teneur moyenne du Na est comparable à celles trouvées sur les bassins forestiers d'Amitioro ($0,58 \text{ mg.l}^{-1}$: MATHIEU, 1972) et d'Iboké ($0,6 \text{ mg.l}^{-1}$: YOBOUE, 1991). Par ailleurs, le rapport moyen Cl/Na est égal à $0,94$. Il est inférieur à celui de la mer qui est de l'ordre de $1,8$. Nous avons trouvé Cl/Na = $1,75$ dans notre échantillon recueilli à Kribi au bord de l'Atlantique. Cette diminution traduit un apport supplémentaire en Na d'origine continentale.

* Le potassium

Le potassium atmosphérique a une origine océanique à laquelle s'ajoute un apport provenant de la végétation. Les teneurs observées sont comprises entre $0,01$ et $2,74 \text{ mg.l}^{-1}$. La teneur moyenne est de $0,568 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 94 % et N = 83). Elle est comparable à celle mesurée par MATHIEU (1972) sur les bassins de Losérigué et d'Amitioro ($0,5 \text{ mg.l}^{-1}$).

* Les bicarbonates

Les bicarbonates dans les précipitations sont le produit du contact des eaux météoriques avec le gaz carbonique atmosphérique suivant la réaction ci-dessous :



Les concentrations de bicarbonates mesurées varient entre $0,61$ et $4,27 \text{ mg.l}^{-1}$. La moyenne est de $1,55 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 49 % et N = 33). Très peu de travaux prennent en compte les ions bicarbonates dans les apports atmosphériques. La moyenne des

bicarbonates est comparable à celle trouvée par KLING (1988) à Barombi-Mbo. Elle est nettement plus faible que celles observées par ORANGE (1990) à Bakel ($11,3 \text{ mg.l}^{-1}$) et à Kédougou ($6,53 \text{ mg.l}^{-1}$).

* Le chlore

Le chlore est le seul élément des précipitations d'origine exclusivement océanique en milieu naturel dans les bassins dépourvus d'évaporites. Les concentrations de l'ion Cl^- mesurées ici varient de $0,11$ à $2,13 \text{ mg.l}^{-1}$. Sa moyenne est de $0,725 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 62 % et N = 33). Cette valeur est inférieure à la plupart de celles rencontrées dans la littérature relative au domaine tropical. Cependant, elle est supérieure à celle observée par LACAUX et al (1992) à Dimonika dans la Mayombe ($0,47 \text{ mg.l}^{-1}$), situé à 50 km de l'Atlantique. Par ailleurs, LEFEIVRE (1993) a mesuré une teneur moyenne en chlore de $1,08 \text{ mg.l}^{-1}$ à Enyéélé (situé à 1000 km de l'Atlantique), soit une concentration près de 3 fois supérieure à celle de Dimonika, en dépit de l'éloignement à la côte 20 fois supérieur. LEFEIVRE suggère deux sources de chlore non marin, à savoir : l'émission sous forme gazeuse (CH_3Cl) ou aérosol par les feux de biomasse (NH_4Cl) et une source terrigène sous forme d'aérosol CaCl_2 provenant de l'érosion des sols désertiques, hypothèse déjà émise par YOBOUE (1991) pour les précipitations de Lamto. De ce point de vue, il n'est pas exclu que les chlorures de nos échantillons soient influencés par ces sources.

* Les sulfates

Comme l'ion Cl^- , les sulfates sont presque exclusivement d'origine océanique. Les teneurs obtenues varient entre $0,1$ et $2,45 \text{ mg.l}^{-1}$. La teneur moyenne est de $0,71 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 74 % et N = 33). Elle est identique à celle des chlorures. MATHIEU (1972) a trouvé des valeurs analogues aussi bien à Amitioro ($0,8 \text{ mg.l}^{-1}$) qu'à Loserigue ($0,6 \text{ mg.l}^{-1}$).

* Les nitrates

L'origine des nitrates dans les précipitations reste jusque-là imprécise. Néanmoins, on pense qu'une partie provient de l'activité des bactéries dénitrifiantes des sols et une autre des activités agricoles utilisant les engrais (DURAND, 1989). Une autre origine non négligeable serait les feux de biomasse. Pour les échantillons dont l'ion NO_3^- a été dosé, les teneurs sont faibles ($0,09$ à $0,93 \text{ mg.l}^{-1}$). La teneur moyenne est égale à $0,44 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 55 % et N = 33). Cette valeur est identique à celle trouvée à Lamto ($0,445 \text{ mg.l}^{-1}$) par YOBOUE (1991).

* La silice

La silice contenue dans les précipitations provient essentiellement des poussières atmosphériques. Une partie de la silice déposée par les poussières minérales en saison sèche est mise en solution dans les eaux pluviales. MATHIEU (1972) pense entre autre que le rôle joué par la végétation dans la silice atmosphérique n'est pas à exclure. Les concentrations mesurées sont semblables à celles de l'ion NO_3^- . En effet, elles sont comprises entre 0,01 et 0,96 mg.l^{-1} , la teneur moyenne étant de 0,226 mg.l^{-1} (CV = 91 % et N = 33). Cette valeur est identique à celle trouvée à Barombi-Mbo (0,244 mg.l^{-1}) par KLING (1988).

Finalement, on obtient des concentrations des éléments des précipitations sur le bassin de la Ngoko comprises entre 2 et 10 mg.l^{-1} . Elles sont dans la même gamme de variation que celles mesurées à Barombi-Mbo (1,5 à 11,8 mg.l^{-1}) au Cameroun par KLING (1988). La concentration moyenne est de 6,32 mg.l^{-1} (CV = 31 % et N = 33). Elle est comprise entre les moyennes calculées à Barombi-Mbo (4,43 mg.l^{-1}) par KLING (1988), et celles à Kédougou (10,8 mg.l^{-1}) et à Bakel (27,1 mg.l^{-1}) au Sénégal par ORANGE (1990).

En résumé, on peut dire que nos résultats concernant les éléments dissous des eaux météoriques sur le bassin de la Ngoko sont en accord avec celles rencontrées dans la littérature portant en particulier sur le milieu tropical forestier. Exception faite de l'ion Cl^- dont la signature marine est assez marquée, les autres éléments sont le produit de la combinaison d'au moins 2 sources : océan, poussières atmosphériques, écosystème forestier et feux de biomasse.

6.2.2.2. Variabilité spatiale et relations inter-éléments

Nous nous proposons de discuter de l'évolution des teneurs ioniques de l'océan vers l'intérieur du continent et des relations pouvant exister entre les différents paramètres mesurés.

Par souci d'homogénéité, nous avons décidé de mener cette discussion à partir des concentrations moyennes des 3 cycles hydrologiques étudiés et par site d'échantillonnage. Pour cela, nous les avons calculées en pondérant les teneurs mesurées par les hauteurs pluviométriques annuelles et en prenant en compte la superficie couverte par chaque poste et en adoptant la méthode des polygones de THIESSEN.

Tableau 6-17 : Composition chimique moyenne des précipitations en $\mu\text{eq.l}^{-1}$ et distance des postes de prélèvement à l'océan Atlantique en km

	DA	pH	CND	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃
KRIBI	1,0	6,8	10,0	5,0	8,0	70,0	3,0	17,0	80,0	10,0	1,6
MOLOUNDOU	600,0	6,0	8,7	47,4	16,6	27,6	15,2	25,0	22,5	14,0	5,8
BIWALA	550,0	6,7	20,0	94,4	11,1	47,5	12,0	28,4	24,9	20,5	8,7
YOKADOUMA	600,0	5,5	10,0	76,5	15,2	28,5	35,3	17,0	20,2	17,8	7,0
GARI-GOMBO	620,0	6,2	17,0	42,9	14,9	21,9	15,0	20,0	13,9	19,8	6,4
LOMIE	405,0	6,9	10,0	53,2	11,7	42,3	2,5	8,5	16,0	2,0	5,8
SOMALOMO	320,0	6,2	12,0	42,3	17,8	37,8	16,5	24,1	16,8	13,1	7,5
SANGELIMA	290,0	6,7	20,0	19,2	13,7	15,3	8,7	17,0	10,0	2,0	3,7
DJOUM	310,0	6,1	18,0	87,3	20,0	34,8	23,0	20,0	26,0	25,5	10,0
BI	400,0	5,5	10,0	25,0	16,4	4,3	15,3	44,3	11,3	14,6	1,6
BATOURI	520,0	6,7	25,0	84,1	24,9	82,9	23,4	33,7	23,6	14,1	7,3
ABONG-MBANG	390,0	6,1	10,0	34,7	22,7	43,1	12,3	28,0	12,6	14,6	7,0
AKONOLINGA	290,0	6,1	10,0	40,0	10,3	18,6	12,0	18,0	18,7	20,0	1,2
NGOAZIK	160,0	6,4	15,0	17,1	11,6	35,9	9,1	25,4	13,1	11,4	9,3
NYABESSAN	65,0	6,1	15,0	32,0	21,0	30,0	20,2	17,0	51,2	13,6	12,0
DA : distance à l'Atlantique en km											
CND : conductivité en $\mu\text{s/cm}$											

D'autre part, nous intégrons ici les concentrations moyennes calculées de la même manière aux sites d'échantillonnage des bassins voisins de la Ngoko. Il s'agit des postes d'Abong-Mang et d'Akonolinga pour le Nyong ; de Ngoazik et de Nyabessan pour le Ntem ; de Batouri pour la Kadey et de Kribi pour la Lobé. Les concentrations par élément et par site d'échantillonnage sont regroupées dans le tableau 6-17.

*** La variabilité spatiale des éléments**

Le suivi de l'évolution des apports météoriques à 15 postes en fonction de la distance à l'Atlantique (Da en km) s'est limité à 4 éléments (Cl^- , Na^+ , Ca^{++} et K^+), les autres n'ayant présenté aucune évolution nette avec cette variable. Les relations retenues sont représentées sur la figure 6-12.

Elle montre une décroissance des teneurs en ions Cl^- et Na^+ ($\mu\text{éq.l}^{-1}$) de Kribi (Atlantique) vers l'est du pays suivant les modèles hyperboliques ci-après :

$$\text{Cl}^- = 80,5/\text{Da}^{0,254} \quad r = -0,74 \quad (6-3)$$

$$\text{Na}^+ = 62,5/\text{Da}^{0,123} \quad r = -0,52 \quad (6-4)$$

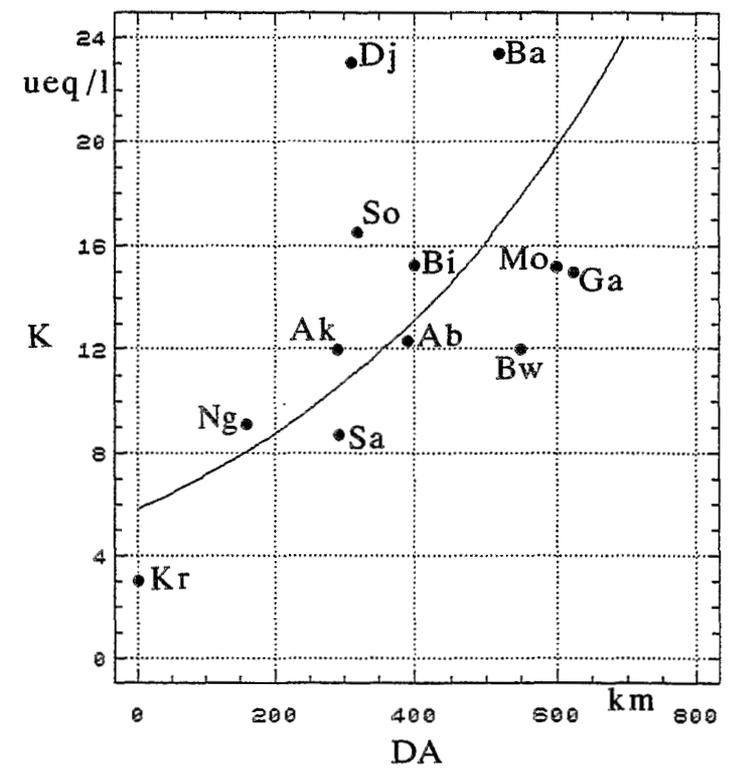
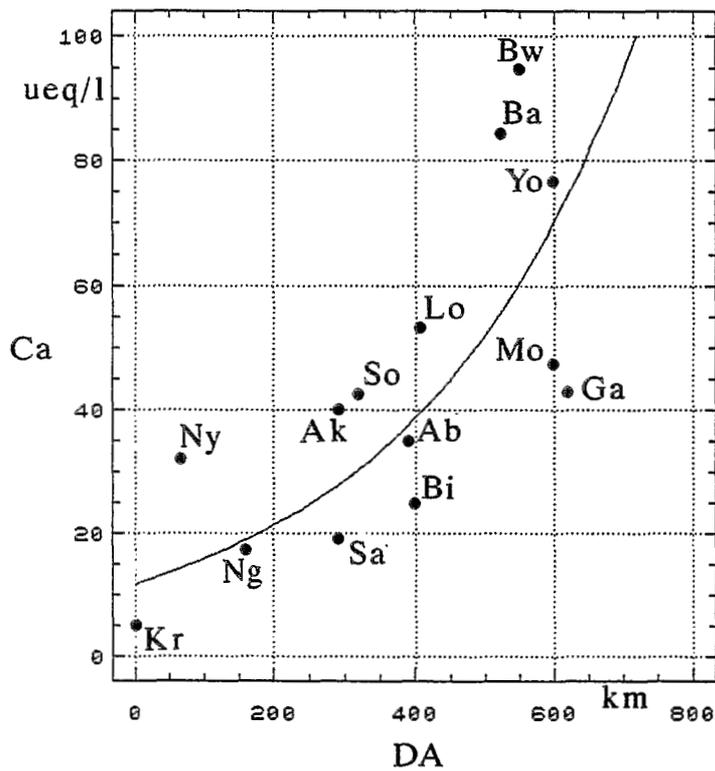
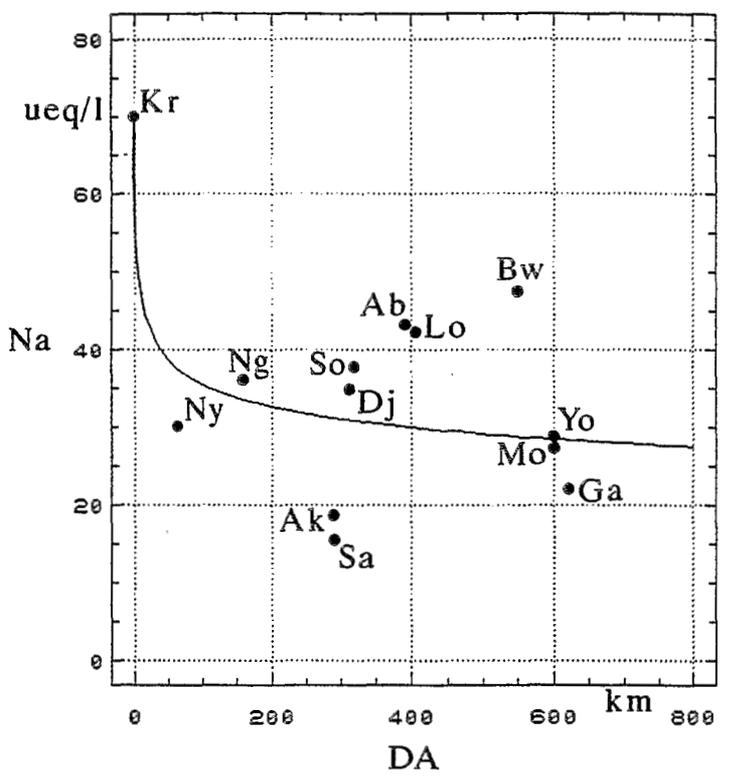
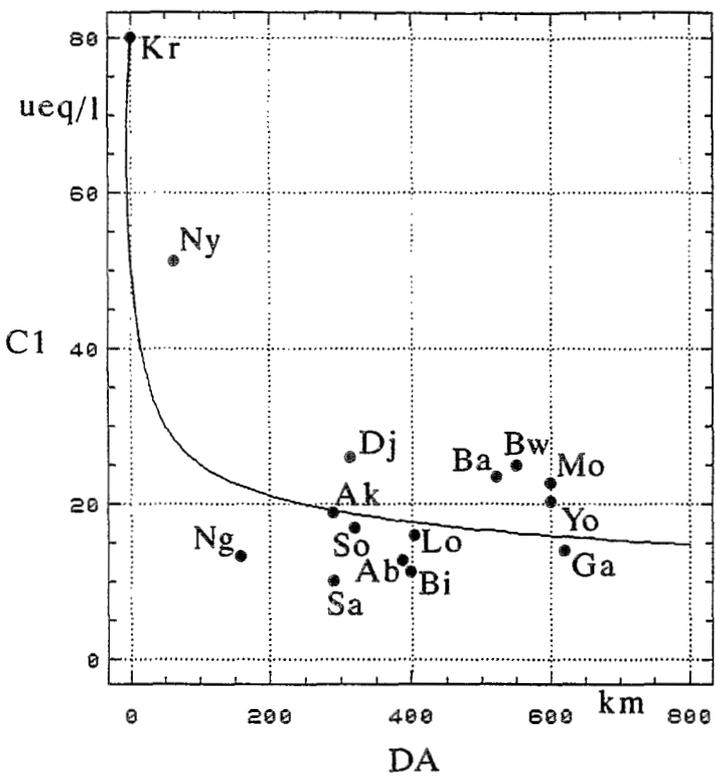
Les deux courbes sont comparables à celles représentées par MEYBECK (1984) pour les pluies françaises. On constate que la décroissance des chlorures est très rapide sur les 300 premiers kilomètres. En effet, les teneurs passent de $80 \mu\text{éq.l}^{-1}$ à Kribi à environ $20 \mu\text{éq.l}^{-1}$ dans l'axe Djoum-Sangmélina-Somalomo-Akonolinga. Puis elles se stabilisent entre 10 et $20 \mu\text{éq.l}^{-1}$ jusqu'à Gari-Gombo-Yokadouma à l'est, en passant par Abong-Mbang-Lomié au centre de notre zone d'intérêt. Cette décroissance confirme la prédominance de l'origine marine des chlorures dans les eaux pluviales analysées.

Pour ce qui est de l'évolution du sodium dont la teneur est de $70 \mu\text{éq.l}^{-1}$ à Kribi, elle est semblable à celle du chlore. Toutefois, on note une dispersion des points à partir de 200 km et des teneurs relativement élevées. On peut les imputer aux apports supplémentaires dus aux poussières éoliennes.

La figure 6-12 montre également l'évolution du Calcium et du potassium en rapport avec l'éloignement à l'Atlantique. Contrairement à celle des chlorures et du sodium, elles suivent un modèle exponentiel d'équations :

$$\text{Ca}^{++} = 11,7.\exp(3.10^{-3} \text{ Da}) \quad r = 0,76 \quad (6-5)$$

$$\text{K}^+ = 5,8.\exp(2.10^{-3} \text{ Da}) \quad r = 0,69 \quad (6-6)$$



Légende :

- | | | | |
|----------------|------------------|------------------|------------------|
| Bw : Biwala | Ny : Nyabessan | Ga : Gari-Gombo | Dj : Djoum-Mbang |
| Kr : Kribi | Ak : Akonolinga | Sa : Sangmélisma | So : Somakomo |
| Lo : Lomié | Ab : Abong-Mbang | Ng : Ngoazik | Ba : Batouri |
| Mo : Moloundou | Yo : Yokadouma | Bi : Bi | |

Figure 6-12 : Evolution des teneurs en éléments des précipitations (ueq.l⁻¹) en fonction de la distance à l'Océan Atlantique

Cette évolution est différente de celle trouvée par MEYBECK (1984) pour les mêmes ions dans les pluies françaises. Par contre, elle est semblable à celle donnée par cet auteur suivant le facteur d'enrichissement relatif aux chlorures. Nos relations traduisent un enrichissement par les poussières éoliennes et/ou les émissions biogéniques de la forêt de l'Atlantique ($\text{Ca}^{++} = 5 \mu\text{éq.l}^{-1}$ et $\text{K} = 3 \mu\text{éq.l}^{-1}$ à Kribi) vers l'arrière-pays où on a mesuré des teneurs en Ca^{++} de $95 \mu\text{éq.l}^{-1}$ à Biwala et en K^+ de $35 \mu\text{éq.l}^{-1}$ à Gari-Gombo. DURAND (1989) est arrivé à la conclusion que l'origine de ces deux cations dans les précipitations est essentiellement continentale.

En définitive, on peut dire que parmi les ions mesurés dans nos échantillons de pluie, seuls les chlorures, et dans une moindre mesure le sodium, montrent une origine océanique nette, l'influence continentale et de la biomasse forestière étant assez marquée sur les autres.

* Les relations inter-éléments

Afin de préciser les éléments d'origine commune probable, nous avons calculé la matrice de corrélations totales des teneurs en ions (tableau 6-18). Les coefficients de corrélation, faibles dans l'ensemble, indiquent des liaisons assez lâches entre les éléments, dues sans doute à la multiplicité de leur origine. Les plus élevés sont de l'ordre de 0,6 pour les relations Ca-K, Ca-SO₄, Mg-K et K-SO₄. En somme, les relations inter-éléments ne semblent acceptables que pour les espèces chimiques susceptibles d'avoir entre autres une origine biogénique forestière assez marquée.

Par ailleurs, toujours dans le souci d'approcher la participation des différents réservoirs aux espèces chimiques des précipitations et à l'instar de MEYBECK (1984), nous avons calculé à chaque poste les rapports ioniques entre les teneurs ($\mu\text{éq.l}^{-1}$) en éléments et l'ion Cl^- dont l'origine marine a déjà été démontrée. Les résultats en % sont donnés dans le tableau 6-19 en regard des teneurs en Cl^- . Il se dégage de ce tableau que les rapports ioniques des éléments sont faibles dans les précipitations recueillies à Kribi (2 à 20 %) pour tous les ions, sauf celui du sodium qui est de l'ordre de 90 %. Par contre, lorsqu'on s'éloigne de l'Atlantique vers l'est du Cameroun, on note une augmentation des rapports ioniques pour la plupart des éléments, atteignant les valeurs de près de 400 % notamment pour le calcium. Ceux des nitrates sont inférieurs à 100 %, de même que ceux des sulfates et du potassium, en dépit de quelques valeurs se situant au-delà. Il importe de signaler par ailleurs que le rapport ionique du sodium, qui est de l'ordre de 100 % à Kribi, baisse d'abord à 59 % à Nyabessan (65 km de l'Atlantique) avant de remonter vers les 100 premiers kilomètres.

Tableau 6-18 : Relations entre les différents éléments des précipitations : matrice de corrélations totales

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 15 NOMBRE DE VARIABLES : 11

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	PH	CND	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3
PH	1.000									
CND	0.442	1.000								
Ca	-0.025	0.434	1.000							
Mg	-0.284	0.320	0.325	1.000						
Na	0.609	0.345	0.268	0.167	1.000					
K	-0.645	0.176	0.571	0.566	-0.070	1.000				
HCO3	-0.352	0.165	0.065	0.378	-0.020	0.183	1.000			
Cl	0.265	-0.099	-0.221	-0.197	0.492	-0.146	-0.266	1.000		
SO4	-0.491	0.114	0.538	0.218	-0.069	0.559	0.277	-0.017	1.000	
NO3	0.010	0.401	0.440	0.491	0.189	0.405	-0.101	-0.029	0.259	1.000

La proportion des espèces ioniques des précipitations par rapport aux chlorures permet de dégager qu'à Kribi, la part océanique en chlore et en sodium est identique. Les pluies s'appauvrissent ensuite en ces éléments lorsqu'on s'éloigne de l'Atlantique, puis interviennent les autres réservoirs, notamment les poussières éoliennes, avec un apport supplémentaire en sodium particulaire dont une partie se dissout dans les précipitations et inverse la tendance initiale. Pour ce qui concerne les autres éléments, la part océanique est faible à partir de Kribi. L'augmentation des rapports ioniques à l'intérieur du pays est donc liée aux apports d'origine continentale, anthropique (feux de biomasse) et à l'aérosol forestier.

D'autre part, on a établi les relations entre les proportions ioniques (R_{X_i}) et l'ion Cl^- , où R est le rapport entre l'élément X_i et l'ion chlorure. Les proportions en Mg^{++} , K^+ , HCO_3^- et NO_3^- corrélées avec les teneurs en Cl^- obéissent à des lois de type hyperbolique (figure 6-13) d'équations ci-dessous :

$$R_{Mg} = 2,1.10^3 / (Cl^-)^{1,102} \quad r = -0,8874 \quad (6-7)$$

$$R_K = 1,9.10^3 / (Cl^-)^{1,147} \quad r = -0,6785 \quad (6-8)$$

$$R_{NO_3} = 0,53.10^3 / (Cl^-)^{1,003} \quad r = -0,6083 \quad (6-9)$$

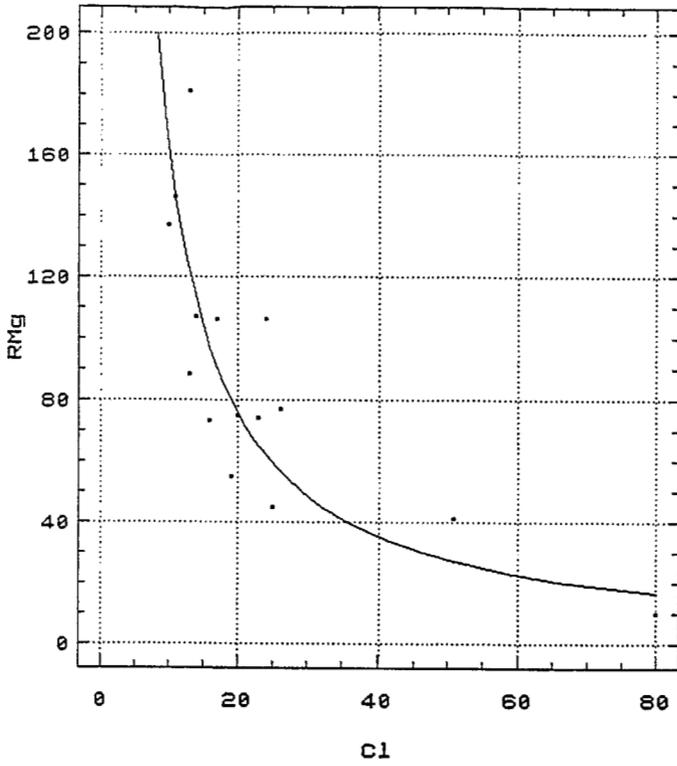
$$R_{HCO_3} = 3,4.10^3 / (Cl^-)^{1,148} \quad r = -0,8628 \quad (6-10)$$

Ces relations dont les coefficients de corrélation sont compris entre -0,6 (nitrates) et -0,9 (magnésium) concernent particulièrement les ions sur lesquels l'influence océanique semble peu marquée. Elles traduisent une évolution du rapport ionique inversement proportionnelle aux concentrations des chlorures. En d'autres termes, plus on est proche de la côte, moins les ions Mg^{++} , K^+ , NO_3^- , et HCO_3^- sont abondants et plus on s'en éloigne, plus ces ions augmentent. Cette évolution met en évidence la forte contribution des sources terrigène, biogéniques forestières et des feux de biomasse aux teneurs de ces ions et à leur grande variabilité temporelle. S'agissant des ions HCO_3^- , leurs fortes teneurs dans les précipitations pourraient sans doute être liées à la durée de contact entre les eaux météoriques et le gaz carbonique.

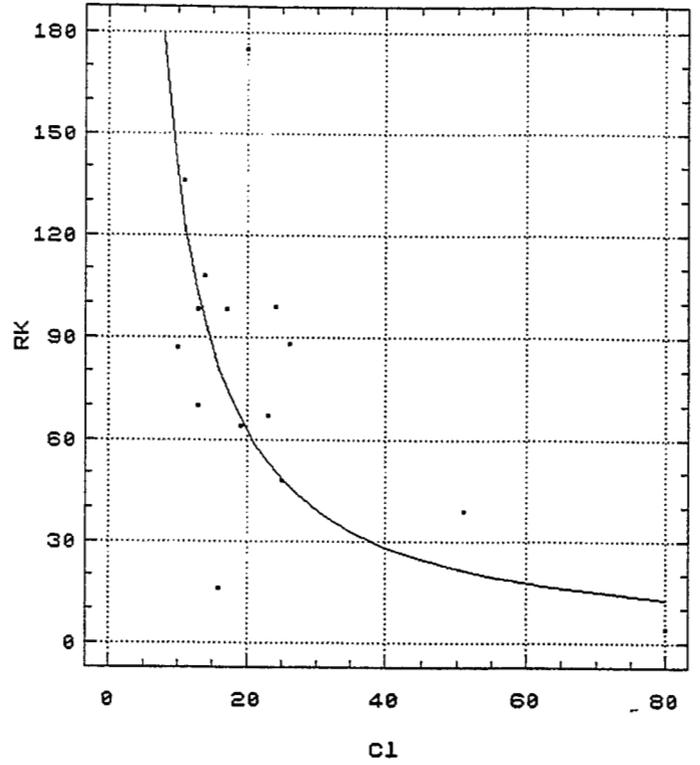
Tableau 6-19 : Rapport en pourcentage entre les chlorures et les autres éléments des précipitations

Rapport (%) entre le Chlore et les autres éléments en regard du Chlore (µéq/l)											
	DA	pH	CND	Ca	Mg	Na	K	HCO3	SO4	NO3	Cl
KRIBI	1	6,8	10	6	10	87	4	21	13	2	80,0
MOLOUNDOU	600	6,0	9	211	74	123	67	111	62	26	22,5
BIWALA	550	6,7	20	379	45	191	48	114	83	35	24,9
YOKADOUMA	600	5,5	10	379	75	141	175	84	88	35	20,2
GARI-GOMBO	620	6,2	17	309	107	157	108	144	143	46	13,9
LOMIE	405	6,9	10	332	73	264	16	53	13	36	16,0
SOMALOMO	320	6,2	12	252	106	225	98	143	78	45	16,8
SANGMELIMA	290	6,7	20	192	137	153	87	170	20	37	10,0
DJOUM	310	6,1	18	336	77	134	88	77	98	38	26,0
BI	400	5,5	10	221	146	39	136	392	129	14	11,3
BATOURI	520	6,7	25	356	106	351	99	143	60	31	23,6
ABONG-MBANG	390	6,1	10	276	181	343	98	223	116	56	12,6
AKONOLINGA	290	6,1	10	214	55	100	64	96	107	6	18,7
NGOAZIK	160	6,4	15	130	88	273	70	194	87	70	13,1
NYABESSAN	65	6,1	15	62	41	59	39	33	27	23	51,2
DA : Distance à l'Atlantique											
CND : conductivité en µS/cm											

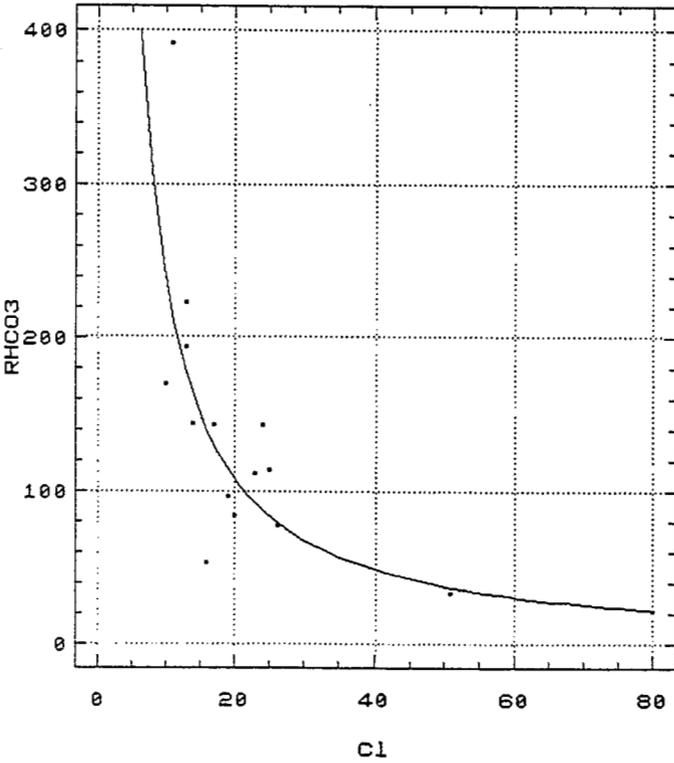
Regression of RMg on Cl



Regression of RK on Cl



Regression of RHC03 on Cl



Regression of RN03 on Cl

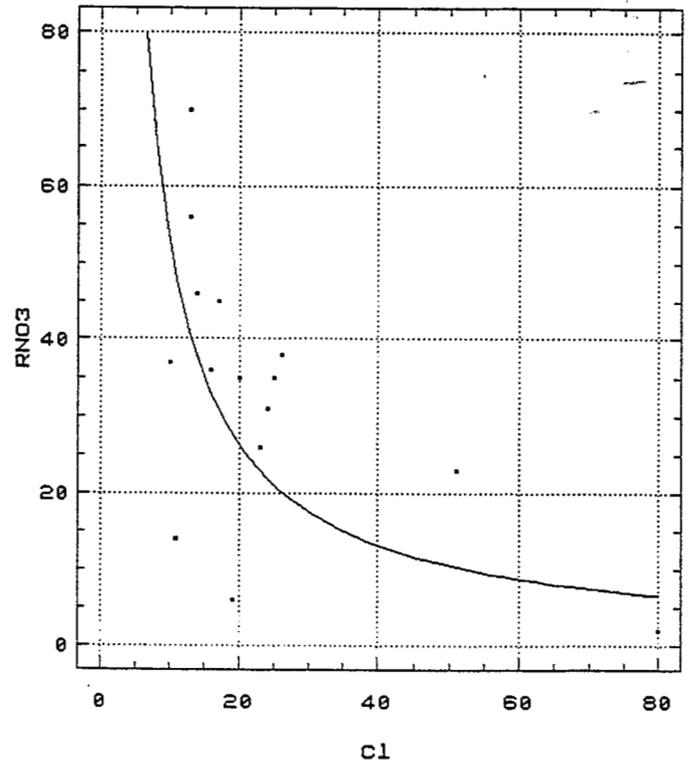


Figure 6-13 : Relation entre les rapports éléments/chlore (%) et les teneurs en Cl⁻ (μég.l⁻¹)

6.2.2.3. Bilans des apports atmosphériques

L'établissement des bilans des apports atmosphériques se fera à deux niveaux. Dans un premier temps, nous les calculerons à l'échelle des postes d'échantillonnage relativement à la superficie que ceux-ci contrôlent.

Dans un deuxième temps, nous calculerons la moyenne sur les bassins versants. Mais à cause du piégeage des éléments sur les versants, nous n'établirons pas de bilans entrées-sorties des bassins. Nous nous limiterons à une comparaison entre les apports atmosphériques moyennés par bassin et flux dissous évacués à son exutoire. Dans cette optique, nous calculerons les apports atmosphériques moyens en même temps que les exportations en solution des cours d'eau.

S'agissant des apports atmosphériques par poste pluviométrique, nous avons calculé les flux par cycle hydrologique, afin de les comparer entre eux d'une part, et avec la moyenne d'autre part. Bien entendu, les sites n'ayant qu'une année d'observations ne sont pas très représentatifs. Ils sont néanmoins maintenus pour donner l'ordre de grandeur des apports aux postes pluviométriques considérés.

Les résultats ramenés à l'unité de surface sont regroupés dans le tableau 6-20. Nous les avons illustrés sur les figures 6-14. Si on considère les apports par espèces chimiques, on s'aperçoit que dans l'ensemble, les bicarbonates, le calcium et dans une moindre mesure le sodium sont les plus abondants sur le bassin de la Ngoko. Par ailleurs, ils montrent une très grande variabilité spatio-temporelle. En effet, les apports spécifiques en bicarbonates varient entre $1,4 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1991/92 à Moloundou et 1989/90 à Yokadouma) et $4,2 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1989/90 à Sangmélina). Pour ce qui concerne le calcium, les apports sont compris entre $0,4 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1989/90 à Moloundou et à Sangmélina) et $3,3 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1990/91 à Yokadouma). Quant au sodium, ses apports spécifiques varient entre $0,2 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1989/90 à Moloundou et à Gari-Gombo) et $3,4 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1991/92 à Somalomo). Ces deux constats traduisent la double ou la triple origine de ces éléments.

Par contre, les apports en chlorures sont relativement constants. En effet, si on excepte les apports à Bi qui ne concernent que 4 prélèvements, on constate que les apports en Cl^- évoluent entre $0,7 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1989/90 à Moloundou et 1990/91 à Sangmélina) et $1,9 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1990/91 à Djoum). Cette stabilité de l'ion Cl^- témoigne une fois de plus de l'unicité de son origine marine.

Tableau 6-20 : Apports atmosphériques spécifiques par poste pluviométrique en t.km⁻². an⁻¹

Apports atmosphériques par poste pluviométrique (t/km ² an)											
Vp	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	SiO ₂	Md	
MOLOUNDOU											
1989/90	15,9	0,4	0,2	0,2	0,9	1,6	0,7	0,6	0,1	0,4	5,1
1990/91	22,5	2,0	0,3	1,0	0,8	2,3	1,2	0,7	0,4	0,3	8,9
1991/92	23,1	1,2	0,2	1,2	0,2	1,4	1,0	1,1	0,9	0,2	7,2
Moy/3ans	20,5	1,2	0,2	0,8	0,6	1,8	0,9	0,8	0,5	0,3	7,1
BIWALA											
1990/91	15,1	2,9	0,2	1,8	1,0	2,2	1,2	0,8	0,7	0,2	10,9
1991/92	16,0	2,6	0,2	1,4	0,3	2,8	1,4	2,1	0,9	0,2	11,9
Moy/2ans	15,6	2,7	0,2	1,6	0,7	2,5	1,3	1,4	0,8	0,2	11,4
YOKADOUMA											
1989/90	6,9	0,6	0,2	0,3	3,8	1,4	1,0	1,3	0,6	0,9	10,1
1990/91	7,2	3,3	0,5	0,7	2,0	1,5	1,0	1,4	0,6	0,3	11,3
1991/92	7,5	2,9	0,1	1,9	0,1	1,6	1,1	1,0	0,7	0,3	9,6
Moy/3ans	7,2	2,2	0,3	1,0	1,9	1,5	1,0	1,2	0,6	0,5	10,3
GARI-GOMBO											
1990/91	2,3	0,8	0,5	0,7	1,7	3,5	1,4	3,2	1,2	0,3	14,0
1991/92	1,7	2,5	0,1	1,4	0,1	2,6	1,0	1,7	0,8	0,2	10,5
Moy/2ans	2,0	1,7	0,3	2,1	0,9	3,0	1,2	2,5	1,0	0,3	12,2
LOMIE											
1990/91	22,2	0,6	0,3	1,3	0,3	1,8	0,6	0,2	0,2	0,4	5,8
	20,5	2,9	0,2	2,0	0,0	0,0	1,3	0,2	1,0	0,4	7,9
Moy/2ans	21,4	1,8	0,2	1,6	0,2	0,9	0,9	0,2	0,6	0,4	6,8
SOMALOMO											
1989/90	12,0	1,0	0,6	0,8	2,0	3,3	1,2	1,3	1,0	0,7	11,8
1990/91	12,6	1,6	0,3	1,0	0,8	2,3	0,8	0,8	0,8	0,4	8,8
1991/92	15,6	2,2	0,3	3,4	0,7	2,5	1,3	1,4	0,7	0,5	13,1
Moy/3ans	13,4	1,6	0,4	1,7	1,1	2,7	1,1	1,2	0,8	0,5	11,2
SANGMELIMA											
1989/90	12,0	0,4	0,4	0,4	0,5	4,2	1,4	0,4	0,4	0,3	8,5
1990/91	5,6	1,3	0,4	1,1	1,1	2,0	0,7	0,2	0,7	0,3	7,2
Moy/2ans	8,8	0,8	0,4	0,8	0,8	3,1	1,1	0,3	0,5	0,3	7,9
DJOUM											
1990/91	5,3	2,6	0,5	1,1	1,9	1,9	1,9	1,1	1,0	0,5	12,0
1991/92	4,7	2,5	0,3	1,3	0,8	1,7	0,9	2,4	0,9	0,3	10,9
Moy/2ans	5,0	2,6	0,4	1,2	1,3	1,8	1,4	1,8	0,9	0,4	11,5
BI											
1990/91	9,7	0,8	0,3	0,2	0,9	4,0	0,5	1,1	0,1	0,4	8,2
Vp : volume d'eau précipité en km ³											

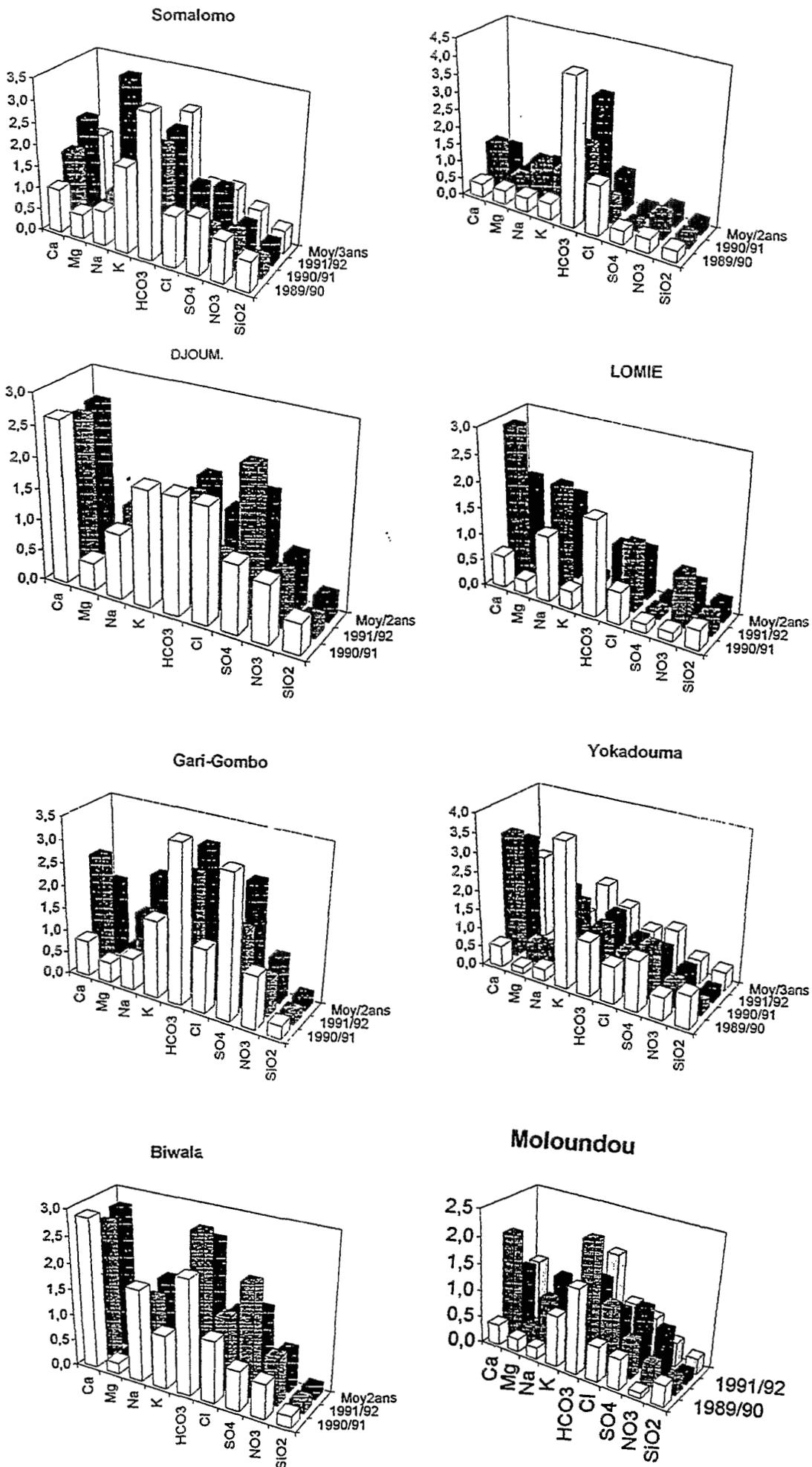


Figure 6-14 : Apports atmosphériques spécifiques par poste pluviométrique en t.km⁻². an⁻¹

Quant au reste des éléments, en dépit de quelques oscillations, on peut dire que les apports sont faibles et relativement constants.

En définitive, sur l'ensemble du bassin de la Ngoko, le bilan quantitatif des matières dissoutes dans les précipitations, par cycle hydrologique et par poste de collecte, varie entre $5,1 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1989/90 à Moloundou) et $13,1 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1991/92 à Somalomo). Les moyennes calculées à l'issue des 3 campagnes de mesure sont comprises entre $6,8 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ à Lomié et $11,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ à Djoum. De nombreux facteurs concourent à cette variabilité spatio-temporelle des apports atmosphériques sur notre bassin. Il s'agit notamment de la dissolution des poussières éoliennes dont une part importante pourrait être imputée à la remobilisation des suspensions (proximité des routes) et de la variabilité spatio-temporelle de la pluviosité.

En conclusion, on peut dire que l'ion Cl^- constitue la principale signature des apports atmosphériques de source marine de nos échantillons, les autres espèces chimiques étant issues de deux, voire trois sources. Par ailleurs, les ions HCO_3^- , Ca^{++} et Na^+ sont les plus abondants. Par conséquent, ils déterminent le faciès hydrochimique de nos précipitations qui est de type bicarbonaté calco-sodique. D'autre part, ils témoignent de l'importance des particules solubles dans les eaux collectées, imputables non seulement aux poussières sahariennes, mais peut-être également à la contamination des échantillons par remobilisation la poussière dans l'air.

6.2.2. COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX FLUVIALES

En raison de la faible variabilité des substances en solution, nous discuterons globalement des résultats sur l'ensemble du bassin, tout en mentionnant les variantes propres à certains bassins. Toutefois, nous maintiendrons le principe consistant à discuter des résultats depuis la zone de production des matériaux en amont, vers l'aval du bassin versant.

Ainsi, après une analyse statistique descriptive des résultats obtenus sur l'ensemble du bassin, on abordera la classification des eaux étudiées. Puis, on caractérisera les principaux types d'altération chimique. Ensuite, on analysera les liaisons entre les paramètres physico-chimiques ainsi que l'origine des eaux avant de quantifier, pour terminer, les espèces chimiques évacuées à l'exutoire des bassins fluviaux en regard de celles apportées par les précipitations.

6.2.2.1. Analyse descriptive de la qualité des eaux

Compte tenu du nombre élevé de variables (15) et de celui des stations où elles ont été mesurées (15), on a regroupé les résultats de certaines stations secondaires : les résultats obtenus aux stations de Somalomo et de Bi sur le Dja, ainsi qu'à celles affluents en amont de Bi, sont traités ensemble. Il en est de même de ceux des sous-bassins de la Bidjar, de la Bangué et de la Lokomo en aval de Biwala sur la Boumba. Nous donnons dans le tableau 6-21 les principales caractéristiques des concentrations des éléments.

Sur le Dja, les concentrations extrêmes de la charge totale dissoute sont de $11,5 \text{ mg.l}^{-1}$ (minimum) et de $55,9 \text{ mg.l}^{-1}$ (maximum) en amont tandis qu'à Moloundou-SOTREF, elles sont respectivement de 20 et de $62,4 \text{ mg.l}^{-1}$. Les moyennes sont de $22,1 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 46 %) en amont et de $34,7 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 37 %) en aval. D'une manière générale, la charge totale dissoute augmente de la source du Dja (Somalomo) vers Moloundou-SOTREF. Cette augmentation peut être liée à l'acquisition par le Dja d'une charge supplémentaire provenant de l'altération des roches plus tendres dans la partie intermédiaire du bassin.

Sur la Boumba, les concentrations minimales et maximales des matières dissoutes sont respectivement de 28,1 et de $45,8 \text{ mg.l}^{-1}$ à Biwala et de 36,6 et $91,9 \text{ mg.l}^{-1}$ à Moloundou-Bac. La moyenne calculée à Biwala est de $36,6 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 18 %) alors qu'elle est de 60 mg.l^{-1} à Moloundou-Bac (CV = 28 %). Comme sur le Dja, on note sur la Boumba une augmentation de la charge soluble de la source vers l'aval. Il convient de souligner l'importance de cette augmentation sur la Boumba, où la charge dissoute passe quasiment du simple au double. Cette forte augmentation est liée aux apports des sous-bassins de la Bidjar, de la Bangué et de la Lokomo.

En effet, les concentrations des éléments dissous de ces rivières sont comprises entre 49 et 183 mg.l^{-1} , la moyenne étant de 100 mg.l^{-1} (CV = 50 %). Ces fortes charges en solution proviennent de l'altération des grès et du complexe andésito-doléritique drainés par ces rivières. On peut donc conclure que la Boumba acquiert sa forte teneur en éléments dissous lors de son passage dans la région de Bandekok-Lokomo.

A Moloundou sur la Ngoko, la concentration minimale des espèces chimiques est de $25,3 \text{ mg.l}^{-1}$ et la maximale de $78,3 \text{ mg.l}^{-1}$. La moyenne est calculée à 44 mg.l^{-1} (CV = 39 %). Cette valeur est à peu de chose près la moyenne des charges solubles des deux tributaires ($47,4 \text{ mg.l}^{-1}$). D'autre part, il importe de signaler que malgré le fait que le Dja contribue pour environ 60 % à l'écoulement de la Ngoko, la charge en solution

Tableau 6-21 : Concentrations moyennes des éléments en solution des bassins amont et de la Ngoko à Moloundou

Concentrations moyennes et extrêmes des éléments en solution en mg/l												
	pH	CE	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	SiO ₂	MD
Dja à Somalomo et à Bi (N=17)												
Moy	6,6	19,4	1,33	0,62	0,91	0,79	7,67	0,88	0,4	0,15	9,64	22,1
Méd	6,5	19,7	1,2	0,6	0,7	0,8	6,1	0,7	0,5	0,6	7,6	18,9
ET	0,34	10	0,53	0,16	0,59	0,54	4,02	0,55	0,34	0,27	7	10,2
Min	6,2	10	0,8	0,4	0,01	0,01	2,4	0,2	0,01	0,01	3,3	11,5
Max	7,5	40	2,8	1	2,1	1,6	15,9	2,2	1,1	0,7	35,6	55,9
Dja à Moloundou-SOTREF (N=12)												
Moy	6,98	35,6	2,69	1,27	1	0,73	14,3	1,19	1,08	0,71	12,6	34,7
Méd	6,8	35,3	2,45	1,15	1,05	0,5	13,6	1,05	1,05	0,6	10,3	31
ET	0,53	8,86	0,78	0,4	0,54	0,52	4,92	0,52	0,27	0,45	8,69	13
Min	6,2	24	1,9	0,9	0,3	0,1	8,5	0,3	0,6	0,2	4,1	20,3
Max	8	50	4,2	2,2	2,1	1,8	25	2,1	1,5	1,6	32,6	62,4
Boumba à Biwala (N=9)												
Moy	7	37,5	3,93	1,39	1,47	0,98	15,7	1,6	0,62	0,69	10,2	36,6
Méd	7	38,2	2,4	1,3	1,4	1,1	14	1,5	0,7	0,6	10,1	33,3
ET	0,26	7,28	3,74	0,28	0,61	0,47	4,35	0,6	0,35	0,59	1,93	6,4
Min	6,7	29,1	1,8	1,1	0,9	0,3	11	1	0,01	0,01	5,9	28,1
Max	7,6	50	13,6	2	2,9	1,6	24,4	2,8	1,1	2	13	45,8
Lokomo, Bangué et Bidjar (N=21)												
Moy	7,5	91,3	9,11	3,36	3,4	1,74	50,4	1,92	1,15	1,93	26,7	99,6
Méd	7,5	84,3	8	2,9	2,2	1,2	42,1	1,6	1,2	1,5	26,3	88,9
ET	0,35	40,6	5,74	1,79	3,36	1,9	26,9	1,03	0,48	1,88	15,2	45,9
Min	7	41,8	3,2	1,2	0,01	0,4	10,4	0,6	0,1	0,2	8,8	48,8
Max	8,1	170	27	7,3	14,6	9,4	97,6	4,5	2,2	8,8	57,7	183
Boumba à Moloundou-Bac (N=13)												
Moy	7,1	52,2	5,42	2,56	1,29	1,04	30,3	1,32	0,96	0,78	13,4	56,9
Méd	7,2	50	4,6	2,1	1,2	1	28,1	1,1	0,9	0,7	10,9	53,8
ET	0,46	10,5	2,2	1,22	0,64	0,48	9,56	0,46	0,23	0,33	8,2	17
Min	6,1	40,6	3	1,5	0,5	0,4	18,3	0,9	0,8	0,5	5,7	36,6
Max	8	75	9,6	5,8	2,5	2	48,8	2,5	1,7	1,7	39	91,9
Ngoko à Moloundou (N=19)												
Moy	6,88	42,2	3,56	1,72	1,21	1,25	18,9	1,25	1,66	0,73	15,3	44,4
Méd	6,9	43	3,4	1,5	1,2	1,2	17,1	1,1	1,2	0,6	12,3	35,5
ET	0,4	14,1	1,32	0,66	0,59	0,98	6,88	0,5	1,63	0,53	9,92	17,2
Min	5,9	20	1,6	1	0,2	0,01	7,9	0,7	0,6	0,2	4,7	25,3
Max	7,6	72,6	6,2	3,4	2,2	3	32,3	2,3	7,5	2,2	35,5	78,3
Légende :												
CE : Conductivité en $\mu\text{s}/\text{cm}$; N = Nombre d'échantillons												
Moy : Moyenne ; Méd : Médiane ; ET : écart-type												
Min : Minimum ; Max : Maximum												

celle-ci est imposée par celle de la Boumba, et plus particulièrement par celles de la Bidjar, de la Bangué et de la Lokomo, du fait de leur forte minéralisation.

Après ce passage en revue de la charge totale dissoute par bassin versant, nous allons examiner les différents paramètres physico-chimiques, cette fois-ci non plus par bassin versant, mais plutôt à l'échelle de l'ensemble des résultats obtenus sur l'ensemble du bassin de la Ngoko.

* Le pH

Les valeurs de pH sont comprises entre 5,9 à Moloundou et 8,1 à Lokomo et à Bandekok. La valeur 8,1 est proche du seuil (8,3) à partir duquel on peut avoir des carbonates dans les eaux. Elle indique que les eaux de la Bidjar et de la Lokomo sont alcalines. La médiane et la moyenne sont égales à 7,0 (CV = 7 %). Elles traduisent ainsi une neutralité des eaux dans leur globalité.

* La conductivité

Elle varie de $10 \mu\text{S.cm}^{-1}$ sur le Dja supérieur à $170 \mu\text{S.cm}^{-1}$ sur la Lokomo. La moyenne est de l'ordre de $50 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (CV = 66 %). Elle traduit la faible à moyenne salinité des eaux.

* Le calcium

Les teneurs en calcium sont comprises entre $0,8 \text{ mg.l}^{-1}$ à Djaposten (Dja) et 27 mg.l^{-1} sur la Lokomo. La concentration moyenne est de $4,6 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 90 %). Cette forte variabilité des teneurs en Ca^{++} est calquée sur les différents faciès géologiques des bassins.

* Le magnésium

Les teneurs en magnésium varient de $0,4 \text{ mg.l}^{-1}$ à Bi (Dja) à $7,3 \text{ mg.l}^{-1}$ sur la Lokomo. La concentration moyenne est de 2 mg.l^{-1} (CV = 73 %).

* Le sodium

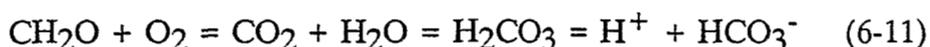
Cet élément n'a pas été dosé dans certains échantillons, ses teneurs étant en-deçà du seuil de détection du spectromètre. Par contre, dans d'autres échantillons, ses teneurs atteignent $14,6 \text{ mg.l}^{-1}$ (Bidjar), ce qui explique sa forte variabilité. La moyenne est calculée à $1,67 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 115 %).

* Le potassium

Pour les mêmes raisons mentionnées ci-dessus, le potassium n'a pas été dosé sur tous les échantillons. La variation des concentrations est cependant moins forte. La teneur maximale est de $9,4 \text{ mg.l}^{-1}$ (Lokomo). La concentration moyenne se situe autour de $1,15 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 97 %).

* Les bicarbonates

En raison du fait que des valeurs de pH $>8,3$ n'aient été mesurées nulle part dans le bassin, y compris les rivières drainant la région de Mintom où les formations carbonatées sont signalées (voir chapitre 1), on peut émettre l'hypothèse selon laquelle les bicarbonates dosés sont le produit de l'oxydation de la matière organique selon la réaction ci-après :



Les bicarbonates sont les ions les plus abondants de nos eaux. Leurs teneurs varient entre $2,4 \text{ mg.l}^{-1}$ à Djaposten (Dja) et $97,6 \text{ mg.l}^{-1}$ sur la Lokomo. La concentration moyenne est de 25 mg.l^{-1} (CV = 84 %).

* Les chlorures

Les teneurs en chlore sont comprises entre $0,2 \text{ mg.l}^{-1}$ à Somalomo et $4,5 \text{ mg.l}^{-1}$ sur la Bangué. Cette forte valeur semble douteuse. La concentration moyenne est de l'ordre de $1,37 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 55 %), soit quasiment le double de celle des précipitations.

* Les sulfates

Les teneurs en sulfates de certains échantillons n'ont pu être déterminées pour les raisons évoquées plus haut. La plus forte teneur est celle de Moloundou sur la Ngoko. Cette concentration de SO_4^{--} dont l'échantillon a été prélevé au port de Moloundou est suspecte. La teneur moyenne est de $1,03 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 88 %).

* Les nitrates

Les nitrates font partie des ions dont le dosage n'a pas été fait pour certains échantillons. La plus forte teneur a été observée sur la Bangué ($8,8 \text{ mg.l}^{-1}$). Elle peut être liée aux fertilisants dans ce bassin agricole. La concentration moyenne est de $0,9 \text{ mg.l}^{-1}$ (CV = 126 %).

* La silice

Les concentrations de silice varient entre $3,3 \text{ mg.l}^{-1}$ à Somalomo et $57,5 \text{ mg.l}^{-1}$ à Bandekok (Bidjar). Sa teneur moyenne se situe autour de 16 mg.l^{-1} (CV = 75 %). C'est le deuxième élément le plus abondant.

En définitive, la charge totale dissoute sur l'ensemble du bassin de la Ngoko est comprise entre $11,5 \text{ mg.l}^{-1}$ sur le Dja et 183 mg.l^{-1} sur la Lokomo. La concentration moyenne se situe autour de 53 mg.l^{-1} (CV = 70 %).

En conclusion de ce suivi de la variabilité spatiale des espèces chimiques et de la charge soluble totale sur le bassin de la Ngoko, on peut dire que les eaux se concentrent de la source vers l'aval du bassin fluvial. Lors de leur transit, les cours d'eau acquièrent des charges supplémentaires provenant surtout de l'altération plus importante du substratum rocheux et moins par évaporation, comme c'est le cas sur d'autres bassins.

6.2.2.2. Typologie des eaux

Pour représenter la composition chimique des eaux, nous utiliserons les diagrammes de PIPER.

Les eaux du Dja sont faiblement minéralisées alors que celles de la Boumba, et particulièrement de la Bidjar, de la Bangué et de la Lokomo le sont un peu plus. Nous représenterons la composition chimique des eaux suivant les principales tendances. A cette fin, les compositions chimiques des eaux du Dja à Somalomo, de celles de Bi et des affluents en aval de Somalomo et celles de la Bidjar de celles de la Bangué et de la Lokomo ont été individualisées.

La construction des diagrammes de PIPER est réalisée avec le logiciel PIPER (MONTGAILLARD et LARAQUE, 1990). Ils sont représentés sur les figures 6-15a à 6-15c.

Il se dégage de ces diagrammes que malgré une légère dispersion des échantillons du Dja, les eaux étudiées sont bicarbonatées calco-magnésiennes.

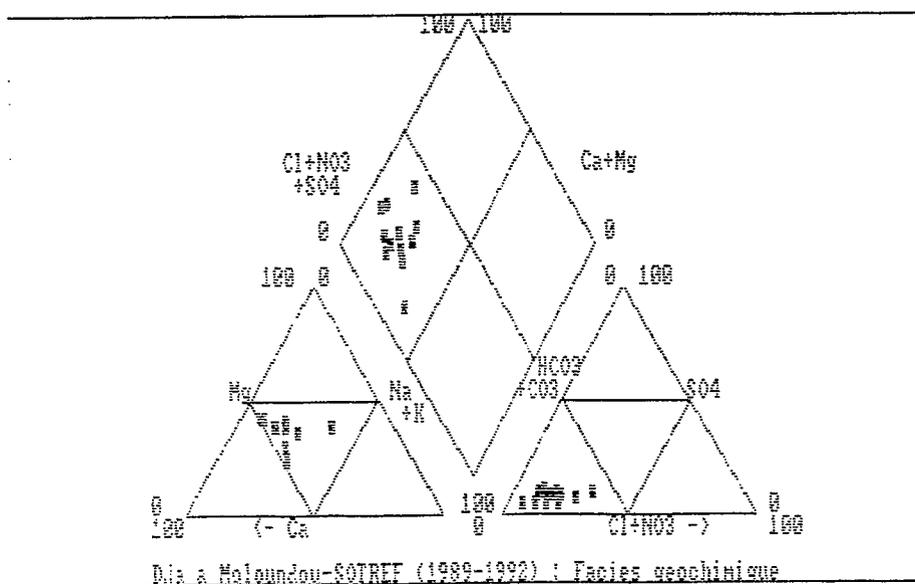
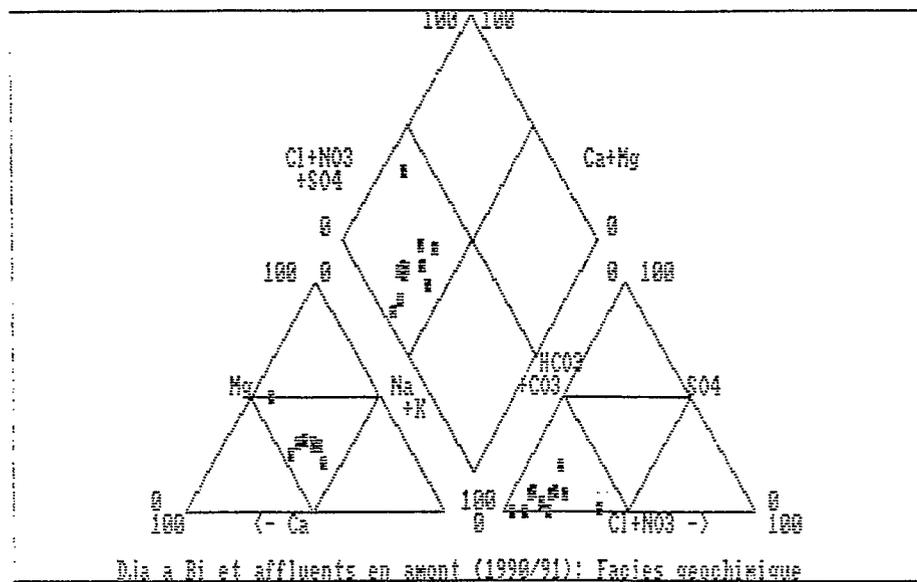
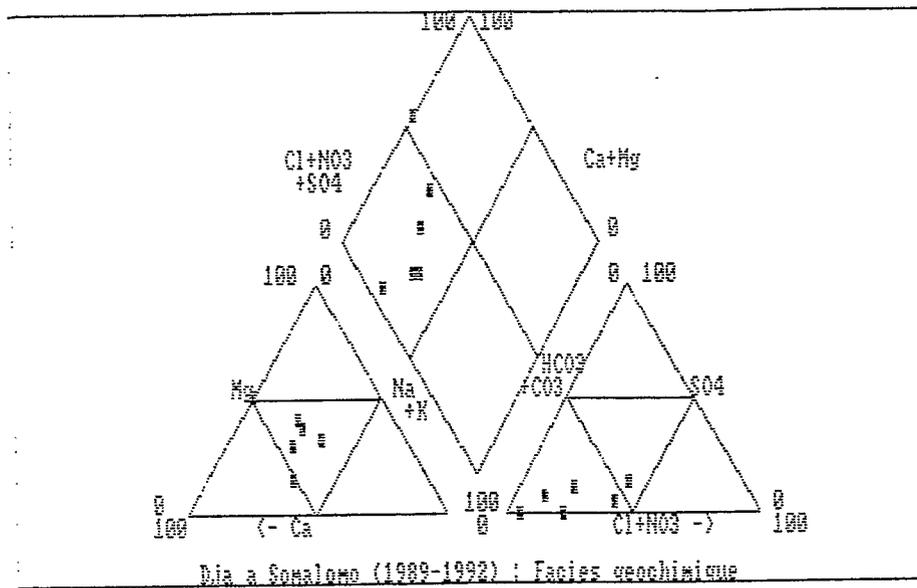


Figure 6-15 : Faciès géochimique des eaux

a) Le bassin du Dja

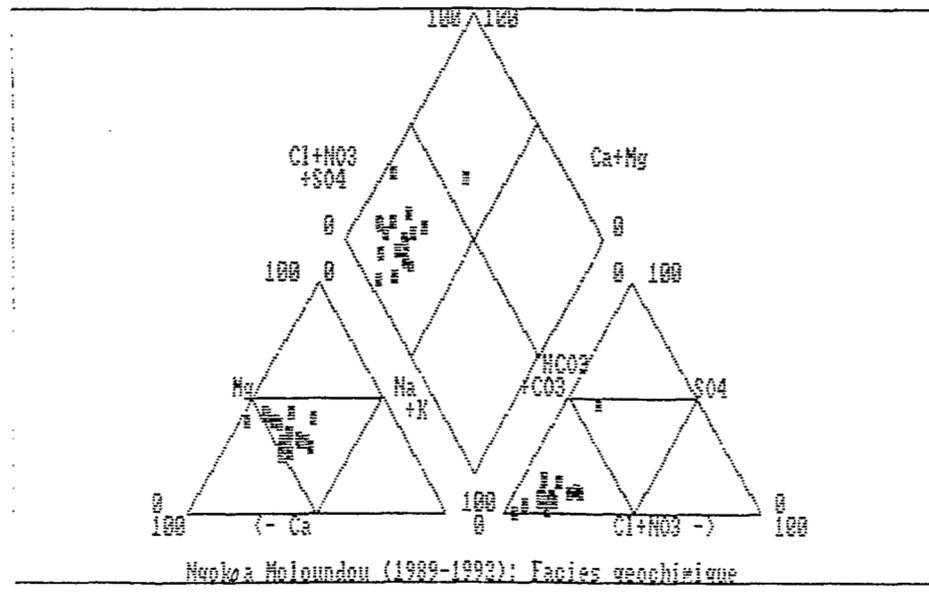
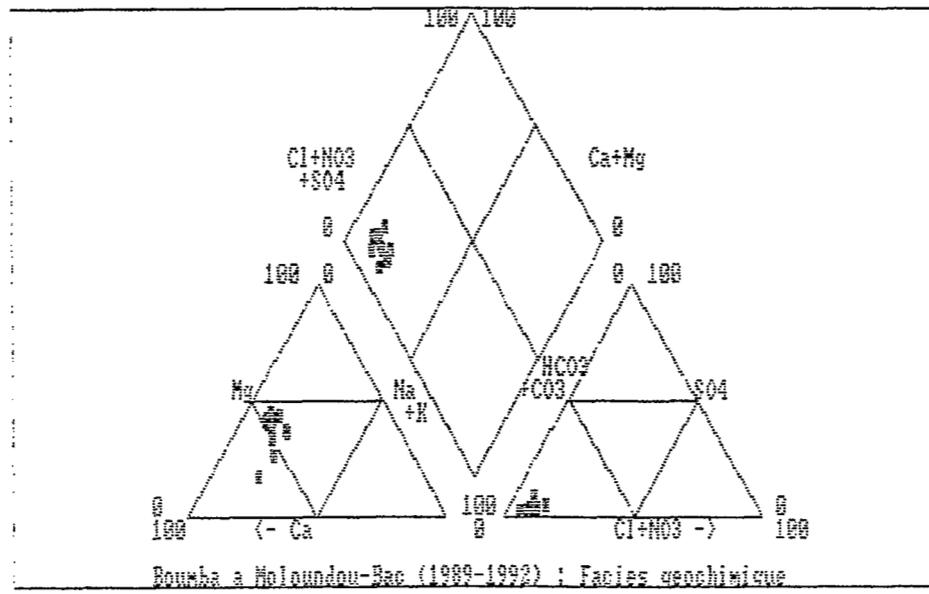
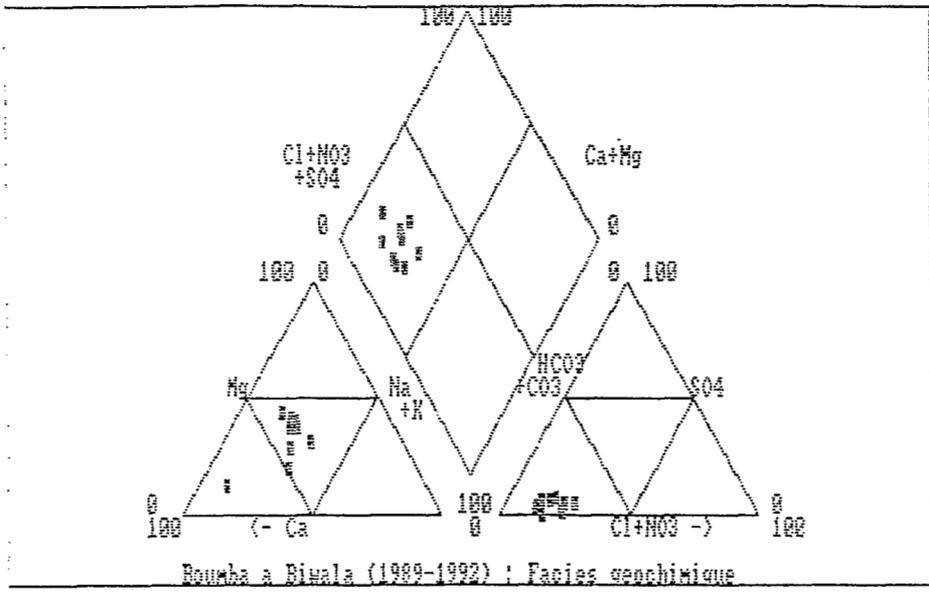


Figure 6-15 (suite) b) Les bassins de la Boumba et de la Ngoko

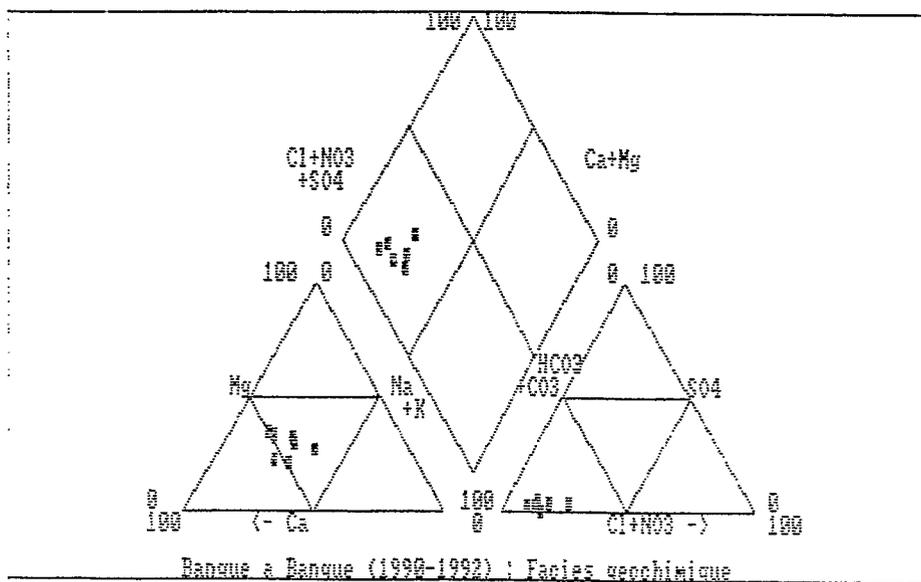
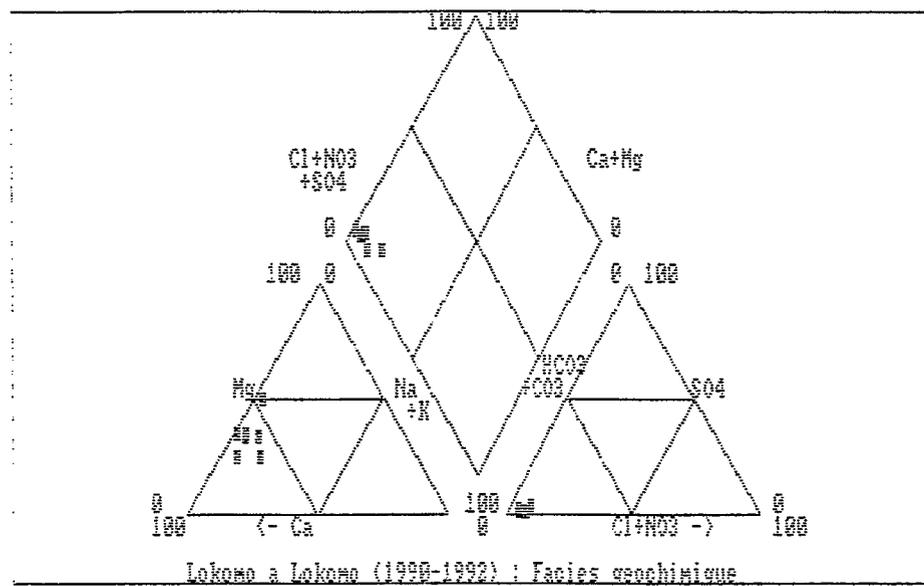
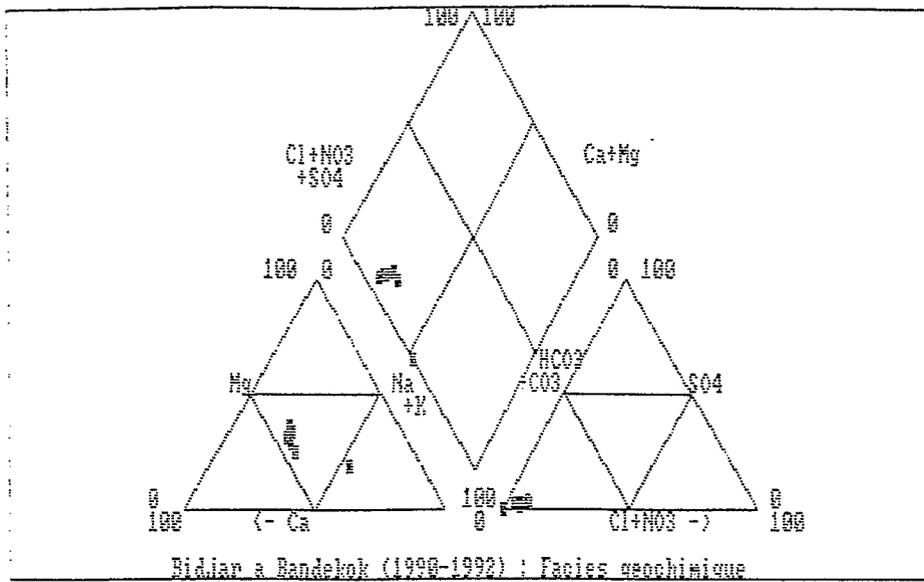


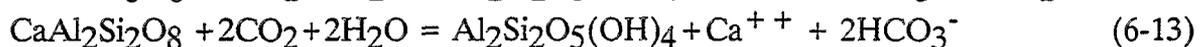
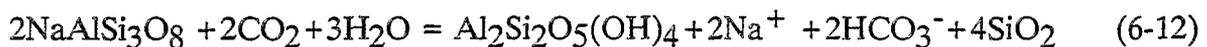
Figure 6-15 (suite) c) Les affluents de la Boumba en aval de Biwala

En résumé, on peut dire qu'en dépit de la faible salinité des eaux du Dja en amont de Moloundou d'une part, et de la forte minéralisation des eaux de la Bidjar, de la Bangué et de la Lokomo d'autre part, le faciès géochimique est le même sur tous les bassins de la Ngoko étudiés. Il est bicarbonaté mixte calco-magnésien. Ce faciès souligne la faible influence des formations carbonatées de la région de Mintom (chapitre 1) et l'absence des roches évaporitiques ainsi que de pollution dans le bassin. En définitive, les éléments proviennent essentiellement de l'altération des minéraux silicatés, notamment des feldspaths dont nous discuterons des diagrammes d'équilibre dans le prochain sous-chapitre.

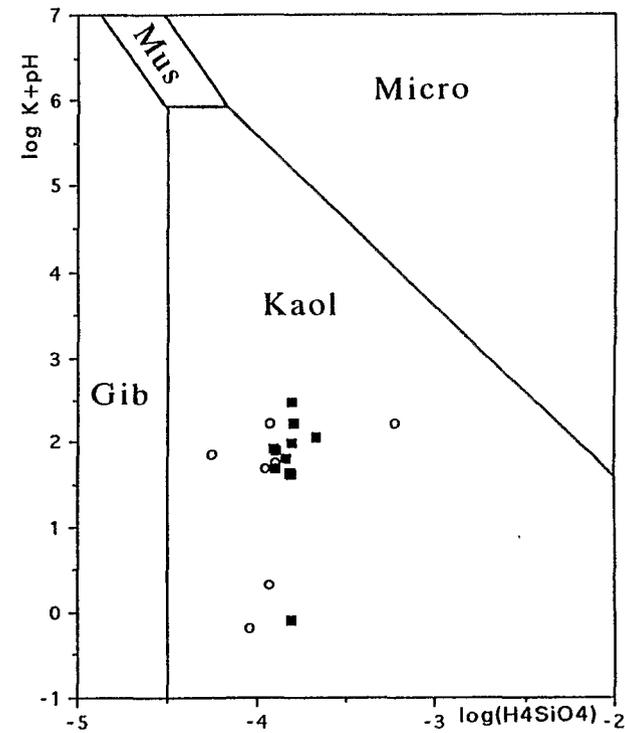
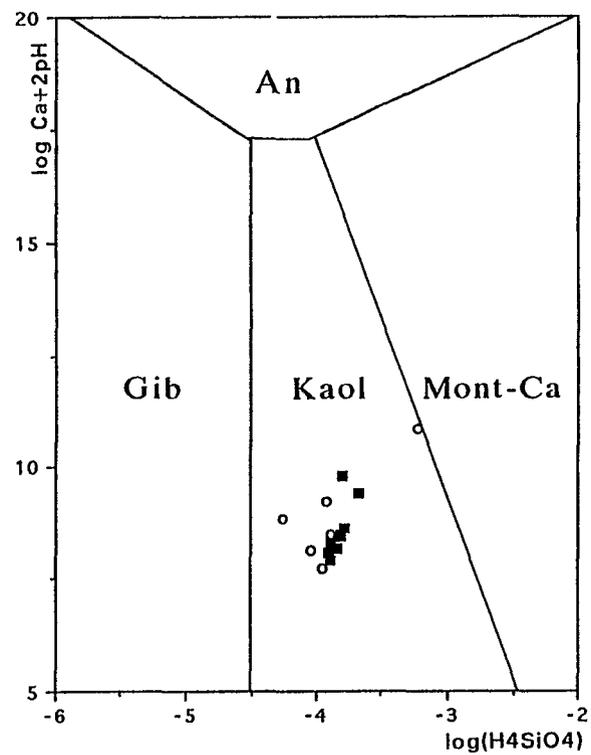
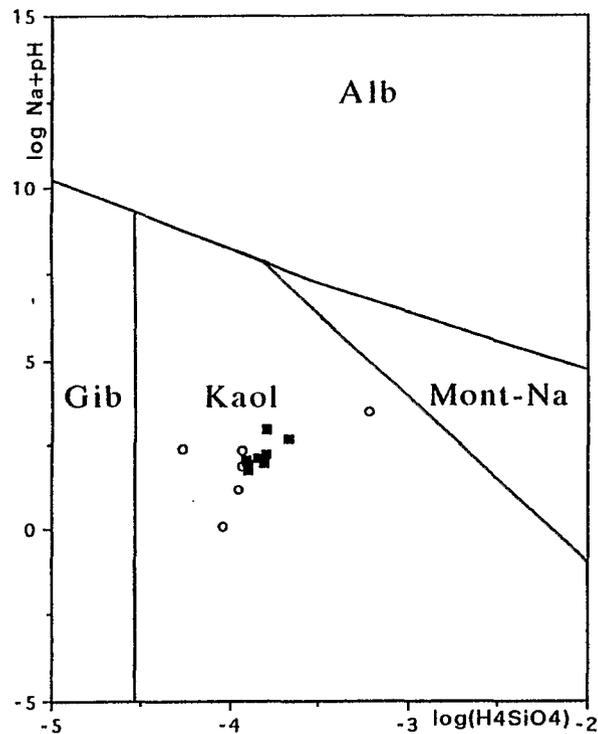
6.2.2.3. Les principaux types d'altération chimique du bassin

D'après PEDRO (1968), l'ameublissement du substratum rocheux découle de la dégradation chimique plus ou moins complète des minéraux primaires de la roche. Il définit 4 types d'altération chimique, à savoir la podzolisation, l'allitisation, la bisiallisation et la monosialitisation ou kaolinisation. Or l'analyse minéralogique des matières en suspension (voir 6.2.1) a montré que les argiles de nos échantillons étaient constituées essentiellement de la kaolinite. C'est donc le dernier type d'altération cité qui s'exerce de façon prépondérante sur les bassins de notre zone d'intérêt.

Il s'agit en fait, d'une hydrolyse des roches (soluviation) accompagnée de l'élimination notable de la silice et d'un lessivage total des cations basiques. Elle permet alors la cristallisation de phyllite à une couche de silice dont les feuillets sont neutres : c'est de la kaolinite. Elle est le produit de l'altération des feldspaths sodiques (albite), calciques (anorthite) et potassiques (microcline) selon les réactions respectives suivantes (TARDY, 1969) :



La typologie des eaux ayant permis de conclure que toutes les eaux étudiées sont bicarbonatées calco-magnésiennes, pour bâtir les diagrammes d'équilibre, nous pouvons procéder à nouveau à des regroupements pour des raisons de synthèse. Ils concernent les eaux faiblement minéralisées du Dja Supérieur d'une part, et les eaux relativement minéralisées de la Bidjar, de la Bangué et de la Lokomo. Les diagrammes d'équilibres bâtis à partir des constantes d'équilibre (GAC, 1980) sont représentés sur les figures 6-16a à 6-16f.



○ Dja à Somalomo ■ Dja à Bi

a) Bassins amont du Dja

Légende :

Gib : Gibbsite	Alb : Albite
Micro : Microcline	Mus : Muscovite
Kaol : Kaolinite	An : Anorthite
Mont-(Na, Ca) : Montmorillonite-(Na, Ca)	

Figure 6-16 : Diagrammes d'équilibre

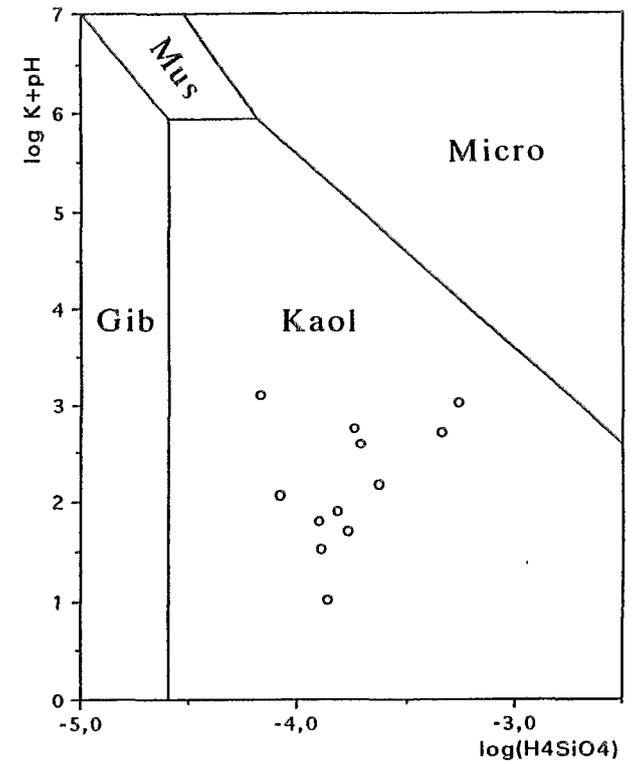
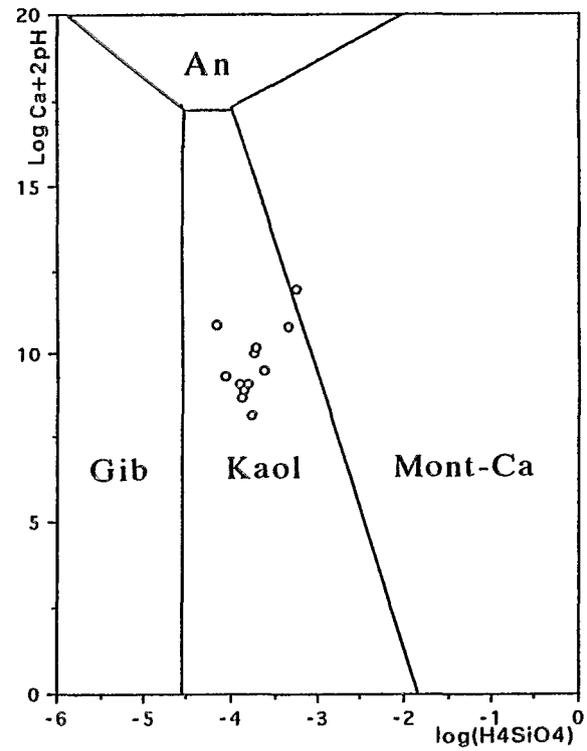
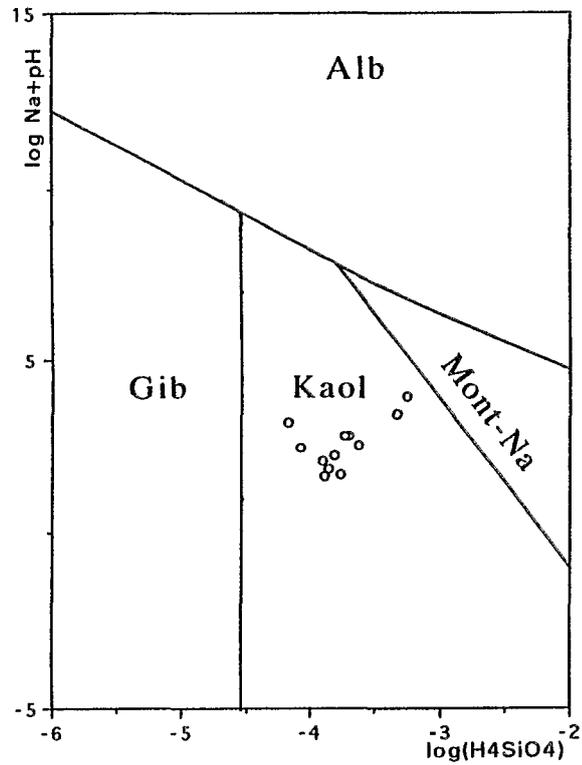


Figure 6-16 (suite) : b) Dja à Moloundou-SOTREF

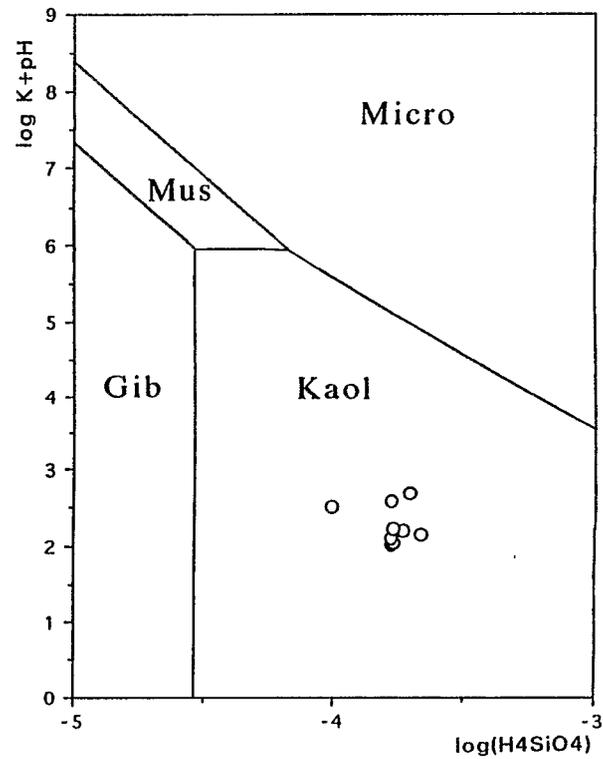
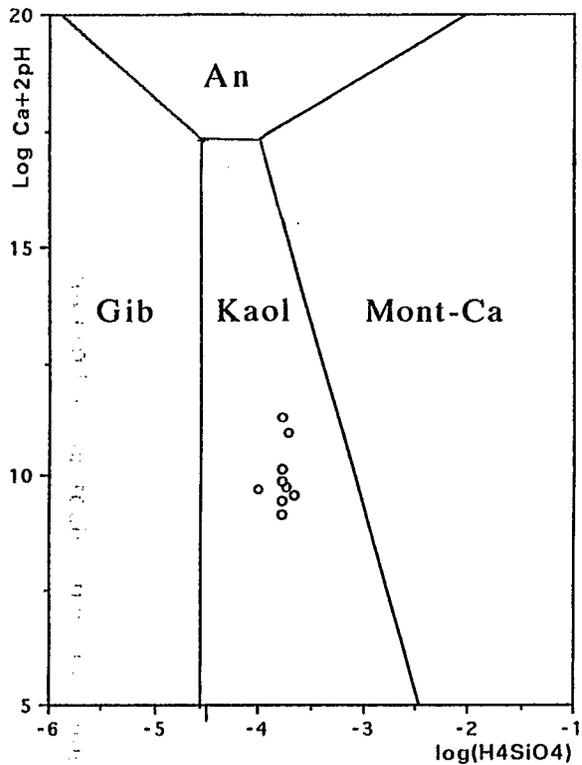
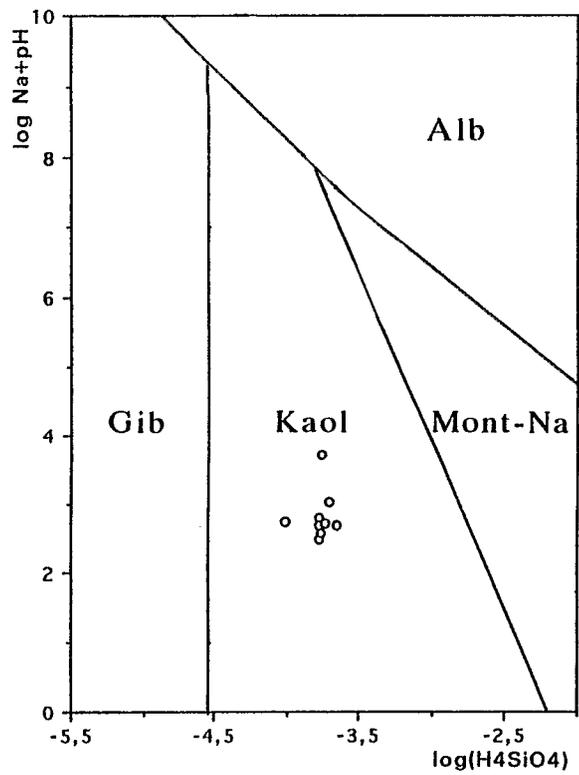


Figure 6-16 (suite) : c) Boumba à Biwala

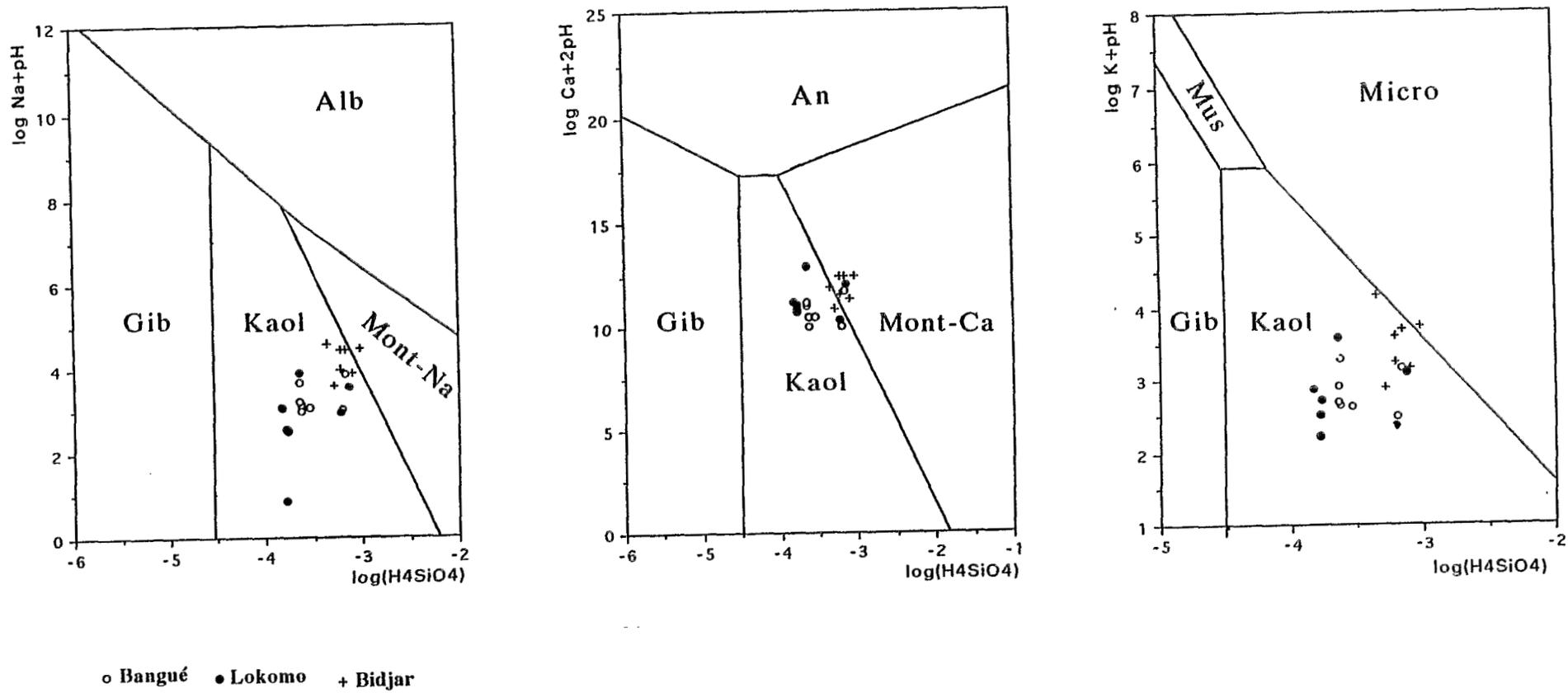


Figure 6-16 (suite) : d) Affluents de la Boumba en aval de Biwala

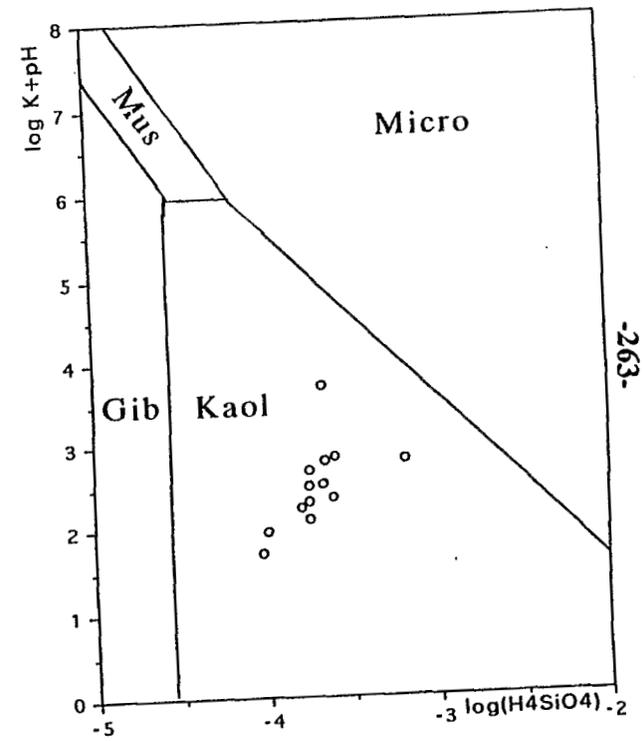
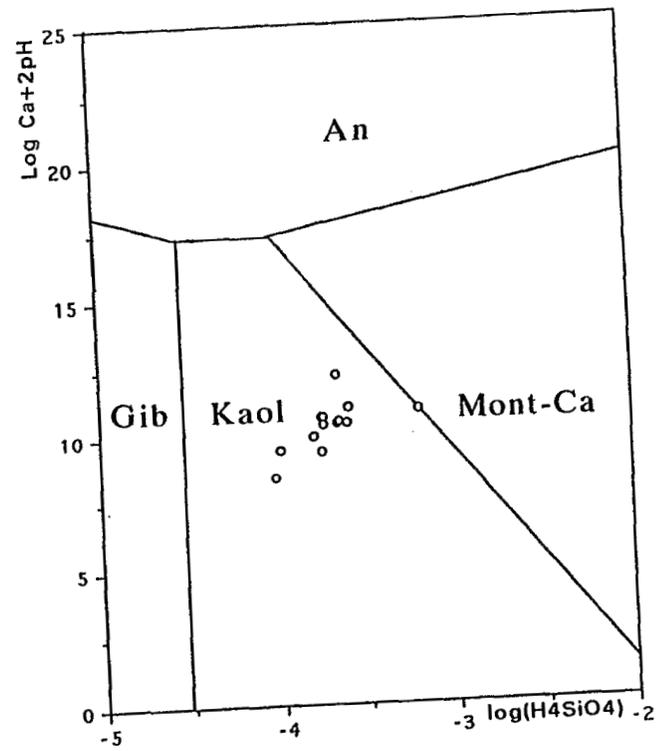
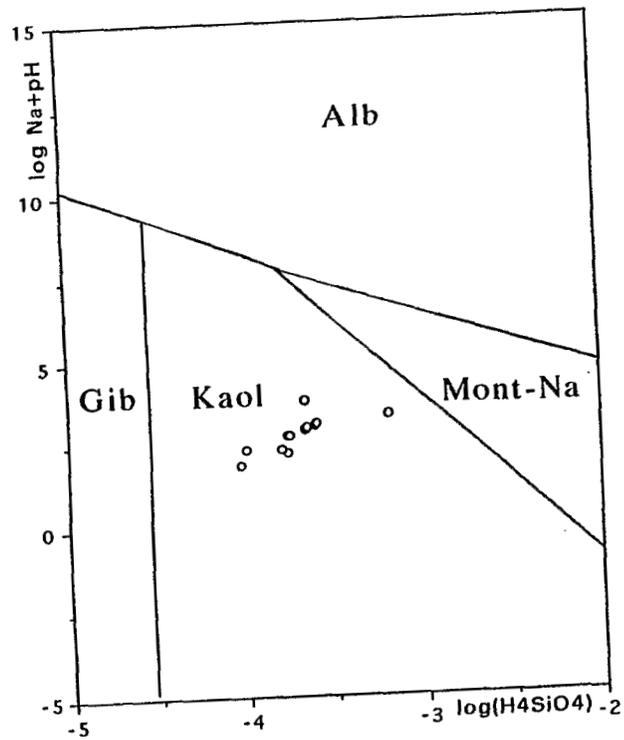


Figure 6-16 (suite) : e) Boumba à Moloundou-Bac

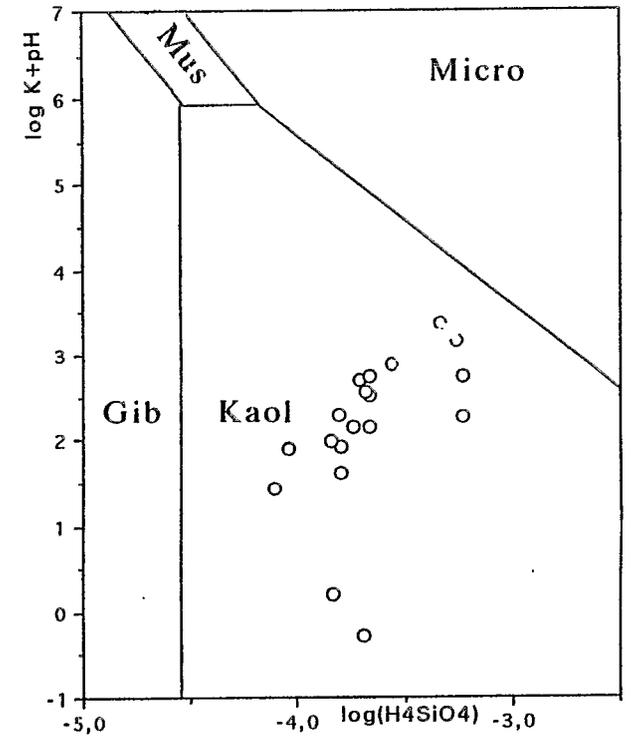
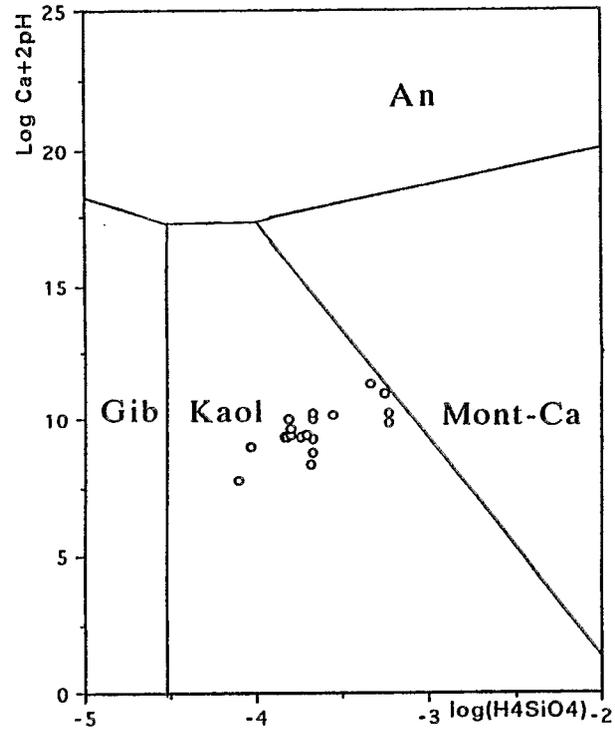
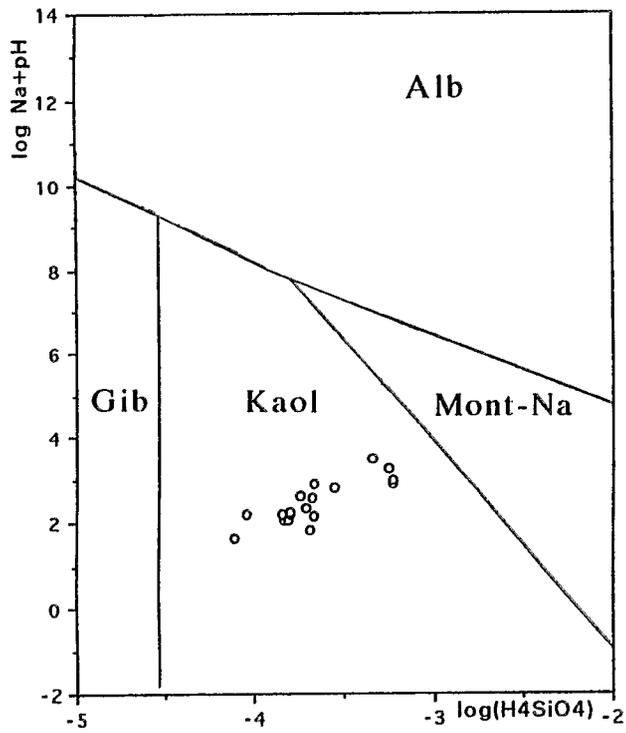


Figure 6-16 (fin) : ϕ Ngoko à Moloundou

Globalement, elles montrent que les eaux du bassin de la Ngoko se situent dans le domaine de la kaolinite. Il importe toutefois de signaler qu'une partie des échantillons de la Bidjar, et dans une moindre mesure de ceux de la Bangué et de la Lokomo, sont proches du domaine de la montmorillonite sans toutefois sortir de celui de la kaolinite. Au stade actuel de nos connaissances et compte tenu du petit nombre d'observations sur ces rivières, il est assez difficile de dire si cette tendance indique un autre type d'altération. On peut peut-être établir une relation entre ce comportement et le caractère particulier de ces sous-bassins déjà discutés, notamment en ce qui concerne le déficit pluviométrique et la nature lithologique des roches (andésites et dolérites).

En définitive, on peut retenir que les bassins étudiés sont en conformité avec la délimitation géographique des types d'altération définis par PEDRO (1968) en raison du fait que les produits d'altération se situent dans le domaine de stabilité de la kaolinite comme l'ont déjà démontré GAC, 1980 et ORANGE, 1990 sur d'autres bassins (lac Tchad et Sénégal) de la zone tropicale.

6.2.2.4. Relations inter-éléments et analyses factorielles en composantes principales

Dans ce sous-chapitre, nous nous proposons d'analyser le comportement hydrochimique du bassin de la Ngoko par une étude globale des paramètres physico-chimiques. A cette fin, l'outil utilisé sera l'analyse des corrélations totales et l'analyse factorielle en composantes principales. Cette approche vise à renforcer et à améliorer nos connaissances des régimes hydrochimiques des bassins.

Les résultats seront discutés d'une part, à l'échelle de l'ensemble du bassin de la Ngoko, et d'autre part, à la sortie de ce bassin (Moloundou).

Les relations inter-éléments

A l'échelle globale du bassin de la Ngoko

Par souci de synthèse, nous avons décidé de nous limiter au calcul de la matrice des corrélations totales par bassin versant avec comme précédemment quelques regroupements et de ne présenter ici que les relations établies sur l'ensemble de tout le bassin.

Dans les matrices de corrélation par bassin, nous avons traité ensemble les résultats obtenus aux stations de Somalomo et de Bi ainsi que ceux des autres sites en amont de cette station sur le Dja. Un autre regroupement concerne les résultats de la Bidjar, de la

Bangué et de la Lokomo, en raison du fait que ces rivières drainent en grande partie des roches volcaniques et que leurs eaux sont relativement concentrées. Les matrices de corrélations des sous-bassins, ainsi que celles calculées à l'échelle globale du bassin de la Ngoko sont données dans les tableaux 6-22a à 6-22c.

On constate que le débit est corrélé négativement avec tous les éléments sauf les nitrates. Cette évolution inversement proportionnelle des concentrations avec les débits traduit la dilution par les écoulements superficiels. Les corrélations positives entre le débit et les nitrates, et entre aussi le débit et les sulfates et entre le débit et la silice indiquent que ces éléments ont une origine superficielle (ruissellement et lessivage de la litière). Les nitrates sont surtout importants dans les bassins agricoles (Boumba à Biwala et Bangué à Bangué), ce qui justifie les fortes teneurs parfois mesurées, indiquant par le fait même une pollution ponctuelle due aux fertilisants.

Les résultats des échantillons collectés sur l'ensemble du bassin versant montrent de bonnes corrélations entre la conductivité et les ions Ca^{++} , Mg^{++} , HCO_3^- et la charge totale dissoute (figure 6-17). Les relations entre la somme des éléments chimiques et les ions Ca^{++} , Mg^{++} , HCO_3^- , Na^+ ainsi que la silice sont également bonnes.

A la sortie de Moloundou sur la Ngoko

L'étude des relations entre les paramètres mesurés à la station la plus en aval du bassin de la Ngoko fait ressortir de meilleures corrélations (tableau 6-23). Elles peuvent être expliquées par le fait qu'à ce niveau le mélange des eaux drainant les différents types de roches du bassin atténue le poids de fortes ou de faibles concentrations des éléments mesurés aux stations amont.

La figure 6-18 représente les relations entre la conductivité, les concentrations des espèces chimiques Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , HCO_3^- et des matières dissoutes (MD) et le débit. Elles s'ajustent selon un modèle de type exponentiel décroissant dont les équations sont portées sur les figures. Elles traduisent la dilution des fortes teneurs en ions en saison sèche (étiages) par les forts débits de la saison des pluies (hautes eaux) déjà évoquée.

Tableau 6-22 : Matrices de corrélations totales

a) Le bassin du Dja

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 17 NOMBRE DE VARIABLES : 15

	DJA	A	BI	ET	SOMALOMO										
	Q	T	PH	CE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	SiO2	MD	
Q	1.000														
T	-0.194	1.000													
PH	-0.495	0.477	1.000												
CE	-0.301	0.502	0.511	1.000											
Ca	-0.105	0.434	<u>0.666</u>	0.392	1.000										
Mg	-0.130	0.386	0.279	0.280	0.306	1.000									
Na	0.204	0.523	0.482	0.184	0.840	0.380	1.000								
K	0.126	0.015	-0.193	-0.128	0.156	0.435	0.374	1.000							
Cl	-0.278	0.306	0.358	0.325	-0.002	0.384	-0.063	-0.474	1.000						
SO4	0.090	0.219	0.425	-0.018	0.562	-0.042	0.523	0.072	-0.095	1.000					
HCO3	-0.237	0.237	0.266	0.327	<u>0.607</u>	0.187	0.453	0.285	0.002	0.012	1.000				
NO3	0.140	-0.147	-0.013	0.016	-0.361	-0.013	-0.412	-0.478	0.520	0.018	-0.373	1.000			
SiO2	-0.133	0.317	<u>0.701</u>	0.242	<u>0.778</u>	-0.234	0.589	-0.242	-0.037	0.556	0.423	-0.236	1.000		
MD	-0.201	0.391	<u>0.674</u>	0.337	<u>0.871</u>	-0.011	<u>0.684</u>	-0.033	0.029	0.446	<u>0.734</u>	-0.315	<u>0.919</u>	1.000	

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 12 NOMBRE DE VARIABLES : 15

: DJA A MOLOUNDO-SOTREF

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	Q	T	PH	CE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	SiO2	MD
Q	1.000													
T	-0.121	1.000												
PH	-0.345	-0.187	1.000											
CE	-0.434	0.297	0.084	1.000										
Ca	-0.414	-0.008	0.367	<u>0.758</u>	1.000									
Mg	<u>-0.755</u>	0.316	-0.087	<u>0.694</u>	0.440	1.000								
Na	-0.384	-0.074	<u>0.750</u>	<u>0.657</u>	<u>0.759</u>	0.293	1.000							
K	-0.258	-0.011	0.020	0.579	0.581	0.285	0.244	1.000						
Cl	-0.555	-0.399	0.407	-0.009	-0.054	0.248	0.223	-0.072	1.000					
SO4	0.434	-0.162	-0.130	-0.168	-0.130	-0.449	-0.098	-0.072	-0.590	1.000				
HCO3	-0.212	0.205	0.276	0.544	<u>0.806</u>	0.163	0.530	0.479	-0.438	0.308	1.000			
NO3	<u>0.733</u>	-0.274	0.078	-0.133	-0.212	<u>-0.694</u>	0.117	-0.181	-0.168	0.413	-0.142	1.000		
SiO2	0.174	-0.076	<u>0.651</u>	0.185	0.394	-0.298	0.725	-0.248	-0.024	0.152	0.390	0.538	1.000	
MD	-0.055	-0.056	<u>0.655</u>	0.419	<u>0.707</u>	-0.084	<u>0.831</u>	0.080	-0.116	0.211	<u>0.734</u>	0.291	<u>0.897</u>	1.000

Tableau 6-22 (suite) : b) Le bassin de la Boumba

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 9 NOMBRE DE VARIABLES : 15

BOUMBA A BIWALÉ

	Q	T	PH	CE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	SiO2	MD
Q	1.000													
T	<u>-0.765</u>	1.000												
PH	-0.173	0.212	1.000											
CE	-0.479	0.583	-0.345	1.000										
Ca	-0.230	0.339	0.402	-0.171	1.000									
Mg	<u>-0.626</u>	<u>0.787</u>	-0.164	0.454	0.019	1.000								
Na	-0.323	0.380	0.577	0.388	0.238	-0.054	1.000							
K	-0.327	0.447	-0.104	<u>0.768</u>	0.280	0.132	0.406	1.000						
Cl	-0.513	0.261	-0.056	0.281	-0.092	0.365	0.103	-0.036	1.000					
SO4	-0.041	0.021	0.343	-0.095	0.279	0.012	0.545	0.015	-0.269	1.000				
HCO3	<u>-0.779</u>	<u>0.871</u>	0.288	<u>0.628</u>	0.012	<u>0.754</u>	0.511	0.386	0.396	0.153	1.000			
NO3	<u>0.637</u>	-0.414	-0.326	-0.038	-0.124	-0.354	0.117	-0.174	-0.209	0.249	-0.479	1.000		
SiO2	0.166	-0.337	0.130	-0.469	0.245	-0.468	-0.056	-0.463	0.327	-0.266	-0.499	0.298	1.000	
MD	-0.697	<u>0.783</u>	0.480	0.335	<u>0.677</u>	0.447	<u>0.643</u>	0.389	0.407	0.292	<u>0.664</u>	-0.244	0.069	1.000

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 21 NOMBRE DE VARIABLES : 15

LOKOMO - BANGUE - BIDJAR

	Q	T	PH	CE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	SiO2	MD
Q	1.000													
T	-0.185	1.000												
PH	<u>-0.610</u>	0.343	1.000											
CE	<u>-0.732</u>	0.070	<u>0.708</u>	1.000										
Ca	-0.464	0.036	0.506	<u>0.845</u>	1.000									
Mg	<u>-0.687</u>	0.074	<u>0.708</u>	<u>0.969</u>	<u>0.852</u>	1.000								
Na	-0.635	-0.077	0.483	0.359	0.101	0.339	1.000							
K	-0.294	-0.257	0.242	0.123	-0.022	0.099	<u>0.822</u>	1.000						
Cl	-0.228	-0.002	0.247	0.180	0.149	0.128	0.023	0.124	1.000					
SO4	-0.579	-0.060	0.484	0.554	0.364	0.456	<u>0.619</u>	0.370	0.154	1.000				
HCO3	-0.755	0.112	<u>0.704</u>	<u>0.968</u>	<u>0.864</u>	<u>0.962</u>	0.421	0.110	0.072	0.575	1.000			
NO3	0.057	-0.090	0.070	-0.008	-0.002	-0.073	0.172	0.466	<u>0.611</u>	0.340	-0.113	1.000		
SiO2	-0.589	0.232	0.359	0.420	0.352	0.335	0.506	0.110	0.097	<u>0.701</u>	0.528	0.116	1.000	
MD	-0.790	0.129	0.681	<u>0.891</u>	0.794	<u>0.854</u>	0.561	0.229	0.154	<u>0.720</u>	<u>0.945</u>	0.058	<u>0.753</u>	1.000

Tableau 6-22 (suite) : c) A l'échelle de globale du bassin de la Ngoko

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 13 NOMBRE DE VARIABLES : 15

BOUMBA A MOLOUNDO-Bac

	Q	T	PH	CE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	SiO2	MD
Q	1.000													
T	-0.335	1.000												
PH	-0.000	0.126	1.000											
CE	<u>-0.793</u>	0.190	0.009	1.000										
Ca	<u>-0.755</u>	0.166	-0.195	0.588	1.000									
Mg	<u>-0.771</u>	0.227	-0.274	<u>0.860</u>	0.599	1.000								
Na	<u>-0.634</u>	0.209	-0.006	0.365	<u>0.806</u>	0.204	1.000							
K	-0.591	0.056	-0.466	0.350	0.439	0.473	0.426	1.000						
Cl	-0.573	0.010	-0.552	<u>0.601</u>	0.577	<u>0.814</u>	0.190	0.426	1.000					
SO4	0.038	0.193	0.036	-0.183	-0.124	-0.135	0.100	0.277	-0.259	1.000				
HCO3	<u>-0.753</u>	0.157	-0.146	<u>0.690</u>	<u>0.970</u>	<u>0.622</u>	<u>0.795</u>	0.438	0.510	-0.154	1.000			
NO3	-0.469	0.099	0.026	<u>0.620</u>	0.483	0.378	0.574	0.062	0.476	-0.252	0.519	1.000		
SiO2	-0.135	0.075	0.384	0.053	0.161	-0.270	0.602	-0.117	-0.147	0.023	0.155	<u>0.703</u>	1.000	
MD	<u>-0.706</u>	0.178	0.032	<u>0.604</u>	<u>0.866</u>	0.419	<u>0.925</u>	0.331	0.405	-0.098	<u>0.876</u>	<u>0.781</u>	<u>0.604</u>	1.000

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 90 NOMBRE DE VARIABLES : 15

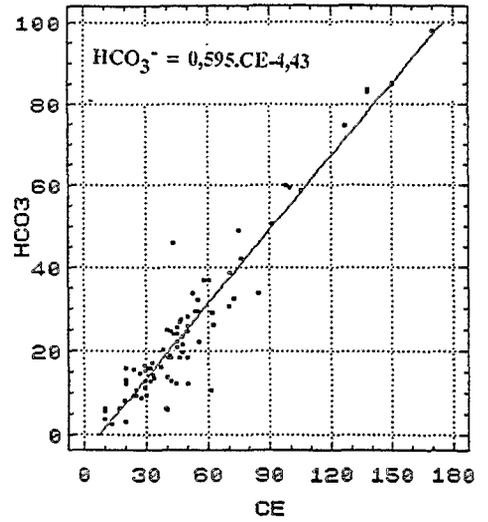
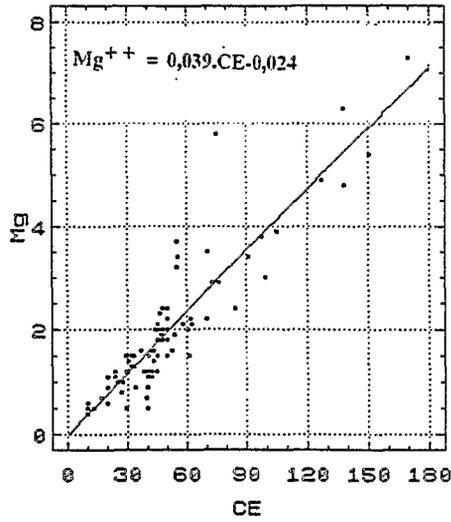
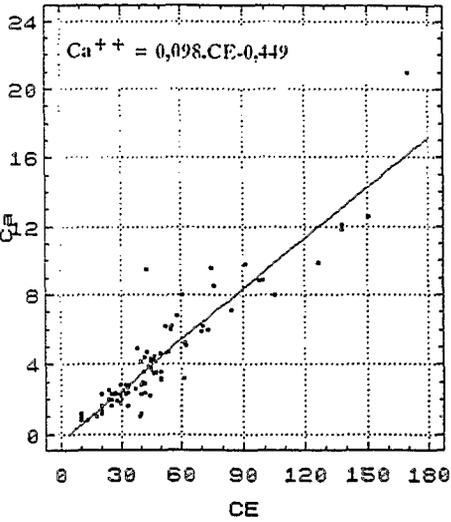
A L'ECHELLE GLOBALE DU BASSIN

	Q	T	PH	CE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	SiO2	MD
Q	1.000													
T	0.010	1.000												
PH	-0.281	0.204	1.000											
CE	-0.339	0.152	<u>0.639</u>	1.000										
Ca	-0.306	0.113	0.542	<u>0.864</u>	1.000									
Mg	-0.298	0.160	0.514	<u>0.925</u>	<u>0.848</u>	1.000								
Na	-0.285	0.036	0.483	0.575	0.421	0.498	1.000							
K	-0.188	-0.082	0.231	0.359	0.250	0.320	0.756	1.000						
Cl	-0.313	0.073	0.352	0.475	0.408	0.460	0.261	0.225	1.000					
SO4	0.067	0.081	0.371	0.439	0.349	0.393	0.367	0.349	0.215	1.000				
HCO3	-0.318	0.136	0.611	0.959	0.893	<u>0.922</u>	0.610	0.334	0.382	0.399	1.000			
NO3	-0.068	-0.003	0.329	0.392	0.334	0.296	0.375	0.410	0.571	0.266	0.322	1.000		
SiO2	-0.212	0.141	0.590	0.596	0.530	0.436	<u>0.604</u>	0.246	0.276	0.483	<u>0.636</u>	0.371	1.000	
MD	-0.323	0.136	<u>0.665</u>	<u>0.925</u>	<u>0.864</u>	0.845	0.696	0.391	0.426	0.474	<u>0.962</u>	0.425	0.810	1.000

Regression Ca - CE

Regression Mg - CE

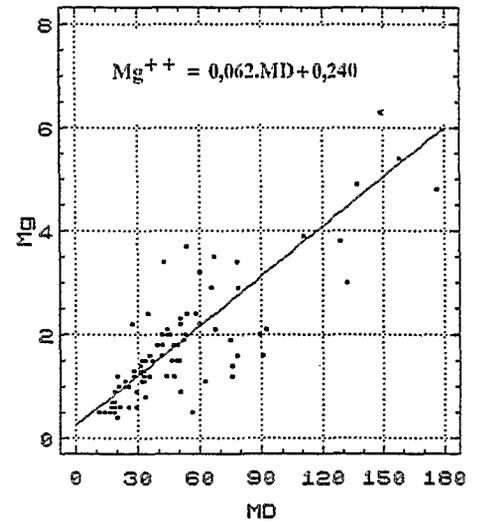
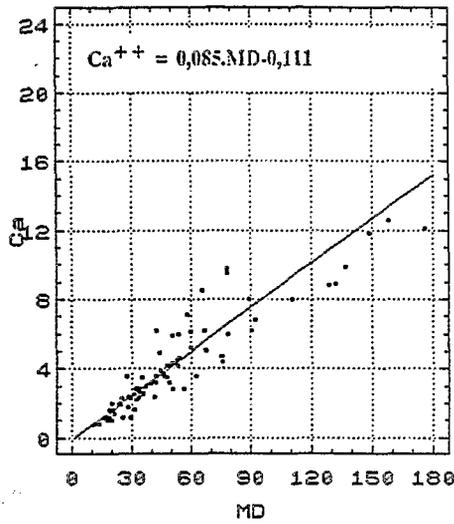
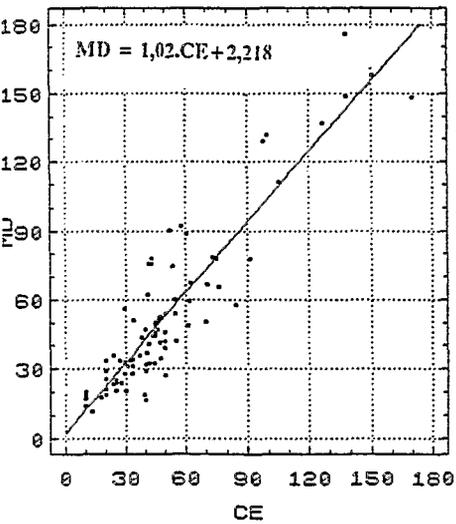
Regression HCO3 - CE



Regression MD -- CE

Regression Ca -- MD

Regression Mg -- MD



Regression Na -- MD

Regression HCO3 -- MD

Regression SiO2 -- MD

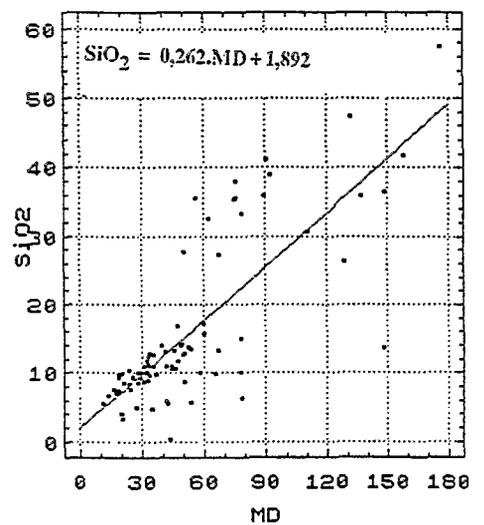
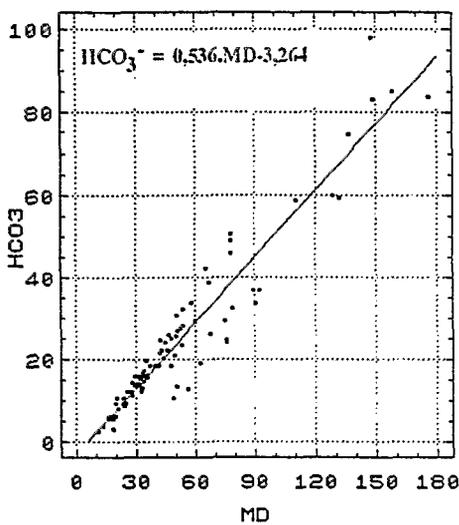
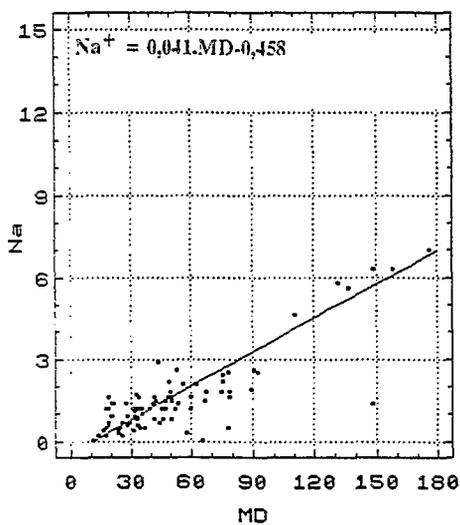


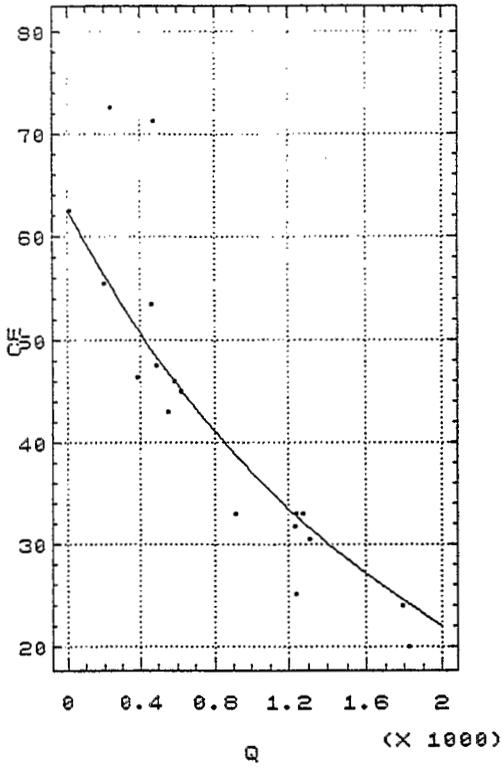
Figure 6-17 : Relations entre la conductivité, la charge totale et les éléments dissous à l'échelle globale du bassin de la Ngoko

Tableau 6-23 : Le bassin de la Ngoko à Moloundou : Matrice de corrélations totales

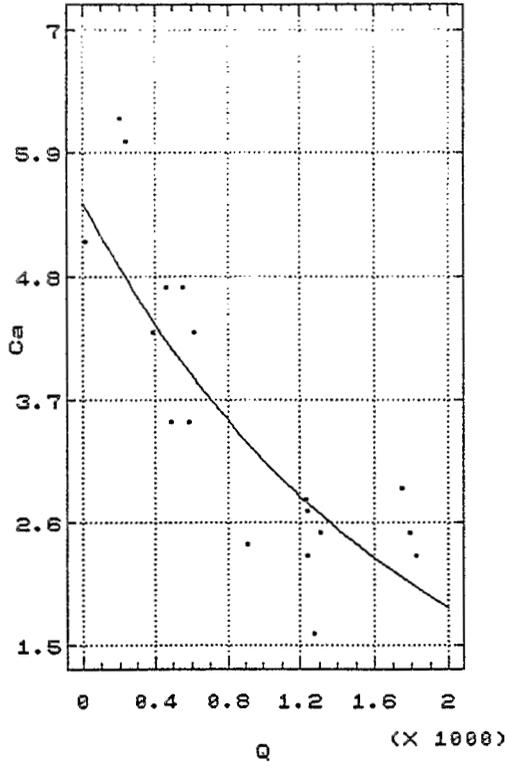
NOMBRE D'OBSERVATIONS : 18 NOMBRE DE VARIABLES : 15

	Q	T	PH	CE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	SiO2	MD
Q	1.000													
T	-0.269	1.000												
PH	-0.247	0.062	1.000											
CE	<u>-0.844</u>	0.044	0.343	1.000										
Ca	<u>-0.832</u>	0.059	0.175	<u>0.886</u>	1.000									
Mg	<u>-0.792</u>	0.095	-0.043	<u>0.797</u>	<u>0.825</u>	1.000								
Na	<u>-0.717</u>	-0.019	0.228	<u>0.738</u>	<u>0.771</u>	0.514	1.000							
K	-0.434	-0.185	0.211	<u>0.681</u>	0.516	0.445	0.547	1.000						
Cl	<u>-0.601</u>	0.004	-0.112	<u>0.624</u>	<u>0.657</u>	<u>0.684</u>	0.462	0.373	1.000					
SO4	-0.552	-0.331	0.356	<u>0.709</u>	0.575	0.499	0.489	0.558	0.508	1.000				
HCO3	<u>-0.810</u>	0.135	0.335	<u>0.850</u>	<u>0.862</u>	<u>0.680</u>	<u>0.836</u>	0.475	0.377	0.450	1.000			
NO3	0.309	-0.015	-0.078	-0.356	-0.352	-0.365	0.004	-0.438	0.117	-0.215	-0.342	1.000		
SiO2	-0.425	-0.002	0.511	0.560	0.548	0.152	<u>0.702</u>	0.387	0.232	0.418	<u>0.684</u>	0.018	1.000	
MD	<u>-0.680</u>	0.030	0.435	<u>0.768</u>	<u>0.792</u>	0.456	<u>0.866</u>	0.492	0.400	0.510	<u>0.894</u>	-0.140	<u>0.926</u>	1.000

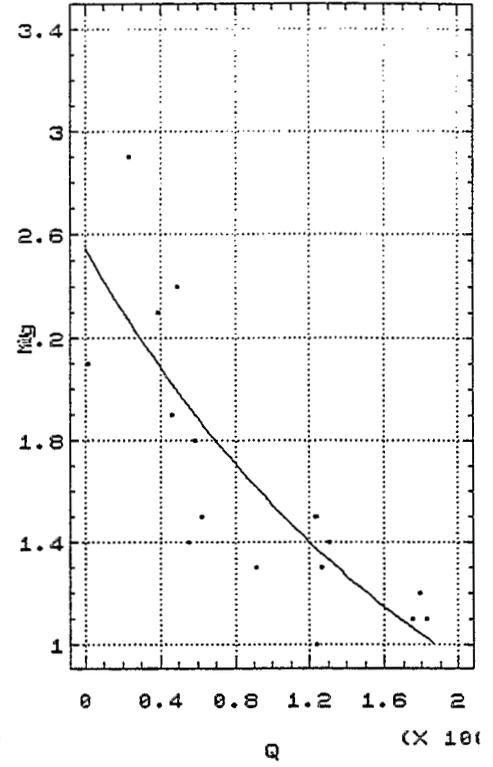
Regression CE - Q
 $CE = \exp(4.13 - 0.0005 Q)$



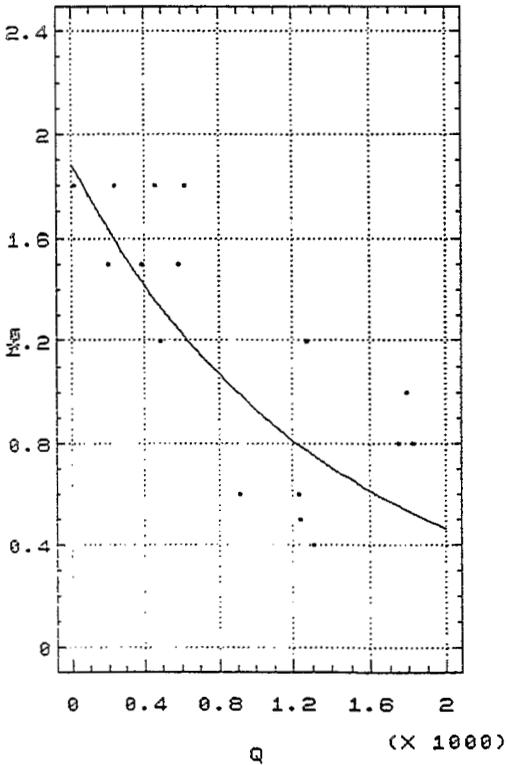
Regression Ca - Q
 $Ca = \exp(1.70 - 0.0005 Q)$



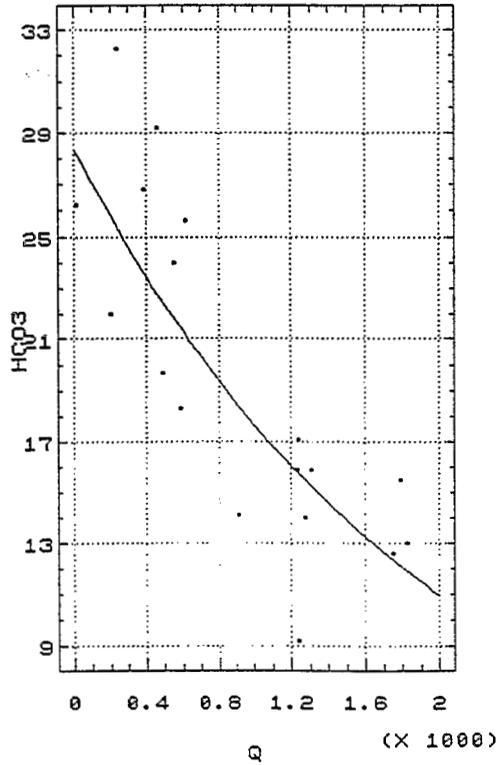
Regression Mg - Q
 $Mg = \exp(0.93 - 0.0005 Q)$



Regression Na - Q
 $Na = \exp(0.63 - 0.0007 Q)$



Regression HCO3 - Q
 $HCO = \exp(3.34 - 0.00047 Q)$



Regression MD - Q
 $MD = \exp(4.13 - 0.00048 Q)$

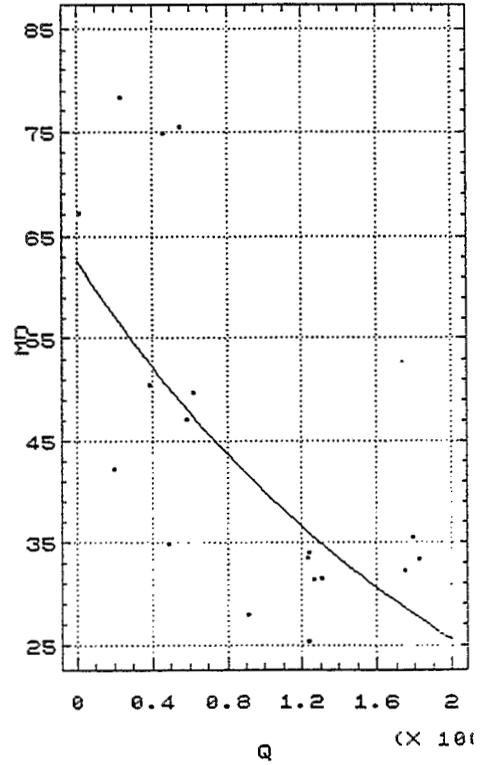
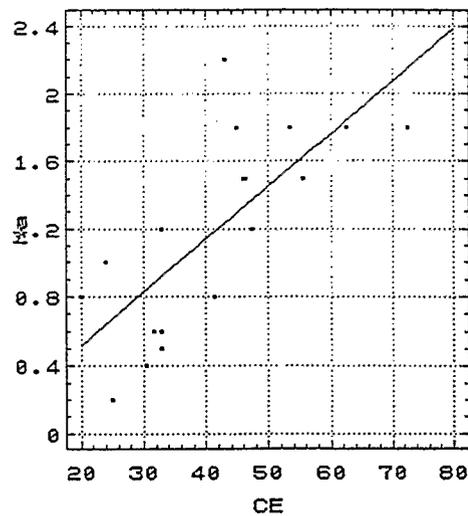
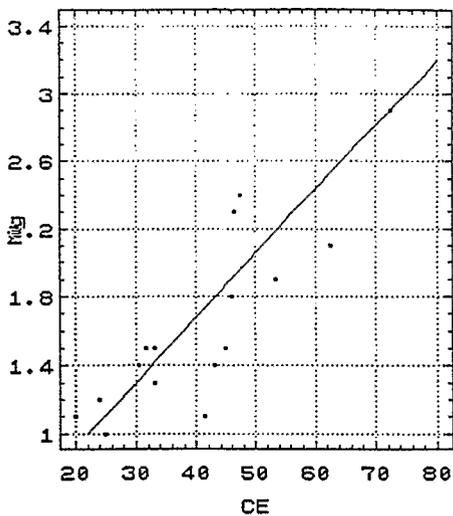
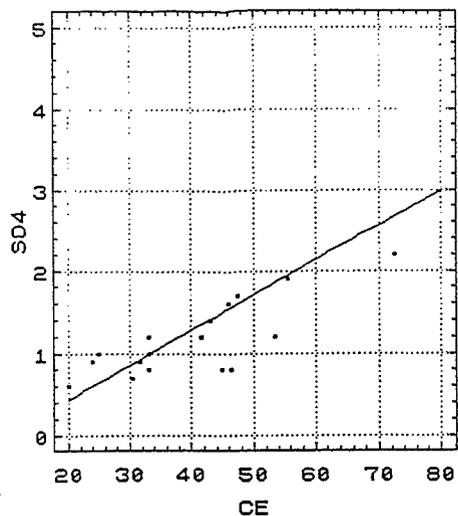


Figure 6-18 a : Ngoko à Moloundou : Evolution des teneurs en éléments dissous en fonction du débit

Regression S04 - CE
 $S04 = -0.420 + 0.042 \text{ CE}$

Regression Mg - CE
 $Mg = 0.166 + 0.038 \text{ CE}$

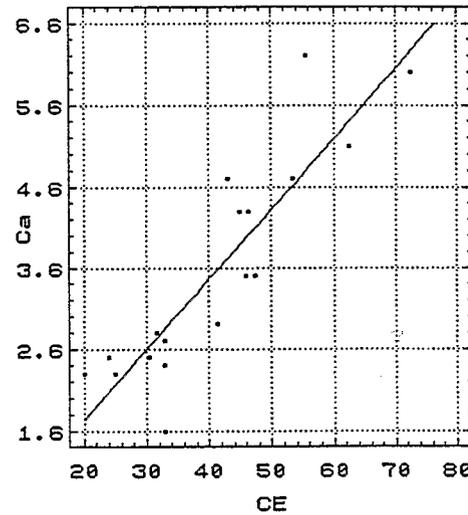
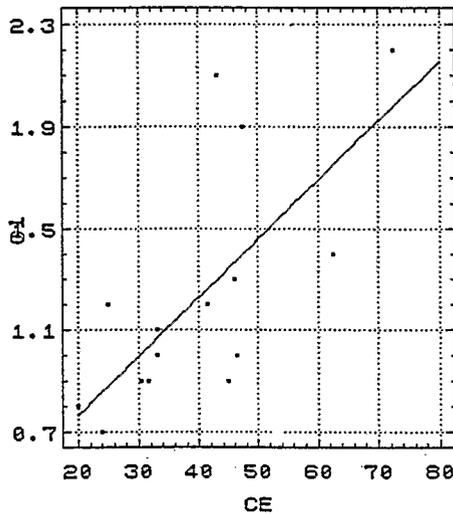
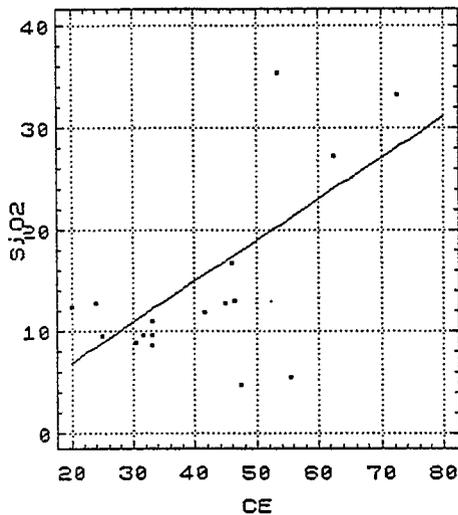
Regression Na - CE
 $Na = -0.109 + 0.031 \text{ CE}$



Regression SiO2 - CE
 $SiO2 = -1.286 + 0.404 \text{ CE}$

Regression Cl - CE
 $Cl = 0.300 + 0.023 \text{ CE}$

Regression Ca - CE
 $Ca = 0.013 + 0.086 \text{ CE}$



Regression HCO3 - CE
 $HCO3 = 3.115 + 0.397 \text{ CE}$

Regression K - CE
 $K = -0.702 + 0.045 \text{ CE}$

Regression MD - CE
 $MD = 4.632 + 0.970 \text{ CE}$

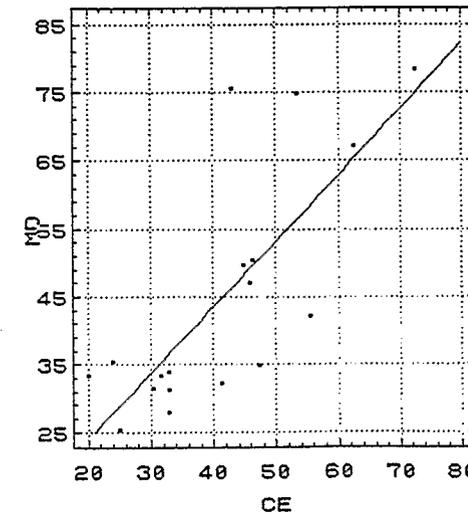
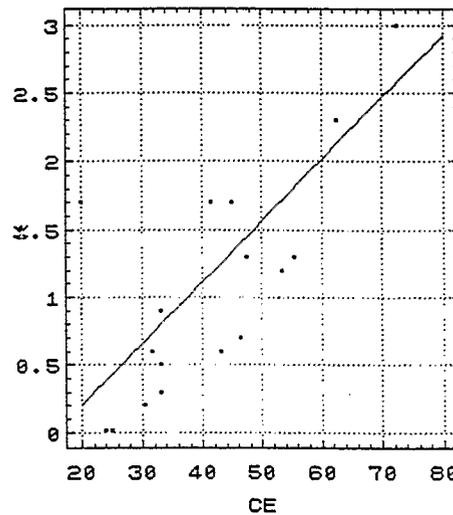
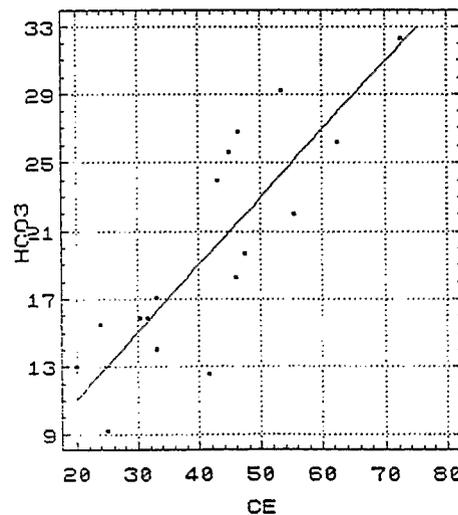


Figure 6-18 b : Ngoko à Moloundou : Relations entre la conductivité et les éléments dissous

On peut dire en somme que l'analyse des relations entre les différents paramètres à l'échelle de toutes les stations du bassin de la Ngoko d'une part, et à sa sortie de Moloundou d'autre part, a permis de dégager une tendance aux fortes concentrations en période d'étiage et à la dilution de celles-ci pendant les hautes eaux, comparables à celles déjà trouvées par d'autres auteurs (PROBST, 1983 ; MEYBECK, 1984 ; KATTAN, 1989 ; ORANGE, 1990 ; MOUKOLO et al, 1991 ; PROBST et al, 1992). S'agissant des relations inter-éléments, elles sont assez bonnes entre les bicarbonates et les cations, faibles avec le potassium. Les relations trouvées au niveau de Moloundou reflètent dans leur globalité celles des stations amont, les différences pouvant être attribuées à la diversité lithologique et au petit nombre d'observations sur ces bassins.

Analyses factorielles en composantes principales

Le traitement des paramètres physico-chimiques des eaux étudiées par l'analyse en composantes principales (ACP) vise, non seulement à visualiser les liaisons inter-éléments discutées plus haut, mais aussi à appréhender les principaux facteurs qui contrôlent la qualité des eaux.

De la même manière que pour les corrélations totales, l'étude de nos données hydrochimiques par l'ACP se fera d'abord à l'échelle globale, puis en détail à la station de Moloundou sur la Ngoko.

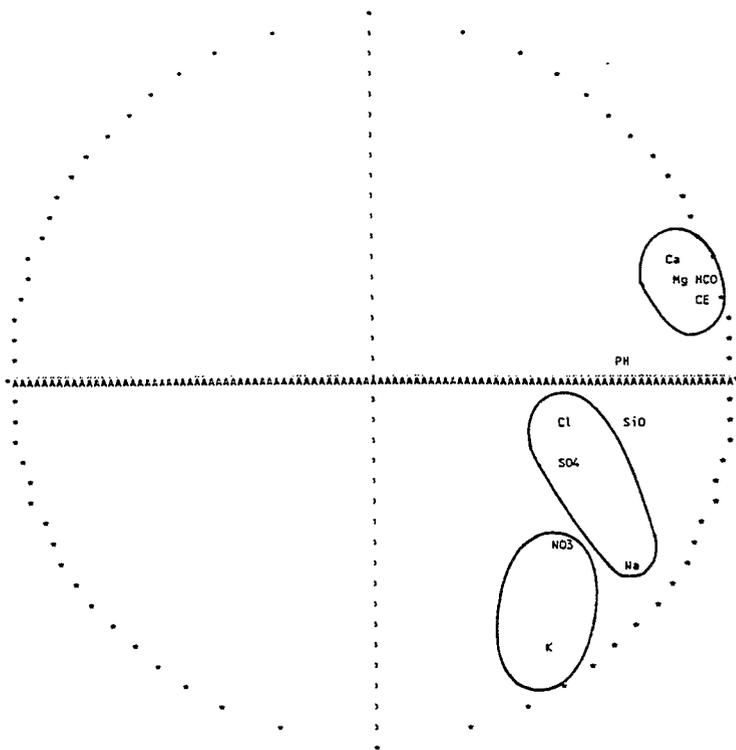
A l'échelle globale du bassin versant de la Ngoko

Nos échantillons ayant été prélevés dans l'espace et dans le temps, nous les traitons en totalité par l'ACP, afin de rendre compte de leur structure géochimique. Pour ce faire, nous ne prenons pas en compte le débit en raison du fait qu'il n'est significatif que pour le bassin fluvial sur lequel il a été mesuré et la température à cause du fait qu'elle est quasiment constante. Par ailleurs, nous avons procédé aux regroupements en affectant aux échantillons les lettres suivantes :

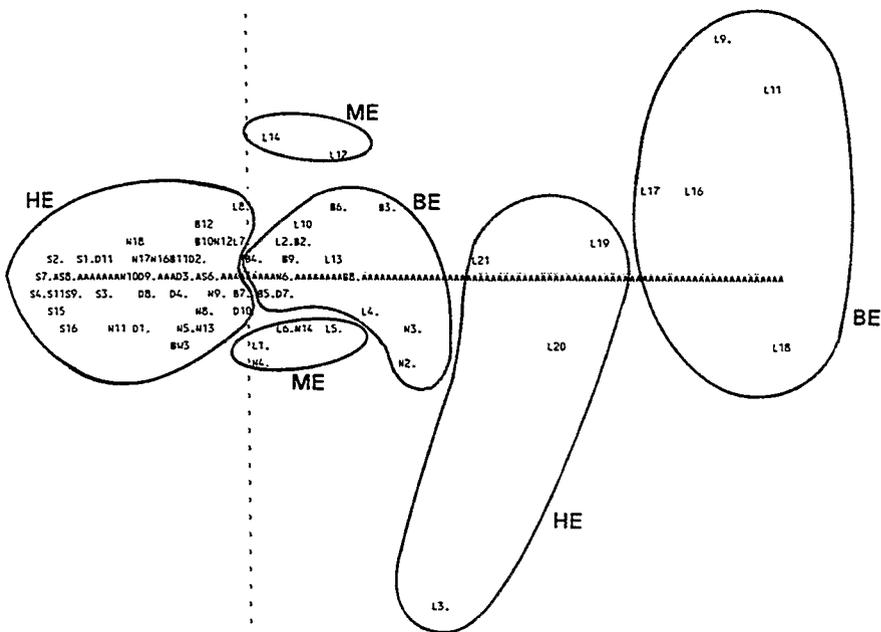
- S : échantillons du Dja Supérieur (S₁ à S₇ : Djaposten et Somalomo ; S₈ à S₁₇ : Bi et affluents)
- D : échantillons du Dja à Moloundou-SOTREF ;
- N : échantillons de la Ngoko à Moloundou ;
- Bw : échantillons de la Boumba à Biwala ;
- L : échantillons de la Bangué (L₁ à L₇), de la Lokomo (L₈ à L₁₄) et de la Bidjar (L₁₅ à L₂₁).
- B : échantillons de la Boumba à Moloundou-Bac

PLAN 1 2 AXE 1 HORIZONTAL

AXE 2 VERTICAL



REPRESENTATION PLAN 1 2 AXE 1 HORIZONTAL AXE 2 VERTICAL



POINTS CACHES

Points vus	Points caches	ABSCISSE	ORDONNEE
M6.	M7.	.4927709	7.132461E-03
M10	M15	-1.499032	.1636348
M18	M19	-1.4151	.4601437
M9.	D5.	-.5630808	-.2575121
D3.	D6.	-.8761575	.108823
D11	D12	-2.043094	.2169439
M10	S5.	-1.745037	.1000656
S7.	S10	-3.072629	.1870382
D1.	S12	-1.38231	-.5794923
S9.	S13	-2.423604	-.2907379
M11	S14	-1.860426	-.5908136
S8.	S17	-2.065586	4.852726E-02
D2.	B1.	-.8057151	.2021225
M12	B13	-.5476471	.7728726
D9.	BW1	-1.367397	1.770701E-02
S6.	BW2	-.4514177	-1.707743E-02
S6.	BW4	-.6789579	7.956404E-02
L7.	BW5	9.043422E-02	.5362139
D10	BW6	7.056212E-02	-.3526535
D9.	BW7	-1.538492	5.267814E-04
D4.	BW8	-.9080147	-.2531509
D2.	BW9	-1.438687	.4522069

Figure 6-19 : Analyses factorielles en composantes principales à l'échelle globale de la Ngoko

Légende : BE : Basses eaux ; ME : Moyennes eaux ; HE : Hautes eaux

L'ACP est appliquée sur 90 échantillons prélevés sur l'ensemble du bassin. Douze variables (pH, conductivité, Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{--} , NO_3^- et SiO_2) ont été testées (figure 6-19).

Le facteur 1, qui représente 54 % de la variance totale, indique l'existence d'une bonne structure des données. Si on considère l'ensemble facteur 1 et facteur 2, il fournit (66,2 %) de la variance, explicitant ainsi plus de 2/3 de la structure des données. Si on ajoute à cet ensemble le troisième facteur, ces 3 premiers facteurs fournissent plus de 3/4 (76 %) de la variance totale. Nous nous limiterons aux axes 1 et 2.

Le facteur 1 est proportionnel au pH, à la conductivité, aux teneurs en HCO_3^- , Ca^{++} , Mg^{++} , SiO_2 . Il oppose les eaux fortement minéralisées (partie positive de l'axe 1) aux eaux faiblement minéralisées (partie négative de l'axe 1). On observe également une association de ces éléments qui traduisent pour la plupart (ici les bicarbonates ne proviennent pas de l'hydrolyse des roches) l'altération des roches. Par contre, les variables Cl^- et SO_4^- , situées à moins de 2/3 du centre de gravité, sont mal représentées dans le plan 1-2, sans doute à cause de leur origine marine. Par ailleurs, le potassium est lié aux nitrates qui indiquent une origine agricole.

Dans le plan des unités statistiques (échantillons), on note une répartition des échantillons en catégorie des eaux de forte et de faible salinité tenant compte des facteurs espace temps. Ainsi, à l'extrémité de la partie positive de l'axe 1 (forte minéralisation), on retrouve les échantillons de basses eaux de la Bidjar et de la Lokomo. En raison de la forte altérabilité des roches basiques (andésites et dolérites) que ces rivières drainent, même leurs échantillons de hautes eaux sont plus concentrées que ceux des basses eaux du reste du bassin. A proximité du centre de gravité, il y a un mélange des échantillons de basses eaux de tous les autres bassins sauf le Dja Supérieur. Dans la partie négative de l'axe 1 sont représentées les échantillons des eaux peu minéralisées prélevées dans leur majorité en hautes eaux.

En somme, bien qu'il soit difficile d'appréhender le comportement des éléments sur l'ensemble du bassin de la Ngoko, l'ACP globale montre l'association des ions HCO_3^- , Ca^{++} , Mg^{++} qui caractérisent l'altération des roches-mères. Elle montre également l'association des ions Cl^- et SO_4^{--} qui sont d'origine marine ainsi que celle des ions NO_3^- et K^+ qui indiquent un apport par lessivage des sols des bassins agricoles, à l'instar de la Bangué où on a mesuré de fortes teneurs en nitrates (échantillon L₃) provenant des fertilisants.

A la sortie de Moloundou sur la Ngoko

A la station principale de la Ngoko à Moloundou, le traitement de nos données par l'ACP est effectué sur 18 échantillons. En plus des variables analysées à l'échelle globale du bassin, nous prenons en compte le débit (Q), la température (T) et le total des matières dissoutes (MD), soit au total 15 variables (figure 6-20).

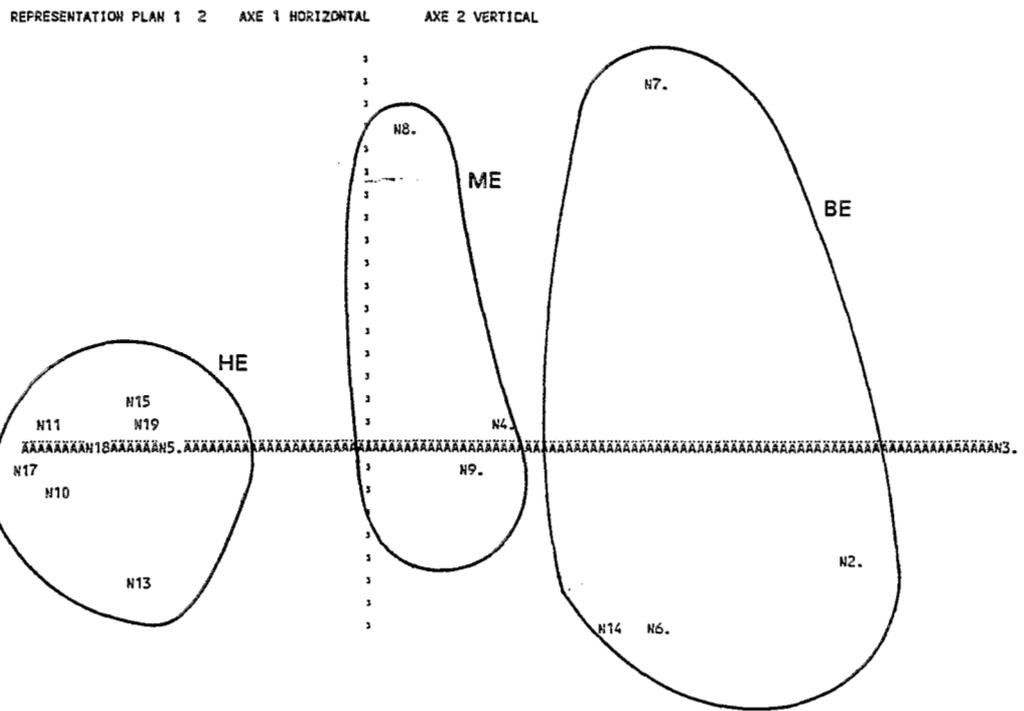
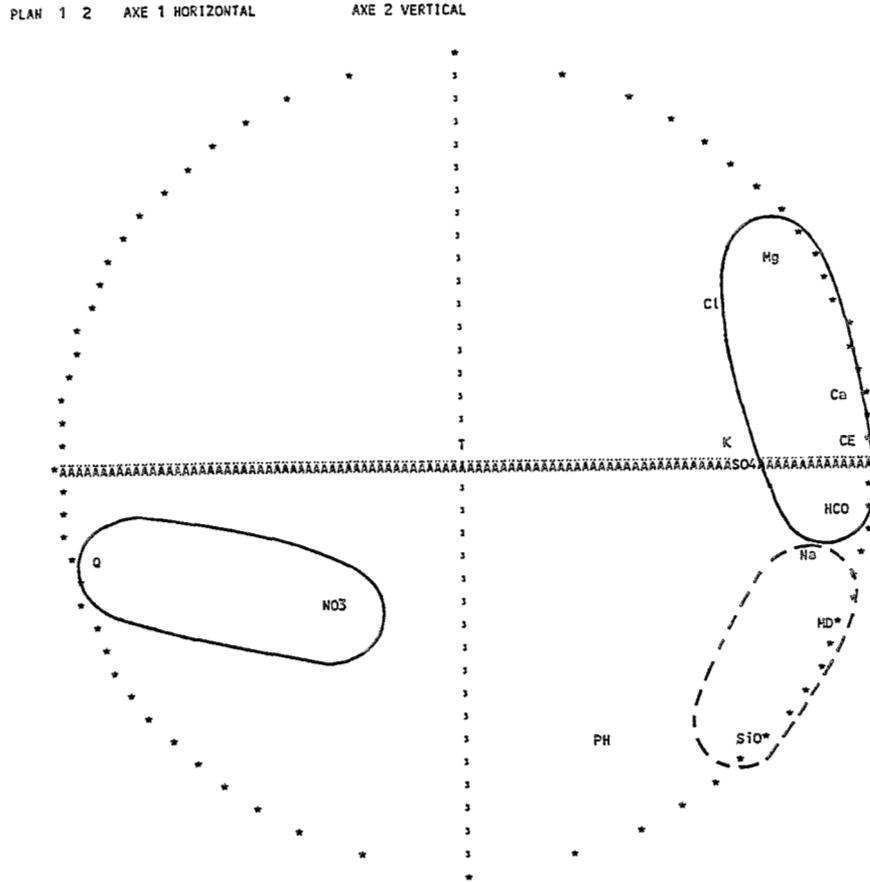
Le premier facteur représente 53,4 % de la variance totale. Avec le deuxième facteur, près de 2/3 (66,8 %) de la variance peuvent être explicités. Les 3 premiers facteurs fournissent plus de 3/4 (75,8 %) de la variance totale, ce qui traduit une bonne structure des données. Comme pour l'étude des observations à l'échelle globale du bassin, nous nous limiterons au premier facteur.

L'axe 1 oppose le débit à toutes les espèces chimiques sauf les nitrates. Il s'agit de la corrélation négative (déjà discutée) entre les éléments dissous et les débits qui les véhiculent. Il met en évidence l'influence des débits sur les matières en solution. Ainsi, la partie positive de l'axe 1 correspond aux eaux fortement minéralisées auxquelles sont opposées dans la partie négative, les eaux de faible salinité par suite de la dilution de leurs concentrations par les écoulements superficiels. Le calcium, le magnésium et le sodium qui caractérisent l'altération des roches, sont corrélés avec la conductivité, les bicarbonates et la charge totale dissoute. La corrélation entre ces paramètres et les deux autres éléments d'altération chimique (silice et potassium) n'est pas très bonne.

La corrélation positive entre les débits et les nitrates qui ne sont pas bien représentés par le facteur 1, traduit leur apport par lessivage des sols. Les sulfates, les chlorures et le potassium se trouvent à moins de 2/3 du centre de gravité. L'évolution de leur concentration inversement proportionnelle à celle des débits est moins nette que celle de la conductivité, de la charge soluble totale, des bicarbonates, du calcium, du magnésium et du sodium du fait que ces ions sont fortement influencés par les aérosols marins et/ou les émissions biogéniques.

Dans le plan des unités statistiques, on observe que le facteur 1 oppose les échantillons de basses eaux (BE) ou d'étiage aux fortes concentrations, à ceux de hautes eaux (HE) peu concentrés. Entre ces deux catégories, se trouve celle des moyennes eaux (ME) correspondant à la montée des eaux d'avril-mai et d'août-septembre.

CERCLE DES CORRELATIONS



POINTS CACHES

Points vus	Points caches	ABSCISSE	ORDONNEE
N4.	N12	1.245157	.2356281
N5.	N16	-1.92686	-4.901358E-02

Figure 6-20 : Ngoko à Moloundou : Analyses factorielles en composantes principales

Légende : BE : Basses eaux ; ME : Moyennes eaux ; HE : Hautes eaux

En définitive, l'étude par l'ACP du chimisme des eaux de la Ngoko permet d'en distinguer 3 catégories lorsqu'on se déplace de la partie positive à la partie négative de l'axe 1. Il s'agit des eaux de fortes, moyennes et faibles minéralisations. Cette répartition montre que le débit et le temps sont des caractéristiques importantes de la structure des données hydrochimiques. Leur intervention sur le facteur 1 indique que la minéralisation des eaux étudiées est liée, non seulement à la nature lithologique des roche-mères, mais aussi aux régimes hydropluviométriques.

6.2.2.5. Bilans des transports en éléments dissous

Les flux annuels des matières minérales en solution seront calculés par cycle hydrologique et par bassin versant étudié selon la formulation (4-3). Comme nous l'avons dit au 6.2.1, nous évaluerons en même temps les apports atmosphériques moyennés sur les principaux bassins versants. Mais auparavant, nous allons calculer les flux des matières dissoutes aux stations secondaires.

Les bassins amont

Les quantités annuelles des substances en solution ramenées à l'unité de surface sont regroupées dans le tableau 6-24 et représentées sur les figures 6-21.

Sur le Dja à Somalomo, le transport spécifique dissous (Tsd) est évalué à $6,6 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1990/91 et à $10,4 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1991/92, soit une moyenne de $8,3 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. A Bi, il est de $7,9 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1990/91. Ces résultats confirment, du moins pour ce qui est du cycle 1990/91, la tendance à l'augmentation de l'altération chimique déjà évoquée de l'amont du Dja (Somalomo) vers l'aval (Bi). Elle est vérifiée par les valeurs des transports spécifiques des cations et de la silice, éléments caractéristiques provenant essentiellement de l'hydrolyse des roches, chiffrés respectivement à $1,4$ et $3,2 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ à Bi et à $1,1$ et $2,6 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ à Somalomo.

Sur la Boumba à Biwala, les transports spécifiques dissous sont évalués à $13,4 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1990/91 et à $15,6 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1991/92, soit une moyenne de $14,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Ils sont supérieurs à ceux du Dja à Somalomo. Cette supériorité est également vérifiée pour les transports spécifiques des cations ($3 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) et de la silice ($4 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) en moyenne et indique une altération chimique sur la Boumba à Biwala plus intense que sur le Dja à Somalomo.

Tableau 6-24 : Transport dissous spécifique des bassins de la Ngoko en amont de Moloundou en t.km⁻².an⁻¹

	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	SiO ₂	MD
Dja à Somalomo										
1990/91	0,4	0,2	0,2	0,3	2	0,4	0,2	0,1	2,6	6,4
1991/92	0,6	0,2	0,3	0,1	2,3	0,4	0,3	0,2	6,2	10,4
Moy	0,5	0,2	0,25	0,15	2,15	0,4	0,25	0,1	4,4	8,35
Dja à Bi										
1990/91	0,5	0,3	0,2	0,4	2,7	0,2	0,2	0,1	3,2	7,9
Boumba à Biwala										
1990/91	0,9	0,6	0,6	0,4	6,4	0,6	0,2	0,4	3,4	13,4
1991/92	2,1	0,6	0,6	0,35	6,3	0,6	0,3	0,3	4,5	15,6
Moy	1,5	0,6	0,6	0,35	6,3	0,6	0,25	0,35	3,95	14,5
Bangué à Bangué										
1990/91	1,6	0,7	0,6	0,5	8,5	0,7	0,2	0,5	5,3	18,5
1991/92	1,5	0,6	0,7	0,5	8,2	0,8	0,3	1,1	8,3	21,9
Moy	1,55	0,65	0,65	0,5	8,35	0,75	0,25	0,8	6,8	20,2
Bidjar à Bandekok										
1990/91	3,6	1,5	3,5	1,9	24,5	0,7	0,5	0,6	11,5	48,4
1991/92	3,4	1,5	2	0,6	24,2	0,6	0,6	0,7	14	47,6
Moy	3,5	1,5	2,75	1,25	24,4	0,65	0,55	0,65	12,8	48
Lokomo à Lokomo										
1990/91	4,6	1,6	0,4	0,3	21,8	0,6	0,4	0,3	3,8	33,8
1991/92	4,1	1,1	0,3	0,3	17,5	0,5	0,3	0,5	7,5	32,1
Moy	4,35	1,35	0,35	0,3	19,7	0,55	0,35	0,4	5,65	33
Légende :										
	Moy : Moyenne									

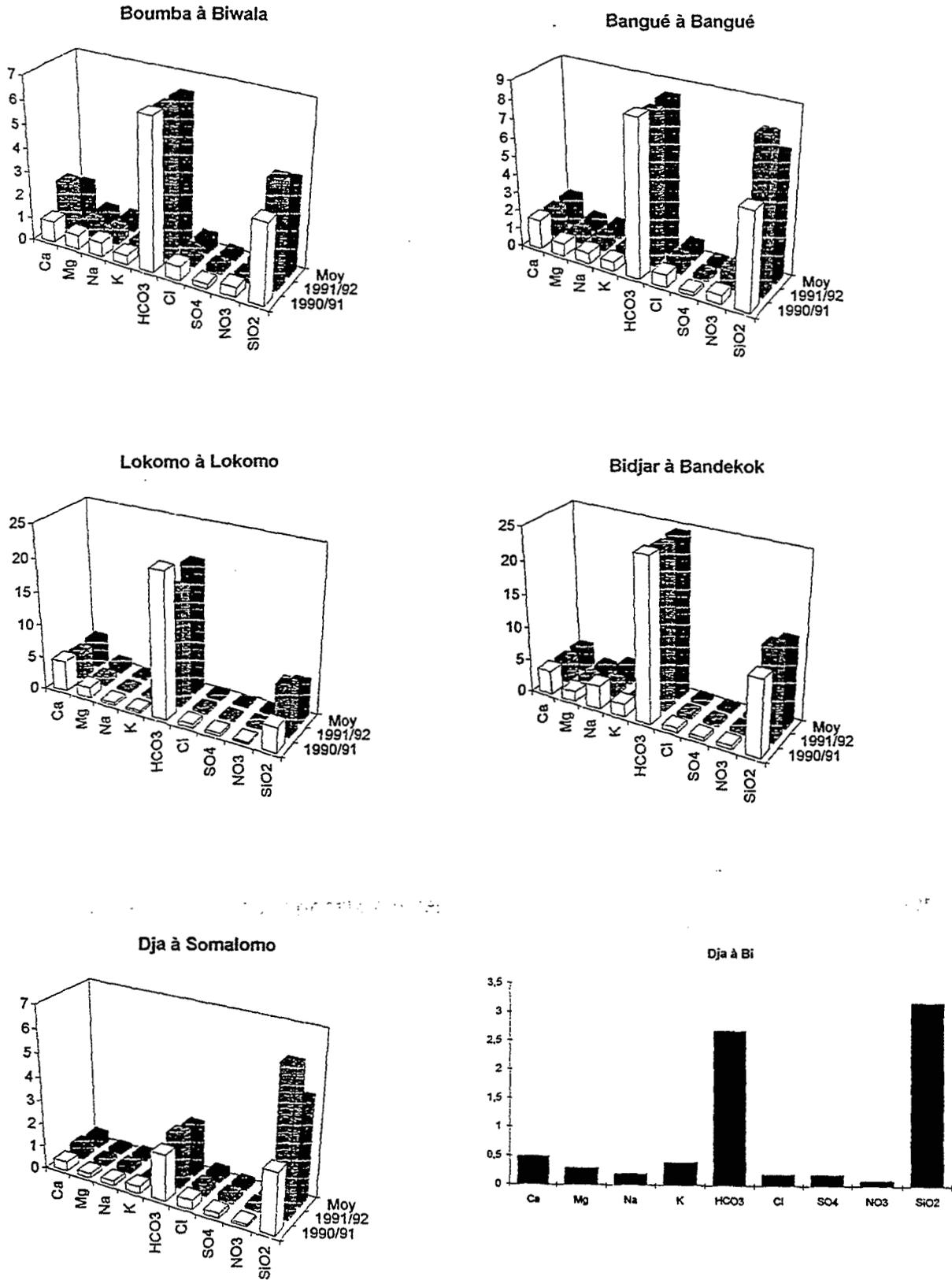


Figure 6-21 : Transport dissous spécifique des bassins de la Ngoko en amont de Moloundou en $t.km^{-2}.an^{-1}$

Sur les affluents de la Boumba en aval de Biwala, les transports spécifiques dissous s'élèvent à $18,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1990/91) et à $21,9 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1991/92), soit une moyenne de $20,2 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur la Bangué. Ils passent à $33,8 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1990/91) et $32,1 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1991/92) soit une moyenne de $33 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur la Lokomo. Ils sont plus élevés sur la Bidjar, avec des valeurs de $48,4 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1990/91) et de $47,6 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$, soit une moyenne de $48 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Les fortes valeurs des transports spécifiques de la Bidjar et de la Lokomo, et dans une moindre mesure de la Bangué, peuvent être imputées au degré d'altérabilité plus élevé des roches éruptives (andésites et dolérites) et/ou de grès. Par ailleurs, ces valeurs sont largement supérieures à celles trouvées sur des formations géologiques similaires (4 à $5,3 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) par ORANGE (1990) et à celles trouvées sur les calcaires ($14,8 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) du bassin du Congo par NKOUNKOU et PROBST (1986). L'existence de formations carbonatées pourrait rendre compte de ces fortes valeurs de transports spécifiques et des valeurs élevées de pH (8,1) et des bicarbonates rencontrées dans ces eaux.

Les bassins de l'aval

Aux stations principales (Moloundou sur la Ngoko, Moloundou-SOTREF sur le Dja et Moloundou-Bac sur la Boumba, nous avons calculé les apports atmosphériques, en les moyennant par bassin versant, et les transports fluviaux des espèces chimiques. Les flux annuels, ramenés à l'unité de surface, sont regroupés dans le tableau 6-25. Pour chaque cycle hydrologique, la première ligne indique le volume d'eau précipité et ses apports spécifiques en éléments tandis que la seconde donne le volume d'eau écoulé et le transport spécifiques des substances minérales exportées en solution. Les moyennes des apports atmosphériques et des transports fluviaux en éléments dissous sont représentées sur la figure 6-22. Les proportions des éléments apportées par les précipitations ou exportées par les écoulements sont reportées sur les figures 6-23a et 6-23b.

En ce qui concerne les éléments, dans l'ensemble les exportations fluviales en calcium, magnésium, bicarbonates et en silice sont supérieures (sauf pour le calcium sur le Dja à la SOTREF) aux apports des précipitations sur les trois bassins. Pour le reste des éléments (Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} et NO_3^-), les apports spécifiques des précipitations sont supérieurs aux quantités sorties des bassins en solution. Si parmi ces éléments on considère ceux d'origine externe aux bassins, notamment les chlorures et les sulfates qui proviennent essentiellement des aérosols marins, leurs faibles quantités évacuées par les écoulements peuvent être liées au déficit hydrique élevé et/ou au au stockage sur les versants. Par analogie, on peut expliquer de la même manière les pertes observées pour

Tableau 6-25 : Apports atmosphériques et transports dissous spécifiques des bassins du Dja à Moloundou-SOTREF, de la Boumba à Moloundou-Bac et de la Ngoko à Moloundou en t.km⁻².an⁻¹

	V	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	SiO2	Md	
Ngoko à Moloundou												
1989/90	Asd	99,3	0,6	0,3	0,4	1,6	2,1	0,9	0,8	0,4	0,5	7,5
	Tsd	23,1	1,6	0,7	0,5	0,7	8,4	0,5	1,0	0,2	7,0	18,7
1990/91	Asd	101	1,6	0,3	1,0	0,8	2,3	0,9	0,7	0,5	0,3	8,4
	Tsd	24,6	1,2	0,6	0,5	0,4	7,3	0,4	0,4	0,2	4,8	16,0
1991/92	Asd	96,8	2,1	0,2	1,6	0,2	1,4	1,1	1,1	0,8	0,3	8,8
	Tsd	23,8	1,0	0,5	0,3	0,2	9,3	0,4	0,4	0,4	5,6	17,9
Moy	Asd	99	1,4	0,3	1,0	0,9	1,9	1,0	0,9	0,6	0,4	8,2
	Tsd	23,9	1,3	0,6	0,4	0,4	8,3	0,4	0,6	0,3	5,8	17,5
Boumba à Moloundou-Bac												
1989/90	Asd	36,7	0,6	0,3	0,3	2,1	2,1	1,0	1,0	0,3	0,7	8,2
	Tsd	9,0	2,1	1,2	0,4	0,4	11,4	0,6	0,3	0,3	3,6	20,3
1990/91	Asd	37,8	1,8	0,3	1,1	0,8	2,0	1,0	0,7	0,4	0,3	8,4
	Tsd	9,3	1,9	1,1	0,5	0,5	11,2	0,4	0,3	0,3	3,7	19,7
1991/92	Asd	37,1	2,0	0,2	1,4	0,1	1,3	1,1	1,0	0,8	0,2	8,2
	Tsd	9,2	1,7	0,6	0,4	0,3	9,3	0,4	0,3	0,3	5,3	18,5
Moy	Asd	37,2	1,5	0,2	1,0	1,0	1,8	1,0	0,9	0,5	0,4	8,3
	Tsd	9,18	1,9	0,97	0,45	0,4	10,6	0,47	0,3	0,3	4,2	19,5
Dja à Moloundou-SOTREF												
1989/90	Asd	63,7	0,6	0,4	0,4	1,3	2,6	1,0	0,8	0,4	0,5	8,0
	Tsd	14,2	0,9	0,4	0,3	0,4	5,2	0,2	0,5	0,5	3,7	12,7
1990/91	Asd	63,9	1,5	0,3	1,0	0,8	2,4	1,0	0,6	0,4	0,4	8,4
	Tsd	15,4	1,0	0,4	0,4	0,4	5,9	0,4	0,4	0,1	2,9	15,4
1991/92	Asd	60,4	1,9	0,2	1,8	0,2	1,1	1,1	1,0	0,9	0,3	8,5
	Tsd	14,4	0,9	0,4	0,3	0,1	4,5	0,4	0,4	0,3	5,5	12,8
Moy	Asd	62,7	1,3	0,3	1,1	0,8	2,0	1,0	0,8	0,6	0,4	8,3
	Tsd	14,7	0,93	0,4	0,35	0,3	5,17	0,35	0,33	0,3	4,03	13,4

Légende :

Asd : Apports spécifiques atmosphériques

Tsd : Transport spécifique dissous

V : Volume d'eau précipité ou écoulé en km³

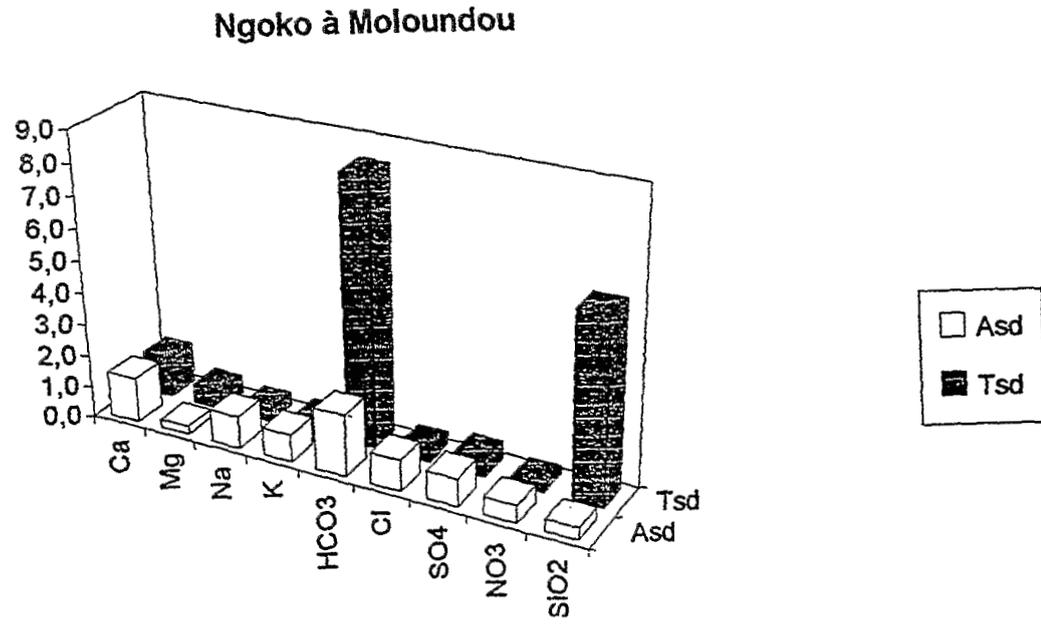
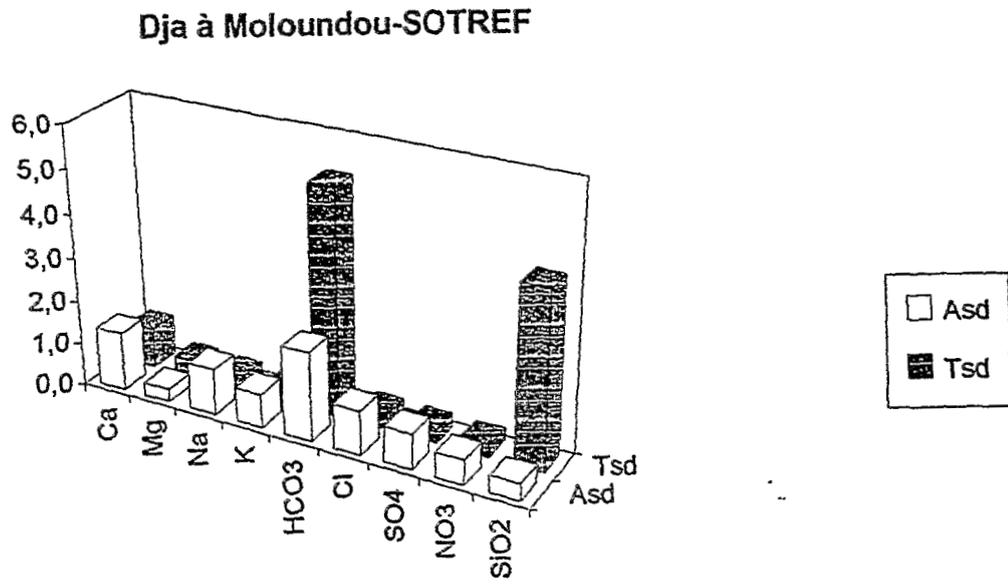
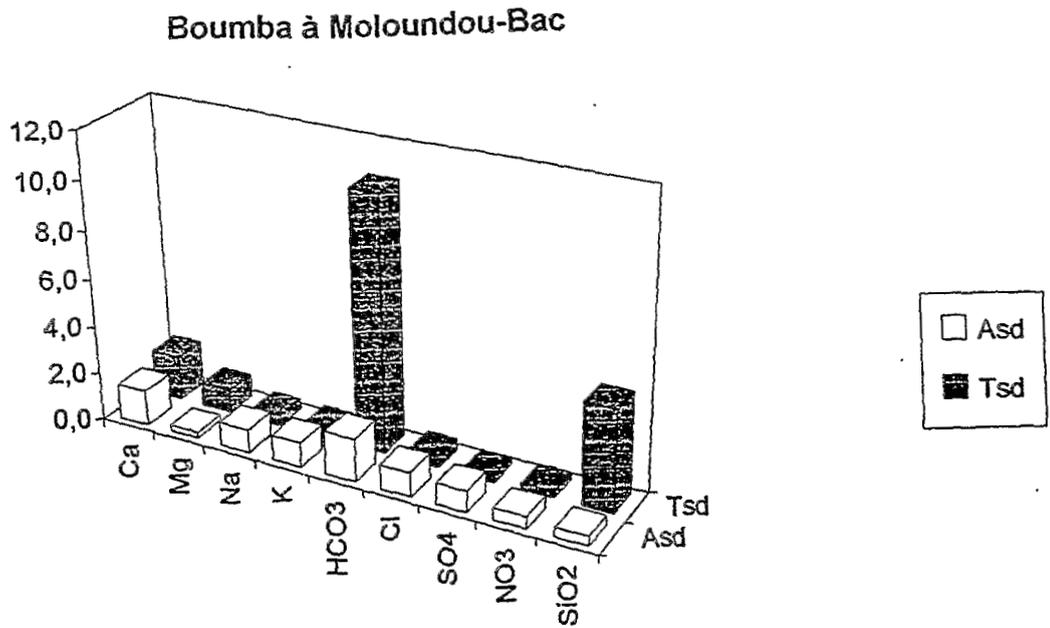


Figure 6-22 : Apports atmosphériques et transports dissous spécifiques des bassins du Dja à Moloundou-SOTREF, de la Boumba à Moloundou-Bac et de la Ngoko à Moloundou en $t.km^{-2}.an^{-1}$

Légende : Asd : Apports atmosphériques spécifiques ; Tsd : Transports dissous spécifiques ;
V : Volume d'eau précipité ou écoulé

Apports atmosphériques spécifiques

Transport dissous spécifique

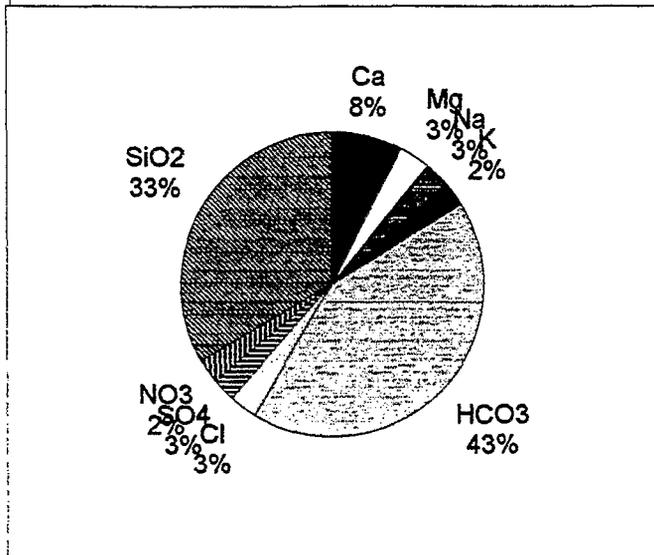
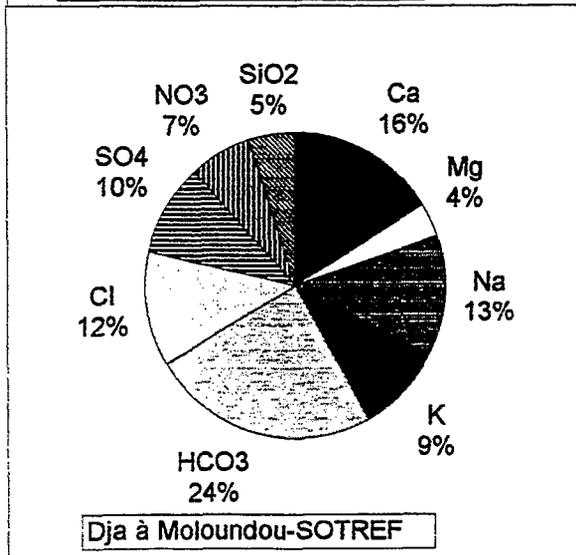
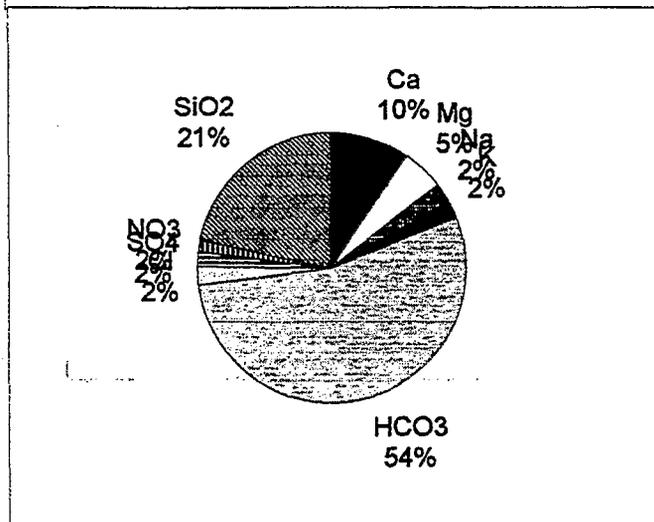
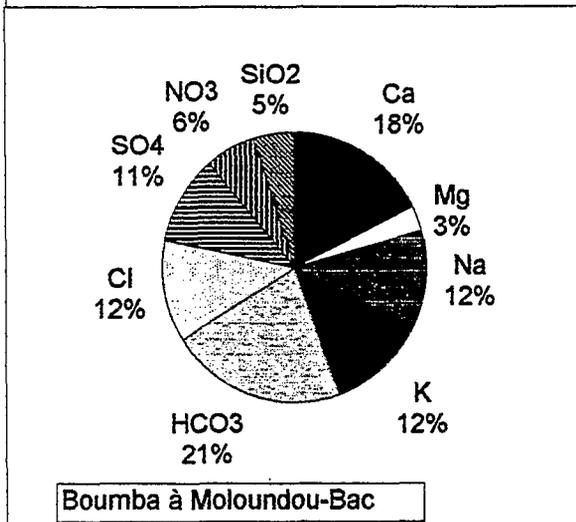
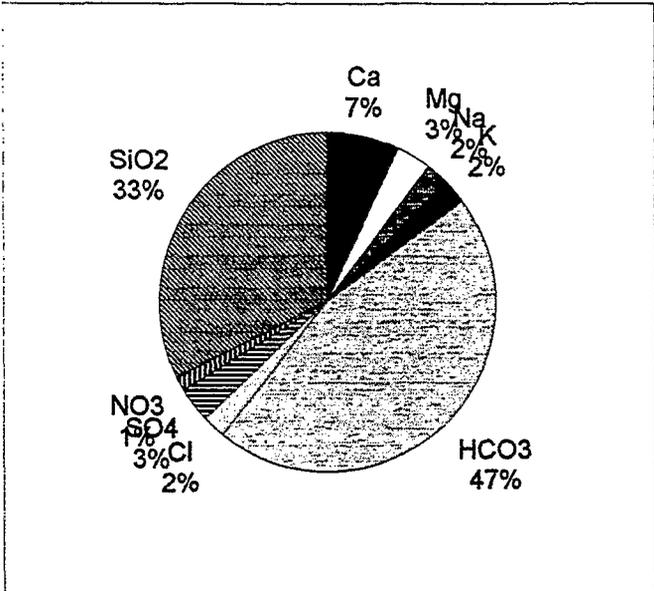
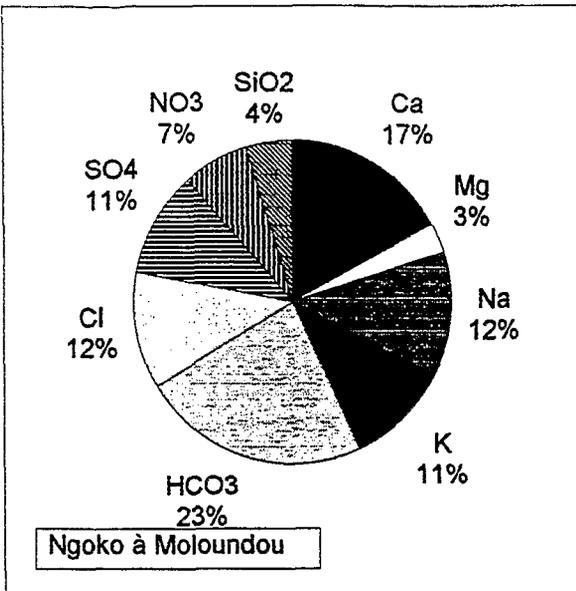


Figure 6-23 : Diagrammes sectoriels des apports atmosphériques et transports dissous spécifiques des bassins du Dja à Moloundou-SOTREF, de la Boumba à Moloundou-Bac et de la Ngoko à Moloundou en pourcentage

les cations. D'après TARDY (1969), ORANGE (1990) et BRUIJNZEEL (1990), une partie du calcium peut précipiter sous forme de calcite dans le sol. Comme on a montré par ailleurs que les cations et la silice sont essentiellement soutirés par altération chimique de la roche-mère, on peut admettre, compte tenu des piègeages dont les apports atmosphériques peuvent être l'objet en milieu forestier, que les quantités de cations et de silice mesurées dans les écoulements sont presque en totalité d'origine lithologique.

Ainsi, en moyenne, l'altération chimique est évaluée à $6,1 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur le Dja à Moloundou-SOTREF, à $7,9 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur la Boumba à Moloundou-Bac et à $8,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur la Ngoko à Moloundou.

En ce qui concerne les apports spécifiques totaux des espèces chimiques des précipitations, ils sont du même ordre de grandeur sur les 3 bassins au cours des cycles hydrologiques étudiés. Ils évoluent entre $7,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1989/90) et $8,8 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1991/92) sur la Ngoko à Moloundou. Les apports moyens par bassin sont de l'ordre de $8,3 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Ces résultats sont satisfaisants dans la mesure où la faible variation temporelle des apports atmosphériques est conforme à celle des précipitations qui les ont apportés durant ces 3 années hydrologiques normales. Signalons également que les apports atmosphériques spécifiques moyennés sur les bassins ont été constants dans l'espace.

Par contre, pour ce qui est du transport spécifique de la charge totale en solution, il est plus élevé sur la Boumba à Moloundou-Bac que sur le Dja à Moloundou-SOTREF et sur la Ngoko à Moloundou (tableau 6-26).

Tableau 6-26 : Transports dissous spécifiques de la Boumba à Moloundou-Bac, du Dja à Moloundou-SOTREF et de la Ngoko à Moloundou en $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$.

Année	Boumba	Dja	Moyenne Boumba-Dja	Ngoko
1989/90	20,3	12,7	16,5	18,7
1990/91	19,7	15,4	17,5	16
1991/92	18,5	12,8	15,7	17,9
Moyenne	19,5	13,4	16,6	17,5

Le transport spécifique dissous varie entre $12,7 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1989/90) sur le Dja à la SOTREF et $20,3 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur la Boumba au Bac. Sur les trois cycles étudiés, il est quasiment constant d'une année à l'autre sur un même bassin.

En moyenne, il est de $13,4 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur le Dja à la SOTREF, de $19,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur la Boumba au Bac et de $17,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur la Ngoko à Moloundou. Ces résultats sont satisfaisants en ce sens que la moyenne des transports spécifiques du Dja et de la Boumba ($16,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) est comparable à celle mesurée sur la Ngoko à Moloundou. D'autre part, ils confirment ceux trouvés sur les bassins en amont, à savoir que l'altération est plus intense sur le bassin de la Boumba que sur celui du Dja.

En résumé, nos mesures des apports atmosphériques permettent de dégager que les ions Cl^- et Na^+ décroissent de Kribi (océan Atlantique) vers la région de Yokadouma-Moloundou à l'est, tandis que les ions Ca^{++} et K^+ évoluent en sens contraire. Par ailleurs, les apports en espèces chimiques provenant des poussières atmosphériques et des émissions biogéniques sont relativement importants dans les précipitations collectées. En moyenne, les apports spécifiques atmosphériques sur les principaux bassins versants (Boumba au Bac, Dja à la SOTREF et Ngoko à Moloundou) sont du même ordre de grandeur. Ces résultats sont conformes au caractère moyen des cycles hydrologiques étudiés.

En ce qui concerne la qualité chimique des écoulements, nos résultats ont permis de classer les eaux étudiées dans le faciès géochimique des eaux bicarbonatées calcoc-magnésiennes. Par ailleurs, elles appartiennent au domaine de stabilité de la kaolinite.

La comparaison entre les éléments atmosphériques d'origine marine (Cl^- et SO_4^{--}) à l'entrée et à la sortie des principaux bassins aboutit à des quantités inférieures évacuées par les eaux fluviales, donc à un déficit de ces espèces chimiques. D'après MATHIEU (1972), une partie de ces éléments est directement absorbée par la végétation et/ou stockée sur les versants. Il en est de même pour les cations. On en déduit une contribution négligeable des apports atmosphériques aux matières exportées en solution par les cours d'eau étudiés. Cette conclusion est appuyée par l'évolution inversement proportionnelle des débits et de la charge dissoute, indiquant ainsi une dilution des concentrations et par conséquent un apport négligeable en éléments de ruissellement. L'altération chimique se limite dans ce cas aux transports spécifiques des cations et de la silice que nous avons calculés à l'exutoire des bassins, étant entendu qu'ils proviennent directement de l'hydrolyse des roches-mères et que les autres éléments sont d'origine externe.

6.3. LE CARBONE ORGANIQUE

Le carbone organique particulaire (COP) et le carbone organique dissous (COD) n'ont pas fait l'objet d'une étude systématique. Cependant, il nous a paru intéressant de l'inclure dans ce mémoire en raison du fait que les données de carbone en milieu équatorial sont relativement réduites et que les fleuves de la ceinture tropicale apportent 40 % du carbone organique total (COT) à l'océan (MEYBECK, 1984).

Les concentrations naturelles de carbone organique dans les fleuves sont très variables et dépendent principalement des conditions climatiques et des types des sols. D'après MEYBECK (1991), les concentrations du carbone dans les fleuves non pollués varient entre 0,5 et 75 mg.l⁻¹ pour le COP et entre 0,5 et 40 mg.l⁻¹ pour le COD.

6.3.1. LE CARBONE ORGANIQUE PARTICULAIRE

D'après MEYBECK (1982), le carbone organique particulaire représente 50 % de la matière organique. Le carbone organique est constitué du matériel détritique allochtone et de la production phytoplanctonique autochtone. Dans cette étude, nous ne distinguerons pas les deux formes.

Au total, on dispose de 63 valeurs de COP sur l'ensemble de notre zone d'intérêt. Parmi les 50 teneurs en COP du bassin versant de la Ngoko, Vingt-huit (28) portent sur le bassin de la Boumba, treize (13) sur celui du Dja et neuf (9) sur la Ngoko à Moloundou. Sur les bassins voisins, le Nyong en compte quatre (4), le Ntem deux (2) et la Kadey sept (7). Dans le tableau 6-27 sont regroupées les concentrations moyennes et extrêmes du carbone organique.

En rapport avec les matières en suspension, la proportion moyenne de COP est de 9,1 % (coefficient de variation de 60 %), ce qui correspond approximativement à une quantité en matière organique particulaire de 20 %. La teneur minimale est de 3,2 %, soit une quantité en matière organique particulaire proche de 6 %. Elle a été mesurée en août 1991 sur la Ngoko à Moloundou. La teneur maximale est 35,6 %, soit une quantité matière organique particulaire de 71 %, ce qui signifie que les matières en suspension sont constituées pour les 3/4 de la matière organique. Elle a été observée en novembre 1991 sur le Nyong à Akonolinga. Il est vraisemblable que la production phytoplanctonique autochtone est responsable d'une fraction importante de la charge en carbone organique.

Tableau 6-27 : Teneurs moyennes et extrêmes de carbone organique particulaire, dissous et total

	MES	Date	COP	MO	Date	COP	Date	COD	Date	COT
	mg/l		%	%		mg/l		mg/l		mg/l
Ngoko à Moloundou										
MOY	33,5		6,3	12,5		2,0		9,4		11,3
STD	22,0		1,7	3,5		1,1		5,9		7,0
CV	0,7		0,3	0,6		0,6		0,6		1,2
MAX	86,0	05/10/91	9,3	18,6	18/03/91	4,1	05/10/91	19,7	07/06/91	23,8
MIN	12,7	18/03/91	3,2	6,4	27/08/91	0,7	19/07/91	3,8	18/03/91	4,4
N	9		9			9		8		
Boumba à Biwala										
MOY	38,7		8,4	16,8		2,9		8,1		10,9
STD	24,0		2,2	4,3		1,4		1,9		3,3
CV	0,6		0,3	0,5		0,5		0,2		0,7
MAX	82,5	17/07/91	11,5	23,0	17/03/91	5,6	17/07/91	10,6	17/11/91	16,2
MIN	9,7	17/03/91	6,5	13,0	26/08/91	1,1	17/03/91	5,9	17/07/91	7,0
N	6		6			6		5		
Boumba à Mol.-Bac										
MOY	37,4		6,7	13,4		2,4		10,9		13,3
STD	14,0		0,6	1,3		0,8		6,8		7,5
CV	0,4		0,1	0,2		0,3		0,6		0,9
MAX	68,4	29/08/91	7,7	15,4	14/11/91	4,1	29/08/91	23,7	20/07/91	27,8
MIN	26,3	01/02/91	5,9	11,9	29/08/91	1,6	01/02/91	3,4	01/02/91	5,0
N	7		7			7		7		
Bangué à Bangué										
MOY	37,9		7,9	15,7		2,5		7,3		9,8
STD	17,4		5,4	10,9		1,1		4,0		5,1
CV	0,5		0,7	1,4		0,4		0,5		1,0
MAX	57,2	26/08/91	19,9	39,8	17/07/91	4,4	17/07/91	14,1	06/06/91	18,5
MIN	17,7	27/09/91	4,7	9,5	06/06/91	1,0	27/09/91	4,1	17/07/91	5,1
N	6		6			6		4		
Lokomo à Lokomo										
MOY	15,4		11,4	22,7		1,5		10,9		12,4
STD	8,7		3,5	7,0		0,5		4,6		5,1
CV	0,6		0,3	0,6		0,3		0,4		0,7
MAX	30,0	06/06/91	16,5	33,0	17/07/91	2,3	06/06/91	18,1	27/09/91	20,4
MIN	7,7	27/09/91	7,2	14,5	26/08/91	0,8	27/09/91	6,9	26/08/91	7,7
N	6		6			6		4		
Bidjar à Bandekok										
MOY	13,9		6,2	12,4		0,9		6,7		7,6
STD	5,5		1,5	2,9		0,4		2,7		3,1
CV	0,4		0,2	0,5		0,5		0,4		0,9
MAX	20,7	17/03/91	8,1	16,1	26/08/91	1,2	17/03/91	10,3	17/03/91	11,5
MIN	7,3	17/07/91	4,5	9,0	17/07/91	0,3	17/07/91	3,7	17/07/91	4,1
N	3		3			3		3		

Tableau 6-27 (suite)

Dja à Mol.-SOTREF						
MOY	34,7	6,5	13,0	2,2	8,6	10,9
STD	14,2	0,6	1,2	0,8	4,1	4,9
CV	0,4	0,1	0,2	0,4	0,5	0,8
MAX	60,7 08/10/91	7,2	14,5 15/11/91	3,5 08/10/91	17,4 30/09/91	20,9
MIN	19,6 28/08/91	5,5	11,0 30/09/91	1,1 30/09/91	4,3 08/06/91	5,4
N	8	8		8	7	
Dja à Somalomo						
MOY	15,3	12,8	25,6	1,6	13,7	15,3
STD	6,3	5,9	11,9	0,4	4,7	5,1
CV	0,4	0,5	0,9	0,3	0,3	0,6
MAX	24,0 15/07/91	17,3	34,6 03/11/91	2,1 03/11/91	20,3 15/07/91	22,4
MIN	9,5 12/06/91	4,4	8,9 15/07/91	1,1 15/07/91	9,5 03/11/91	10,6
N	3	3		3	3	
Dja à Bi						
13/12/90	16,0	13,7	27,5	2,2	9,2	11,3
Ebé à Zoébéfam						
13/12/90	19,4	8,8	17,5	1,7	5,0	6,7
Nyong à Akonolinga						
MOY	13,6	20,9	41,8	2,2	19,3	21,5
STD	8,9	11,7	23,4	0,9	4,2	5,1
CV	0,7	0,6	1,1	0,4	0,2	0,6
MAX	26,0 15/07/91	35,6	71,2 03/11/91	3,3 12/06/91	22,7 15/07/91	26,0
MIN	6,3 03/11/91	7,4	14,7 15/07/91	1,4 24/08/91	13,6 24/08/91	15,0
N	4	4		4	4	
Ntem à Ngoazik						
11/12/90	14,2	14,9	29,8	2,1	10,7	12,8
Ntem à Nyabessan						
10/12/90	18,0	14,1	28,2	2,5	10,6	13,1
Kadey à Batouri						
MOY	27,3	8,2	16,4	2,0	10,0	11,9
STD	7,8	3,4	6,8	0,3	2,9	3,2
CV	0,3	0,4	0,8	0,1	0,3	0,4
MAX	35,0 16/07/91	11,6	23,2 04/11/91	2,3 16/07/91	12,9 04/11/91	15,2
MIN	19,5 04/11/91	4,8	9,7 16/07/91	1,7 04/11/91	7,0 16/07/91	8,7
N	2	2		2	2	
Kadey à Pana						
MOY	26,4	9,3	18,5	2,4	8,8	11,1
STD	9,4	3,2	6,3	1,2	0,8	2,0
CV	0,4	0,3	0,7	0,5	0,1	0,6
MAX	41,5 05/06/91	12,5	25,0 04/11/91	4,5 05/06/91	10,1 26/09/91	14,6
MIN	16,0 26/09/91	3,7	7,4 16/07/91	0,9 16/07/91	7,5 16/07/91	8,4
N	5	5		5	5	5

Les quantités de matières organiques sont supérieures aux estimations de la matière organique faites lors des analyses minéralogiques qui varient de 5 à 40 % (tableau 6-14). D'autre part, en moyenne, les teneurs en matière organique trouvées ici sont 10 fois supérieures à celles indiquées par SEGALEN et al (1957) dans les premiers 10 cm des sols. Ces fortes teneurs peuvent être expliquées par l'abondance du carbone algal dans le COP.

La figure 6-24 représente la variation de COP en pourcentage en fonction des concentrations des matières en suspension. Elle suit une loi d'équation :

$$\text{COP (\%)} = 1,24/\text{MES}^{+0,443} \quad (6-15)$$

avec :

MES = concentrations des matières en suspension en mg.l^{-1} ;

r = -0,6434

Elle montre que les proportions de COP évoluent en sens inverse des concentrations des MES. Cette variation est comparable à celle trouvée par MEYBECK (1984), HUMBEL (1988) ORANGE (1990) et BARREAU (1992).

Variations spatio-temporelles

Globalement, les variations spatio-temporelles montrent que les faibles proportions de COP qui sont observées en juillet sur les bassins de la partie septentrionale de notre zone d'intérêt (7,4 % sur le Nyong à Akonolinga ; 4,4 % sur le Dja à Somalômô ; 4,4 % sur la Kadey à Batouri et 3,7 % sur la Kadey à Pana). Par contre, en allant de la latitude 3 °N (Biwala) vers l'équateur, elles sont observées en juin (maximum de crue secondaire) et/ou en août-septembre (début de la crue principale et mois des teneurs maximales en MES). Ainsi, elle a été de 6,8 % de juin à août à Biwala et de 5,8 % en août à Moloundou-Bac sur la Boumba ; de 5,5 % en septembre sur le Dja à Moloundou-SOTREF et de 3,2 % en août sur la Ngoko à Moloundou.

Nos valeurs sont comparables à celles trouvées sur le bassin fluvial du Congo par d'autres auteurs : 7,6 % (KINGA-MOUZEO, 1986) ; 6 % (NKOUNKOU et PROBST, 1987) et 2 à 14 % (BARREAU, 1992).

En ce qui concerne les proportions élevées de COP, elles ont été mesurées pendant l'étiage principal et précisément en février-mars sur la plupart des stations (11,5 % à Biwala et 6,2 % à Moloundou-Bac sur la Boumba ; 7,1 % à Moloundou-SOTREF sur le

Dja et 9,3 % à Moloundou sur la Ngoko). Ces teneurs sont comparables à celles du mois de novembre, mois pendant lequel de faibles concentrations de MES sont également mesurées suite à leur dilution par de forts débits.

On peut donc dire qu'en proportion, plus les charges de matières en suspension sont faibles et plus la proportion de carbone organique particulaire est importante. Aucune relation nette n'a été décelée avec les débits, sans doute à cause de la taille réduite des observations par station.

Exprimé en poids par unité de volume, le COP a une teneur moyenne de $2,4 \text{ mg.l}^{-1}$ (coefficient de variation de 48 %). La teneur maximale est de $5,6 \text{ mg.l}^{-1}$ (observée le 17/07/91) sur la Boumba à Biwala. La concentration minimale, d'une valeur de $0,3 \text{ mg.l}^{-1}$, a été mesurée le même jour sur la Bidjar à Bandekok. La moyenne de nos teneurs en COP est dans la gamme de variation de celles mesurées sur l'Amazonie, à savoir : 1 à 5 mg.l^{-1} (MEYBECK, 1984). Par ailleurs, elle est supérieure à celle du Congo ($1,07 \text{ mg.l}^{-1}$) d'après CADEE cité par NKOUNKOU, (1989) et inférieure à la moyenne mondiale (5 mg.l^{-1}) selon MEYBECK (1984).

Nous avons représenté sur la figure 6-25 la relation entre les teneurs en COP et celles des MES. Elle obéit à une régression linéaire d'équation :

$$\text{COP (mg.l}^{-1}\text{)} = 0,0443.\text{MES} + 0,7871 \quad (6-16)$$

avec :

MES = concentration des matières en suspension en mg.l^{-1} ;

$r = 0,851$

Cette relation montre que les teneurs en COP varient dans le même sens que celles des MES. Elle est comparable à celle trouvée par HUMBEL (1988).

Les faibles teneurs en COP ($1,1 \text{ mg.l}^{-1}$ sur la Boumba à Biwala en mars par exemple) sont mesurées durant l'étiage principal et les fortes teneurs sont rencontrées dès le maximum de crue secondaire en juin ($3,3 \text{ mg.l}^{-1}$ sur le Nyong à Akonolinga et $4,5 \text{ mg.l}^{-1}$ sur la Kadey à Batouri).

Par contre, aux stations proches de l'équateur (Moloundou-Bac sur la Boumba, Moloundou-SOTREF sur le Dja et Moloundou sur la Ngoko), on observe deux minimas des teneurs en COP correspondant aux deux saisons sèches. La première apparaît en

ANALYSE DE LA REGRESSION

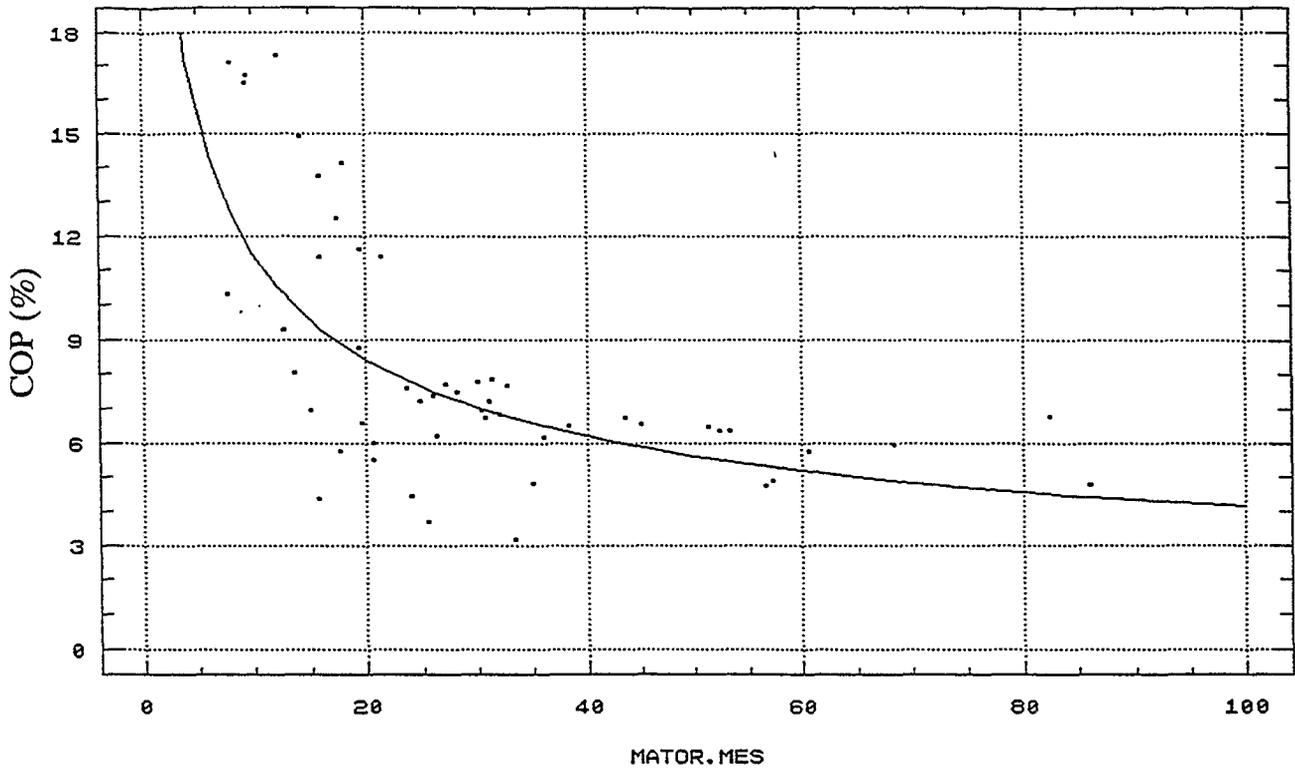


Figure 6-24 : Variation du carbone organique en pourcentage en fonction des teneurs de matières en suspension

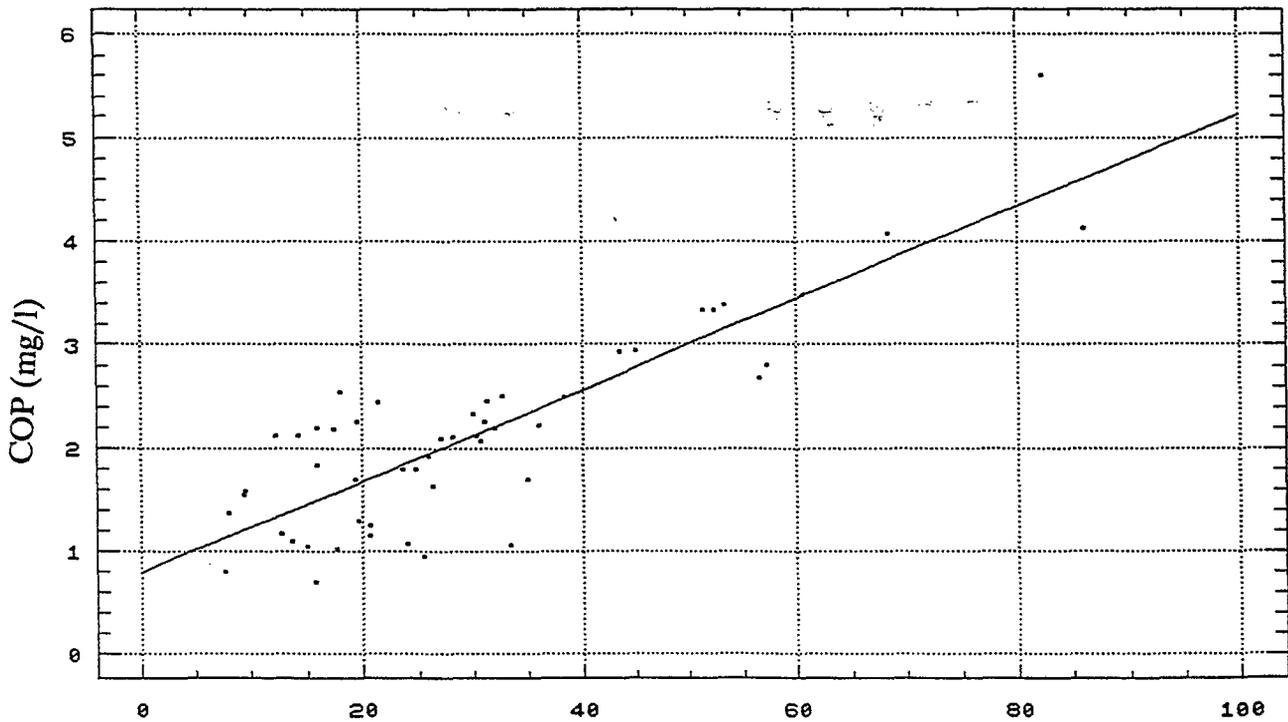


Figure 6-25 : Relation entre le carbone organique en mg.l^{-1} les concentrations de matières en suspension

février-mars ($1,6 \text{ mg.l}^{-1}$ sur la Boumba à Moloundou-Bac et sur le Dja à Moloundou-SOTREF et $1,2 \text{ mg.l}^{-1}$ sur la Ngoko à Moloundou) et la seconde en juillet ($2,9 \text{ mg.l}^{-1}$ sur la Boumba au Bac et $0,7 \text{ mg.l}^{-1}$ sur la Ngoko à Moloundou). On enregistre également deux maximas correspondant aux deux saisons de pluie. La première coïncide avec le maximum de crue secondaire en juin et la seconde avec le maximum de crue principale d'octobre-novembre. Sur la Ngoko à Moloundou, les teneurs respectives sont de $3,3 \text{ mg.l}^{-1}$ et de $4,1 \text{ mg.l}^{-1}$.

Les teneurs en COP en mg.l^{-1} semblent contrôlées par celles des MES ; mais le maximum des teneurs en COP coïncide avec celui des débits. On pense que l'augmentation de COP après le maximum des MES est imputable à un apport autochtone important de COP produit par la population phytoplanctonique qui s'accroît après consommation des nutriments apportés par les écoulements des premières pluies (MEYBECK, 1984).

6.3.2. Le carbone organique dissous

Le carbone organique transporté en solution est constitué essentiellement des acides humiques et des acides fulviques. On dispose de 56 valeurs des teneurs en carbone organique dissous réparties comme suit :

- Quarante-trois (43) observations portent sur le bassin de la Ngoko, dont vingt-trois (23) sur la Boumba, douze (12) sur le Dja et neuf (9) sur la Ngoko à Moloundou ;
- Sur les bassins voisins, le Nyong en compte quatre (4), le Ntem deux (2) et la Kadey sept (7).

Les teneurs moyennes et extrêmes en COD sont regroupées dans le tableau 6-27. La teneur moyenne de COD est de $10,1 \text{ mg.l}^{-1}$ (coefficient de variation de 13 %). On doit préciser que dans le calcul de cette moyenne, la valeur $70,6 \text{ mg.l}^{-1}$ mesurée le 05/11/91 sur la Bangué a été écartée ainsi que dans la suite de l'étude. D'après ECTHEBER (com.personnelle), cet échantillon présentait des traces de pollution (détergent). La teneur moyenne en COD de nos échantillons est supérieure à la moyenne des fleuves tropicaux (6 mg.l^{-1}) et elle est le double de la moyenne mondiale ($5,75 \text{ mg.l}^{-1}$, MEYBECK, 1984). Elle est également supérieure aux teneurs moyennes observées par GUYOT (1992) en Amazonie Bolivienne ($1,2$ à $3,5 \text{ mg.l}^{-1}$ dans les Andes et $4,2$ à $7,4 \text{ mg.l}^{-1}$ dans les Llanos). La concentration maximale est de $23,7 \text{ mg.l}^{-1}$ sur la Boumba à Moloundou-Bac (20/07/91). La teneur minimale, observée à la même station le 01/02/91, est de $3,4 \text{ mg.l}^{-1}$.

D'une façon générale, les teneurs en COD sont élevées sur les bassins étudiés. La moyenne est comparable à celle du Congo ($8,5 \text{ mg.l}^{-1}$) selon CADEE cité par NKOUNKOU (1989). Ces fortes teneurs en COD sont caractéristiques du climat équatorial et de la forêt dense.

Variations spatio-temporelles

Les faibles teneurs en COD aux stations principales sont mesurées pendant la grande saison sèche ($4,3 \text{ mg.l}^{-1}$ sur la Dja Moloundou-SOTREF ; $3,4 \text{ mg.l}^{-1}$ sur la Boumba au Bac et sur la Ngoko à Moloundou). Les fortes teneurs sont observées de juin à juillet sur la Boumba à Moloundou-Bac ($18,2$ et $23,8 \text{ mg.l}^{-1}$) ainsi que sur la Ngoko à Moloundou ($19,7$ et 19 mg.l^{-1}) et en septembre sur le Dja à Moloundou-SOTREF ($17,4 \text{ mg.l}^{-1}$).

Aux stations secondaires, en l'absence des mesures de COD pendant la grande saison sèche, les concentrations maximales sont mesurées en juin sur la Boumba à Biwala (10 mg.l^{-1}) et la Bangué à Bangué (14 mg.l^{-1}) ; en juillet sur le Dja à Somalomo ($20,3 \text{ mg.l}^{-1}$), le Nyong à Akonolinga ($22,7 \text{ mg.l}^{-1}$) et en septembre sur la Kadey à Pana (10 mg.l^{-1}) et sur la Lokomo à Lokomo ($18,1 \text{ mg.l}^{-1}$).

D'une manière générale, sur l'ensemble de la zone étudiée, les faibles teneurs en COD sont observées pendant l'étiage principal, période au durant laquelle, en l'absence des apports en nutriments des versants, les phytoplanctons se nourrissent essentiellement de COD. Les fortes concentrations maximales de COD sont mesurées de moyennes aux hautes eaux, en raison des apports par les écoulements superficiels de fortes quantités de COD et d'autres nutriments qui sont consommés par les phytoplanctons à la place de COD.

6.3.3. BILAN DU CARBONE ORGANIQUE

Avant l'évaluation des flux de carbone organique exporté en suspension et en solution, nous allons d'abord nous attarder sur le carbone organique total (COT) et sur le rapport d'abondance des formes organiques dissoutes et particulaires ci-dessous :

$$R = \text{COD}/\text{COT} \quad (6-17)$$

avec :

$$\text{COT} = \text{COP} + \text{COD} \text{ en } \text{mg.l}^{-1} ;$$

R en %.

Ce calcul a porté sur 56 valeurs. La moyenne est de 80 % (coefficient de variation de 13 %). La valeur maximale de R, de l'ordre de 97 %, correspond à l'échantillon du 17/07/91 à Moloundou sur la Ngoko. La valeur minimale, calculée le même mois sur la Bangué à Bangué, est de 48 %. La figure 6-26 représente la relation entre R et les teneurs en MES. L'équation correspondante est la loi exponentielle :

$$R (\%) = 92,3 \exp(-5 \times 10^{-3} \cdot \text{MES} + 4,53) \quad r = -0,8205 \quad (6-18)$$

Elle indique une évolution inversement proportionnelle du rapport R en fonction des teneurs en MES. Elle est comparable à celle établie par MEYBECK (1984). Il traduit également qu'en moyenne, le carbone est évacué à 80 % sous sa forme dissoute. C'est l'une des principales caractéristiques du carbone organique du milieu équatorial, contrairement aux zones tempérées où chaque forme de carbone participe pour moitié au carbone total (MEYBECK, 1984).

Le bilan du carbone organique a été évalué à l'aide de la formulation (4-3). Les tonnages exportés ainsi que les transports spécifiques correspondants par bassin versant sont regroupés dans le tableau 6-28. On doit signaler que sur la plupart des bassins versants, notamment le Ntem (Ngoazik et Nyabessan), l'Ebé (Zoébéfam) et le Dja (Bi), les bilans estimés donnent juste des ordres de grandeur.

Les valeurs de transports spécifiques de COP ($0,8 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$), de COD ($3,3 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) et de COT ($4,0 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) sont les mêmes aux stations de Moloundou sur la Ngoko, de Moloundou-SOTREF sur le Dja et de Moloundou-Bac sur la Boumba. Ces valeurs sont comparables à celles calculées sur le bassin du Congo par NKOUNKOU et PROBST (1986), à savoir : $0,8 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour le COP ; $2,9 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour le COD et $3,7 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour le COT.

Sur l'ensemble de la zone étudiée, le transport spécifique de COP varie de $0,3 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur la Bidjar à Bandekok à $1,3 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur le Ntem à Nyabessan tandis que celui de COD est compris entre $2,1 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur l'Ebé à Zoébéfam à $6,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur le Nyong à Akonolinga. Le transport spécifique varie de $2,6 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur la Bidjar à $7,2 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur le Nyong à Akonolinga. On note par ailleurs des valeurs assez proches sur le bassin du Nyong à Akonolinga et celui du Dja à Somalomo.

ANALYSE DE LA REGRESSION

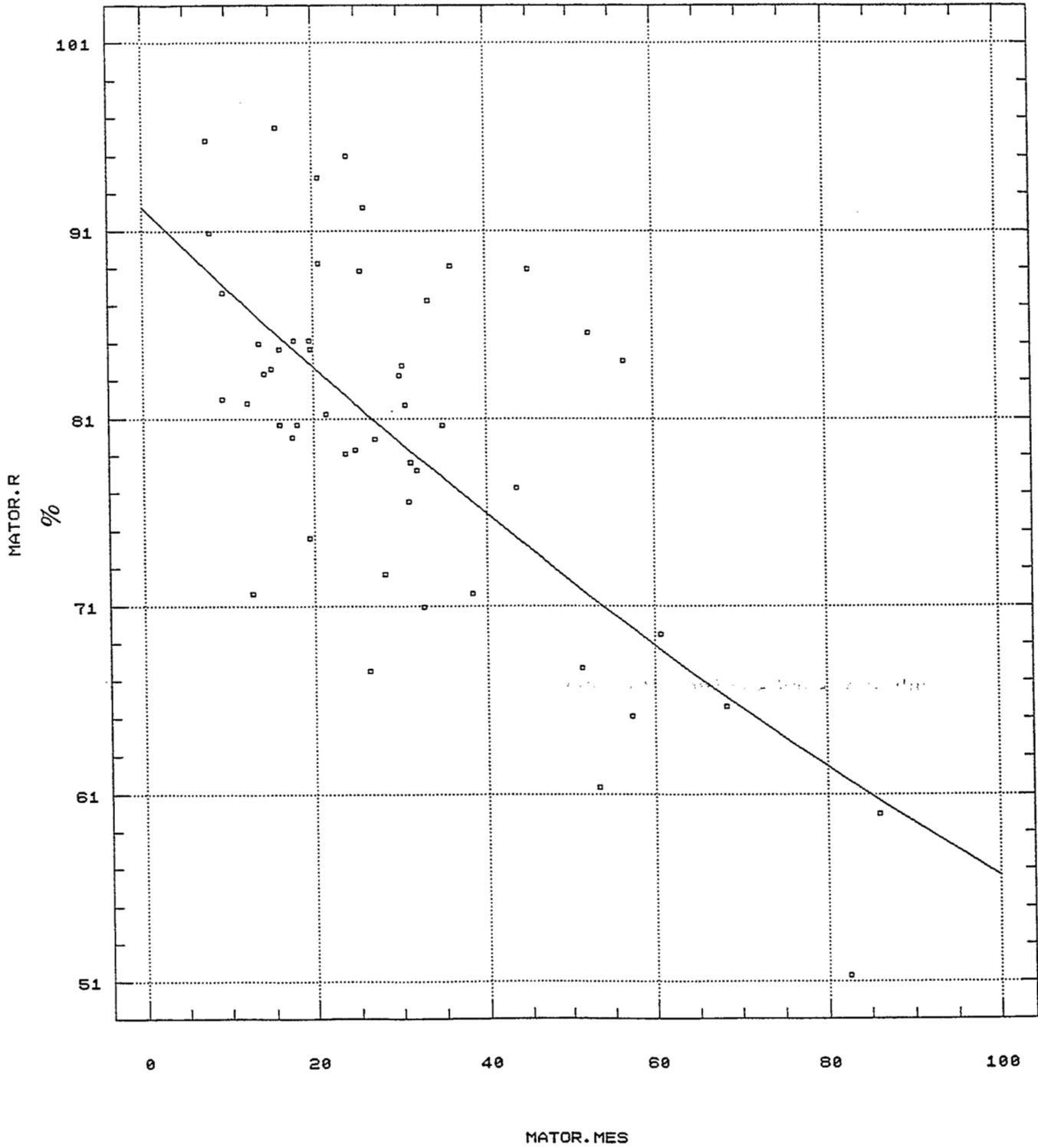


Figure 6-26 : Relation entre le rapport COD/COT en pourcentage et les concentrations de matières en suspension

Tableau 6-28 : Flux et transport spécifique du carbone organique
particulaire, dissous et total en t et en $t.km^{-2}.an^{-1}$

Riv	stat	COP		COD		COT		R
		10^3t	$t/km^2.an$	10^3t	$t/km^2.an$	10^3t	$t/km^2.an$	%
Boumba	Biwa	12,6	1,2	35,3	3,4	47,8	4,6	74
Boumba	Bac	22,6	0,8	101	3,7	123	4,5	82
Dja	Soma	3,4	0,6	28,9	5,3	32,3	5,9	90
Dja	Bi	17,8	0,9	74,1	3,8	91,9	4,7	81
Dja	SOTREF	32,1	0,8	124	3,1	156	3,9	79
Ngoko	Mol	6,5	0,7	224	3,3	270	4	83
Ebé	Zoébé	0,12	0,7	0,35	2,1	0,46	2,8	75
Bidjar	Band	0,05	0,3	0,37	2,3	0,42	2,6	88
Bangué	Bang	2,8	0,8	8,2	2,3	11	3	77
Lokomo	Loko	1,3	0,5	9,6	3,7	10,9	4,2	88
Nyong	Akga	6,2	0,7	54,1	6,5	60,3	7,2	90
Ntem	Ngoa	18	1	90,6	5	109	6	83
Ntem	Nyabe	33,5	1,3	140	5,3	173	6,6	80
Kadey	Batou	7,4	0,8	37,4	4,2	44,8	5	84
Kadey	Pana	17,3	0,9	63,8	3,1	81,2	4	78

Légende :

Soma : Somalomo ; Biwa : Biwala ; Mol. : Moloundou ; Bac: Moloundou-Bac; SOTREF : Moloundou-SOTREF ; Band. : Bandekok ; Bang. : Bangué ; Loko.: Lokomo; Zoébé : Zoébéfam ; Akga : Akonolinga ; Ngoa : Ngoazik ; Nyabe : Nyabessan ; Batou. : Batouri; Riv : Rivière ; R = COD/COT ; CO : Carbone organique (P: particulaire ; D : dissous ; T : total).

En résumé, les résultats de nos observations de carbone organique ont fait ressortir une évolution inversement proportionnelle entre le carbone particulaire en pourcentages et les matières en suspension. Les teneurs en COP sont inférieures aux teneurs en COD. Celles-ci représentent 80 % du carbone organique total. Ce rapport est caractéristique au carbone organique en milieu équatorial. Nos valeurs de transport spécifique de COP, de COD et de COT sont en accord avec celles de NKOUNKOU et PROBST (1986) sur le bassin du Congo.

A la lecture des analyses développées dans ce chapitre, il ressort que la compréhension du fonctionnement hydrochimique du bassin de la Ngoko à Moloundou est liée à celle des entités en amont. Le suivi spatio-temporel des régimes de matières en suspension et en solution de ces entités a montré des variantes qui méritent d'être soulignées.

En effet, l'étude spatiale des matières en suspension indique une augmentation du transport spécifique particulaire de l'amont du Dja (Somalomo) vers l'aval (Moloundou-SOTREF), liée à une érosion mécanique plus intense dans les régions agricoles de Zoétélé, de Sangmélina et de Djoum. Par contre, sur le bassin de la Boumba, le transport spécifique particulaire diminue des régions agricoles en amont de Biwala vers Moloundou-Bac en aval, à cause de la dilution par les eaux de la Bek et de la Lokomo qui drainent des bassins à activités agricoles quasiment nulles. En dépit de cette variabilité spatiale, nos résultats restent dans la gamme de variation des exportations en suspension mesurées par ROCHE (1982) sur les écosystèmes forestiers amazoniens à ECEREX en Guyane avant déforestation (4 à 38 t.km⁻².an⁻¹).

A l'échelle de nos trois années de mesure, nous avons noté une augmentation du transport spécifique, et par conséquent de l'érosion mécanique. Cette augmentation est liée, non seulement aux défrichements et à la création de nouvelles plantations, mais aussi à l'intensification de l'exploitation forestière (le volume d'abattage a augmenté de 30 % entre 1989 et 1992) et à ses corollaires, notamment les trouées d'abattage, la création et la réfection des routes suite à l'acheminement des grumes par route.

En ce qui concerne les matières en solution, nos résultats sur la qualité des eaux pluviales montrent que malgré la variabilité spatiale des espèces chimiques, les apports spécifiques atmosphériques moyennés sur les trois principaux bassins (Dja, Boumba et Ngoko) sont comparables et constants (8 t.km⁻².an⁻¹) pendant nos cycles d'observation. Pour ce qui est des matières dissoutes dans les eaux fluviales, les transports spécifiques augmentent de l'amont vers l'aval des bassins du Dja et de la Boumba, de suite de l'altération. A l'opposé des matières en suspension, les transports spécifiques dissous

sont constants dans le temps traduisant ainsi une stabilité des processus naturels qui les induisent.

En définitive, les moyennes des transports spécifiques particulaires et dissous des bassins de la Boumba à Moloundou-Bac et du Dja à Moloundou-SOTREF sont comparables aux résultats de nos observations sur la Ngoko à Moloundou, confirmant par ailleurs que le fonctionnement hydrochimique de la Ngoko se résume aux comportements de ses deux formateurs. Nous avons représenté dans le tableau 6-29 et sur la figure 6-27 les apports atmosphériques, les transports particulaires et dissous spécifiques de la Ngoko à Moloundou.

Tableau 6-29 : Ngoko à Moloundou (1989-1992) : Apports atmosphériques, transports particulaire et dissous spécifiques en t/km².an

Année	Asp	Tsd	Tsp	Ts	R1	R2
1989/90	7,5	18,7	8	26,7	40	70
1990/91	8,4	16	12,5	28,5	53	56
1991/92	8,8	17,9	13,9	31,8	49	56
Moyenne	8,2	17,5	11,5	29	50	57

Légende :

Asp : Apports atmosphériques spécifiques ; Ts : Transport spécifique total ; Tsd : dissous ; Tsp : particulaire ; R1 = Asp/Tsd en % ; R2 = Tsp/Tsd en %.

Globalement, ces résultats indiquent une prédominance du transport spécifique dissous sur le transport spécifique particulaire. En moyenne, le flux total de matières exportées par la Ngoko à Moloundou s'élève à $1,95 \cdot 10^9$ tonnes, soit un transport spécifique de $29 \text{ t.km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$.

Par ailleurs, ces différents résultats permettent d'apprécier la dynamique des sols sur les versants, par une estimation de l'épaisseur des sols décapés par l'érosion ou formés par l'altération. Cette approche nécessite une bonne connaissance de la densité des matériaux étudiés aussi bien sur les versants que sous et hors de l'eau.

Mais la mesure de la densité du matériau est difficile à réaliser. En effet, elle varie dans l'espace et en fonction de la granulométrie et la consolidation liée au tassement du matériau est mal connue. Pour simplifier, il est généralement admis qu'une tonne de matières particulaires transitant à l'exutoire occupe un mètre cube lors de la sédimentation et que la densité du matériau sec est de 1,6 tandis que celle de la roche en place est de 2,5. Pour le calcul de l'épaisseur des sols décapée sur les versants de la Ngoko, nous utiliserons la valeur 1,3, densité des sols ferrallitiques du Sud-Cameroun mesurée par HUMBEL (1976). Ainsi, la lame moyenne de sol érodée en trois ans est évaluée à $8,8 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$, soit 8,8 mm en 1 000 ans.

Les exportations de carbone organique indiquent une prédominance de la forme dissoute sur la forme particulaire. Le carbone organique dissous représente 80 % de carbone organique total. Nos valeurs de transport spécifiques sur les stations de l'aval des principaux bassins (Boumba, Dja , Ngoko) sont en accord avec celles de NKOUNKOU et PROBST (1986) sur le Congo.

Signalons pour terminer que, pour des raisons de norme, les tonnages annuels précipités ou évacués à l'exutoire des bassins ont été ramenés à l'unité de surface. Nous précisons, compte tenu des différences observées sur les transports particuliers en amont du Dja et de la Boumba ou de fortes vartes valeurs de transports dissous sur la Bidjar et la Lokomo, que cette approche n'a de signification physique que pour les bassins considérés ou analogues. Elle permet néanmoins de faire de comparaison. Toutefois, l'extrapolation des résultats d'un bassin à un autre ne doit se faire que si des mesures spécifiques ont été réalisées au préalable.

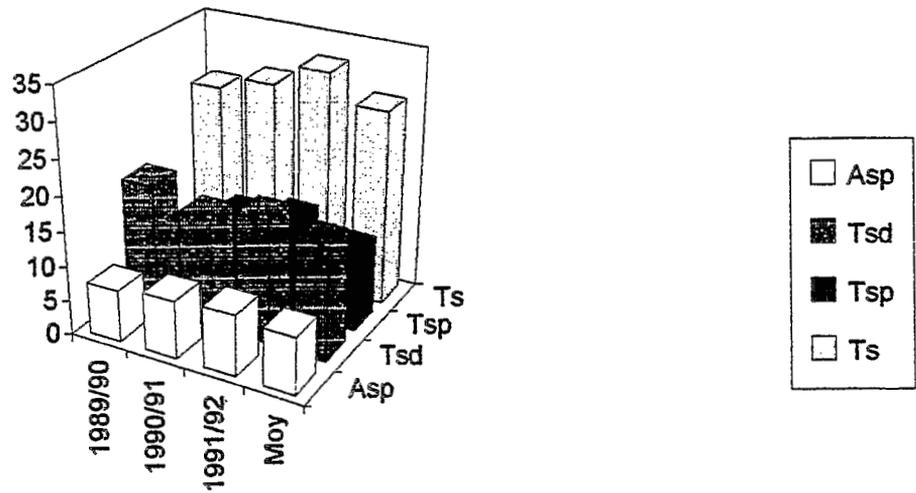


Figure 6-27 : Ngoko à Moloundou : Apports atmosphériques, transport particulaire et dissous et transport de matières totales en $t.km^{-2}.an^{-1}$

Légende : Asp : Apports atmosphériques ; Tsp : Transport particulaire ; Tsd : Transport dissous ; Ts : Transport de matières totales

CHAPITRE 7

OBSERVATIONS ET TRANSFERTS DE MATIERES SUR LES BASSINS VOISINS DE LA NGOKO

L'objectif de ce chapitre est de permettre une reconnaissance et une analyse comparée de l'hydrochimie des autres bassins de la bande méridionale du plateau sud-Camerounais. Il s'agit des bassins du Nyong, du Ntem et de la Kadey.

La discussion des résultats portera essentiellement sur l'évaluation des flux particuliers et dissous ainsi que sur les apports atmosphériques.

7.1. LES MATIERES EN SUSPENSION

7.1.1. ANALYSE DESCRIPTIVE DES RESULTATS

L'analyse des transports de matières particulaires sur les bassins voisins de la Ngoko porte sur 17 observations à Akonolinga et 11 à Mbalmayo pour le bassin du Nyong, sept (7) à Ngoazik et huit (8) à Nyabessan pour le bassin du Ntem, quatre (4) à Batouri et six (6) à Pana pour le bassin de la Kadey. Les prélèvements ont sur les bassins du Nyong et du Ntem ont été effectués en 1990/91, et sur celui de la Kadey en 1991/92.

Sur le Nyong, les concentrations des substances particulaires mesurées sont comprises entre 5,7 et 24,2 mg.l⁻¹ à Akonolinga et entre 12,7 et 61,6 mg.l⁻¹ à Mbalmayo. Les concentrations moyennes respectives pondérées par les débits sont de 14,6 (CV = 27 %) et 21,1 mg.l⁻¹ (CV = 63 %).

Pour ce qui est de la charge solide du bassin du Ntem, elle varie entre 11,4 et 24,7 mg.l⁻¹ à Ngoazik et entre 7,4 et 26 mg.l⁻¹ à Nyabessan, les moyennes respectives étant de 18 (CV = 24 %) et 18,2 mg.l⁻¹ (CV = 30 %).

Sur le bassin de la Kadey, la charge en suspension est comprise entre 8,8 et 33 mg.l⁻¹ à Batouri et entre 8 et 49,3 mg.l⁻¹ à Pana. Les moyennes respectives sont calculées à 18,4 (CV = 49 %) et 25,6 mg.l⁻¹ (CV = 57 %).

Dans l'ensemble, à l'exception d'une valeur de $61,6 \text{ mg.l}^{-1}$ observée le 26/05/90 à Mbalmayo, les concentrations des matières en suspension sont relativement faibles, sans doute parce que les échantillons de la montée des eaux n'ont pas été prélevés.

7.1.2. EXPORTATIONS DES MATIERES

La difficulté d'évaluer les quantités de matières exportées en suspension à partir d'un petit nombre d'observations nous amène à signaler à l'avance que les flux établis sur les bassins voisins de la Ngoko ne sont que des ordres de grandeur. La qualité de nos résultats extrapolés à l'échelle d'un cycle hydrologique est affectée par l'irrégularité de l'échantillonnage.

Ainsi, nous avons estimé les matières exportées en suspension en 1990/91 par le Nyong à Akonolinga à $59,2 \cdot 10^3 \text{ t}$, soit un transport spécifique de $7,1 \text{ t.km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$; la même année à Mbalmayo, les exportations de matières sont chiffrées à $133 \cdot 10^3 \text{ t}$, ce qui correspond à un transport spécifique de $9,8 \text{ t.km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$.

Sur le bassin du Ntem, en 1990/91, le flux particulaire a été calculé $153 \cdot 10^3 \text{ t}$, soit un transport spécifique de $8,5 \text{ t.km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ à Ngoazik, et à $240 \cdot 10^3 \text{ t}$, soit un transport spécifique de $9,2 \text{ t.km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ à Nyabessan. Nos valeurs sont inférieures à celles calculées pour les cycles 1981/82 et 1982/83 au chapitre 4. Par rapport aux transports spécifiques moyens desdits cycles ($10,6$ et $13,2 \text{ t.km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ respectivement à Ngoazik et à Nyabessan), les différences sont de 20 % à Ngoazik et de 30 % à Nyabessan. Nous pensons que ces différences sont liées aux lacunes d'observations des mois pendant lesquels les charges en suspension du Ntem sont élevées (chapitre 4), ces lacunes ayant entraîné une sous-estimation des quantités de matières évacuées.

Pour ce qui est des flux particuliers sur la Kadey, ils ont été estimés pour le cycle 1991/92 à $69,1 \cdot 10^3 \text{ t}$, soit un transport spécifique de $7,7 \text{ t.km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ à Batouri et à $186 \cdot 10^3 \text{ t}$, soit un transport spécifique de $9,1 \text{ t.km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ à Pana.

Globalement, les valeurs des transports spécifiques en 1990/91 sur les bassins du Nyong et du Ntem et en 1991/92 sur le bassin de la Kadey sont inférieures à celles que nous avons calculées sur le Ntem en 1981/82 et en 1982/83. D'autre part, elles sont du même ordre de grandeur ($7,7$ à $9,2 \text{ t.km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$). Ces remarques permettent de confirmer que l'irrégularité et l'absence de mesures pendant les mois de la montée des eaux, période d'enregistrement des maximas de concentrations de substances particulières en milieu tropical, sont à l'origine de nos faibles valeurs. D'autre part, ces résultats sont

comparables à ceux calculés en 1989/90 à partir des mesures similaires sur les principaux bassins de la Ngoko. En dépit de la sous-estimation des quantités de matières exportées, on note une augmentation des transports spécifiques de la zone de production des matériaux en amont vers l'aval des trois bassins comme sur le Dja.

7.2. LES MATIERES EN SOLUTION

L'étude des matières en solution portera dans un premier temps sur les éléments des eaux de pluie, et dans un second temps sur les substances chimiques des écoulements fluviaux. Les deux volets seront abordés essentiellement sur les plans qualitatif et quantitatif.

7.2.1. LES APPORTS ATMOSPHERIQUES

La composition chimique des eaux pluviales sur les bassins voisins a été partiellement discutée au chapitre précédent dans l'analyse de la variabilité spatiale des apports atmosphériques sur notre zone d'intérêt. Dans ce qui suit, nous parlerons des quantités moyennes apportées par espèces chimiques pour chacun des postes pluviométriques et par bassin versant.

A l'échelle des bassins versants, les concentrations moyennes et extrêmes des éléments des précipitations sont reportés dans le tableau 7-1. Il se dégage de ce tableau que les charges totales sont plus élevées sur le bassin de la Kadey à Batouri que sur ceux du Nyong et du Ntem dont les teneurs en éléments sont proches. D'une façon générale, la charge totale des éléments varie entre 3,2 et 13,9 mg.l⁻¹ sur la Kadey à Batouri, la moyenne étant 8,6 mg.l⁻¹ (CV = 39 %). Sur les bassins du Nyong à Akonolinga et du Ntem à Nyabessan, elle est comprise entre 2,2 et 8,6 mg.l⁻¹, les moyennes respectives étant calculées à 5,5 mg.l⁻¹ (CV = 38 %) et 5,8 mg.l⁻¹ (CV = 41 %). Les fortes teneurs mesurées sur le bassin de la Kadey peuvent être expliquées par le fait que, étant plus proche de la zone sahélo-soudanienne, il reçoit d'importantes quantités de poussières sahariennes. Cette idée est appuyée par les valeurs comparables entre les charges moyennes de la Kadey et celles trouvées par ORANGE (1990) sur le Sénégal à Bakel (15 mg.l⁻¹) et à Kédougou (13,5 mg.l⁻¹).

Les flux atmosphériques spécifiques par poste pluviométrique sont donnés dans le tableau 7-2 et représentés sur la figure 7-1. Ces évaluations permettent de dégager que les apports atmosphériques spécifiques à Kribi, à Nyabessan (faibles teneurs en éléments) et à Batouri (fortes teneurs en éléments) sont élevés et de même ordre de

Tableau 7-1 : Teneurs moyennes et extrêmes en éléments dissous des précipitations sur les bassins du Nyong, du Ntem et de la Kadey en mg.l⁻¹

	pH	COND	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	SiO2	Md
		μS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
NTEM												
MOY	6,3	17,0	0,5	0,2	0,8	0,5	1,3	1,0	0,6	0,6	0,3	5,8
STD	0,3	7,5	0,3	0,1	0,6	0,4	0,6	1,0	0,4	0,6	0,2	2,4
CV	4,2	44,0	71,8	58,9	72,8	82,9	44,4	96,5	73,5	85,5	57,3	41,3
MAX	6,8	30,0	1,0	0,4	1,4	1,3	3,1	2,9	1,4	1,7	0,6	8,1
MIN	6,1	10,0	0,1	0,0	0,0	0,0	1,0	0,4	0,1	0,0	0,0	2,2
N	4	5	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
KRIBI												
MOY	6,8	0,0	0,1	0,1	1,6	0,1	1,0	2,8	0,5	0,1	0,4	6,8
KADEY												
MOY	6,7	24,9	1,6	0,2	1,8	0,9	1,6	0,7	0,6	0,4	0,4	8,6
STD	0,4	8,8	0,9	0,3	1,7	0,9	1,0	0,5	0,4	0,2	0,3	3,4
CV	6,1	35,2	53,0	117,6	94,9	100,6	60,0	68,2	77,4	55,8	60,8	39,3
MAX	7,2	40,0	3,4	1,3	8,0	3,9	3,7	1,8	1,7	0,6	0,7	13,9
MIN	5,8	10,0	0,4	0,0	0,1	0,0	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	3,2
N	8	7	17	17	17	17	12	12	12	12	17	12
NYONG												
MOY	6,2	5,0	0,7	0,2	1,0	0,5	1,4	0,5	0,8	0,3	0,2	5,5
STD	0,2	5,0	0,5	0,1	1,0	0,5	0,7	0,3	0,4	0,3	0,2	2,1
CV	3,5	100,0	69,6	60,9	94,1	100,3	53,7	53,7	52,0	76,1	96,3	37,5
MAX	6,4	10,0	1,8	0,5	3,0	2,0	3,1	1,1	1,4	0,6	0,5	8,6
MIN	5,8	0,0	0,2	0,1	0,1	0,0	1,0	0,1	0,1	0,1	0,0	2,3
N	6	3	14	14	14	14	12	12	12	11	14	12

Tableau 7-2 : Apports atmosphériques spécifiques par poste pluviométriques en t.km⁻².an⁻¹

	Vp	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	SiO2	Md
ABONG MBANG	9,3	1,2	0,5	1,7	0,8	2,9	0,7	1,1	0,7	0,3	10,0
AKONOLINGA	4,5	1,2	0,2	0,6	0,7	1,7	1,0	1,5	0,1	0,2	7,2
NYABESSAN	27,1	0,4	0,2	1,0	0,4	1,9	0,6	0,7	0,7	0,3	6,1
NGOAZIK	8,3	1,4	0,5	1,5	1,7	2,2	3,9	1,4	1,6	0,6	14,6
KRIBI	6,0	0,3	0,3	4,2	0,3	2,7	7,4	1,3	0,3	1,1	17,7
BATOURI	13,5	2,6	0,4	2,9	1,3	3,1	1,3	1,0	0,7	0,6	15,0

Vp : Volume d'eau précipité en km³

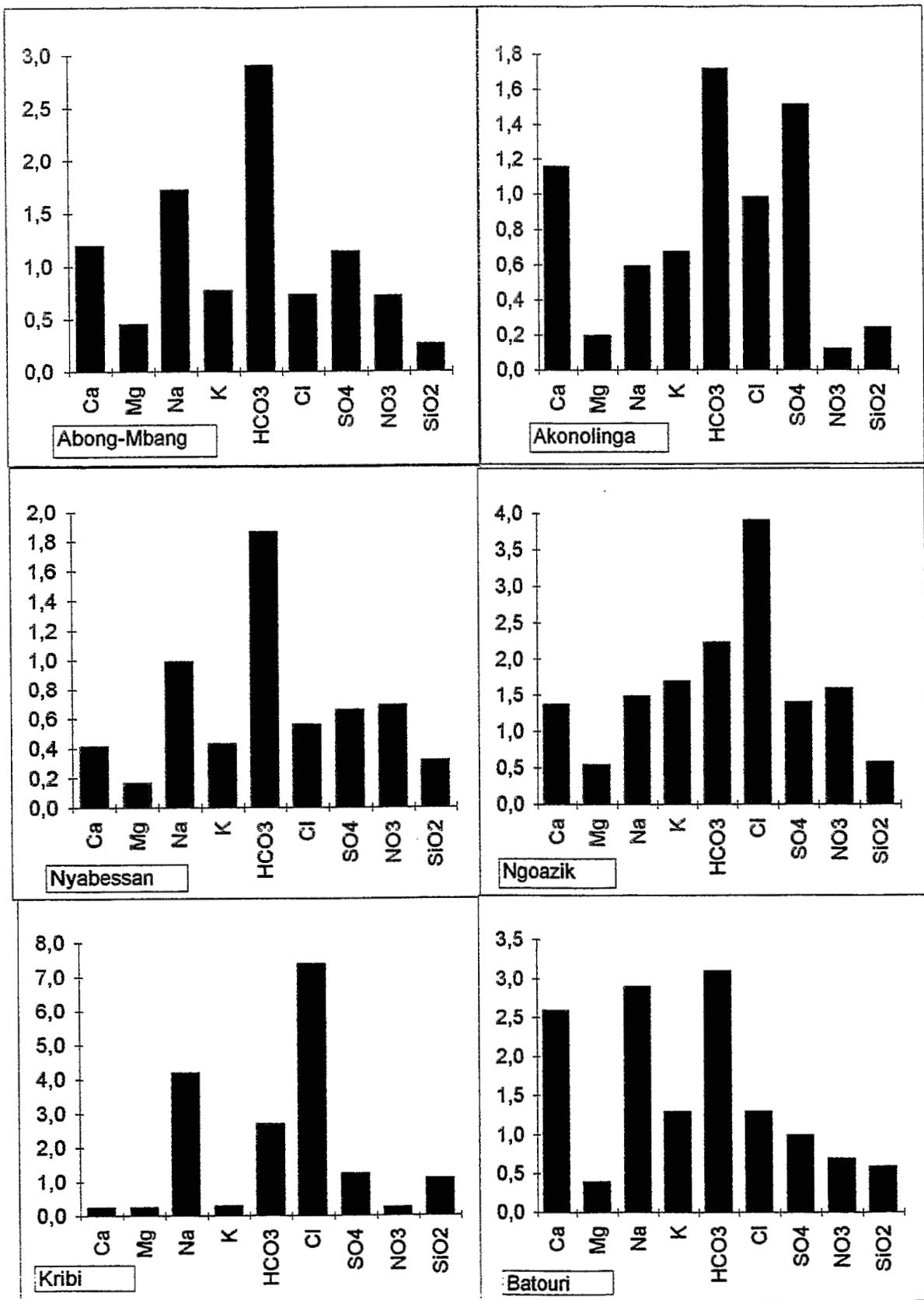


Figure 7-1 : Apports atmosphériques spécifiques par poste pluviométriques en $t.km^{-2}.an^{-1}$

grandeur. Ceux d'Akonolinga, d'Abong-Mbang et de Ngoazik sont faibles et aussi de même ordre de grandeur. Ils sont comparables aux apports atmosphériques évalués aux postes pluviométriques du bassin de la Ngoko.

Dans le groupe des postes aux apports atmosphériques élevés, les faibles teneurs en éléments enregistrées au bord de l'Atlantique sont compensées par d'importants volumes d'eau précipités. On en déduit que les quantités d'éléments atmosphériques dépendent non seulement des concentrations, mais aussi des précipitations qui les apportent.

En définitive, d'après ces résultats, les apports atmosphériques spécifiques sont élevés au voisinage de l'Atlantique et de la zone soudano-sahélienne et faibles au centre de notre zone d'intérêt. Les apports spécifiques atmosphériques par bassin versant seront discutés en même temps que les transports dissous des cours d'eau.

7.2.2. LES ELEMENTS DISSOUS DES FLEUVES

7.2.2.1. Analyse descriptive

La composition chimique des eaux a été déterminée : sur le Nyong, à partir de 9 échantillons d'eau (6 à Akonolinga et 3 à Mbalmayo) ; sur le Ntem, à partir de 7 observations (4 à Ngoazik et 3 à Nyabessan ; sur la Kadey, à partir de 7 échantillons (3 à Batouri et 4 à Pana). Le tableau 7-3 regroupe les concentrations moyennes et extrêmes des espèces chimiques des 3 cours d'eau.

Dans l'ensemble, les teneurs moyennes en éléments sont plus fortes sur la Kadey que sur le Nyong et le Ntem. Elles sont du même ordre de grandeur sur ces derniers bassins. En effet, la charge soluble du Nyong varie entre 9,8 et 39 mg.l⁻¹, la moyenne étant 19,4 mg.l⁻¹ (CV = 47 %) alors que sur le Ntem, elle est comprise entre 16,7 et 24,3 mg.l⁻¹, avec une moyenne identique à celle du Nyong (19,6 mg.l⁻¹ et CV = 14 %). Ces valeurs sont comparables à celles mesurées sur le Dja Supérieur. La valeur moyenne du pH est 5,8. Elle confirme le caractère acide des eaux du Nyong déjà souligné par OLIVRY et NAAH (1978). Sur la Kadey, la charge soluble varie entre 29,3 et 68,3 mg.l⁻¹, la moyenne étant 41,3 mg.l⁻¹ (CV = 39 %).

D'une façon générale, on peut retenir que les teneurs en éléments dissous du Nyong et du Ntem, et dans une moindre mesure de la Kadey sont inférieures à celles mesurées sur la Ngoko à Moloundou.

Tableau 7-3 : Teneurs moyennes et extrêmes en éléments dissous du Nyong, du Ntem et de la Kadey en mg.l⁻¹

Tableau 7- : Concentrations moyennes et extremes du Nyong, du Ntem et de la Kadey												
	pH	CND	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	SiO2	Md
		μS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Nyong (N=9)												
MOY	5,8	17,8	1,2	0,6	0,8	0,7	7,4	1,3	0,4	0,8	7,2	19,4
STD	0,7	6,0	0,3	0,3	0,9	0,8	4,3	0,8	0,2	0,8	6,0	9,0
CV	12,3	33,9	24,2	45,6	114,1	119,5	58,0	59,3	44,5	99,3	84,0	46,5
Min	4,9	11,9	0,7	0,4	0,0	0,0	1,8	0,7	0,0	0,1	3,1	9,7
Max	7,1	29,1	1,6	1,3	2,5	2,0	15,9	3,2	0,7	2,5	23,8	38,9
Ntem (N=7)												
MOY	6,7	13,9	0,9	0,4	1,0	0,8	5,9	0,8	0,8	0,1	8,9	19,6
STD	0,5	3,7	0,1	0,1	0,4	0,5	2,1	0,2	0,5	0,2	0,7	2,7
CV	7,9	26,8	15,7	19,0	42,2	59,8	36,1	26,9	65,8	138,1	7,9	13,9
Min	5,9	10,0	0,8	0,4	0,0	0,0	3,1	0,4	0,5	0,1	8,1	16,7
Max	7,3	20,0	1,2	0,6	1,4	1,2	9,2	1,1	1,9	0,6	10,0	24,3
Kadey (N=7)												
MOY	7,0	25,4	1,9	0,6	1,6	1,8	12,0	1,4	0,5	0,7	20,8	41,3
STD	0,4	1,8	0,7	0,1	0,6	0,3	2,2	0,6	0,1	0,5	12,2	16,1
CV	5,4	7,1	37,8	16,1	40,6	14,2	18,5	43,0	26,1	65,9	58,9	39,1
Min	6,6	21,8	1,2	0,4	0,8	1,4	9,2	0,6	0,2	0,0	10,4	29,3
Max	7,5	28,2	3,1	0,8	2,4	2,2	15,3	2,3	0,6	1,7	40,2	67,3
Légende :												
N = Nombre d'échantillons												

7.2.2.2. Typologie des eaux

La représentation des résultats de nos échantillons sur le Nyong et de ceux obtenus par OLIVRY et NAAH (1978) sur le diagramme de PIPER montre les eaux du Nyong sont bicarbonatées calco-magnésiennes (figures 7-2 a et b). Les eaux du Ntem (figure 7-3 a) et les eaux de la Kadey (figure 7-3 b) présentent un faciès bicarbonaté mixte. Les teneurs relativement élevées en sodium et en potassium seraient liées à la nature granitique des roches drainées par ces cours d'eau.

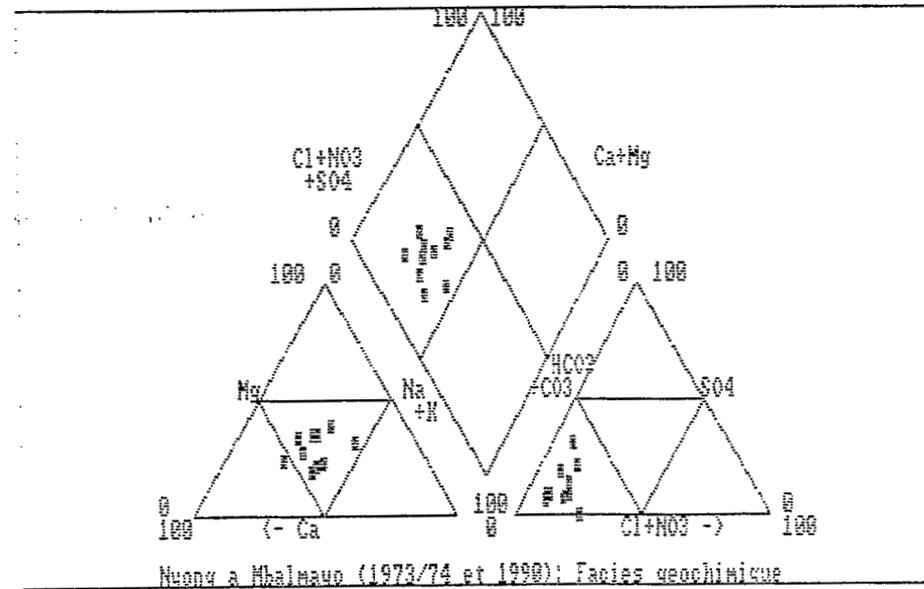
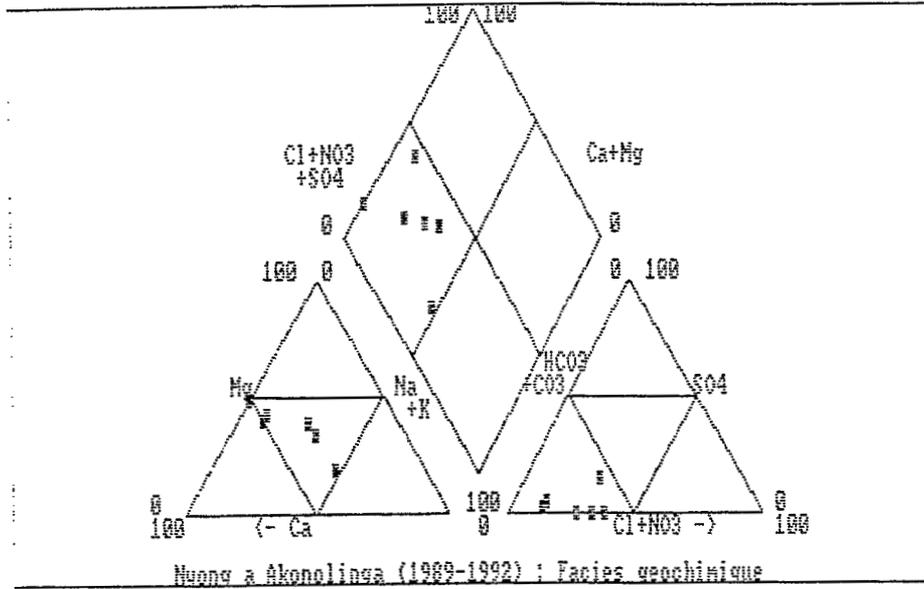
7.2.2.3. Exportations des matières dissoutes

Les tonnages annuels des espèces chimiques des précipitations et des écoulements ont été calculés pour les bassins du Nyong à Akonolinga, du Ntem à Ngoazik et à Nyabessan ainsi que de la Kadey à Batouri. Les résultats, exprimés sous forme d'apports atmosphériques et de transports dissous spécifiques sont rassemblés dans le tableau 7-4 et représentés sur la figure 7-4.

Dans l'ensemble, les transports spécifiques du Nyong et du Ntem sont faibles et du même ordre de grandeur ($9 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$). Cette valeur est comparable à celle que nous avons calculée sur le bassin amont du Dja, et supérieure à celle trouvée par OLIVRY et NAAH (1978) sur le Nyong à Mbalmayo ($6,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$). La faible valeur proposée par ces auteurs peut être liée au fait que certains ions, notamment les nitrates, n'avaient pas été dosés. Les transports spécifiques de la Kadey à Batouri et à Pana sont plus élevés et du même ordre de grandeur ($15 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$). Ils sont comparables à ceux mesurés sur la Ngoko à Moloundou.

Les apports atmosphériques spécifiques à l'échelle des bassins versants sont comparables aux transports dissous spécifiques des bassins considérés. Par ailleurs, à l'exception de la Kadey à Batouri, ces apports atmosphériques sont du même ordre de grandeur que ceux observés sur les principaux bassins de la Ngoko. Ces constatations renvoient à l'analyse que nous avons faite sur les bassins de la Ngoko, à savoir qu'une partie des anions, éléments d'origine externe au bassin, et la quasi-totalité des cations apportés par les précipitations sont absorbés par la végétation et/ou stockés sur les versants. De ce point de vue, le calcul de l'altération chimique se limite aux cations et à la silice observés à l'exutoire du bassin, du fait de leur origine lithologique.

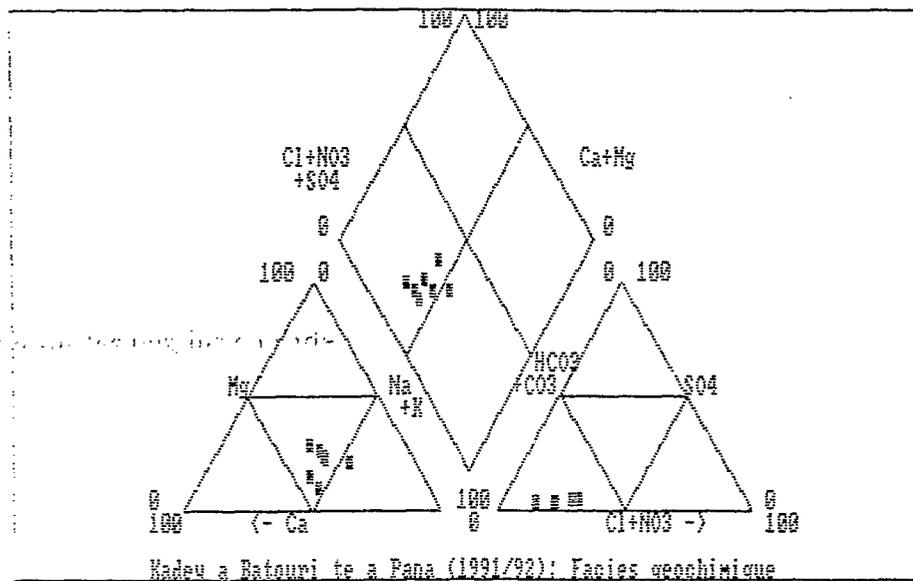
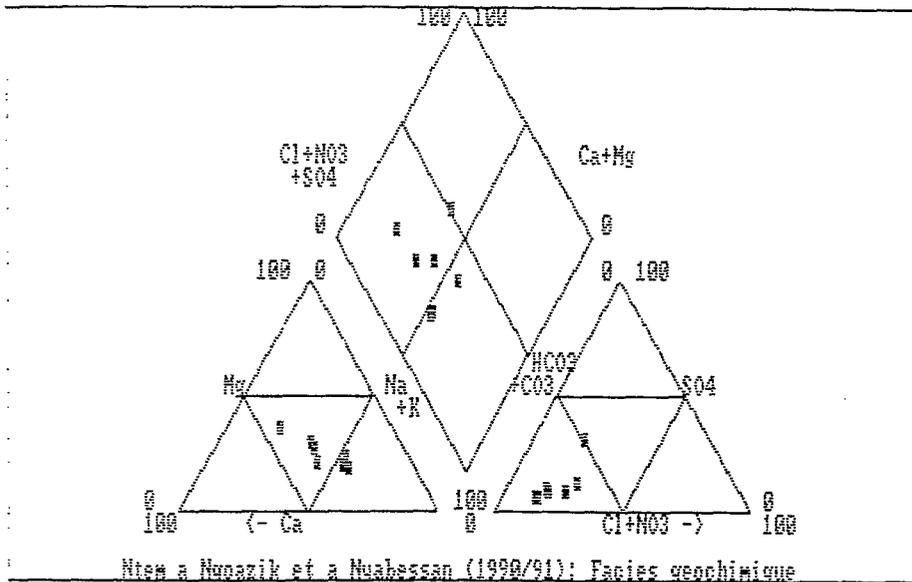
a) Nyong à Akonolinga



b) Nyong à Mbalmayo

Figure 7-2 : Faciès géochimique

a) Ntem à Ngoazik et à Nyabessan



b) Kadeu à Batouri et à Pana

Figure 7-3 : Faciès géochimique

Tableau 7-4 : Apports atmosphériques et transports dissous spécifiques des bassins du Nyong, du Ntem et de la Kadéy en t.km⁻².an⁻¹

DATE	V	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	SiO2	Md	
NYONG MBALMAYO												
1990/91	6,3	0,7	0,4	0,3	0,9	3,5	0,5	0,2	0,0	2,9	9,4	
NYONG AKONOLINGA												
Moy/2an: Asp	13,9	1,5	0,4	1,7	0,4	2,9	0,7	1,1	0,5	0,2	9,4	
Tsd	3,4	0,5	0,3	0,2	0,3	3,2	0,4	0,1	0,6	3,4	8,7	
NTEM NGOAZIK												
1990/91 Asp	33,1	0,6	0,3	1,5	0,7	2,8	0,9	1,0	1,0	0,5	9,3	
Tsd	8,5	0,4	0,2	0,6	0,4	3,0	0,3	0,5	0,0	4,0	9,4	
NTEM NYABESSAN												
1991/92 Asp	45,8	0,7	0,3	1,4	0,8	2,5	1,4	1,0	1,1	0,5	9,5	
Tsd	13,2	0,5	0,2	0,5	0,5	2,4	0,4	0,3	0,0	4,4	9,2	
KADEI BATOURI												
1991/92 Asp	13,5	2,6	0,4	2,9	1,3	3,1	1,3	1,0	0,7	0,6	15,0	
Tsd	3,8	0,7	0,2	0,5	0,7	5,0	0,4	0,2	0,3	7,7	15,9	
KADEI PANA												
1991/92	7,3	0,7	0,2	0,5	0,6	4,4	0,6	0,2	0,2	7,1	14,6	

Légende :

Asp : Apports spécifiques atmosphériques

Tsp : Transports spécifiques dissous

V : Volume d'eau précipité ou écoulé en km³

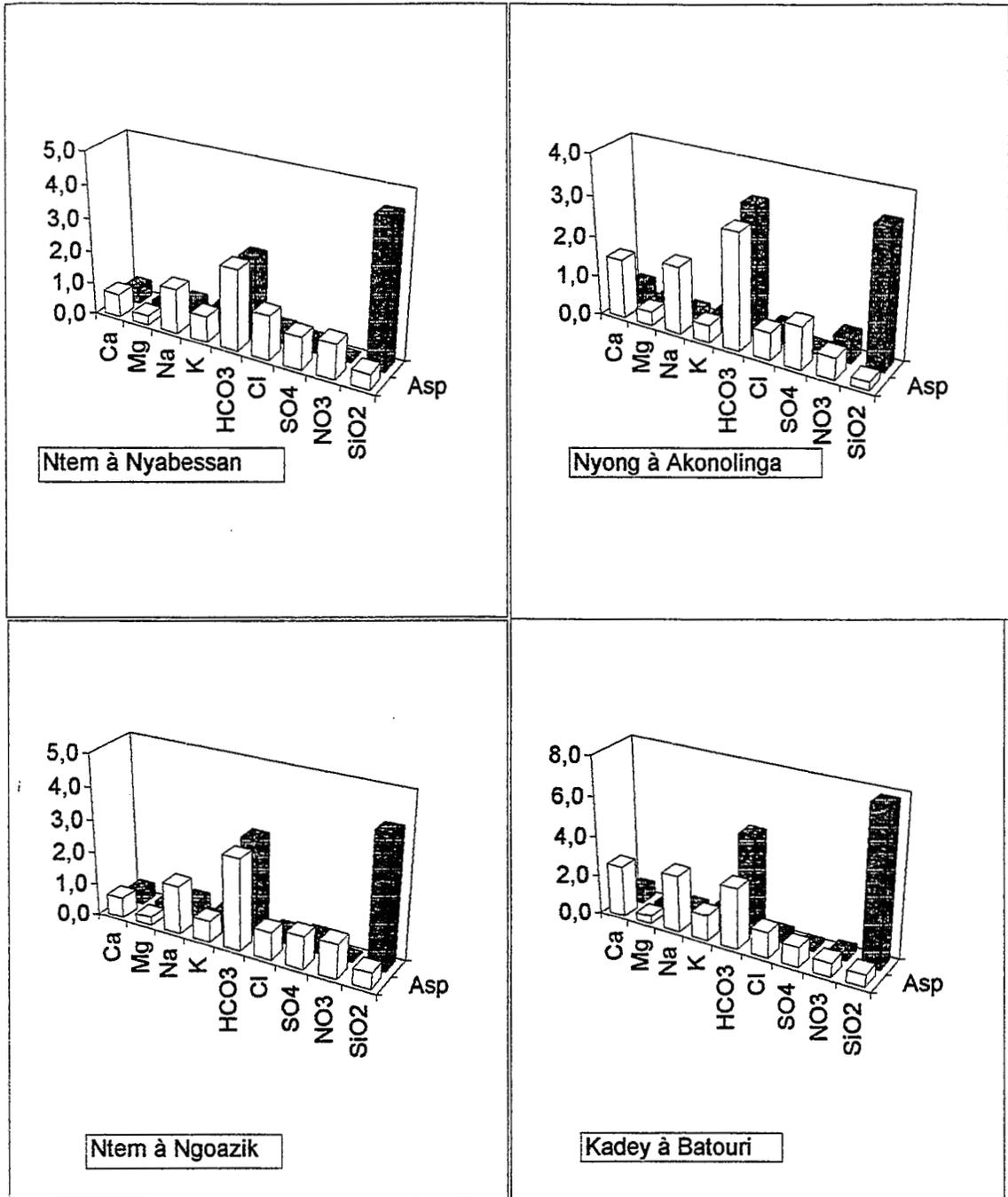


Figure 7-4 : Apports atmosphériques et transports dissous spécifiques des bassins du Nyong, du Ntem et de la Kadey $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$

Légende : Asp : Apports atmosphériques ; Tsd : Transport dissous

Ainsi, l'érosion chimique est évaluée sur le Nyong à $4,7 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (Akonolinga) et à $5,2 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (Mbalmayo) ; sur le Ntem à $5,7 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (Ngoazik) et $6,7 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (Nyabessan) ; sur la Kadey à $9,8 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (Batouri) et à $9,1 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (Pana). Les valeurs de l'érosion chimique du Nyong et du Ntem sont inférieures à celles de la Ngoko et que celles de la Kadey leur sont comparables.

D'après nos résultats, l'analyse hydrochimique des bassins fluviaux voisins de la Ngoko indiquent des transports spécifiques particulières inférieurs de 20 à 30 % à celles mesurées sur la Ngoko. Mais nous pensons que ces valeurs ont été sous-estimées sur le Nyong et le Ntem à cause des lacunes d'observations en hautes eaux. Elles devraient être proches sinon supérieures à celles trouvées par BOUM et al (1983) sur le Ntem.

Pour ce qui est des éléments contenus dans les eaux pluviales, nous avons mesuré des apports atmosphériques comparables à ceux de la Ngoko, sauf sur la Kadey où ils sont plus élevés, en raison des quantités importantes des poussières Sahariennes.

En ce qui concerne la composition chimique des écoulements, la représentation des ions dans le diagramme de PIPER a permis de dégager que les eaux du Nyong sont bicarbonatées calco-magnésiennes comme celles de la Ngoko. Les eaux du Ntem et de la Kadey bicarbonatés mixtes. L'érosion chimique du Nyong et du Ntem est inférieure à celle de la Kadey, laquelle est similaire à l'altération mesurée sur la Ngoko.

CHAPITRE 8

OBSERVATIONS DES ISOTOPES STABLES DE L'EAU ET FONCTIONNEMENT HYDROCLIMATIQUE

Les isotopes stables (^{18}O et ^2H) existent en faibles teneurs dans les eaux naturelles et peuvent être utilisés comme traceurs naturels en hydrologie. Ces teneurs dépendent des processus (évaporation, échange avec l'atmosphère) susceptibles de modifier la composition isotopique de l'eau au cours de son cycle hydrologique.

Parmi les nombreux travaux réalisés sur la composition isotopique des eaux (FONTES et al, 1970 ; FONTES, 1976 ; FONTES et OLIVRY, 1976 ; ROCHE, 1973 ; DEVER, 1978 ; IAEA, 1981 ; MICHELOT, 1988 ; NJITCHOUA, 1991 ; MCKENNA et al, 1992 ; RAMESH et SARIN, 1992), très peu ont porté sur le milieu forestier équatorial humide de l'Afrique Centrale. Compte tenu de la complexité hydrologique de notre zone d'étude, il nous a paru intéressant d'intégrer dans ce travail le volet isotopique pour la compréhension du fonctionnement hydro-climatique. On pense, malgré le fait que les isotopes n'aient pas été observés de façon systématique durant les trois cycles étudiés, qu'ils peuvent donner des indications sur l'origine des précipitations et sur leur comportement dans le réseau depuis l'amont jusqu' à l'exutoire des bassins.

8.1. LES RESULTATS

Sur les 37 résultats disponibles, six (6) dont quatre (4) à Moloundou et un à Somalomo et à Sangmélima donnent la composition isotopique des précipitations (tableau 8-1) et trente-un (31) celle des écoulements fluviaux. Parmi ces derniers, les stations de Moloundou sur la Boumba au Bac, le Dja à la SOTREF et la Ngoko au Centre-ville en comptent 5 chacune. Pour le reste, huit (8) portent sur les stations du Dja amont, quatre (4) sur celles de la haute Boumba , trois sur le Nyong et un sur la Kadey. La composition isotopique des eaux fluviales est donnée dans le tableau 8-2. La figure 8-1 représente la distribution des teneurs en oxygène-18

Tableau 8-1 : Composition isotopique des eaux de pluie (‰)

Poste	Date	P(mm)	^{18}O	^2H
Moloundou	29/8/91	30	-4,18	-24,1
	8/10/91	11,4	-3,13	-12,6
	6/11/91	43,1	2,36	29,8
	11/11/91	15,2	-3,79	-13,1
Sangmélina	5/11/90	29	-3,24	-9,2
Somalomo	3/11/90	9,4	-1,18	-5,7

En ce qui concerne les isotopes lourds des précipitations, les teneurs moyennes respectives de ^{18}O et de ^2H sont de $-2,19\text{‰}$ et de $-5,82\text{‰}$. Les teneurs minimales de ^{18}O ($-4,18\text{‰}$) et de ^2H (-24‰) ont été observées le 28/08/91 à Moloundou. Les teneurs maximales, à savoir $2,36\text{‰}$ pour ^{18}O et $29,8\text{‰}$ pour ^2H ont été mesurées le 06/11/91 à la même station. Ces valeurs exceptionnellement fortes ont été confirmés par un deuxième dosage.

Du point de vue des écoulements fluviaux, les teneurs moyennes respectives de ^{18}O et ^2H pondérées par les débits sont de $-2,07\text{‰}$ et de -12‰ . La plus faible teneur en ^{18}O ($-2,6\text{‰}$) a été mesurée le 03/11/90 sur le Dja à Somalomo et la plus forte ($-2,21\text{‰}$) le 01/02/91 sur la Boumba à Moloundou-Bac. Quant au Deutérium, sa teneur minimale ($-18,6\text{‰}$) a été observée le 27/08/91 sur la Ngoko à Moloundou et le 28/08/91 sur le Dja à Moloundou-SOTREF (elle est corrélée à celle de la pluie du même jour) et sa plus forte teneur ($-6,2\text{‰}$) le 17/11/91 sur la Boumba à Biwala.

Tableau 8-2 : Teneurs en isotopes stables des eaux fluviales en ‰

STATIONS	Date	Alt. m	Débit m ³ /s	Cond. uS/cm	18-O (‰ vs. SMOW)	2-H
NGOKO	31/1/91	354	388	46,3	-2,34	-9,1
(Station de Moloundou)	19/7/91		556	52,8	-3,44	-8,3
"	27/8/91		913	33,1	-3,26	-18,6
"	5/10/91		1240	35,5	-2,36	-11,0
"	7/11/91		1310	36,6	-2,75	-11,8
DJA	1/2/91	360	247	36,6	-2,30	-9,1
(Station de Moloundou-Sotref)	20/7/91		361	32,7	-2,59	-8,3
"	28/8/91		553	25,5	-2,57	-18,6
"	8/10/91		828	27,4	-3,15	-11,0
"	8/11/91		843	23,8	-2,45	-11,8
(Station de Somalomo)	3/11/90	617	172	10,0	-3,60	-10,7
"	3/11/91		132	13,2	-3,51	-11,7
(Station de Bi)	6/11/90	533	801	10,0	-2,96	-13,6
Boumba à Moloundou	1/2/91	359	145	70,7	-2,21	-7,0
(Bac)	20/7/91		225	58,0	-2,63	-6,8
"	29/8/91		362	43,3	-3,61	-15,1
"	8/10/91		538	40,6	-2,87	-9,5
"	8/11/91		523	43,8	-2,09	-10,9
(Station de Biwala)	17/11/91	500	230	29,1	-2,50	-6,1
Bangué à Bangué	5/11/91		65,5	46,6	-2,46	-9,4
Lokomo à Lokomo	5/11/91		52,2	76,0	-2,26	-6,7
Bidjar à Babdékok	5/11/91		24,5	105,0	-2,93	-10,5
Lobo à Assok	4/11/90		32,8	10,0	-3,51	-13,9
Lobo à Kombé	9/11/90		9,6	20,0	-3,14	-13,7
Afamba à Sangmélima	9/11/90	713	2,5	20,0	-2,89	-12,9
Ebé à Zoébéfam	6/11/90	534	2,2	10,0	-2,93	-13,5
Kon à Mintom	7/11/90	535	0,6	10,0	-2,79	-13,0
Kadeï à Batouri	4/11/91	558	343	23,1	-2,96	-18,1
Nyong à Akonolinga	2/11/90	644	181	20,0	-3,31	-13,7
"	3/11/91		215	18,1	-3,24	-14,6
Nyong à Mbalmayo	9/11/90	634	385	20,0	-3,35	-13,1

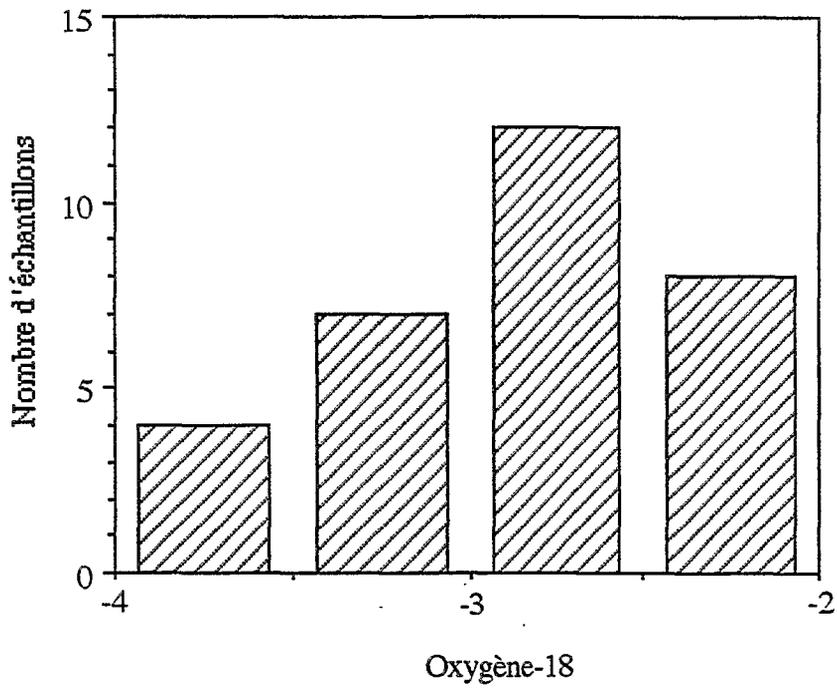


Figure 8-1 : Distribution des teneurs en oxygène-18

8.2. DISCUSSIONS

Nous avons représenté sur la figure 8-2 la relation entre le Deutérium et l'Oxygène-18 des eaux pluviales et des écoulements, en regard de la droite des eaux météoriques mondiales définie par CRAIG (1961) dont l'équation est donnée ci-dessous :

$$\delta \text{ } ^2\text{H} = 8,8 \text{ } ^{18}\text{O} + 10 \quad (8-1)$$

Cette figure montre que nos résultats se positionnent autour de la droite de CRAIG. Les eaux écoulées proviennent bien des précipitations par infiltration et/ou par ruissellement sans modification de la composition isotopique, donc sans évaporation, ce qui caractérise une saturation en humidité dans la région. Elle permet également de confirmer qu'il y a bonne homogénéisation des eaux. L'absence de pollution dans les eaux pluviales et fluviales (chapitre 6) permet d'admettre, à l'instar de JOSEPH et ARANYOSSY (1989), que le faciès isotopique des écoulements est représentatif des précipitations.

Les teneurs moyennes de l'oxygène-18 des écoulements fluviaux sont représentées sur la figure 8-3. Cette figure montre de faibles teneurs isotopiques aux stations comprises entre les longitudes 11° 30' et 12° 30' E à environ 300 km de l'océan Atlantique (Mbalmayo, Akonolinga et Somalomo) et de fortes teneurs aux stations proches de la République centrafricaine (Batouri, Biwala et Moloundou). Cette tendance ne semble pas en accord avec le processus dénommé "effet de continentalité" caractérisant l'appauvrissement en isotopes lourds des eaux au fur et à mesure de la progression de la vapeur atmosphérique de la mer vers les confins du pays.

Cependant, si on se reporte aux teneurs moyennes isotopiques du poste de Bakingelé (-2,9 ‰ pour ^{18}O et -15 ‰ pour ^2H) situé à 10 m d'altitude sur le Mont Cameroun (FONTES et OLIVRY, 1976), "l'effet de continentalité" semble se manifester jusqu'à la partie centrale de la zone étudiée (Mbalmayo, Akonolinga et Somalomo) où s'inverse cette tendance.

L'appauvrissement en isotopes lourds des stations les plus orientales vers celles du centre de notre zone d'étude pourrait être lié au gradient de "continentalité inverse" mis en évidence par JOSEPH et ARANYOSSY (1989). Selon ces auteurs, les lignes de grain qui prennent naissance dans la zone de convergence camerounaise et centrafricaine, se déplacent sous l'influence des courants JET et JEA d'est en ouest parallèlement au FIT;

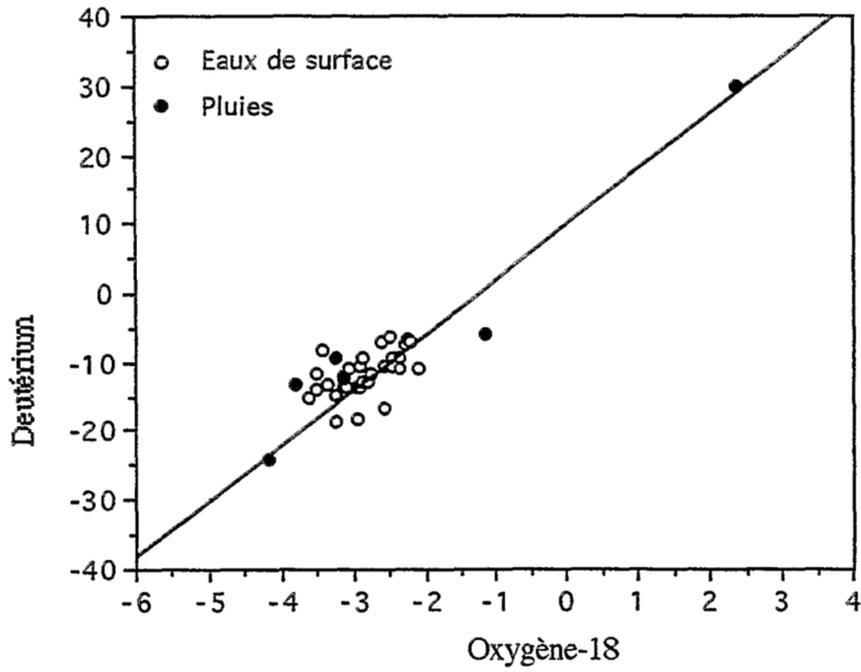


Figure 8-2 : Relation entre $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des eaux pluviales et fluviales

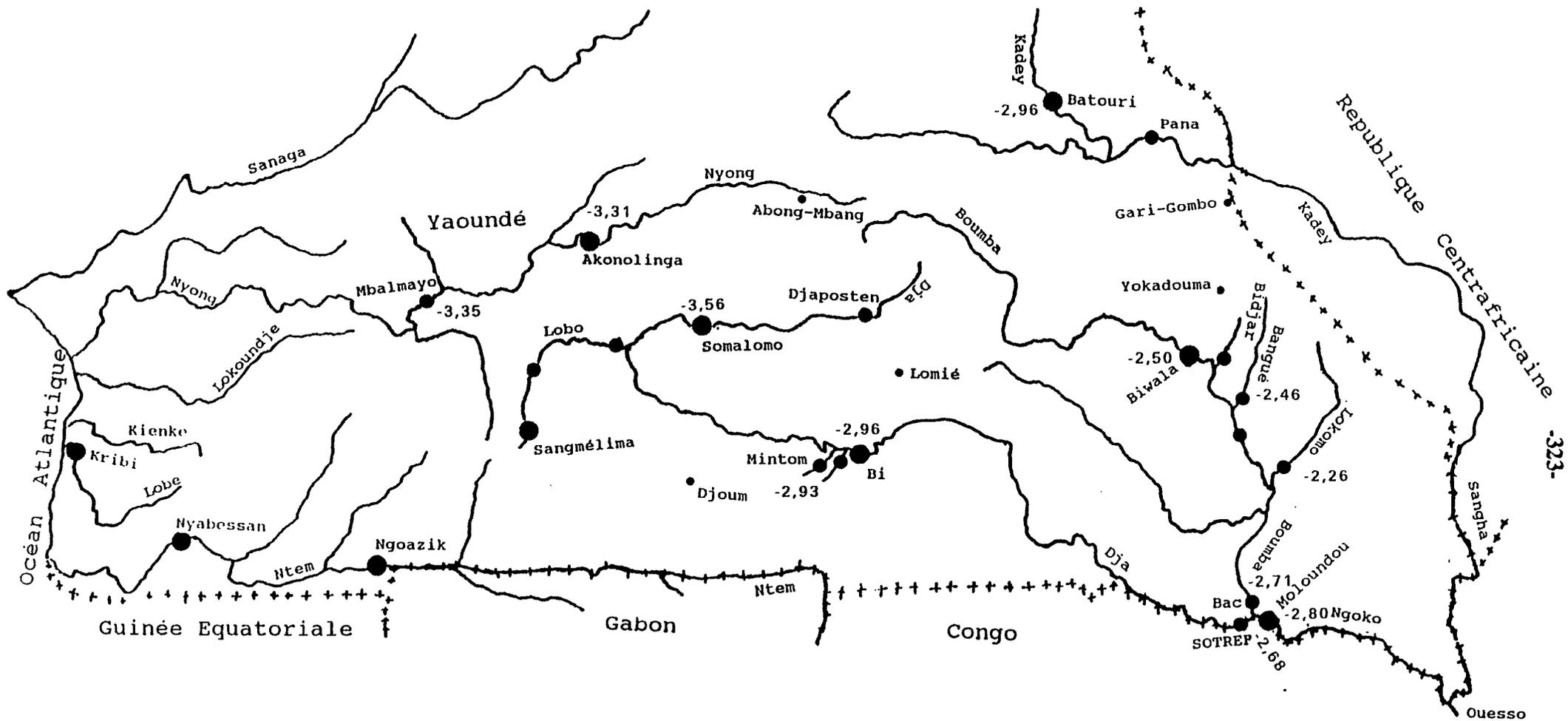


Figure 8-3 : Variation spatiale des teneurs en ^{18}O

- : COURS D'EAU
- +++ : LIMITE DES ETATS
- : EAUX PLUVIALES
- : EAUX FLUVIALES
- : EAUX PLUVIALES ET FLUVIALES

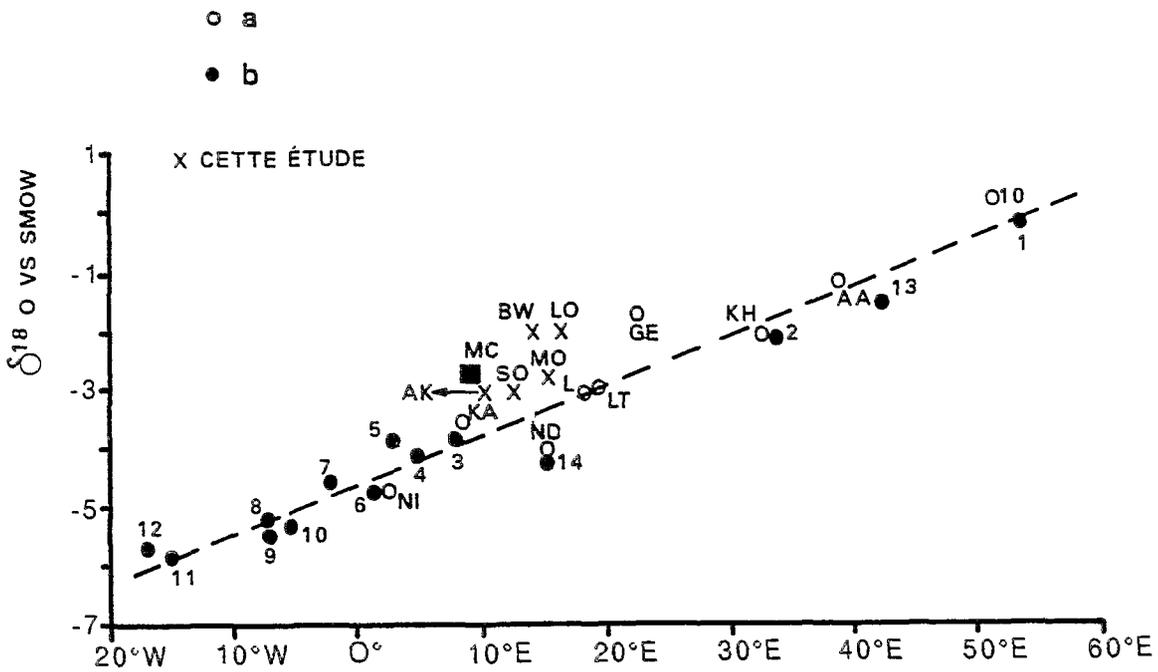


Figure 8-4 : Représentation des teneurs en ^{18}O de cette étude par rapport à l'abondance ^{18}O des eaux de précipitation (a) et souterraines (b) en fonction de la longitude le long de la bande sahélo-soudanienne (d'après JOSEPH et al., à paraître).

MC : Précipitations de Bakingélé au Mont Cameroun (FONTES et OLIVRY, 1976)

X : Ecoulements fluviaux de cette étude

Ak : Akonolinga ; So Somalomo

Bw : Biwala ; Lo : Lokomo

Mo : Moloundou

au fur et à mesure de leur progression, les masses humides se délestent de leurs isotopes les plus lourds.

Les teneurs moyennes en ^{18}O des eaux des stations orientales de notre zone d'étude sont supérieures à celles reportées aux mêmes longitudes sur la droite d'abondance ^{18}O (figure 8-4) établie par JOSEPH et al, à paraître. Ce résultat permet d'avancer que la pluie fortement enrichie du 6 novembre 1991 à Moloundou serait issue des premières condensations après la formation des amas nuageux mobiles.

En résumé, l'étude isotopique a montré que les eaux de notre zone d'intérêt sont peu évaporées et bien homogénéisées. La variabilité spatiale de leur composition isotopique permet de dégager que la zone est soumise à deux processus dénommés "effet de continentalité" et gradient de "continentalité inverse", le premier se manifestant de l'Atlantique vers l'arrière-pays et le second de l'est vers l'ouest, les deux s'estompant aux environs de 300 km au dans la partie centrale de la zone étudiée. Une bonne répartition spatio-temporelle des observations isotopiques dans la région est cependant nécessaire non seulement pour confirmer cette hypothèse, mais aussi pour apporter d'autres réponses à l'anomalie climatique de l'axe Yokadouma-Moloundou.

CHAPITRE 9

PLACE DES RESULTATS HYDROCHIMIQUES DE LA NGOKO

Au terme de nos analyses sur le fonctionnement hydrochimique du bassin de la Ngoko, il nous paraît intéressant, compte tenu de sa position géographique et de sa faible anthropisation, de le situer par rapport à d'autres bassins. Cette approche vise à appréhender le comportement de cet écosystème dans un contexte environnemental plus vaste (régional, continental et mondial).

De ce point de vue, à l'échelle locale et régionale, nous comparerons nos résultats, d'une part avec ceux des bassins de régimes hydroclimatiques différents, et d'autre part avec d'autres résultats obtenus dans le cadre de l'opération GBF du PEGI sur le Congo. Par ailleurs, nous examinerons la situation du bassin de la Ngoko en matière de dégradation des versants à l'échelle globale, en utilisant des données bibliographiques.

9.1. DU POINT DE VUE DES TRANSPORTS PARTICULAIRES

Dans le contexte hydrographique camerounais, nous avons spatialisé nos résultats sur le transport solide et ceux de trois bassins répartis du nord au sud et soumis à deux types de climat. Il s'agit de la Tsanaga à Bogo (climat tropical pur), du Mbam à Goura et de la Sanaga à Nachtigal (climat tropical de transition). L'évolution de la charge en suspension sur les bassins considérés est représentée sur la figure 9-1.

Il se dégage de cette figure que le transport solide diminue du bassin de la Tsanaga au Nord vers le bassin de la Ngoko au Sud, en passant par des valeurs intermédiaires des bassins du Mbam et de la Sanaga au Centre. Contrairement à ce que nous avons décrit sur la Ngoko, on observe sur la Tsanaga une montée brutale (de 0 à 3 000 mg.l⁻¹) et de fortes charges solides, imputables à l'absence de la végétation. D'autre part, cette spatialisation fait également ressortir une supériorité de la charge solide sur les bassins amont de la Sanaga (le Mbam) et de la Ngoko (la Boumba). Elle est liée aux zones de cultures des pays Bamoun et Bamilékés pour le Mbam et de Yokadouma pour la Boumba ou, en d'autres termes, à l'intervention humaine. NOUVELOT (1972) indique au sujet de la faible charge en suspension de la Sanaga qu'une partie de matériaux provenant du Djérem est déposée dans le barrage de Mbakaou. D'après OLIVRY (1977), le transport particulaire spécifique de ce bassin serait estimé à 44 t.km⁻².an⁻¹.

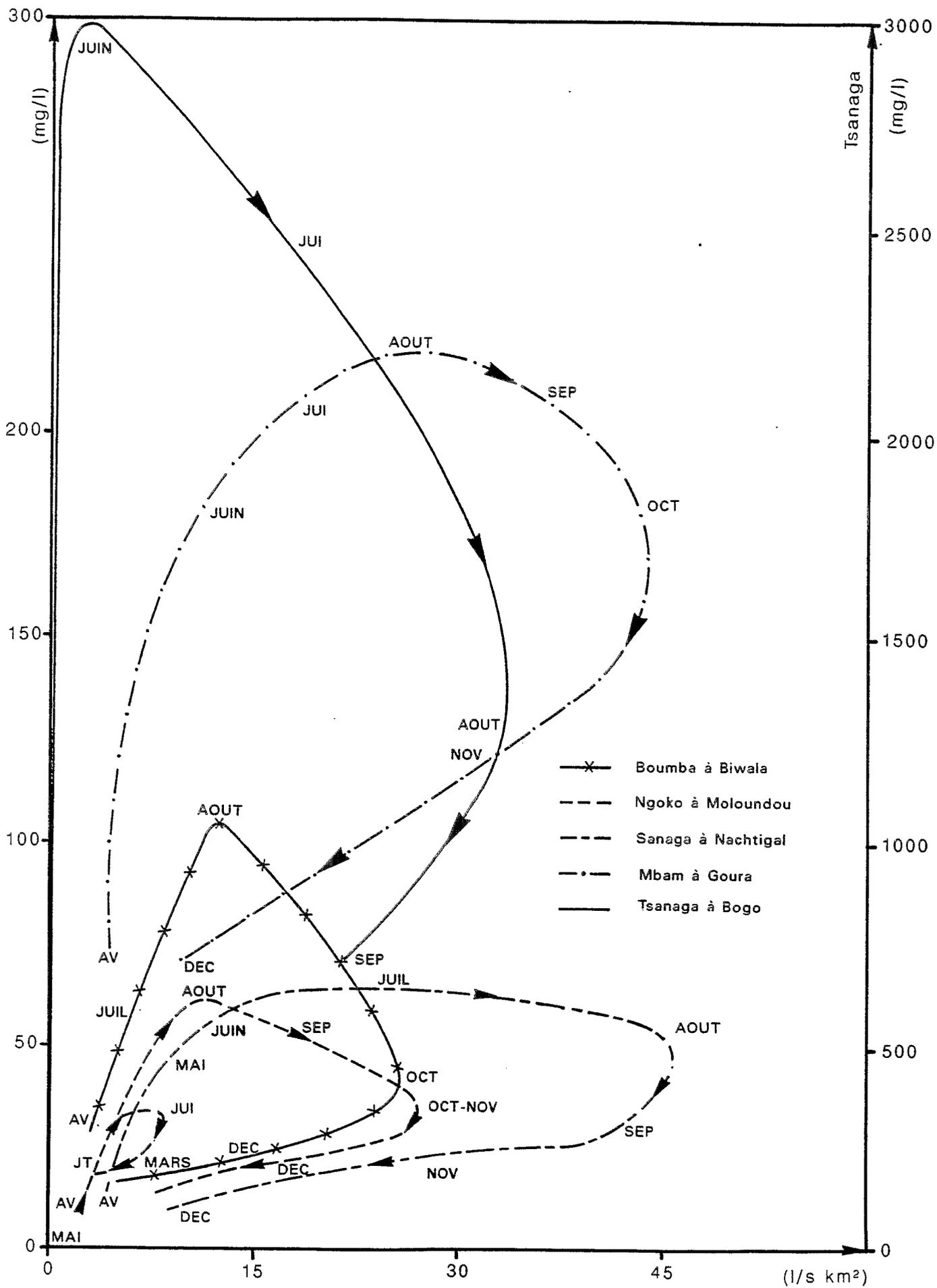


Figure 9-1 : Spatialisation de la charge solide en fonction de débit à l'échelle locale

D'une façon générale, on peut retenir qu'au Cameroun, l'intensité de l'érosion mécanique diminue du nord au sud en fonction de la densité de la végétation et des activités agricoles et que les maxima de la charge solide sont enregistrés avant ceux des débits de juin (Tsanaga) à août (Ngoko).

A l'échelle régionale, nous avons situé la charge solide de la Ngoko par rapport à celles des fleuves Congo à Brazzaville et Oubangui à Bangui pour le cycle 1990/91 (figure 9-2). Il se dégage de cette figure que la charge en suspension est plus élevée sur la Ngoko que sur l'Oubangui et sur le Congo. Ces fortes charges sont liées non seulement à la sensibilité du bassin de la Ngoko aux perturbations sur les versants et à sa taille réduite comparée à celles du Congo (2 %) et de l'Oubangui (13 %), mais aussi à ses débits spécifiques mensuels élevés.

L'amplitude de variation de la charge solide est plus importante sur la Ngoko et l'Oubangui (40 mg.l^{-1}) que sur le Congo (10 mg.l^{-1}). D'autre part, si l'évolution saisonnière de la charge particulaire décrite sur la Ngoko est comparable à celle de l'Oubangui, il n'en est pas de même pour le Congo. En effet, on constate qu'il n'y a pas de véritable cycle, du fait d'un second maximum des matières en février-mars provenant du Kasai. Le même constat a été fait sur les résultats de 1987/88 (OLIVRY et al, 1989).

Par contre, la charge correspondant à l'érosion du lit et des berges est quasiment la même sur la Ngoko et le Congo (20 mg.l^{-1}) ; sur l'Oubangui, elle est quasiment nulle (3 mg.l^{-1}) comme sur la Tsanaga. L'enseignement tiré est que cette forme d'érosion se manifeste de façon identique sur la Ngoko et le Congo, et que la charge en suspension des écoulements superficiels du Congo est négligeable. D'autre part, à la différence des substances particulières des bassins situés au nord de la latitude 5° N (Mbam, Sanaga, Oubangui et Tsanaga), l'évolution de la charge solide des bassins de la Ngoko et du Congo forme une boucle de juin à juillet pour le premier et de d'avril à juillet-août pour le second. Elle est liée à la saison sèche de juillet-août.

La distribution latitudinale des transports spécifiques en Afrique Centrale (figure 9-3) montre que, sur les bassins compris entre les latitudes 4° N et 6° S (milieu forestier), l'érosion mécanique est faible et se manifeste de façon identique. Entre les latitudes 4° et 10° N (zone de transition), elle est moyenne (sauf pour l'Oubangui). Au nord de la latitude 10° (milieu soudano-sahélien), elle est forte.

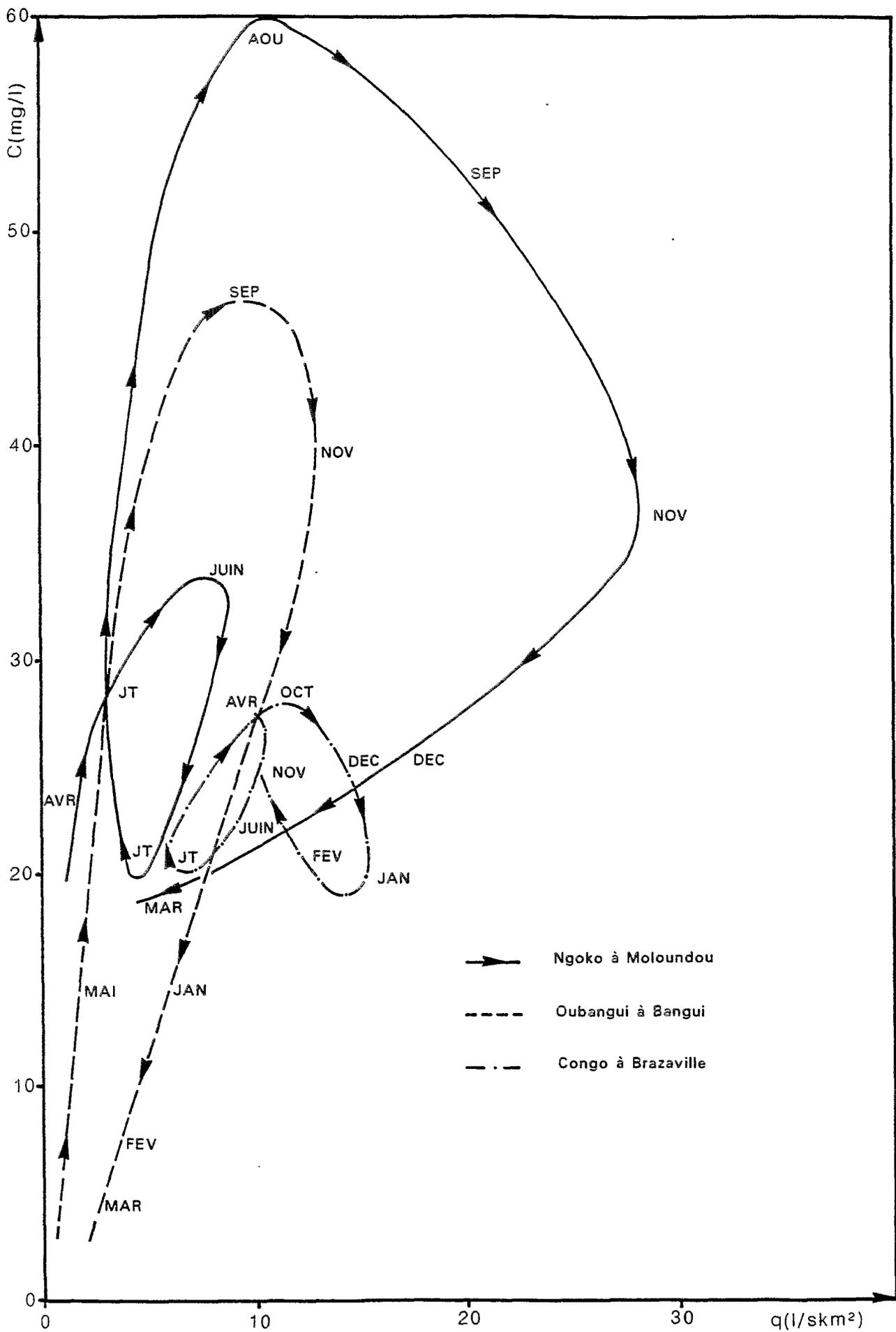


Figure 9-2 : Spatialisation de la charge solide en fonction de débit à l'échelle régionale de GBF de PEGI (1990/91)

A l'échelle globale, nous avons examiné nos résultats par rapport à ceux d'autres auteurs cités par GAC (1980) et NKOUNKOU (1989) sur les transports spécifiques de quelques grands bassins fluviaux du monde. En milieu intertropical, le transport spécifique particulière de la Ngoko est 20 fois plus petit que celui de l'Amazone à Obidos ($250 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$). On retrouve une différence comparable avec certains feuves européens comme le Rhône ($318 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) ou un peu plus faible tels qu'avec le Danube ($82,3 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) et la Garonne ($68,2 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$).

L'écart se creuse davantage si on se réfère aux fleuves asiatiques issus de l'Himalaya, à l'instar du Brahmapoutre ($1435 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$), le Gange (540 t.km^{-2}), le Mékong ($430 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) et le Yang Tsé Kiang ($175 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$). Il importe toutefois de signaler que l'érosion de certains bassins comme le Rhin, l'Iénisseï, la Léna et l'Ob, comparée à celle de la Ngoko, est plus faible (2 à $6,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$).

A l'échelle des continents, l'intensité de l'érosion mécanique globale évaluée à $116 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ par MILLIMAN et MEADE (1983), est 10 fois supérieure à celle de la Ngoko. Cette comparaison permet de conclure, en accord avec les précédentes, que l'érosion mécanique sur le bassin de la Ngoko ainsi que sur les autres bassins de notre zone d'intérêt et du Congo, est parmi les plus faibles du monde.

9.2. DU POINT DE VUE DES TRANSPORTS DISSOUS

Dans l'étude de la composition chimique des eaux pluviales et fluviales développée au 6.2., nous nous sommes attachés à comparer nos résultats concernant les espèces chimiques à ceux d'autres travaux notamment en milieu tropical. De ce fait, la situation de nos résultats sur la qualité des eaux sera limitée dans ce chapitre aux transports spécifiques dissous.

Sur la figure 9-3 relative à la répartition latitudinale des transports spécifiques particuliers, nous avons représenté en même temps celle des transports spécifiques dissous. Cette figure montre, en ce qui concerne les substances dissoutes, un regroupement des valeurs entre 10 et $20 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ aussi bien pour les cours d'eau camerounais que pour les autres fleuves de l'Afrique Centrale. La valeur la plus faible est celle que nous avons mesurée sur le Nyong ($9 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) et la plus forte celle du Mbam ($20,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) d'après OLIVRY et NAAH (1978). On signale toutefois que certains bassins africains présentent des transport spécifiques plus faibles (de $1,5$ sur l'Orange à $8,3 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur le Niger).

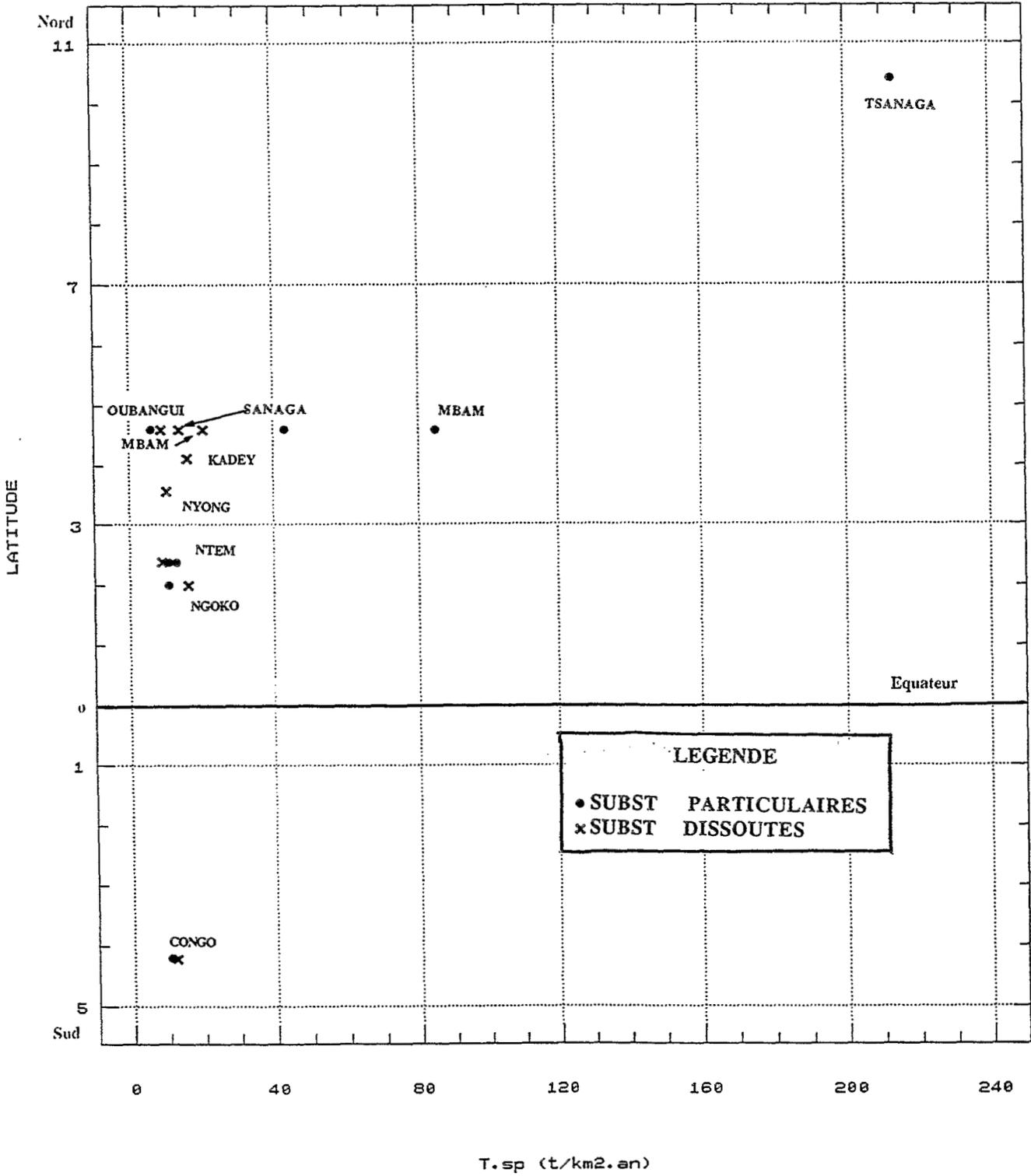


Figure 9-3 : Distribution latitudinale des transports spécifiques particulaire et dissous en Afrique Centrale

Légende : Tsp : transport particulaire ; Tsd : Transport dissous

A l'échelle intertropicale et mondiale, nous avons procédé de la même façon qu'au paragraphe 9.2., en situant nos résultats par rapport à ceux des auteurs cités par GAC (1980) et NKOUNKOU (1989).

Ainsi, le transport spécifique dissous de la Ngoko représente à peine 30 % de la valeur trouvée sur l'Amazonie ($46 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$). Le rapport est encore plus faible lorsqu'on se réfère aux continents européen où on note des valeurs de 44 (Garonne) à $157 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (Rhône) et asiatique où ces valeurs varient entre 75 (Mékong) et $136 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (Brahmapoutre).

A la lueur de ce qui précède, on peut dire que l'érosion chimique de la Ngoko est faible par rapport à celle du bassin amazonien et de certains bassins européens et asiatiques. En revanche, elle est proche de l'altération chimique moyenne mondiale, calculée à $20 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ par MILLIMAN et MEADE (1983) sur l'ensemble des continents.

Les transports spécifiques particuliers et dissous du bassin de la Ngoko et des autres bassins de notre zone d'étude sont comparables à ceux des bassins de PEGI de la sous-région, l'Oubangui et le Congo. La distribution latitudinale indique une augmentation du transport particulaire de la Ngoko ($11,6 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) vers la Tsanaga ($213 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) au Nord du Cameroun et une stabilité du transport dissous entre 10 et $20 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$.

A l'échelle planétaire, du point de vue de l'érosion mécanique, le bassin de la Ngoko et d'une manière générale les bassins de l'Afrique Centrale ont les valeurs les plus faibles du monde. Par contre, l'altération chimique des roches de la Ngoko et desdits bassins est plus proche de la moyenne mondiale, avec un minimum sur le Nyong et un maximum sur le Mbam.

En terme de bilans d'érosion mécanique et chimique, la Ngoko se situe parmi les bassins du monde qui résistent le mieux aux deux phénomènes et particulièrement à la dégradation des sols ($7 \mu\text{m}$ de lame érodée annuelle) à cause de sa couverture végétale forestière qui protège les sols contre l'agressivité des gouttes de pluies.

CONCLUSION

L'analyse des travaux antérieurs a permis dégager que l'érosion mécanique est plus intense sur les bassins du Mbam et de la Sanaga que sur le bassin du Ntem.

Les observations de transferts de matières particulaires des zones de production de matériaux vers l'aval du bassin de la Ngoko a montré que sur la Dja, l'érosion augmente de Somalomo vers Moloundou-SOTREF tandis sur la Boumba, elle diminue de Biwala vers Moloundou-Bac. Ces résultats traduisent la faible perturbation du bassin du Dja à Somalomo (réserve forestière) et l'importance des activités agricoles de la région de Yokadouma en amont de la Boumba à Biwala. Sur l'ensemble du bassin de la Ngoko, on a noté une augmentation du transport particulaire de 1989/90 ($8 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) à 1992 ($14 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$). Cette augmentation est liée, non seulement aux activités agricoles, mais aussi à une exploitation forestière industrielle accrue (30 % d'augmentation de volume d'abattage) et ses conséquences (création et réfection des routes, intensification du transport routier). La lame érodée est calculée à $7,3 \mu\text{m}$ par an, soit 7,3 m par million d'années. La détermination minéralogique a montré que la kaolinile est le minéral argileux le plus abondant.

En ce qui concerne les matières dissoutes, la composition chimique des précipitations a fait ressortir une décroissance des chlorures et du sodium de l'Atlantique vers la région de Moloundou-Batouri et une variation inverse du calcium et du potassium.

Les observations des transports dissous ont permis de déceler une augmentation de l'érosion chimique de l'amont du Dja et de la Boumba vers l'aval. Elle est plus intense sur la Boumba et particulièrement sur ses affluents en aval de Biwala (Bidjar, Bangué et Lokomo). De façon générale, les eaux sont bicarbonatées calco-magnésiennes. Elles appartiennent au domaine de stabilité de la kaolinite. Sur l'ensemble du bassin de la Ngoko à Moloundou, à l'inverse du transport particulaire, le transport dissous n'a presque pas varié durant les trois cycles d'étude. En moyenne, le transport spécifique dissous est de $17,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Le rapport transport particulaire/transport dissous (0,7) indique une prédominance de l'altération sur l'érosion mécanique.

L'étude de carbone organique a montré que le carbone organique dissous représente 80 % du carbone organique total. Ce rapport est conforme aux proportions en carbone en milieu forestier tropical. Le transport spécifique de carbone organique total est de $4,0 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$.

En complément au fonctionnement hydroclimatique, les observations isotopiques (^{18}O et ^2H) ont permis de conclure à une faible évaporation et à une bonne homogénéisation des eaux étudiées. La variabilité spatiale des teneurs isotopiques semble indiquer que les bassins sont soumis aux processus dénommés "effet de continentalité" et gradients de "continentalité inverse".

Les exportations totales de matières minérales sont de $29 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ auxquelles s'ajoutent celles de carbone organique ($4 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$). A l'échelle planétaire, la situation du bassin de la Ngoko d'un point de vue transport de matières le classe parmi les bassins qui résistent le mieux à l'érosion mécanique, son altération chimique le situant proche de la moyenne mondiale.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Tout au long de cette étude réalisée en milieu forestier équatorial humide, nous avons avancé nos analyses sur les régimes hydropluviométriques et géochimiques du système Boumba-Dja (Ngoko). Ces bassins fluviaux revêtent une importance particulière en ce qui concerne le fonctionnement hydrochimique des écosystèmes forestiers, en raison de leur faible anthropisation. D'autre part, le suivi hydrogéochimique de ces bassins permet d'apprécier leur réaction face aux éventuelles perturbations dont ils peuvent être l'objet. En guise de conclusion, nous rappellerons les principaux résultats obtenus et nous donnerons quelques orientations pour la suite des recherches.

L'étude des régimes pluviométriques a permis de relever que les années sèches et humides ne sont pas toujours en phase d'un poste pluviométrique à un autre. Elle a aussi mis en évidence un déficit pluviométrique à l'est de l'isohyète 1600 mm passant par Souanké, Lomié et Kélemba. Ce déficit serait lié à la succession des collines d'environ 800 m d'altitude entre Biwala et Mikel ; elles constituent une "barrière" orographique à l'avancée de la mousson vers l'est du bassin.

Quant à l'analyse des régimes hydrologiques, elle a montré, du moins pour les stations hydrométriques de longue durée, notamment Somalomo (Dja) et Biwala (Boumba), que l'évolution des débits ne suit pas intégralement celle des précipitations qui les induisent. En effet, la réponse de ces bassins à la variabilité spatio-temporelle de la pluviosité a fait ressortir une régularité sur le plan du comportement hydrologique. On a pu ainsi individualiser une séquence humide de 1962 à 1972, suivie d'une séquence sèche dont la fin se situe en 1984. Depuis, la tendance est normale à humide, contrairement à d'autres bassins de l'Afrique tropicale où on ne note pas encore la reprise (ORANGE, 1990 ; MAHE, 1992 et OLIVRY, 1992). La faible accentuation de la sécheresse sur nos bassins est liée au rôle régulateur de la forêt sur les débits. Cette analyse a permis par ailleurs de constater que nos années d'étude (1989 à 1992) appartiennent à la séquence normale. En conséquence, nos résultats hydrochimiques seront représentatifs des années hydrologiques moyennes. D'autre part, le bilan hydrique fait ressortir un déficit important par évapotranspiration (80 %).

En ce qui concerne les transferts de substances et le comportement hydrochimique des bassins, l'analyse des transports particuliers a permis de relever des variantes entre les bassins amont du Dja et de la Boumba. En effet, à la faible érosion mécanique observée dans la réserve forestière du Dja à Somalomo, s'oppose la forte érosion de la Boumba à

Biwala due aux champs cultivés dans la région de Yokadouma. Par contre, à l'aval de ces deux stations, on enregistre une augmentation de l'érosion sur le Dja, imputable aux activités agricoles de la région de Sangmélima-Djoum contre une diminution sur la Boumba suite à une dilution par les eaux peu chargées de la Bek et de la Lokomo. L'enseignement tiré de ce suivi spatial concerne la notion d'échelle. Pour des raisons de norme, nous avons ramené les flux à l'unité de surface. Compte tenu des différences notées, nous précisons que les résultats n'ont de signification que pour les bassins considérés ou analogues. De ce point de vue, leur extrapolation sur d'autres bassins ou à d'autres échelles ne doit pas se faire sans mesure spécifique préalable.

A l'échelle des trois cycles hydrologiques étudiés, le transport spécifique est passé de 8 à 14 t.km⁻².an⁻¹ sur la Ngoko à Moloundou. Ce résultat indique une augmentation de l'érosion mécanique, qui serait liée entre autres à l'exploitation forestière en nette progression (30 % d'augmentation de volume d'abattage) et à ses conséquences (multiplication des trouées d'abattage et des surfaces dénudées, intensification du trafic routier, réfection et création des routes).

La qualité des particules recueillies est caractérisée par les minéraux argileux avec une forte contribution de la kaolinite, minéral caractéristique des sols soumis à une longue pédogenèse en milieu forestier équatorial chaud et humide.

Le chimisme des eaux météoriques a permis de déceler des apports atmosphériques en quantités relativement importantes sous forme soluble. L'évolution spatiale montre d'une part, une diminution des ions Cl⁻ et Na⁺, et d'autre part, une augmentation des ions Ca⁺⁺ et K⁺ de l'Atlantique vers l'est du Cameroun. La quantification annuelle de la charge totale des éléments par poste pluviométrique et par bassin versant a permis de conclure que les apports atmosphériques par unité de surface sont constants dans notre zone d'étude. Concernant leur contribution aux matières dissoutes des cours d'eau, en raison de l'importance du déficit hydrique évoquée ci-dessus et du piégeage d'une grande partie des éléments au niveau des versants, les cations et la silice n'ont pas été déduits des exportations fluviales.

L'analyse de la qualité des eaux fluviales n'a indiqué aucune trace de pollution, exception faite des pics ponctuels de nitrates et de sulfates d'origine agricole. Les eaux des bassins étudiés sont bicarbonatées calco-magnésiennes. Par ailleurs, elles se positionnent dans le domaine de stabilité de la kaolinite, ce qui est en accord avec la nature minéralogique déjà évoquée.

L'étude des relations entre les différents paramètres physico-chimiques par les corrélations totales et par les analyses factorielles en composantes principales a mis en évidence la corrélation négative classique entre les débits et les concentrations (sauf les nitrates). D'autre part, elle a permis d'indiquer l'origine des principaux éléments et de caractériser les bassins les plus vulnérables à l'érosion chimique.

Ainsi, les anions sont d'origine externe aux bassins, tandis que la silice et globalement tous les cations proviennent de l'altération des roches-mères. Par ailleurs, la forte altération observée sur les bassins de la Bidjar et de la Lokomo avec des valeurs élevées de pH et de bicarbonates, fait penser qu'il y aurait, en plus du complexe andésito-doléritique, des formations carbonatées sur ces bassins.

Le transport des substances en solution par la Ngoko à Moloundou a très peu varié au cours des 3 cycles étudiés (16 à 18,7 t.km⁻².an⁻¹). Par ailleurs, le transport dissous domine le transport solide ; en moyenne, les valeurs respectives sont de 17,5 et 11,5 t.km⁻².an⁻¹ et le rapport transport solide/transport dissous est égal à 0,66.

Les volets carbone organique et isotopes ont été également étudiés. La quantification du carbone organique a fait ressortir que les eaux de la Ngoko exportent beaucoup plus de carbone organique sous la forme dissoute (3,3 t.km⁻².an⁻¹) que sous la forme particulaire (0,7 t.km⁻².an⁻¹), soit au total une exportation de carbone de 4,0 t.km⁻².an⁻¹. Ce résultat induit que le carbone organique dissous représente 80 % du carbone organique total. Ce chiffre est conforme au rapport caractérisant le carbone en milieu équatorial humide (MEYBECK, 1984).

Pour ce qui est de l'étude des isotopes stables de l'eau, le positionnement des teneurs en ¹⁸O et en ²H sur la droite des eaux météoriques mondiales de CRAIG traduit une évaporation négligeable et une bonne homogénéisation des eaux dans notre zone d'étude. Par ailleurs, cette zone serait sans doute soumise aux processus dénommés "effet de continentalité" et "effet de continentalité inverse" se manifestant, de l'Atlantique vers l'est pour le premier et de la frontière Centrafricaine (Moloundou-Batouri) vers l'ouest pour le second, les deux s'estompant à environ 12° de longitude est (Mbalmayo-Somalomo).

La situation du bassin de la Ngoko du point de vue du transport particulaire et dissous a montré qu'avec 29 t.km⁻².an⁻¹, son bilan total est légèrement supérieur à ceux des bassins voisins et des autres bassins du Congo et inférieur à ceux de la Sanaga, du Mbam et de la Tsanaga. A l'échelle globale des continents, le transport particulaire spécifique

de la Ngoko est faible et son transport dissous proche de la moyenne mondiale. En définitive, les bilans de transports de matières en suspension et en solution de la Ngoko la situent parmi les bassins de la planète qui résistent le mieux à la dégradation des versants et surtout à l'érosion mécanique, en raison de sa couverture végétale forestière qui protège les sols contre l'agressivité des pluies.

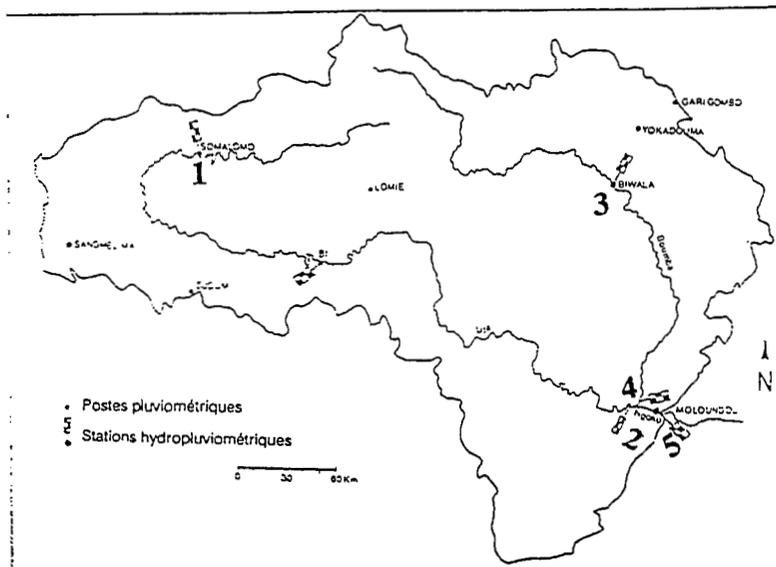
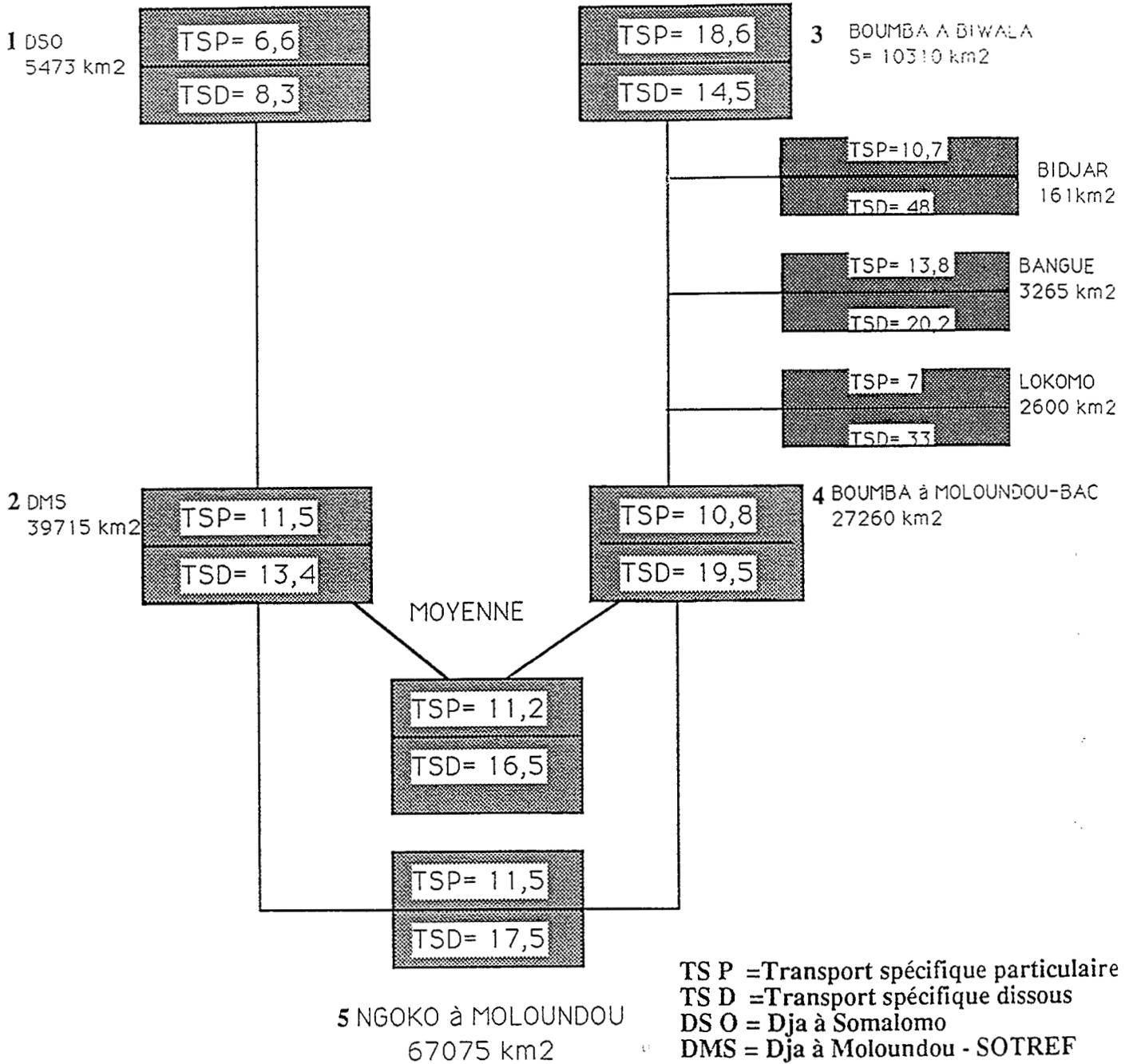
Au terme de cette étude, on retiendra que les observations de transports de matières ont permis de "diagnostiquer des symptômes" de perturbations des versants (exploitation forestière accrue notamment), auxquelles la réponse de la Ngoko s'est traduite par une augmentation du transport particulaire. Néanmoins, en dépit de cette augmentation, l'altération chimique, calculée en moyenne à $17,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$, prédomine sur l'érosion mécanique évaluée à $11,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$, soit une épaisseur équivalente de sols décapée estimée à $8,8 \mu\text{m}$ par an, soit $8,8 \text{ mm}$ en 1 000 ans.

Il importe de préciser que les conclusions ci-dessus découlent de 3 cycles d'observations et doivent être manipulées avec prudence, en raison de leur caractère provisoire. De ce point de vue, elles devraient être confirmées par d'autres mesures réalisées suivant les orientations ci-après :

- Multiplication des mesures pluviométriques dans l'axe Moloundou-Yokadouma pour un bon suivi de l'anomalie climatique de la zone ;
- Echantillonnage serré dans le temps et caractérisation des surfaces dénudées pour une bonne évaluation de l'érosion mécanique ;
- Précision sur l'origine des fortes teneurs en éléments des bassins de la Bidjar et de la Lokomo ;
- Prélèvement mensuel à Moloundou pour une étude saisonnière du carbone organique;
- Prélèvement des averses et des écoulements pour les études isotopiques en vue de la détermination de l'origine des précipitations et de la séparation des écoulements.

La réalisation de ces recherches, avec éventuellement la participation d'autres disciplines (hydrogéologie, écologie, botanique, foresterie, géographie, géologie, pédologie, agronomie et télédétection), fera du bassin de la Ngoko un véritable observatoire du fonctionnement hydrochimique des écosystèmes exclusivement forestiers sinon des zones intertropicales du monde, au moins d'Afrique.

ORGANIGRAMME DES TRANSPORTS SPECIFIQUES
PARTICULAIRE ET DISSOUS DEPUIS L'AMONT VERS L'AVAL DU
BASSIN VERSANT DE LA NGOKO en t / (km².an)



BIBLIOGRAPHIE

1. *Journal of the American Medical Association*, 1998; 279: 2500-2501.

BIBLIOGRAPHIE

- ANONYME CIEH-ASECNA-ORSTOM (1990) : Annales des précipitations journalières du Cameroun de 1966 à 1980. Direction de l'Hydraulique Rurale, Yaoundé. CIEH-ASECNA-ORSTOM, 747 p.
- ANONYME IRGM/MESRES (1985) : Annuaire hydrologique de la République du Cameroun, année 1985. IRGM/MESRES, 173 p.
- ANONYME (1959) : Atlas du Cameroun, *Imp. Nationale*
- ANONYME Centre Technique Forestier Tropical (1989) - Memento du forestier, 3 éd. Paris.
- ANONYME ENCYCLOPEDIE DE L'ECOLOGIE (1977) - Le présent en question. *Larousse*, Paris, 487 p.
- ANONYME ENCYCLOPEDIE DE LA REPUBLIQUE UNIE DU CAMEROUN (1981). Tome 1. Le milieu et les hommes. Tome 2. L'économie. *Nouv. Edit. africaines*, 287 p. et 312 p.
- ANONYME FAO (1988) : Plan d'action tropical. Mission conjointe interagence de planification et de revue pour le secteur forestier, Cameroun. Rap. de mission PNUD/FAO, Rome, 3 vol., 15 p., 162 p., et 118 P.
- ANONYME IAEA (1981) - Stable isotope hydrologie. Deutérium and oxygen-18 in the water cycle. Vienna, 340 p.
- ANONYME PIRAT, INSU/ORSTOM (1989) : Opération Grands Bassins Fluviaux : Premiers résultats 1987-1989; Note d'information n° 3. PIRAT, INSU/ORSTOM, Montpellier, 124 p.
- ANONYME PNUD (1987) - Recherches Minières dans le Sud-Est du Cameroun. Rap. de synth. final, Yaoundé, 102 p.
- ANONYME RIO (1992) - Effet de serre. In *special Recherche*, vol. 23, p. 515-613.
- ANONYME UNESCO, PNUE, FAO (1981) - Ecosystèmes pâturés tropicaux. Recherche sur les ressources naturelles. XVI, Paris, 675 p.
- ANONYME UNESCO, PNUE, FAO (1983) - Ecosystèmes forestiers tropicaux d'Afrique. Recherche sur les ressources naturelles. XIX, Paris.
- ALDEGHERI M. (1979) - Mesure des débits à partir des vitesses. Tome IV, ORSTOM IDT 41, 313 p.
- ATAYI E. A. and KNIPSCHER H. C. (1980). Survey of food crop farming systems in the "Zapi est", EAST CAMEROON.
- BARREAU C (1992) - Etude de la matière organique associée aux suspensions fluviales : application à des climats tempéré et intertropical. Th. Doc. Uni. Paris VI
- BARUSEAU J.P., GIRESSE P. et OUNETINGUE (1989) - Premières observations et analyses des suspensions et alluvions du bassin Oubangui-Congo. PIRAT ORSTOM-INSU, n° 3 p. 64-79.
- BIROT P. (1981) - Les processus d'érosion à la surface des continents. *Masson*, 605 p.

- BOUM J.P., SIGHA N., AYISSI G. (1983) - Etudes hydrologiques du Ntem aux chutes de Menve'ele. Rap. Synth. 1980/1983, IRGM/DGRST Yaoundé, 75 p.
- BRUIJNZEEL L. A. (1990) - Hydrology of moist tropical forest and effects of conversion : a state of knowledge review. UNESCO, 224 p.
- CAMAIL M., MAHAMANE M., PUCCI B. et RIGAUD J.P. (1987) - Analyses chimiques des eaux du Niger à Niamey. Premiers résultats d'une campagne de mesures. *Hydrol. cont. ORSTOM*, 2 (2), p. 87-100.
- CARRE P. (1972) - Quelques aspects du régime des apports fluviaux de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.* Vol. IX, n° 1, p.19-46.
- CAUWET (1984) - Automatic determination of dissolved organic carbon in seawater. In *the sub-ppm range marine chemistry*, 14, p. 297-306.
- CAUWET G. (1975) - Optimisation d'une technique de dosage du carbone organique des sédiments. *Chemical Geology*, 16, p. 59-63.
- CAUWET G. (1985) - Dynamique de la matière organique dans les milieux marin et polyhalin. Rôle géochimique aux interfaces. Th. Doc. d'Etat, Uni. Perpignan, 285p.
- CAUWET G., SEMPERE R. et SALIOT A. (1990) - Carbone organique dissous dans l'eau de mer : confirmation de la sous-estimation antérieure. C.R.A.S., Paris, 311, 11, p. 1061-1066.
- CLEAVES E.T., GODFREY A. et BRICKER O.P. (1970) - Geochemical balance of a small watershed and its geomorphic implications. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81, p. 3015-3032.
- CRAIG H. (1961) - Isotopic variations in meteoric water. *Sciences*, 133, p. 1702-1703.
- DANLOUX J. et LAGANIER R. (1991) - Classification et quantification des phénomènes d'érosion, de transport et de sédimentation sur les bassins touchés par l'exploitation minière en Nouvelle Calédonie. *Hydrol. Cont. ORSTOM*, 6 (1), p. 15-28.
- DEJOUX C. (1988) - La pollution des eaux continentales africaines. Expériences actuelles et perspectives. *Coll. Tr. et Doc.* n° 213, 513 p.
- DELAUNE M. (1989) - Etude des transports solides du Congo. Premiers résultats sur la granulométrie des MES et de la fraction supérieure à 50 microns. PIRAT ORSTOM-INSU, n° 3 p.58-59.
- DERONDE L. et SYMOENS J.J. (1980) - L'exploitation des éléments dominants du bassin du fleuve Zaïre : une réévaluation. *Ann. Limno.*, 16 (2), p. 183-188.
- DEVER L. (1978) - Teneurs ioniques et isotopiques des eaux de surface en période d'hydraulicité exceptionnelle et mécanismes de décharge de nappes : cas du bassin de la Seine en 1976-1977. Th. 3è cycle, Uni. Marie-Curie, 125 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. *Eath Sc. J. V.* 2, n° 2.
- DUBREUIL P. (1974) - Initiation à l'analyse hydrologique. *Masson et Cie*, 216 p.
- DURAND P. (1989) : Biogéochimie comparée de trois écosystèmes (pelouse, hêtre, pessière) de moyenne montagne granitique (Mont-Lozère, France). Th. Doc. Uni. d'Orléans 193 p.

- DURAND P., LELONG F, NEAL C., (1992) - Comparaison and significance of annual hydrochemical budgets in three small granitic catcments with contrasting vegetation (Mont Lozère, France). *Envir. poll.* 75, p. 223-228.
- DURAND P., NEAL C., LELONG F. (1992) - Anthropogenic to the rainfall chemistry of a mountainous area in the Cevennes of national park (Mont Lozère, Southern France). *J. of Hydrol.*, 130, p. 71-85.
- DURAND P., NEAL C., LELONG F. (1992) - Effects of land-use and atmospheric input on stream and soil chemistry : field results and long term simulation at Mont Lozère (Cevennes national park, Southern France). *The Sc. of total env.*, 119, p. 191-209.
- DURAND P., NEAL C., LELONG F. and DIDON-LESCOT JF. (1991) - Hydrochemical variations in spruce, beech and grassland areas, Mont Lozère, Southern France. *Journ. of Hydrol.*, 129, p. 57-70.
- EISMA D. and VAN BENNEKOM A.J. (1978) - The Zaire river and estuary and the Zaire outflow in the Atlantic Ocean. *Neth. J. of Sea Res.*, p.255-272.
- EISMA D., KALF J. and VAN DER GAAST S. J. (1978) - Suspended matter in the Zaire estuary and the adjacent Atlantic Ocean. *Neth. J. of Sea Res.*, p. 382-406.
- FONTES J. Ch. (1976) - Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles : quelques aspects. Th. Doc. d'état, Uni. Paris VI, 208 p.
- FONTES J. Ch. (1976) - Les isotopes du milieu dans les eaux naturelles. *La Houille blanche*, n° 3/4 p. 205-221.
- FONTES J. Ch., GONFLANTINI R. and ROCHE M. A. (1970) - Deutérium et oxygène-18 dans les eaux du lac Tchad. *Isotopes in hydrology*, Vienna, p. 387-404.
- FONTES J. Ch. et OLIVRY J. C. (1976) - Premiers résultats sur la composition isotopique des précipitations de la région de Mont Cameroun. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIII n° 3 p. 179-194.
- FORTI M. C., NEAL C. (1992) - Hydrochemical cycles in tropical rainforests : an overview with emphasis on central Amazonia. *J. of Hydrol.*, t. 134, p. 103-115.
- FORTI M. C., NEAL C., JENKINS A. (submitted) - Modelling perspective of impact for deforestation of Amazonian rainforest stream water quality : on perseved small forest areas. Submitted to Amazonia.
- FRITSCH J.M. (1992) - les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants. Opération ECEREX en Guyane française. *Etudes et thèses ORSTOM*, Paris, 392 p.
- FRITSCH J. M. et SARRAILH J. M. (1986) - Les transports solides de l'écosystème forestier tropical humide guyanais : effets du défrichement et de l'aménagement des pâturages. *Cah. ORSTOM, sér. pédo*, vol. XXII, N° 2
- GAC J.Y. (1980) - Géochimie du bassin du Lac Tchad. *Trav. et doc. ORSTOM*, 123, 251 p.
- GAC J.Y, BOUCHEZ J.M., BAMBA B.S., CARN M., ORANGE et DUVERT P. (1987) - Géochimie des eaux du Fouta-Djalou, flux dissous et particulaire en Haute Gambie (Kédougou et Gouloumbou). *Mono. ORSTOM*, 102 p.
- GAC J.Y. et KANE A. (1986a) - Le fleuve Sénégal : I. Bilan hydrologique et flux continentaux de matières particulaire à l'embouchure. *Sci. Géol., Bull.* 39, 1, Strasbourg p.99-130.

- GAC J.Y. et KANE A. (1986b) - Le fleuve Sénégal. : II. Flux continentaux de matières dissoutes à l'embouchure. *Sci. Géol., Bull.* 39, 2, Strasbourg p.151-172.
- GIBBS R. J. (1967) - The geochemistry of the Amazon river system , part 1. The factors that control the salinity and the concentrations of suspended solids. *Geol. Soc. of Am., Bull.* 78, p. 1203-1232.
- GIBBS R. J. (1970) - Mechanisms controlling world water chemistry. *Sc.*, V. 170.
- GIBBS R. J. (1972) - Water chemistry of the Amazon river. *Geoch. and Cos. Acta*, Vol. 36, p. 1061-1066.
- GLOOR R. (1982) - Résumé des cours de la formation postgrade en hydrologie opérationnelle, EPFL, IGR n° 166.
- GONZALEZ-BARRIOS J. L. (1992) - Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine : exemple dans la "Comarca Lagunera". Th. Doc. Uni. Montpellier II, 315 p.
- GROVE A. T. (1972) - The dissolved and solid load carried by some west african river : Senegal, Niger, Benue, and Chari. *J. of Hydrol.*, 16, p. 227-300.
- GUYOT J. L. (1992) - Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Th. Doc. Uni. Bordeaux I, 362 p.
- HADLEY R. F., LAL R., ONSTAD C. A., WALLING D. E. and YAIR A. (1985) - Recent developments in erosion and sediments yield studies, UNESCO, Paris, 127 p.
- HUMBEL F.X. (1976) - L'espace poral des sols ferrallitiques du Cameroun. *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, 310 p.
- HUMBEL H.X. (1988) - Transport de matières en suspension et du carbone organique particulaire par la Garonne. Mém. de DEA, ULP Strasbourg, 33 p.
- IKOUNGA M. (1978) - Mécanismes de ruissellement de sous forêt. Etude hydrologique des bassins d'Ottomo (région de Yaoundé). Th. Doc. Ing., Uni. Paris VI.
- JANSEN J. M. L., PAINTER R. B. (1974) - Predicting siment yield from climate and topography. *Journal of Hydrology* t.21 p. 371-380
- JANSSON MARGARETA B. (1982) - Land erosion by water in different climates. Uppsala university, departement of physical geography UNG Rapport Nr 57, 151 p.
- JATON J. F. (1980) - Ecoulements de surface et débits de crue. EPFL, Suisse, 38 p.
- JOSEPH A. et ARANYOSSY J.F. (1989) - Mise évidence d'un gradient de continentalité inverse de l'Afrique de l'Ouest et relation avec les lignes de grain. *Hydrogéologie*, n° 3, p. 215-218.
- JOSEPH A. FRANGI J.P. et ARANYOSSY J.F. (soumis) - Caractéristiques isotopiques des eaux météoriques et souterraines en Afrique sahélo-soudanaise
- JULIEN P. Y. (1991) - Spatially varied soil erosion under different climates. *Hydrol. Sc.*, 36, p. 6-12.
- 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. Th. Doc., ULP Strasbourg, 220 p.

- KINGA-MOUZEO (1986) - Transport particulaire actuel du fleuve Congo et de quelques affluents ; enregistrement quaternaire dans l'éventail détritique profond (sédimentologie, minéralogie et géochimie). Th. Doc. Uni. Perpignan, 262 p.
- KLING G. (1987) - Comparative limnology of lakes in Cameroon, West Africa. Ph. D. Thesis, Duke University USA, 482 p.
- KREMPP G. (1988) - Techniques de prélèvement des eaux naturelles et des gaz associés ; méthodes d'analyse des eaux et des roches. Note technique, Géologie, Uni. Strasbourg, 19, 79 p
- LACAUX J. P., LOEMBA-NDEMBI J., LEFEIVRE B., CROS B. and DELMAS R. (1992) - Biogenic emissions and biomass burning influences of the chemistry of fogwater and stratiforms precipitations in the African equatorial rain forest. *Atm. Env.*, 26 A (4), p. 541-551.
- LASSERRE M. et BESSOLES B. (1977) - Le complexe de base du Cameroun. *Bull. de la Soc. Géol. de France*, n° 5.
- LASSERRE M. et SOBA D. (1979) - Migmatization d'âge panafricain au sein des formations camerounaises appartenant à la zone mobile de l'Afrique Centrale. *Bull. de la Soc. Géol. de France*, 2, p. 64-68.
- LEFEIVRE B. (1993) - Etude expérimentale et par modélisation des caractéristiques physiques et chimiques des précipitations collectées en forêt équatoriale africaine. Th. Uni. P. SABATIER, Toulouse, 308 p.
- LEFEVRE P. (1965) - Etude hydrologique de la moyenne Sanaga : bassins représentatifs de l'Avéa. ORSTOM, Paris.
- LELONG F. et 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.
- LE MARECHAL A. (1976) - Géologie et Géochimie des sources thermominérales du Cameroun. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, v. VIII, n° 1, p. 107-108.
- LENOIR F. (1992) - Exportation chimique d'un bassin intertropical (le Bandama, Côte-d'Ivoire). Th. Uni. Nice, 402 p.
- LETOUZEY R. (1986) - Etude phytogéographique du Cameroun. Paris, 511 p.
- LOZET J. et MATHIEU C. (1990) : Dictionnaire de science de sol. 2è éd. Tech. et doc. Lavoisier. Paris, 384 p.
- MAHE G. (1992) - Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Th. Doc., Uni. Paris-Sud, 385 p.
- MALEY J. (1991) - The African rain forest vegetation and paleoenvironments during late quaternary. *Climate change*, t. 19, p. 79-98.
- MALEY J (1992) - Mise en évidence d'une préjoration climatique entre Ca. 2 500 et 2 000 ans BP en Afrique tropicale humide. *Bull. Soc. géol. France* t. 163, p. 363-365.
- MALEY J et SERVANT M. (1992) - L'histoire mouvementée des forêts tropicales. *Sc. et Avenir*, p. 56-59.

- MATHIEU P. (1972) - Apports chimiques par les précipitations atmosphériques en savane et sous forêt. Influence du milieu forestier intertropical sur la migration des ions et sur les transports solides (Bassin de l'Amittioro, Côte d'Ivoire). Th. Doc. Uni. de Nice, 441 p
- MATHIEU P. (1976) - Influence des apports atmosphériques et du pluvio-lessivage sur la qualité des eaux de deux bassins versants en Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, vol. VIII, n°1 p. 11-31
- MARTIN C. et CHEVALIER Y. (1991) - Premières conséquences d'un incendie de forêt sur le comportement hydrochimique du bassin du Rimbaud. massif de Maures, Var, France. *Hydrol. Cont.*, 6 (2), p. 145-154.
- MARTIN D. (1967) - Géomorphologie et sols ferrallitiques dans le Centre-Cameroun. *Cah. ORSTOM, sér. pedo.*, vol. V n°2, p. 189-217.
- MARTIN D. et VOLKOFF B. (1990) - Signification paléoclimatique des cuirasses et des nappes de nodules ferrugineux dans les sols de l'Afrique Centrale (rive droite du Zaïre). In *Paysages quater. de l'Af. Centr. Atl.*, p.129-135.
- MAUZORIOT P. et al. (1986) - Etude et prospection minière du Sud-ouest du Cameroun. Synthèse des travaux de 1978 à 1985. MINMEN - BRGM.
- McKENNA S. A., INGRAHAM N. L., JACOBSON R. L. and COCHRAN F. (1992) - A stable isotope study of bank storage mechanisms in the Truckee river basin. *Journ. of Hydrol.*, p. 203-219.
- MEYBECK M. (1982) - Carbon, Nitrogen and Phosphorus transport by world rivers. *Am. J. Sci.*, 282, p. 401-450.
- MEYBECK M. (1984) - Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. Th. Doc. Sc., Géologie, Uni. Paris VI, 558 p.
- MEYBECK M. (1986) - Composition chimique des ruisseaux non pollués en France. *Sc. Géol.*, t. 39, p. 3-78.
- MEYBECK M. (1991) - Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulphur in rivers : from sources to global inputs. Coupling of C, N, P, S in "geochemical cycles", Melrux ed. Nato adv. studies Symp.
- MICHELOT J. L. (1988) - Hydrologie isotopique des circulations lentes en milieu cristallin fracturé : essai méthodologique. Th. d'Etat, Uni. Paris-Sud, 164 P.
- MILLET B. (1986) - Hydrologie et hydrochimie d'un milieu lagunaire tropical : le lac Togo. *Etudes et thèses ORSTOM*, Paris, 228 p.
- MILLIMAN J. D. and MEADE R.H. (1983) - Word wide delivery of river sediment to the oceans. *J. of Geol.*, 91, p. 1-21.
- MOGUEDET G. (1988)- Les relations entre le fleuve Congo et la sédimentation récente sur la marge continentale entre l'embouchure et le sud du Gabon. Etude hydrologique, sédimentologique et géochimique. Th. Doc. ès. Sc., Uni. d'Angers, 187 p.
- MOLINIER (1976) - Qualité des eaux de surface en zone forestière équatoriale de Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIII, n° 1 p. 7-36.
- MOLINIER M. (1979) - Note sur les débits et la qualité des eaux du Congo à Brazzaville. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, XVI, 1, p. 55-66.

- MONTGAILLARD M. et LARAQUE (1990) - Construction du diagramme de PIPER
- MOUKOLO N., BRICQUET J.P., BIYIDI B. (1990) - Bilans et variation des exportations de matières sur le Congo à Brazzaville, de janvier 1987 à décembre 1988. *Hydrol. Cont.*, vol. 5, n° 1, p. 41-52.
- NEAL C., FORTI M. C., JENKINS A. (accepted) - Towards modelling the impact of the climate change and deforestation on stream water quality in Amazonia : a perspective based on the magic model. *Sc. of tech total environment*.
- NJITCHOUA R. (1991) - Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines de la nappe de grès de Garoua (Nord-Cameroun). Th. Doc. Sc., Uni. Paris-Sud; 148 p.
- NKOUNKOU R.R. (1989) - Hydrogéodynamique actuelle du Congo et de l'Amazone. Cycle Global de l'eau et bilan de l'érosion au cours des temps phanérozoïques (Derniers 600 millions d'années) Th. Doc., ULP Strasbourg, 192 p.
- NKOUNKOU R.R., PROBST J.L. (1987) - Hydrologie and geochemistry of the Congo river system. Mitt. Geol. paläont. inst. Hambourg, SCOPE/UNEP, 64, p. 483-508.
- NOUVELOT J.F. (1969) - Mesures et étude des transports solides en suspension au Cameroun. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.* Vol. VI, n° 4, p.43-85
- NOUVELOT J.F. (1972a) - Méthodologie pour la mesure en réseau des transports solides en suspension dans les cours d'eau intertropicaux peu chargés. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.* Vol. IX, n° 1, p.3-42.
- NOUVELOT J.F. (1972b) - Le régime des transports solides en suspension dans divers cours d'eau du Cameroun de 1969 à 1971. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.* Vol. IX, n° 1, p.47-74.
- OLIVRY J. C. (1976) - Transports solides en suspension au Cameroun, ORSTOM, Yaoundé, 19 p.
- OLIVRY J. C. (1978) - Transports solides au Cameroun. Cah. de l'ONAREST, vol. n° 1.
- OLIVRY J. C. (1979) - Monographie du Nyong et des fleuves côtiers : facteurs conditionnels des régimes hydrologiques ; Hydrologie du Nyong et des fleuves côtiers. ONAREST Yaoundé, 3 vol. 523 p.
- OLIVRY J.C. (1986) - Fleuves et Rivières du Cameroun. Coll. "Mono. Hydro.", 9, Ed. MESRES-ORSTOM, Paris, 733 p.
- OLIVRY J.C. (1992) - Les fleuves malades d'Afrique. in Coll. ICID, Fortaleza.
- OLIVRY J.C. (1977) - Transports solides en suspension au Cameroun. Actes du Colloque de Paris sur l'érosion et les transports solides dans les eaux continentales, *AIHS, publ.* n° 122, p. 134-141.
- OLIVRY J. C., BRICQUET J. P. et MAHE G. (1993) - Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ? AISH, Yokohama, Japon, p. 67-78
- OLIVRY J.C., BRICQUET J.P., THIEBAUX J.P., SIGHA-NKAMDJOU (1988) - Transport des matières sur les grands fleuves des régions intertropicales. Les premiers résultats des flux particuliers sur le bassin du fleuve Congo. In "Sédiments Budgets", Symp. de Porto Alegre, *IAHS, publ.* n° 174, p. 509-521.
- OLIVRY J. C. et NAAH E. (1978) - Qualité des eaux de quelques rivières du Cameroun Méridional. Rap. ONAREST, Yaoundé, 39 p.

- OLIVRY J. C. et NAAH E. (1988) - Qualité des eaux de quelques rivières du Cameroun Méridional. Journées hydro., ORSTOM Montp. p.
- ORANGE D. (1990) - Hydroclimatologie du Fouta Djallon et Dynamique d'un vieux paysage latéritique (Afrique de l'Ouest). Th. Doc., ULP Strasbourg, 220 p.
- PACES T. (1986) - Weathering and mass balance in small drainage basins : environmental applications in the Bohemian massif. *Sc. Geol., Bull.*, 39 p. 131-150.
- PEDRO G. (1968) - Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. *Rev. de géogr. et de géol.*, . X, p. 457-470.
- PROBST J. L. (1983) - Hydrologie du bassin de la Garonne, modèle de mélanges, bilans de l'érosion, exportation des phosphates et des nitrates. Th. 3^e cycle, Uni. P; SABATIER, Toulouse, 148 p.
- PROBST J. L. (1990) - Géochimie et Hydrologie de l'érosion continentale. Mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 millions d'années. Vol. I et II. Thèse d'Etat ULP Strasbourg, 578 p.
- PROBST J.L., NKOUNKOU R. R., KREMP G., BRICQUET J. P., THIEBAUX J. P., OLIVRY J. C. (1992) - Dissolved major element exported by the Congo and Ubangi rivers during period 1987-1989. *J. of Hydrol.*, 135, p. 237-257.
- PROBST J.L., SIGHA-NKAMDJOU (1989) - Estimation de l'écoulement superficiel et de sa charge en suspension sur quelques grands bassins fluviaux du monde. CRAS Paris, t. 309, sér. II, p. 357-363.
- RAMESH R. and SARIN MM (1992) - Stable isotope study of the Ganga (Ganges) river system. *Journ. of Hydrol.*, p. 49-62.
- ROCHE M. F. (1963) - Hydrologie de surface. Gauthier-Villars Paris, 430 p.
- ROCHE M. F. (1986) - Dictionnaire d'hydrologie de surface. *Masson*, Paris, 288 p.
- ROCHE M. A. (1973) - Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad. Th. Doc. ès. Sc., Uni. Paris VI, 398 p.
- ROCHE M.A. (1982) - Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème forestier amazonien à Ecérex, en Guyane. *Cah. ORSTOM, sér. Hydro*, vol. XIX n°2, p. 81-114.
- ROCHE M.A., FERNENDEZ C., APOTEKER A., ABASTO N., CALLE H., TOLEDE M., CORDIER J. P. et POINTILLART C. (1987) - Reconnaissance hydrochimique et première évaluation des exportations hydriques et salines des fleuves de l'amazone Bolivienne. Rap. ORSTOM, 257 p.
- ROUX M. (1991) - L'évaluation de la qualité écologique d'un cours d'eau. *La Houille blanche* n° 7/8.
- SCHOELLER H. (1962) - Les eaux souterraines. Ed. Masson, Paris.
- SCHWARTZ D. (1990) - Relations sols-reliefs. Variations paléoclimatiques en Afrique Centrale. In *Paysages quater. de l'Af. Centr. Atl.* p. 186-189.
- SEAGALEN P. (1957) - Les sols du Cameroun. In *Atlas du Cameroun*.
- OSEGALEN P. (1967) - Les sols et la géomorphologie du Cameroun. *Cah. ORSTOM, sér Pédol.* vol. V, n° 2, p. 146-179.

- SEGALEN P., LETOUZEY R. (1959) - Les sols plantés en cacaoyer de la région centrale du Cameroun. ORSTOM Paris, p. 45-66.
- SEYLER P., OLIVRY J.C. et SIGHA-NKAMDJOU (1993) - Hydrochemistry of the Ngoko river, Cameroon : chemical balances in a rain-forest equatorial basin. *AISH* Yokohama, Japan, p. 87-105
- SIEFFERT et TRUONG HUA XUONG P. (1992) - Mode de production et stratégies paysannes des communautés rurales de la zone forestière dans l'Est-Cameroun. Mém. d'Ing., ENGREF Montp. 165 p.
- SIGHA-NKAMDJOU (1986) - Contribution au calcul de bilans d'érosion sur petits bassins représentatifs. Les bassins du Pic Saint-Loup. Mém. DEA, USTL Montpellier, 148 p.
- SIGHA-NKAMDJOU (1987) - Notes sur quelques programmes de recherche en hydrologie au Centre ORSTOM de Brazzaville. Mém. d'élève ORSTOM, Brazzaville, 128 p.
- SIGHA-NKAMDJOU (1988) - Estimation de de l'écoulement superficiel et de sa charge en suspension sur quelques grands bassins fluviaux du monde. Rap., CSGS-CNRS, Strasbourg, 32 p.
- SIGHA-NKAMDJOU (1991) - Caractérisation et fonctionnement hydrochimique d'un bassin forestier tropical humide : le bassin de la Ngoko à Moloundou (Cameroun). Premiers résultats 1989-1990. IRGM-ORSTOM, Yaoundé, 22 p.
- SIGHA-NKAMDJOU (1993) : Le bassin fluvial de la Ngoko : Hydrochimie d'un écosystème forestier équatorial humide. Com. PIREN Lyon, 14 p.
- SIGHA-NKAMDJOU, BRICQUET J.P. (1987) - Un exemple méthodologique de la mesure de flux particulaires et dissous des fleuves d'Afrique Centrale : transports de matières sur le Congo à Brazzaville. Premiers résultats 1986-1987 ORSTOM-INSU, Montpellier, 25 p.
- SIGHOMNOU D., SIGHA-NKAMDJOU, NTONGA J.C., NAAH E. (1990) - Influence de la densité du réseau sur l'estimation de la pluie moyenne journalière. Un exemple au Cameroun. *Hydrol. Cont.*, vol. 5, n° 1, p. 53-60.
- SOLTNER D. (1992) - Les bases de la production végétale : Le climat. météorologie-pédologie-bioclimatologie. t. II 6è éd. 320 p.
- STALLARD R. F. and EDMOND J. M. (1981) - Geochemistry of the Amazon. 1. Precipitation chemistry and the marine contribution to the dissolved load at time of peak discharge. *J. of Geoph. Res.*, 86, n° C10, p. 9844-9858.
- STALLARD R. F. and EDMOND J. M. (1983) - Geochemistry of the Amazon. 2. Influence of geology and weathering environment on dissolved load. *J. of Geoph. Res.*, 88, n° C14, p. 9671-9688.
- STEIN N. (1981) - Is the large scale destruction of tropical rainforest necessarily crucial for the global carbon cycle ? Beyond the energy crisis, opportunity and challenge, vol. IV, Pergamon press.
- SUCHEL J.B. (1987) - Les climats du Cameroun. Th. d'Etat, Uni. Bordeaux III, 4 volumes.
- SUGIMURA Y. and SUZUKI Y (1990) - A high temperature catalytic oxidation method for determination of non-volatile dissolved organic carbon seawater by direct injection of liquid sample. *Marine chemistry*, 24, p. 105-131.

- TARDY Y. (1969) - Géochimie des altérations: étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mém. du Sce de la carte géol. d'Alsace et Lorraine*, n° 31, 199 p.
- TARDY Y. (1986) - Le cycle de l'eau : climats, paléoclimats et géochimie globale. *Masson*, Paris, 388 p.
- TCHANGWE N. D., ROUPSARD M. L., ANGO M. S. (1987) - Le Cameroun méridional forestier. ENS Yaoundé, 95 p.
- TSALEFAC M. (1991) - Convection et formations végétales au Cameroun. *Veille climatique* n° ISSN 1144-2026.
- VEN TE CHOW (1964) - Handbook of applied hydrologie. p. 19-1 à 19-37.
- YOBOUE V. (1991) - Caractéristiques physiques et chimiques des aérosols et des pluies collectées dans la savane humide de Côte d'Ivoire. Th. Doc., Uni. P. Sabatier, Toulouse, 145 p.

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1	18
Situation des bassins versants de la Ngoko, du Nyong et du Ntem	
Figure 1-2	20
Bassin versant de la Ngoko à Moloundou : Hydrographie	
Figure 1-3	21
Bassin versant du Nyong à Mbalmayo (d'après OLIVRY, 1979)	
Figure 1-4	21
Bassin du Ntem (d'après BOUM et al., 1983)	
Figure 1-5	27
Profil en long de la Ngoko à Moloundou et de ses principaux affluents	
Figure 1-6	28
Bassin versant de la Ngoko à Moloundou - Relief	
Figure 1-7	30
Répartition altimétrique et courbe hypsométrique du bassin versant de la Ngoko à Moloundou : a - Dja à Moloundou - Sotref ; b - Boumba à Moloundou - Bac ; c - Ngoko à Moloundou	
Figure 1-8	33
Profil en long du Nyong - Cours supérieur (d'après OLIVRY, 1979)	
Figure 1-9	34
Courbe hypsométrique et altimétrique : a - du Nyong à Akonolinga ; b - Du Nyong à Mbalmayo	
Figure 1-10	35
Profil du Ntem (d'après OLIVRY, 1979)	
Figure 1-11	39
Esquisse géologique du bassin de la Ngoko (selon la minute du PNUD, 1987)	
Figure 1-12	40
Géologie des bassins du Nyong et du Ntem (d'après LASSERE et al., 1977)	
Figure 1-13	42
Répartition des roches par bassin versant	
Figure 1-14	47
Les sols du plateau du centre-sud camerounais (selon l'encyclopédie du Cameroun, 1981)	
Figure 1-15	52
Forêt sud-camerounaise (selon l'atlas du Cameroun, 1959)	
Figure 1-16	60
Schéma des principaux flux de masses d'air en Afrique de l'ouest et centrale durant les deux situations extrêmes de l'année : janvier-février et juillet-août. Les grandes zonations végétales sont repérées par des numéros : 1 : déserts ; 1' : steppes et brousses à épineux ; 2, 4 et 5 : savanes herbacées à arborées ; 3 : forêt dense (d'après MAHE, 1992).	

Figure 1-17.....	60
Coupe schématique nord-sud en août de la troposphère au-dessus de l'Afrique vers le méridien origine. 1. Front Intertropical (FIT). 2. Limite inférieure de l'air équatorial d'altitude. 3. Limite supérieure de la mousson. J.E.a., Jet d'Est africain (AEJ). J.E.t., Jet d'Est tropical (TEJ). Les principales zones de temps : A, zone sans pluie. B, zones avec des orages isolés. C1, zone où dominent les lignes de grains. C2, zone où dominent les "pluies de mousson". D, zones avec des pluies réduites. Les flèches schématisent les flux et en particulier les mouvement de convection ou de subsidences de masses d'air (d'après Detwiller, 1965 ; Flohn, 1965 ; Leroux, 1970 ; Burpee, 1972 et Dhonneur, 1974 ; cités par Maley, 1981, et Olivry, 1986).	
Figure 1-18.....	60
Les vents en surface sur l'Afrique et l'Atlantique intertropical en janvier et juillet. Le trait tireté marque la trace au sol de l'équateur météorologique (EM), les pointillés celle de la confluence inter-océanique (CIO).	
Figure 1-19.....	62
Variations saisonnières des températures minimales et maximales : a - Zonalité latitudinale des températures dans les parties occidentale et centrale de la zone d'étude ; b - Zonalité méridienne des températures dans la partie centrale de la zone d'étude ; Yaoundé ; Sangmélina ; Abong-Mbang ; Ebolowa ; Yokadouma	
Figure 1-20.....	65
Variations saisonnières moyennes de l'humidité : a - Zonalité latitudinale de l'humidité relative ; YDE : Yaoundé ; AKGA : Akonolinga ; SGMA : Sangmélina ; b - Zonalité méridienne de l'humidité relative : EBWA : Ebolowa ; ABMB : Abong-Mbang	
Figure 1-21.....	65
Distribution de la tension de la vapeur d'eau : YDE, AKGA, EBWA, SGMA et ABMB (cf. fig. 1-20)	
Figure 1-22.....	67
Variations saisonnières des évaporations : a - Zonalité latitudinale de l'évaporation ; YDE, AKGA et EBWA (cf. fig. 1-20) ; b - Zonalité méridienne de l'évaporation : YDMA : Yokadouma ; Ep, EBWA, SGMA, ABMB (cf. fig. 1-20)	
Figure 1-23.....	67
Distribution de l'Evapotranspiration potentielle (ETP)	
Figure 2-1.....	77
Histogrammes et isohyètes des pluies interannuelles du plateau du centre-sud du Cameroun (de l'origine des observations à 1991)	
Figure 2-2.....	83-84
a) Zonalité latitudinale et fluctuations annuelles des précipitations ; b) Zonalité latitudinale et évolution des écarts à la moyenne interannuelle des précipitations	
Figure 2-3.....	85-86
Zonalité méridienne et fluctuations annuelles des précipitations ; b) Zonalité méridienne et évolution des écarts à la moyenne des précipitations interannuelles	
Figure 2-4.....	87
Pluviométrie interannuelle en fonction de l'altitude	
Figure 2-5.....	88
Pluviométrie interannuelle en fonction de la distance à l'atlantique	
Figure 2-6.....	90
Variation saisonnière spatiale des précipitations mensuelles : a) Transect Nord-Sud ; b) Transect Est-Ouest	
Figure 2-7.....	93-94

Figure 2-8	96
Double cumul des précipitations annuelles : OUES : Ouesso ; YDMA : Yokadouma ; SKE : Souanké	
Figure 3-1	104
Variations des débits extrêmes et des débits caractéristiques. Légende (cf. tableau 3-2)	
Figure 3-2	107
Variations saisonnières des débits mensuels. Légende (cf. tableau 3-2)	
Figure 3-3	139
Variations saisonnières des débits mensuels des années sèche moyenne et humide. Légende (cf. tab. 3-5)	
Figure 3-4	112
Variations saisonnières des débits mensuels des cycles étudiés	
Figure 3-5	114
Distribution statistique des modules. Valeurs observées	
Figure 3-6	115
Fluctuations annuelles des modules	
Figure 3-7	116
Evolution des écarts à la moyenne interannuelle des modules	
Figure 3-8	118
Variations des débits caractéristiques et extrêmes.	
Figure 3-9	119
Variations saisonnières des débits mensuels. Légende (cf. tableau 3-2)	
Figure 3-10	121
Variations saisonnières des années sèche, moyenne et humide. Légende (cf. tableau 3-5)	
Figure 3-11	122
Variations saisonnières des débits mensuels des cycles étudiés	
Figure 3-12	122
Distribution statistique des modules. Valeurs observées	
Figure 3-13	123
Fluctuations annuelles des modules. Légende (cf. figure 3-6)	
Figure 3-14	123
Evolution des écarts à la moyenne interannuelle des modules	
Figure 3-15	126
Variations saisonnières des débits mensuels . Légende (cf. tableau 3-2)	
Figure 3-16	129
Variations saisonnières des débits mensuels des années sèche, moyenne et humide	
Figure 3-17	130
Variations saisonnières des débits mensuels des cycles étudiés	
Figure 3-18	131
Fluctuations annuelles des modules . Légende (cf. figure 3-6)	

Figure 3-19.....	132
Evolution des écarts à la moyenne interannuelle	
Figure 3-20.....	135
Variations saisonnières des débits mensuels . Légende (cf. tableau 3-2)	
Figure 3-21.....	138
Variations saisonnières des débits mensuels des années sèche, moyenne et humide	
Figure 3-22.....	139
Variations saisonnières des débits mensuels des cycles hydrologiques étudiés	
Figure 3-23.....	140
Fluctuations mensuelles des modules	
Figure 3-24.....	141
Evolution des écarts à la moyenne interannuelle	
Figure 3-25.....	146
Variations saisonnières des débits mensuels des cycles étudiés	
Figure 3-26.....	148
Variations saisonnières des débits mensuels et annuels	
Figure 4-1.....	158
Variations saisonnières des concentrations de matières en suspension sur le Mbam et la Sanaga d'après NOUVELOT (1972), modifié.	
Figure 4-2.....	160
Evolution de la charge solide en fonction du débit sur le Mbam et la Sanaga d'après OLIVRY (1977), modifié.	
Figure 4-3.....	163
Evolution de la charge solide mensuelle en fonction de débit sur le Ntem en 1981/82.	
Figure 4-4.....	164
Evolution de la charge solide mensuelle en fonction de débit sur le Ntem en 1982/83.	
Figure 5-1.....	172
Localisation des sites de prélèvements des eaux pluviales et fluviales	
Figure 6-1.....	192
Dja à Somalomo (1990/91) : Evolution de la charge solide mensuelle en fonction de débit	
Figure 6-2.....	195
Dja à Somalomo (1990/91) : Contributions mensuelles en pourcentage aux flux annuels particulaire et hydrique	
Figure 6-3.....	199
Dja à Moloundou-SOTREF (1990/91) : Evolution de la charge solide mensuelle en fonction de débit	
Figure 6-4.....	202
Dja à Moloundou-SOTREF (1990/91) : Contributions mensuelles en pourcentage aux flux annuels particulaire et hydrique	
Figure 6-5.....	206
Boumba à Biwala (1990/91) : Evolution de la charge solide mensuelle en fonction du débit	

Figure 6-6.....	208
Boumba à Biwala (1990/91) : Contributions mensuelles en pourcentage aux flux annuels particulaire et hydrique	
Figure 6-7.....	212
Boumba à Moloundou-Bac (1990/91) : Evolution de la charge solide mensuelle en fonction du débit	
Figure 6-8.....	214
Boumba à Moloundou-Bac (1990/91) : Contributions mensuelles en pourcentage aux flux annuels particulaire et hydrique	
Figure 6-9.....	217
Relation entre les teneurs moyennes de matières particulaires des jaugeages solides et celles des échantillons témoins	
Figure 6-10.....	221
Ngoko à Moloundou (1989/92) : Evolution de la charge solide moyenne mensuelle en fonction de débit	
Figure 6-11.....	223
Ngoko à Moloundou (1989/92) : Contributions mensuelles en pourcentage aux flux annuels particulaire et hydrique	
Figure 6-12.....	240
Evolution des teneurs en éléments des précipitations ($\mu\text{eq.l}^{-1}$) en fonction de la distance à l'océan Atlantique	
Figure 6-13.....	245
Relation entre les rapports éléments/chlore (%) et les teneurs en Cl^- ($\mu\text{eq.l}^{-1}$)	
Figure 6-14.....	248
Apports atmosphériques spécifiques par poste pluviométrique en $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$	
Figure 6-15.....	255-257
Faciès géochimique des eaux : a) Le bassin du Dja ; b) Les bassins de la Boumba et de la Ngoko ; c) Les affluents de la Boumba en aval de Biwala	
Figure 6-16.....	259-264
Diagrammes d'équilibre : a) Bassins amont du Dja ; b) Dja à Moloundou-SOTREF ; c) Boumba à Biwala ; d) Affluents de la Boumba en aval de Biwala ; e) Boumba à Moloundou-Bac ; f) Ngoko à Moloundou	
Figure 6-17.....	270
Relations entre la conductivité, la charge totale et les éléments dissous à l'échelle globale du bassin de la Ngoko	
Figure 6-18 a.....	272
Ngoko à Moloundou : Evolution des teneurs en éléments dissous en fonction du débit	
Figure 6-18 b.....	273
Ngoko à Moloundou : Relations entre la conductivité et les éléments dissous	
Figure 6-19.....	275
Analyses factorielles en composantes principales à l'échelle globale de la Ngoko	
Figure 6-20.....	278
Ngoko à Moloundou : Analyses factorielles en composantes principales	
Figure 6-21.....	281
Transport dissous spécifique des bassins de la Ngoko en amont de Moloundou en $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$	
Figure 6-22.....	284

Apports atmosphériques et transports dissous spécifiques des bassins du Dja à Moloundou-SOTREF, de la Boumba à Moloundou-Bac et de la Ngoko à Moloundou en $t.km^{-2}.an^{-1}$

Figure 6-23	285
Diagrammes sectoriels des apports atmosphériques et transports dissous spécifiques des bassins du Dja à Moloundou-SOTREF, de la Boumba à Moloundou-Bac et de la Ngoko à Moloundou en pourcentage	
Figure 6-24	293
Variation du carbone organique en pourcentage en fonction des teneurs de matières en suspension	
Figure 6-25	293
Relation entre le carbone organique en $mg.l^{-1}$ les concentrations de matières en suspension	
Figure 6-26	297
Relation entre le rapport COD/COT en pourcentage et les concentrations de matières en suspension	
Figure 6-27	302
Ngoko à Moloundou : Apports atmosphériques, transport particulaire et dissous et transport de matières totales en $t.km^{-2}.an^{-1}$	
Figure 7-1	308
Apports atmosphériques spécifiques par poste pluviométriques en $t.km^{-2}.an^{-1}$	
Figure 7-2	312
Faciès géochimique : a) Nyong à Akonolinga ; b) Nyong à Mbalmayo	
Figure 7-3	313
Faciès géochimique : a) Ntem à Ngoazik et à Nyabessan ; b) Kadey à Batouri et à Pana	
Figure 7-4	315
Apports atmosphériques et transports dissous spécifiques des bassins du Nyong, du Ntem et de la Kadey $t.km^{-2}.an^{-1}$	
Figure 8-1	320
Distribution des teneurs en oxygène-18	
Figure 8-2	322
Relation entre 2H et ^{18}O des eaux pluviales et fluviales	
Figure 8-3	323
Variation spatiale des teneurs en ^{18}O	
Figure 8-4	324
Représentation des teneurs en ^{18}O de cette étude par rapport à l'abondance ^{18}O des eaux de précipitation et souterraines en fonction de la longitude le long de la bande sahélo-soudanienne d'après JOSEPH et al, à paraître.	
Figure 9-1	328
Spatialisation de la charge solide en fonction de débit à l'échelle locale	
Figure 9-2	330
Spatialisation de la charge solide en fonction de débit à l'échelle régionale de GBF de PEGI	
Figure 9-3	332
Distribution latitudinale des transports spécifiques particulaire et dissous en Afrique Centrale	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1	17
Coordonnées géographiques des bassins versants et centres administratifs	
Tableau 1-2	25
Caractéristiques morphométriques des bassins versants	
Tableau 1-3	26
Caractéristiques principales du réseau hydrographique	
Tableau 1-4	26
Répartition hypsométrique des bassins versants de la Ngoko, du Dja et de la Boumba à Moloundou	
Tableau 1-5	34
Hypsométrie des bassins versants du Nyong supérieur	
Tableau 1-6	38
Principales unités lithologiques d'après le PNUD, 1987	
Tableau 1-7	41
Géologie du bassin versant de la Ngoko. Répartition des unités lithologiques par sous-bassin	
Tableau 1-8	48
Types et caractéristiques des sols des bassins versants	
Tableau 2-1	76
Précipitations moyennes mensuelles et interannuelles (mm) de l'origine des stations à 1991	
Tableau 2-2	79
Précipitations interannuelles comparées de quelques stations	
Tableau 2-3	80
Précipitations moyennes mobiles sur 5 ans et écarts à la moyenne (1951-1991)	
Tableau 2-4	92
Pluviométrie moyenne par bassin versant	
Tableau 3-1	101
Corrélations entre les modules des stations de longue durée	
Tableau 3-2	103
Répartition statistique des débits extrêmes et des débits caractéristiques	
Tableau 3-3	106
Répartition statistique des débits moyens mensuels et annuels. Légende (cf. tableau 3-2)	
Tableau 3-4	108
Débits annuels et écarts à la moyenne interannuelle	
Tableau 3-5	109
Débits mensuels et annuels des années sèche , moyenne et humide	
Tableau 3-6	110
Débits mensuels et annuels du Dja en amont de Moloundou de 1990 à 1992 (au regard des moyennes interannuelles de l'origine des stations à 1992)	
Tableau 3-7	118
Boumba à Biwala : débits moyens caractéristiques et extrêmes (1965-1992)	

Tableau 3-8	119
Boumba à Biwala : débits moyens mensuels et annuels (1965-1992)	
Tableau 3-9	121
Boumba à Biwala : débits annuels et écarts à la moyenne (1965-1992)	
Tableau 3-10	121
Boumba à Biwala : débits mensuels des années sèche, moyenne et humide	
Tableau 3-11	122
Boumba à Biwala : débits mensuels et annuels 1989-1992 (au regard des moyennes de 1965 à 1992)	
Tableau 3-12	125
Répartition statistique des débits moyens mensuels et annuels. Légende (cf. tableau 3-2)	
Tableau 3-13	127
Modules et écarts à la moyenne interannuelle	
Tableau 3-14	129
Débits mensuels et annuels des années sèche , moyenne et humide	
Tableau 3-15	130
Débits mensuels des cycles étudiés en m ³ /s	
Tableau 3-16	134
Répartition statistique des débits moyens mensuels et annuels . Légende (cf. tableau 3-2)	
Tableau 3-17	137
Modules et écarts à la moyenne interannuelle	
Tableau 3-18	138
Débits mensuels et annuels des années sèche, moyenne et humide. Légende (cf. tableau 3-5)	
Tableau 3-19	139
Débits mensuels des cycles étudiés en m ³ s-1	
Tableau 3-20	143
Modules et irrégularités interannuelles des régimes	
Tableau 3-21	146
Débits mensuels et annuels des cycles hydrologiques (1989-90) (1990-91) (1991-92)	
Tableau 3-22	148
Débits mensuels et annuels des trois cycles hydrologiques à Moloundou sur la Ngoko	
Tableau 4-1	161
Concentrations des matières en suspension et débits solides mensuels du Ntem	
Tableau 4-2	168
Flux particuliers du Ntem calculés selon trois méthodes	
Tableau 5-1	174-175
Caractéristiques des postes d'échantillonnage des eaux pluviales et types de prélèvement	
Tableau 5-2	178
Inventaire des échantillons des eaux fluviales prelevés et analysés	

Tableau 5-3	185
Nombre d'analyses par tranche d'erreur en pourcentage des eaux fluviales	
Tableau 5-4	187
Nombre d'analyses par tranche d'erreur en pourcentage et d'échantillons acidifiés des eaux pluviales	
Tableau 6-1	190
Dja à Somalomo (1989-1992) : Concentrations moyennes et extrêmes des matières en suspension en mg.l ⁻¹	
Tableau 6-2	191
Concentrations moyennes et flux mensuels du Dja à Somalomo et à Bi : a) Dja à Somalomo ; b) Dja à Bi	
Tableau 6-3	197
Dja à Moloundou-SOTREF (1989-1992) : Concentrations moyennes et extrêmes des matières en suspension en mg.l ⁻¹	
Tableau 6-4	198
Concentrations moyennes et flux mensuels du Dja à Moloundou-SOTREF	
Tableau 6-5	204
Boumba à Biwala (1990-1992) : Concentrations moyennes et extrêmes des matières en suspension en mg.l ⁻¹	
Tableau 6-6	205
Concentrations moyennes et flux mensuels de la Boumba à Biwala	
Tableau 6-7	209
Concentrations moyennes et extrêmes des affluents de la Boumba en aval de Biwala en mg.l ⁻¹	
Tableau 6-8	210
Boumba à Moloundou-Bac (1989-1992) : Concentrations moyennes et extrêmes des matières en suspension en mg.l ⁻¹	
Tableau 6-9	211
Concentrations moyennes et flux mensuels de la Boumba à Moloundou-Bac	
Tableau 6-10	217
Ngoko à Moloundou (1989-1992) : Jaugeages liquide et solide	
Tableau 6-11	218
Ngoko à Moloundou (1989-1992) : Concentrations moyennes et extrêmes des matières en suspension en mg.l ⁻¹	
Tableau 6-12	220
Concentrations moyennes et flux mensuels de la de la Ngoko à Moloundou	
Tableau 6-13	224
Transports spécifiques du Dja Moloundou-SOTREF, de la Boumba à Moloundou-Bac et de la Ngoko à Moloundou en t.km ⁻² .an ⁻¹	
Tableau 6-14	227
Poids de la fraction minérale ou supérieure sur les bassins amont et sur les bassins voisins de la Ngoko à Moloundou	
Tableau 6-15	229
Ngoko à Moloundou : Caractéristiques granulométriques en pourcentage	

Tableau 6-16	234
Teneurs moyennes et extrêmes en éléments dissous des précipitations en mg.l^{-1}	
Tableau 6-17	238
Composition chimique moyenne des précipitations en $\mu\text{eq.l}^{-1}$ et distance des postes de prélèvement à l'océan Atlantique en km	
Tableau 6-18	242
Relations entre les différents éléments des précipitations : matrice de corrélations totales	
Tableau 6-19	244
Rapport en pourcentage entre les chlorures et les autres éléments des précipitations	
Tableau 6-20	245
Apports atmosphériques spécifiques par poste pluviométrique en $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$	
Tableau 6-21	251
Concentrations moyennes des éléments en solution des bassins amont et de la Ngoko à Moloundou	
Tableau 6-22	267-269
Matrices de corrélations totales :a) Le bassin du Dja ; b) Le bassin de la Boumba ; c) A l'échelle de globale du bassin de la Ngoko	
Tableau 6-23	271
Le bassin de la Ngoko à Moloundou : Matrice de corrélations totales	
Tableau 6-24	280
Transport dissous spécifique des bassins de la Ngoko en amont de Moloundou en $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$	
Tableau 6-25	283
Apports atmosphériques et transports dissous spécifiques des bassins du Dja à Moloundou-SOTREF, de la Boumba à Moloundou-Bac et de la Ngoko à Moloundou en $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$	
Tableau 6-26	286
Transports spécifiques de la charge totale dissoute du Dja à Moloundou-SOTREF, de la Boumba à Moloundou-Bac et de la Ngoko à Moloundou en $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$	
Tableau 6-27	289-290
Teneurs moyennes et extrêmes de carbone organique particulaire, dissous et total	
Tableau 6-28	298
Exportations de carbone organique particulaire, dissous et total en $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$	
Tableau 6-29	300
Ngoko à Moloundou : Rapports entre les apports atmosphériques,le transport particulaire et le transport dissous en pourcentage	
Tableau 7-1	306
Teneurs moyennes et extrêmes en éléments dissous des précipitations sur les bassins du Nyong, du Ntem et de la Kadey en mg.l^{-1}	
Tableau 7-2	307
Apports atmosphériques spécifiques par poste pluviométriques en $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$	
Tableau 7-3	310
Teneurs moyennes et extrêmes en éléments dissous des du Nyong, du Ntem et de la Kadey en mg.l^{-1}	

Tableau 7-4314
Apports atmosphériques et transports dissous spécifiques des bassins du Nyong, du Ntem et de la Kadey
en $t.km^{-2}.an^{-1}$

Tableau 8-1318
Teneurs en isotopes stables des précipitations en ‰

Tableau 8-2319
Teneurs en isotopes stables des eaux fluviales en ‰

TABLE DES MATIERES



TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS	3
RESUME	7
ABSTRACT.....	8
SOMMAIRE.....	I
INTRODUCTION GENERALE.....	9
PREMIERE PARTIE : CADRE NATUREL DE L'ETUDE : LA BANDE MERIDIONALE DU PLATEAU SUD-CAMEROUNAIS	15
INTRODUCTION	17
1.1. PRESENTATION ET CARACTERISATION DES BASSINS VERSANTS	17
1.1.1 PRESENTATION DES BASSINS.....	17
1.1.1.1 Situation géographique.....	17
1.1.1.2. La population, les centres urbains et l'économie	23
1.2. LA CARACTERISATION DU MILIEU NATUREL DE LA BANDE MERIDIONALE DU PLATEAU SUD-CAMEROUNAIS.....	24
1.2.1. LE RELIEF ET LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE	25
Le système Dja-Ngoko.....	25
Le Nyong supérieur	33
Le bassin du Ntem.....	33
1.2.2. LA GEOLOGIE	38
1.2.2.1. Les unités lithologiques de la zone étudiée.....	38
Le groupe du Ntem ou craton du Congo.....	39
La zone mobile ou chaîne panafricaine.....	44
1.2.2.2 Minéralogie, aperçu structural et géologie des formations géologiques du bassin de la Ngoko	46
1.2.3. LES SOLS.....	47
1.2.3.1. Les sols ferrallitiques typiques.....	50
1.2.3.2. Les sols hydromorphes.....	51
1.2.4. LA VEGETATION : UNE FORET DENSE HUMIDE OU FORET DENSE SEMPERVIRENTE.....	52
La forêt dense toujours verte du bassin du Dja	54
La forêt dense humide semi-caducifoliée de la Boumba	55
Les forêts denses humides toujours vertes et semi-caducifoliées du Nyong supérieur.....	56
La forêt atlantique du bassin du Ntem	56
1.3. UN CLIMAT EQUATORIAL A QUATRE SAISONS	58
1.3.1. LES MOUVEMENTS DES MASSES D'AIR EN MILIEU FORESTIER SUD-CAMEROUNAIS	59
1.3.2. LES ELEMENTS CLIMATIQUES DE LA BANDE MERIDIONALE DU PLATEAU SUD-CAMEROUNAIS	60
1.3.2.1 L'insolation.....	62
1.3.2.2. La température de l'air.....	62
1.3.2.3. Les vents	64
1.3.2.4. L'humidité de l'air et la tension de vapeur d'eau	64
1.3.2.5. L'évaporation et l'évapotranspiration potentielle	65
1.3.2.6. Les précipitations.....	67
Conclusion	69

DEUXIEME PARTIE : LES REGIMES HYDROPLUVIOMETRIQUES DES BASSINS-VERSANTS .71	
Introduction	73
CHAPITRE 2 : LES REGIMES PLUVIOMETRIQUES.....75	
2.1. LA BANDE MERIDIONALE DU PLATEAU SUD-CAMEROUNAIS.....75	
Les régimes saisonniers et les pluies moyennes annuelles	75
Les variations spatio-temporelles des précipitations	78
Les variations spatiales des précipitations	81
Les variations temporelles des précipitations	82
Variabilité saisonnière spatiale des précipitations au cours des cycles étudiés.....	89
2.2. LE BASSIN VERSANT DE LA NGOKO.....89	
CHAPITRE 3 : LES REGIMES HYDROLOGIQUES.....99	
3.1. LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES REGIMES HYDROLOGIQUES	
DU DJA ET DE LA BOUMBA..... 100	
3.1.1. LE BASSIN VERSANT DU DJA.....	102
3.1.2. LE BASSIN VERSANT DE LA BOUMBA	113
3.2. LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DU NYONG	
SUPERIEUR ET DU NTEM..... 124	
3.2.1. LE BASSIN DU NYONG SUPERIEUR.....	124
3.2.2. LE BASSIN VERSANT DU NTEM	133
3.3. LES CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DES CYCLES ETUDIES	
SUR LE BASSIN AVAL DE LA NGOKO	142
3.3.1. LA BOUMBA A MOLOUNDOU-BAC ET LE DJA A MOLOUNDOU-SOTREF.....	144
3.3.2. LE BASSIN VERSANT DE LA NGOKO A MOLOUNDOU.....	147
CONCLUSION	151
TROISIEME PARTIE : OBSERVATIONS ET FONCTIONNEMENT CHIMIQUES DES	
HYDROSYSTEMES	153
INTRODUCTION	155
CHAPITRE 4 : ENSEIGNEMENTS TIRES DES TRAVAUX ANTERIEURS	157
4.1 LES REGIMES DE TRANSPORTS SOLIDES SUR LE MBAM, LA SANAGA ET LE NTEM	147
4.1.1 RAPPELS DE QUELQUES RESULTATS SUR LE MBAM ET LA SANAGA	157
4.1.2 LE TRANSPORT SOLIDE SUR LE BASSIN DU NTEM.....	159
4.1.2.1 Les régimes saisonniers de la charge solide en suspension.....	159
4.1.2.2 Choix d'une méthode d'évaluation des flux de matières	166
4.2 LES TRANSPORTS DISSOUS SUR LES BASSINS DU NYONG, DU MBAM ET	
DE LA SANAGA.....	169
CHAPITRE 5 : LES METHODES D'ECHANTILLONNAGE ET LES TECHNIQUES D'ANALYSES DES	
EAUX.....	171
5.1. LE PROTOCOLE D'ECHANTILLONNAGE	171
5.1.1. LES MATIERES EN SUSPENSION.....	171
5.1.2. LES MATIERES DISSOUTES	173
5.1.2.1. Les eaux pluviales.....	173
5.1.2.2. Les eaux fluviales.....	176
5.1.3 LE CARBONE ORGANIQUE.....	179
5.1.4 LES ISOTOPES.....	179
5.2. LES TECHNIQUES D'ANALYSES.....	179
5.2.1. LES MATIERES EN SUSPENSION.....	179
5.2.2. LES MATIERES EN SOLUTION	181

5.2.3. LE CARBONE ORGANIQUE.....	181
* Le carbone organique particulaire	181
* Le carbone organique dissous	182
5.2.4. LES ISOTOPES STABLES DE L'EAU	182
* Oxygène-18.....	182
* Deutérium.....	183
5.3. PRESENTATION ET CRITIQUE DES RESULTATS D'ANALYSES CHIMIQUES	183
5.3.1. LES EAUX FLUVIALES	184
5.3.2. LES EAUX PLUVIALES	186
CHAPITRE 6 : OBSERVATIONS DES TRANSFERTS DE MATIERES ET FONCTIONNEMENT HYDROCHIMIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA NGOKO	189
6.1. OBSERVATIONS ET TRANSFERTS DE MATIERES EN SUSPENSION	190
6.1.1. LE BASSIN VERSANT DU DJA	190
Le Dja à Somalomo	190
Le Dja à Bi.....	196
Le Dja à Moloundou-SOTREF.....	197
6.1.2. LE BASSIN VERSANT DE LA BOUMBA	203
La Boumba à Bivala	203
La Bidjar à Bandekok, la Bangue à Bangue et la Lokomo à Lokomo	207
La Boumba à Moloundou-Bac.....	210
6.1.3. LE BASSIN VERSANT DE LA NGOKO A MOLOUNDOU.....	216
Les teneurs en matière particulaire des jaugeages complets	216
Les régimes de matières en suspension	218
6.1.4. GRANULOMETRIE ET MINERALOGIE DES MATIERES EN SUSPENSION.....	226
Les tributaires de la Ngoko.....	226
La Granulométrie.....	226
Les minéraux de la fraction sableuse	228
La minéralogie des argiles	228
Le bassin de la Ngoko	229
La granulométrie.....	229
Les minéraux de la fraction sableuse	230
La minéralogie des argiles	230
6.2. LES MATIERES EN SOLUTION	231
6.2.1. COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE PLUIE.....	232
6.2.1.1. Descriptif des résultats.....	232
* Le pH.....	233
* La conductivité.....	233
* Le calcium.....	233
* Le magnésium	235
* Le sodium	235
* Le potassium	235
* Les bicarbonates.....	235
* Le chlore	236
* Les sulfates	236
* Les nitrates.....	236
* La silice.....	236
6.2.2. Variabilité spatiale et relation inter-éléments	237
* La variabilité spatiale des éléments	239
* Les relations inter-éléments.....	241
6.2.2.3. Bilans des apports atmosphériques	246
6.2.2. COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX FLUVIALES	249
6.2.2.1. Analyse descriptive de la qualité des eaux.....	250
* Le pH.....	252
* La conductivité.....	252
* Le calcium.....	252
* Le magnésium	252

* Le sodium	252
* Le potassium	253
* Les bicarbonates.....	253
* Les chlorures.....	253
* Les sulfates.....	253
* Les nitrates.....	253
* La silice.....	254
6.2.2. Typologie des eaux.....	254
6.2.2.3. Les principaux types d'altération chimique du bassin.....	258
6.2.2.4. Relations inter-éléments et analyses factorielles en composantes principales.....	265
Les relations inter-éléments.....	265
A l'échelle globale du bassin de la Ngoko.....	265
A la sortie de Moloundou sur la Ngoko.....	266
Analyses factorielles en composantes principales.....	274
A l'échelle globale du bassin versant de la Ngoko.....	274
A la sortie de Moloundou sur la Ngoko.....	277
6.2.2.5. Bilans des transports en éléments dissous.....	279
Les bassins amont.....	279
Les bassins de l'aval.....	282
6.3. LE CARBONE ORGANIQUE.....	288
6.3.1. LE CARBONE ORGANIQUE PARTICULAIRE.....	288
Variations spatio-temporelles.....	291
6.3.2. Le carbone organique dissous.....	294
Variations spatio-temporelles.....	295
6.3.3. BILAN DU CARBONE ORGANIQUE.....	295
CHAPITRE 7 : OBSERVATIONS ET TRANSFERTS DE MATIERES SUR LES BASSINS VOISINS DE LA NGOKO.....	303
7.1. LES MATIERES EN SUSPENSION.....	303
7.1.1. ANALYSE DESCRIPTIVE DES RESULTATS	303
7.1.2. EXPORTATIONS DES MATIERES.....	304
7.2. LES MATIERES EN SOLUTION.....	305
7.2.1. LES APPORTS ATMOSPHERIQUES.....	305
7.2.2. LES ELEMENTS DISSOUS DES FLEUVES.....	309
7.2.2.1. Analyse descriptive.....	309
7.2.2.2. Typologie des eaux.....	311
7.2.2.3. Exportations des matières dissoutes.....	311
CHAPITRE 8 : OBSERVATIONS DES ISOTOPES STABLES DE L'EAU ET FONCTIONNEMENT HYDROCLIMATIQUE.....	317
8.1. LES RESULTATS	317
8.2. DISCUSSIONS	321
CHAPITRE 9 : PLACE DES RESULTATS HYDROCHIMIQUES DE LA NGOKO.....	327
9.1. DU POINT DE VUE DES TRANSPORTS PARTICULAIRES	327
9.2. DU POINT DE VUE DES TRANSPORTS DISSOUS	331
CONCLUSION	334
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	337
BIBLIOGRAPHIE.....	345
LISTE DES FIGURES.....	357
LISTE DES TABLEAUX.....	367
ANNEXE : PHOTOS : MILIEU NATUREL ET TRAVAUX DE TERRAIN	379

ISBN : 2-7099-1183-3
Éditions de l'ORSTOM
72, route d'Aulnay
93143 BONDY Cedex